

# Kontrola materijala i zavarenih spojeva metodom ispitivanja bez razaranja u proizvodnji transformatorskih kotlova

---

Strahija, Kristijan

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Polytechnic of Međimurje in Čakovec / Međimursko veleučilište u Čakovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:110:780769>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-19**



Repository / Repozitorij:

[Polytechnic of Međimurje in Čakovec Repository - Polytechnic of Međimurje Undergraduate and Graduate Theses Repository](#)





MEĐIMURSKO VELEUČILIŠTE U ČAKOVCU  
STRUČNI PRIJEDIPLMOSKI STUDIJ ODRŽIVI RAZVOJ

**KRISTIЈAN STRAHIЈA, JMBAG - 0313020982**

**KONTROLA MATERIJALA I ZAVARENIH SPOJEVA  
METODOM ISPITIVANJA BEZ RAZARANJA U  
PROIZVODNJI TRANSFORMATORSKIH KOTLOVA**

ZAVRŠNI RAD

Čakovec, lipanj 2024.



MEĐIMURSKO VELEUČILIŠTE U ČAKOVCU  
STRUČNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ ODRŽIVI RAZVOJ

**KRISTIЈAN STRAHIЈA, JMBAG - 0313020982**

**KONTROLA MATERIJALA I ZAVARENIH SPOJEVA  
METODOM ISPITIVANJA BEZ RAZARANJA U  
PROIZVODNJI TRANSFORMATORSKIH KOTLOVA**

**MATERIAL AND WELDED JOINTS INSPECTION  
CONTROL BY NON-DESTRUCTIVE TESTING  
METHOD IN THE PRODUCTION OF TRANSFORMER  
TANKS**

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

dr. sc. Mario Šercer, viši pred.

Čakovec, lipanj 2024.

## **PREDGOVOR**

Tema ovog završnog rada je ispitivanje zavara i materijala na kotlu u lokalnom poduzeću METAL DEKOR d.o.o., gdje sam zaposlen 4 godine, a od osobnog interesa mi je svako poboljšanje koje mogu doprinijeti poslovanju.

Zahvaljujem se mentoru, dr. sc. Mario Šercer, na pomoći tijekom izrade završnog rada i savjetima kojima je uvelike pomagao u pripremi završnog rada. Također, zahvaljujem se svim profesorima na prenesenom znanju.

Na kraju bih se zahvalio svojoj obitelji na podršci tijekom izrade završnog rada, kao i tijekom cijelog studija.



## MEĐIMURSKO VELEUČILIŠTE U ČAKOVCU

### PRIJAVA TEME I OBRANE ZAVRŠNOG/DIPLOMSKOG RADA

Stručni prijediplomski studij:

Računarstvo

Održivi razvoj

Menadžment turizma i sporta

Stručni diplomski studij Menadžment turizma i sporta:

Pristupnik: Kristijan Strahija, JMBAG: 0313020982  
(ime i prezime)

Kolegij: Tehnologija materijalnih resursa  
(na kojem se piše rad)

Mentor: dr. sc. Mario Šercer, n. v. pred.  
(ime i prezime, zvanje)

Naslov rada: Kontrola materijala i zavarenih spojeva metodom bez ispitivanja bez razaranja u proizvodnji transformatorskih kotlova

Naslov rada na engleskom jeziku: Material and welded joints inspection by non destructive testing method in the production of transformer tank

- Članovi povjerenstva: 1. dr. sc. Tomislav Hublin, v. pred., predsjednik  
(ime i prezime, zvanje)
2. dr. sc. Tibor Rodiger, v. pred., član  
(ime i prezime, zvanje)
3. dr. sc. Mario Šercer, n. v. pred., mentor  
(ime i prezime, zvanje)
4. mag. iur. Magdalena Zeko, v. pred., zamjenski član  
(ime i prezime, zvanje)

Broj zadatka: 2023-OR-20

Kratki opis zadatka: Na praktičnom primjeru opisati i pojasniti kontrolu materijala i zavarenih spojeva metodom bez razaranja

u proizvodnji transformatorskih kotlova. Dati teorijski pregled i pojasniti metode ispitivanja bez razaranja te pojasniti primjeru transformatorskih kotlova u praktičnoj primjeni.

Datum: 17.09.2024.

Potpis mentora: 

## SAŽETAK

Ispitivanja bez razaranja ključne su metode za kontrolu kvalitete materijala i zavarenih spojeva u proizvodnji transformatorskih kotlova. Cilj ovih metoda je otkrivanje grešaka i nesukladnosti u materijalima i zavarenim spojevima bez oštećenja ispitivanog objekta, čime se osigurava dugovječnost i pouzdanost transformatora.

U ovom radu bit će prikazani procesi ispitivanja bez razaranja na materijalima i zavarenim spojevima na primjeru poduzeća „METAL DEKOR d.o.o.“. Također će biti opisani svi postupci NDT (Non – Destructive Testing), pojašnjenje tehnike zavarivanja, te greške koje se javljaju tijekom zavarivanja. Na kraju rada bit će prikazano ispitivanje jednog transformatorskog kotla.

**Ključne riječi :** *Ispitivanje bez razaranja, kontrola materijala, kontrola zavarenih spojeva, greške zavarivanja, transformatorski kotao*

## **ABSTRACT**

Non – destructive testing methods are key for quality control of materials and welded joints in the production of transformer tanks. The goal of these methods is to detect errors and inconsistencies in materials and welded joints without damaging the object being tested, thus ensuring the longevity and reliability of the transformer.

In this paper, non–destructive testing processes for materials and welded joints will be presented using the example of the company „METAL DEKOR d.o.o“. Each NDT (Non - Destructive Testing) procedure will be described, along with an explanation of welding techniques and the errors that occur during welding. At the end of the paper, a test of one transformer tank will be demonstrated.

**Key words** : *Non – destructive tests, material control, welded joints control, errors in welding, transformer tank*

## **POPIS KRATICA**

**NDT** Non-Destructive Testing

**VT** Visual Testing

**UT** Ultrasonic Testing

**MT** Magnet Testing

**RT** Radiographic Testing

**PT** Penetrant Testing

**MIG** Metal Inert Gas

**MAG** Metal Active Gas

**TIG** Tungsten Inert Gas

**ISO** International Organization for Standard

**QMS** Quality Management System

**PDCA** Plan-Do-Check-Act

**EMS** Environmental Management System



## SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. OPIS TRANSFORMATORSKIH KOTLOVA I NJIHOVA ULOGA U ENERGETSKIM SUSTAVIMA</b> .....	2
<b>3. POVIJEST TRANSFORMATORSKIH KOTLOVA</b> .....	4
<b>4. PRINCIP RADA TRANSFORMATORSKIH KOTLOVA</b> .....	6
<b>5. METODE ISPITIVANJA BEZ RAZARNJA</b> .....	7
5.1. Vizualna kontrola .....	8
5.2. Ultrazvučno ispitivanje .....	10
5.3. Magnetsko ispitivanje .....	12
5.4. Radiografsko ispitivanje .....	13
5.5. Penetrantsko ispitivanje .....	15
<b>6. KONTROLA MATERIJALA U PROIZVODNJI TRANSFORMATORSKIH KOTLOVA</b> .....	18
6.1. Proces odabira materijala .....	19
6.2. Važnost kontrole kvalitete materijala prije i tijekom procesa proizvodnje .....	23
6.3. Primjena metode ispitivanja bez razaranja u kontroli materijala .....	25
<b>7. KONTROLA ZAVARENIH SPOJEVA U PROIZVODNJI TRANSFORMATORSKIH KOTLOVA</b> .....	26
7.1. Značaj zavarenih spojeva u procesu proizvodnje .....	26
7.2. Tehnike zavarivanja u proizvodnji .....	27
7.3. Metode ispitivanja bez razaranja primijenjene na zavarene spojeve .....	32
7.4. Identifikacija i rješavanje nedostataka u zavarenim spojevima .....	37
<b>8. ISO STANDARDI</b> .....	43
<b>9. PRIMJENA METODA ISPITIVANJA BEZ RAZARANJA U KONTROLI ZAVARENIH SPOJEVA KOD TRANSFORMATORSKIH KOTLOVA</b> .....	46
<b>10. ZAKLJUČAK</b> .....	59
<b>11. Izjava o autorstvu</b> .....	60
<b>12. Literatura</b> .....	61
<b>13. Popis ilustracija</b> .....	62
<b>14. Popis tablica</b> .....	64

## 1. UVOD

Transformatorski kotlovi su nezamjenjivi dijelovi elektroenergetskih sustava, odgovorni za transformaciju električne energije na različite naponske razine kako bi se osigurala stabilna i pouzdana opskrba električnom energijom širokog spektra potrošača. Transformatori podižu napon električne energije na visokoj razini prije prijenosa kroz prijenosne linije kako bi se smanjili gubici energije. Zatim se napon smanjuje na prikladnu razinu za distribuciju do krajnjih korisnika. Isto tako postoje različiti tipovi transformatora koji svaki od njih ima posebnu karakteristiku i primjenu u različitim industrijama. U svrhu osiguranja visoke kvalitete i pouzdanosti transformatorskih kotlova, ključno je pažljivo provesti kontrolu materijala i zavarenih spojeva tijekom procesa proizvodnje.

Pravilna selekcija materijala od iznimne je važnosti za osiguranje strukturalnog integriteta, termičke stabilnosti i otpornosti na koroziju transformatorskih kotlova. Metode ispitivanja bez razaranja, kao što su ultrazvučno ispitivanje, radiografsko ispitivanje, magnetska praćenja i penetrantska ispitivanja, omogućuju detaljnu analizu svojstava materijala bez oštećenja njihove strukture. Materijali moraju zadovoljavati stroge standarde kvalitete kako bi se osigurala njihova dugovječnost i pouzdanost u radu.

Zavareni spojevi su ključni elementi transformatorskih kotlova i podložni su raznim naporima tijekom rada. Kvalitetno izvedeni zavareni spojevi ključni su za osiguranje čvrstoće i pouzdanosti kotlova. Metode ispitivanja bez razaranja omogućuju detekciju površinskih i unutarnjih nepravilnosti u zavarenim spojevima te sprječavaju potencijalne kvarove i oštećenja. Pažljiv odabir metode ispitivanja može imati veliku ulogu te isto tako veliki utjecaj u svim fazama proizvodnje, od selekcije materijala do završne kontrole. Pravilna primjena ovih metoda osigurava veliku kvalitetu i pouzdanost transformatorskih kotlova, te smanjuje rizik od neplaniranih kvarova i prekida u elektroenergetskim sustavima.

## 2. OPIS TRANSFORMATORSKIH KOTLOVA I NJIHOVA ULOGA U ENERGETSKIM SUSTAVIMA

Transformatorski kotlovi imaju značajnu ulogu u energetske sustavima diljem svijeta koji omogućavaju prijenos i distribuciju električne energije u različitim naponskim razinama. Njihova uloga je od vitalnog značenja za stabilnost, pouzdanost i učinkovitost elektroenergetskih sustava. Kotao je osnovna strukturna komponenta transformatora, često izrađena od debelog željeznog lima, koji služi kao vanjsko kućište. U njemu se smještaju ključni dijelovi transformatora, kao što su namotaji i željezna jezgra, a sve se ispunjava transformatorskim uljem radi poboljšanja toplinske i električne izolacije te hlađenja.

Transformatorsko ulje osim što poboljšava toplinsku provodljivost, također služi kao izolator i hladilo za unutarnje dijelove transformatora. Kotao obično ima dodatne strukturne elemente na bočnim stranama poput rebra, cijevi ili radijatora, koji pomažu u brzem raspršivanju topline koju je ulje preuzelo od namotaja i jezgre. To osigurava da temperatura unutar transformatora ostane na prihvatljivoj razini. Važno je spriječiti prodor vlage u unutrašnjost transformatorskog ulja, stoga se posebna pažnja posvećuje očuvanju hermetičke zatvorenosti kotla. Na dnu kotla nalazi se ventil za ispuštanje ulja koji se koristi za održavanje samog transformatora.

Veći transformatorski kotlovi obično su opremljeni kotačima radi olakšanog transporta duž pruga ili drugih lokacija. Također, svaki kotao mora biti dobro uzemljen na mjestu postavljanja kako bi se osigurala sigurnost i zaštita od električnih udara.

**Slika 1.** Transformatorski kotao u pogonskoj jedinici



Izvor: [https://edutorij-admin-api.carnet.hr/storage/extracted/452e1469-e362-4711-abcb-6f535c3b5254/html/7590\\_Transformatori.html](https://edutorij-admin-api.carnet.hr/storage/extracted/452e1469-e362-4711-abcb-6f535c3b5254/html/7590_Transformatori.html)

(pristup 26.06.2024)

Poklopac kotla hermetički zatvara gornju stranu transformatora i opremljen je posebnom brtvom koja sprječava prodor vlage i drugih nečistoća. Poklopac se čvrsto steže većim brojem vijaka radi osiguranja potpune hermetičnosti. Ugrađeni dijelovi na poklopcu kotla uključuju provodne izolatore, konzervator, termometar i kuke za vađenje cijele jezgre s namotima u slučaju potrebe za servisiranjem ili popravkom transformatora. Provodni izolatori na poklopcu su izrađeni od porculana te imaju uloge spojiti namotaje unutar transformatora s vodičima izvan transformatora. Termometar na transformatorskom kotlu mjeri temperaturu ulja kako bi se spriječilo pregrijavanje. Skala na termometru omogućuje lako očitavanje temperature. Osim kao pokazni uređaj, termometri imaju i zaštitnu ulogu, jer imaju kontakte koji mogu alarmirati zvučnim ili svjetlosnim signalom u slučaju pregrijavanja ulja, što može dovesti do isključenja napajanja ako temperatura transformatora prijeđe kritičnu vrijednost.

Transformatorski kotli se klasificiraju prema broju namotaja i fazama električnog sustava za koji su namijenjeni. Prema broju namotaja, mogu biti dvo-namotajni, tro-namotajni ili višenamotajni. Ovisno o broju faza električnog sustava, mogu biti jednofazni, trofazni ili višefazni.

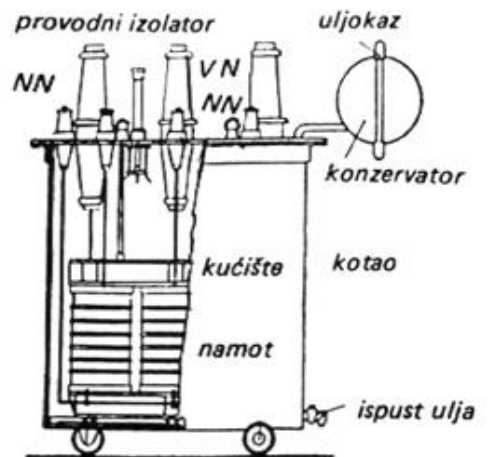
Namotaji transformatora sastoje se od svih međusobno povezanih faznih namotaja istoga napona. Namotaji priključen na mrežu višeg napona naziva se namotaj višeg napona (VN), dok se onaj priključen na mrežu nižeg napona naziva namotaj nižeg napona (NN). Transformatori se često stavljaju u kotao napunjen transformatorskim uljem radi poboljšanja izolacije i hlađenja. Takvi transformatori nazivaju se uljni transformatori. Nasuprot tome, transformatori koji ne koriste ulje nazivaju se suhi transformatori.

Prema području primjene, transformatori se mogu podijeliti u nekoliko grupa :

- energetske transformatori – koji se koriste za prijenos i distribuciju električne energije, te se cjelokupna snaga prenosi s primarne strane na sekundarnu induktivnim putem.
- energetske transformatori specijalne namjene – koji se koriste za posebne svrhe poput električnih peći ili ispravljačkih uređaja.
- autotransformatori – koji se koriste umjesto energetskih transformatora kada su razlike između primarnog i sekundarnog napona vrlo male, ili kao regulacijski transformatori. Jedan dio snage prenosi se s primarne u sekundarnu galvanskim putem, a drugi dio induktivnim.
- mjerni transformatori – koji se koriste u električnim mjerenjima.

Osim nabrojanih primjera, transformatori se koriste i u drugim područjima, posebno u tehničkim sustavima slabe struje. [1]

**Slika 2.** Dijelovi transformatorskog kotla



Izvor: [http://ss-ios-pu.skole.hr/upload/ss-ios-pu/images/static3/883/attachment/ES\\_2-\\_1-Jednofazni\\_transformator.pdf](http://ss-ios-pu.skole.hr/upload/ss-ios-pu/images/static3/883/attachment/ES_2-_1-Jednofazni_transformator.pdf) (pristup 26.06.2024.)

### 3. POVIJEST TRANSFORMATORSKIH KOTLOVA

Godine 1831. Michael Faraday otkrio je poznati zakon elektromagnetske indukcije, na temelju kojeg je kasnije izgrađena većina transformatora. Međutim, prvi praktično upotrebljivi transformator konstruiran je tek 54 godine kasnije. Tri mađarska inženjera, Blathy, Deri i Zipernowski, konstruirali su prvi transformator 1885. godine u tvornici tvrtke Ganz u Budimpešti. Ti transformatori bili su suhi jednofazni transformatori s jezgrom prstenasta oblika i kvadratnog presjeka. Njihove priključne stezaljke smještene su na jednoj od dviju drvenih ploča, između kojih je bila stegnuta jezgra s namotajem.

Jezgra transformatora izgrađena je od običnog crnog lima, a magnetske indukcije u jezgri dosezale su, u najboljem slučaju, 0.8 T. Prvi transformatori imali su specifične gubitke od oko 10 W/kg pri navedenoj indukciji i frekvenciji od 50 Hz.

Pojava transformatora značajno je utjecala na područje elektrotehnike, omogućavajući odvajanje prijenosa električne energije od mreža za napajanje rasvjete i elektromotora. Prije toga, uređaji istosmjerne struje imali su ograničen doseg, dok su se transformatori pokazali kao

ključno rješenje za ovaj problem. Transformatori su omogućili prijenos električne energije na veće udaljenosti, čime su riješili problem ograničenog dometa u mrežama istosmjernje struje. Osim toga, omogućili su povećanje prijenosnog napona na mjestu potrošnje bez povećanja rizika od iskrenja na kolektoru ili potrebe za snižavanjem napona na mjestu potrošnje.

Uvođenje transformatora u elektrotehniku označilo je i početak razvoja izmjenične struje kao dominantnog oblika prijenosa električne energije. Razvoj transformatora nastavio se s ciljem postizanja većih snaga i viših radnih napona. Tehnološki napredak omogućio je izgradnju jačih transformatora bez značajnog povećanja količine materijala potrebnog za izradu.

Jedan od ključnih koraka u razvoju transformatora bio je prelazak s pločastih namota na cilindrične, kao i razvoj regulatora napona. Uz to, pronalazak hladno valjanih legiranih limova omogućio je povećanje magnetske indukcije u jezgri i gustoće struje u namotaju, što je dovelo do izgradnje jačih transformatora s manjim gubicima. Uronjavanje transformatora u ulje, prema ideji Nikole Tesle, omogućilo je brže odvođenje topline uz transformatora i omogućilo povećanje radnih napona. Osim toga, napredni izolacijski materijali na bazi silikona omogućili su rad na višim temperaturama, što je dalje povećalo snagu i učinkovitost transformatora.

**Slika 3.** Izgled prvog transformatora



Izvor: <https://e-elektro.blogspot.com/2012/08/povijesni-razvoj-transformatora.html>

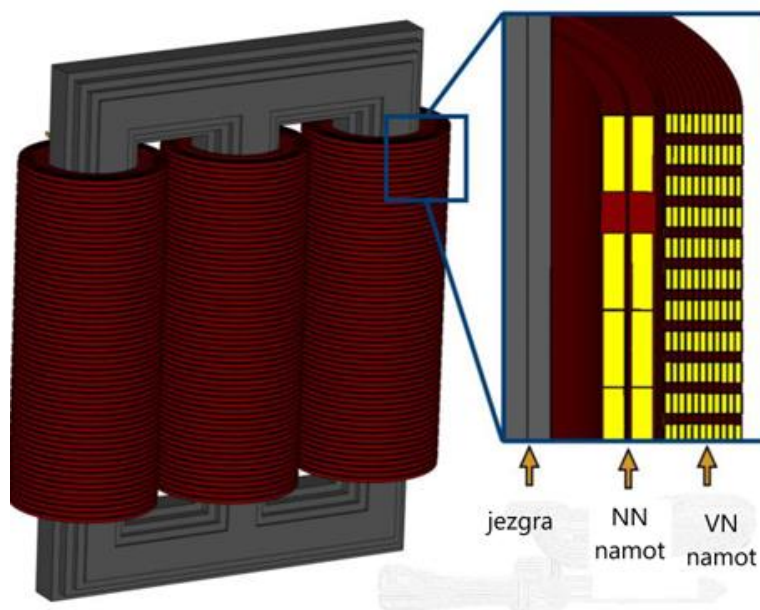
(pristup 26.06.2024.)

Danas, transformatori se grade u različitim snagama, od nekoliko vata do više stotina megawata, s radnim naponima od nekoliko volti do više stotina tisuća volti. Njihov razvoj i dalje ovisi o napretku tehnologije, posebno u pogledu izolacijskih materijala i termalne učinkovitosti. Proizvodnja transformatora u Hrvatskoj započela je 1946.godine u tvornici Rade Končar. Danas se u tvornici Končar – Energetski transformatori proizvode, između ostalog, generatorski transformatori električne snage do 800 MVA i električnog napona do 429 kV [2]

#### 4. PRINCIP RADA TRANSFORMATORSKIH KOTLOVA

Osnovni princip rada naponskog transformatora počiva na ideji elektromagnetske indukcije, prema kojoj promjene magnetskog polja u jezgri transformatora uzrokuju indukciju električne struje u zavojnicama. Struktura transformatora uključuje željeznu jezgru i primarni te sekundarni namotaj, kao što se vidi na slici 4. Kada se na primarni namotaj transformatora primijeni izmjenična struja, stvara se promjenjivo magnetsko polje u jezgri. To magnetsko polje inducira električnu struju u sekundarnom namotaju prema Faradayevom zakonu elektromagnetske indukcije. Odnos broja zavoja između primarnog i sekundarnog namotaja određuje omjer transformacije, što rezultira promjenom napona između primarne i sekundarne strane.

Slika 4. Izgled namotaja transformatora



Izvor: *zavrzni\_rad-tin\_brubnjak.pdf* (pristup 26.06.2024.)

Naponski transformatori za mjerenje obično su jednofazni transformatori s dvostrukim namotajem, pri čemu se primarni napon mjeri na primarnom namotaju. Zaštita naponskih transformatora uključuje osigurače na primarnoj strani i pouzdano uzemljenje na sekundarnoj strani kako bi se spriječile ozljede ili oštećenja u slučaju kratkog spoja. Kada je sekundarna strana kratko spojena, struja u transformatoru naglo raste, što može dovesti do pregrijavanja namota. Stoga je važno osigurati pouzdanu zaštitu kako bi se spriječilo oštećenje transformatora i rizik od požara.

Trofazni naponski transformatori koriste se u elektroenergetskim sustavima kako bi se mjerenje i zaštita izvodili na trofaznim linijama. Oni se koriste za detekciju uzemljenja i osiguravaju da se sustav automatski isključi u slučaju opasnosti. Naponski transformatori su ključni dio elektroenergetskih sustava jer omogućuju sigurno i učinkovito mjerenje i kontrolu napona na elektroenergetskim linijama. Bez njih, mjerenje i zaštita električnih sustava bili bi izazovni i potencijalno opasni. Stoga je važno razumjeti njihov princip rada i primjenu u različitim elektroenergetskim okruženjima. [3]

## **5. METODE ISPITIVANJA BEZ RAZARNJA**

Metoda ispitivanja bez razaranja (NDT – Non-Destructive Testing) je proces provjere materijala, komponenti ili sustava radi otkrivanja nedostataka ili abnormalnosti bez uzrokovanja trajne štete ili uništavanja predmeta koji se ispituje. Ova metoda se koristi u različitim industrijama, uključujući inženjering, proizvodnju, građevinarstvo, zrakoplovstvo, nuklearnu energiju i mnoge druge, kako bi se osigurala kvaliteta, sigurnost i pouzdanost proizvoda ili konstrukcija.

Vrste metoda ispitivanja bez razaranja su :

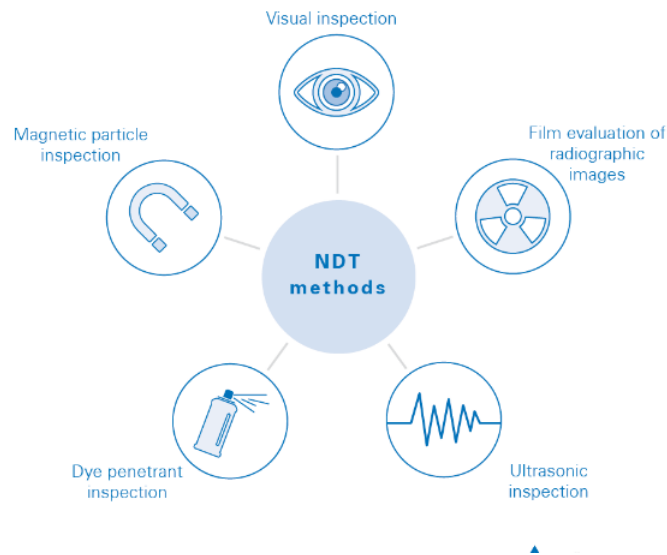
- vizualna inspekcija
- ultrazvučno ispitivanje
- radiografsko ispitivanje
- magnetno ispitivanje
- penetrantsko ispitivanje

Metode ispitivanja bez razaranja omogućuju inspektorima da otkriju nedostatke ili abnormalnosti u materijalima ili konstrukcijama bez uzrokovanja trajne štete. Ove metode



omogućuju ranu detekciju potencijalnih problema prije nego što dođe do ozbiljnih oštećenja ili nezgoda. [4]

**Slika 5.** NDT metoda



Izvor: <http://ba.weldsteelpipe.com/news/what-is-non-destructive-testing-of-steel-pipes-70003236.html>\_(pristup 26.06.2024.)

### **5.1. Vizualna kontrola**

Vizualna kontrola je postupak pregleda i procjene predmeta, komponenti ili sustava putem promatranja vizualnih karakteristika kako bi se utvrdilo stanje, kvalitete, nedostaci ili potencijalni problemi. Ovaj postupak često se koristi u različitim područjima, uključujući inženjering, proizvodnju, građevinarstvo, medicinu i mnoge druge industrije. Vizualna kontrola može biti izvedena golim okom ili uz pomoć različitih alata poput povećala, kamera ili drugih optičkih uređaja.

**Slika 6.** Oprema za vizualnu kontrolu



Izvor: <https://www.sigmat.hr/kontrola/3114-set-za-kontrolu> (pristup 26.06.2024.)

Svaka vizualna kontrola mora uključivati sljedeće korake :

1. priprema za inspekciju – prije početka vizualne kontrole, važno je osigurati prikladan prostor, osvjetljenje i uvjete kako bi se omogućila učinkovita inspekcija. Također je važno osigurati da su inspektori obučeni za provođenje inspekcije i da imaju potrebne alate i opremu.
2. pregled vanjskih karakteristika – prvi korak u vizualnoj kontroli obično uključuje pregled vanjskih karakteristika predmeta ili komponenti kako bi se utvrdilo postoje li očigledni nedostaci ili oštećenja. To može uključivati pregled boje, teksture, oblika, veličine simetrije i općeg izgleda.
3. pregled detalja – nakon pregleda vanjskih karakteristika, inspektor može detaljnije pregledati specifične dijelove ili komponente kako bi otkrio eventualne nedostatke ili abnormalnosti. To može uključivati pregled spojeva, rubova, pukotina, udubljenja, ogrebotina ili drugih oštećenja.
4. provjera funkcionalnosti – ovisno o predmetu inspekcije, može biti potrebno provjeriti i funkcionalnost ili rad predmeta. To može uključivati testiranje pokretljivosti, rada mehaničkih ili električnih komponenata, te provjeru performansi u skladu s očekivanjima.
5. snimanje rezultata – tijekom vizualne kontrole važno je dokumentirati sve otkrivene nedostatke, abnormalnosti ili probleme. To može uključivati fotografiranje ili snimanje detalja, bilješke ili izvještavanje o stanju predmeta ili komponenti.

6. analiza rezultata – nakon završetka vizualne kontrole, rezultati se analiziraju kako bi se utvrdilo postoje li potrebni koraci za popravak, zamjenu, održavanje ili druge radnje. Ova analiza može biti temelj za donošenje odluka o daljnjim koracima.

Vizualna kontrola može biti izuzetno važan alat za osiguranje kvalitete, sigurnosti i pouzdanosti u različitim industrijama. Redovita i pažljiva vizualna kontrola može pomoći u otkrivanju problema u ranoj fazi, sprječavanju nezgoda ili oštećenja te osiguranju zadovoljstva kupca.[5]

**Slika 7.** Vizualna kontrola objekta



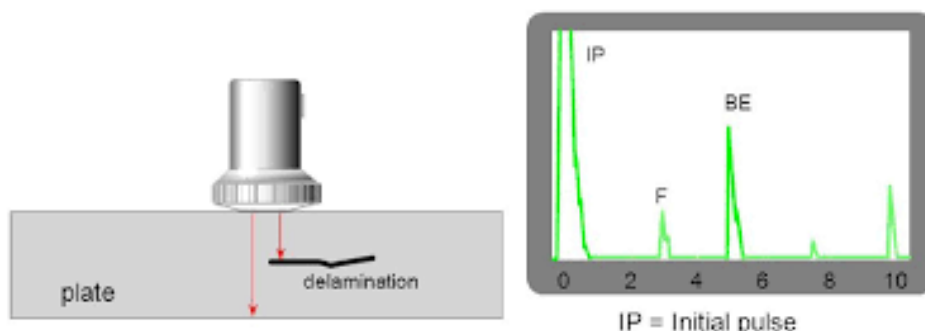
Izvor: Arhiva autora

## **5.2. Ultrazvučno ispitivanje**

Ultrazvučno ispitivanje materijala je tehnika koja se koristi za detekciju unutarnjih nedostataka ili deformacija u materijalima korištenjem ultrazvučnih valova. Takve detekcije mogu biti širokog spektra kao što su pukotine, poroznost, nehomogenosti, delaminaciju ili druge nepravilnosti. Ova tehnika je neinvazivna, brza i precizna, te se često koristi za osiguranje kvalitete i sigurnosti u industrijskim i inženjerskim primjenama.

Prozvučivanje je tehnika ispitivanja materijala koja odašilje zvučne valove određenog spektra frekvencije kroz materijal ili medij. Kada se ti valovi prošire kroz materijal, dolazi do elastomehaničkog titranja tog medija. Ako frekvencija titranja prelazi granicu područja čujnosti ljudskog uha, to titranje se naziva ultrazvukom.

**Slika 8.** Ultrazvučna kontrola



Izvor: <https://pondt.hr/paut-ultrazvucno-ispitivanje-visepretvornickom-tehnikom/> (pristup 26.06.2024.)

U svrhu ispitivanja zavarenih spojeva, prozvučivanje se obično provodi u frekventnom području od 0,5 do 6 MHz. Ova frekvencija omogućuje precizno otkrivanje nedostataka i deformacija unutar materijala. Kada ultrazvučni valovi nailaze na razdjelnu plohu unutar materijala (kao što je vanjska stijenka, pukotina ili druga nepravilnost), zbog velike razlike u akustičnim impedancijama između materijala i zraka (ili drugog materijala), dio valova će se reflektirati natrag u materijal. Ovaj odraz otkriva prisutnost prepreke ili nedostatka u materijalu.

**Slika 9.** Princip rada ultrazvučne metode



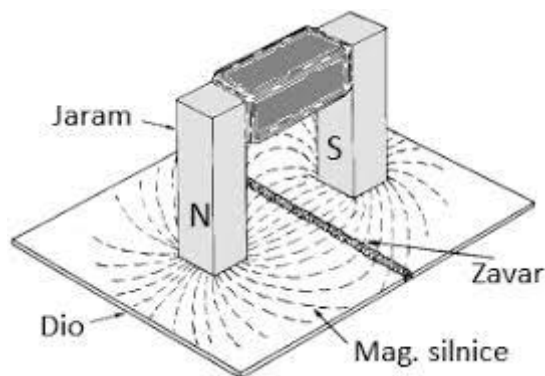
Izvor: [https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/07\\_12\\_2018\\_\\_30131\\_Osnove\\_ultrazvuka.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/07_12_2018__30131_Osnove_ultrazvuka.pdf) (pristup 27.06.2024.)

Važno je napomenuti da ultrazvučno ispitivanje ne otkriva samu prirodu nedostatka, već samo određuje veličinu, položaj i orijentaciju razdjelne plohe materijala ili nedostatka. Za daljnju analizu i tumačenje rezultata potrebno je dodatno znanje o svojstvima metode, svojstvima zvučnih valova te mogućim oblicima i položajima ploha koja omeđuje nedostatak. [6]

### 5.3. Magnetsko ispitivanje

Magnetsko ispitivanje je metoda ispitivanja bez razaranja koja se koristi za otkrivanje površinskih i podpovršinskih grešaka (približno do dubine 6mm) kod feromagnetskih materijala. Zasniva se na principu magnetske indukcije, kao što je vidljivo na slici 10.

**Slika 10.** Ispitivanje zavara magnetom



Izvor : <https://zir.nsk.hr/islandora/object/vuka:310/preview> (pristup 27.06.2024.)

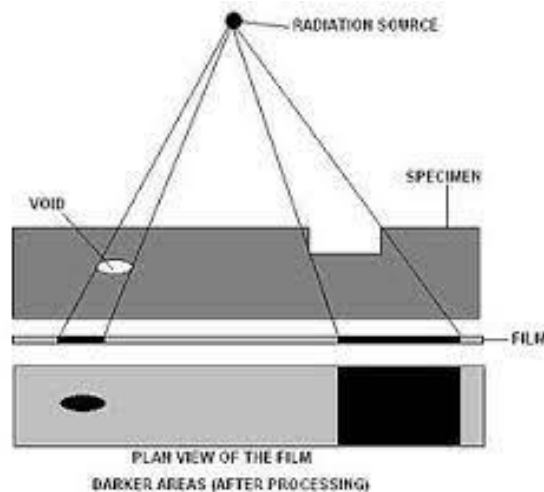
Oko vodiča, kroz koji prolazi električna struja (magnetski jaram, magnetske elektrode) stvara se magnetsko polje (istosmjerne ili izmjenične struje), čije silnice, po pravilu desne ruke, prolaze između ostalog i kroz feromagnetski materijal koji se ispituje, odnosno koji je u dodiru s magnetskim jarmom ili magnetskim elektrodama. Da bi se otkrila pukotina, potrebno je da smjer silnica magnetskog polja bude više okomito na pukotinu. Prosipaju li se magnetske čestice (suhe sitne čestice) po površini ispitivanog materijala, sitne čestice će se okupiti oko pukotine ukoliko je ta pukotina okomita na smjer prolaska silnica magnetskog polja.

Ova metoda je relativno jeftina i brza, ali ima ograničenja s obzirom na neferomagnetske materijale, greške duboko ispod površine te nemogućnost određivanja dubine pukotine koja je otkrivena kod ispitanog materijala. [6]

#### 5.4. Radiografsko ispitivanje

Radiografska kontrola, također poznata kao ispitivanje prozračivanjem, je metoda radijacijske kontrole koja se koristi za otkrivanje nepravilnosti u strukturi ili kroz presjek ispitanog objekta. Ove metode omogućavaju i kvalitativno (opisno) i kvantitativno (mjerjenje) praćenje nepravilnosti, poput pukotina, šupljina ili drugih defekata.

Slika 11. Princip rada radiografskog ispitivanja



Izvor: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Radiografska\\_kontrola](https://hr.wikipedia.org/wiki/Radiografska_kontrola) (pristup 27.06.2024.)

Postupak radiografske kontrole :

1. ionizirajuće zračenje – metoda se oslanja na korištenje ionizirajućeg zračenja, kao što su X-zrake ili gama zrake. Ove zrake prodiru kroz ispitivani objekt.
2. prozračivanje objekta – kada zračenje prolazi kroz objekt, ono se susreće s različitim materijalima unutar objekta (npr. metal, zrak u pukotini, itd.). Svaki materijal drugačije apsorbira i raspršuje zračenje.

- informacije o objektu – zračenje koje prođe kroz objekt nosi sa sobom informacije o unutarnjoj strukturi objekta zbog međudjelovanja zračenja s materijalima unutar objekta.
- detekcija varijacija intenziteta zračenja – Nakon prolaska kroz objekt, intenzitet zračenja se mjeri i registrira. Varijacije u intenzitetu ukazuju na prisutnost nepravilnosti, jer različiti materijal unutar objekta ( i praznine) različito apsorbiraju zračenje.

Postoje dvije vrste prozračivanja :

- radiografija – rendgensko ispitivanje
- gamagrafija – ispitivanje radioaktivnim izotopima

Radiografska kontrola je vrlo korisna metoda jer omogućuje detaljan uvid u unutarnju strukturu objekta bez potrebe za njegovim uništavanjem ili rastavljanjem. Međutim, korištenje ionizirajućeg zračenja zahtijeva stroge sigurnosne mjere kako bi se zaštili radnici i okoliš od štetnog utjecaja zračenja

**Slika 12.** Uređaj za RT ispitivanje



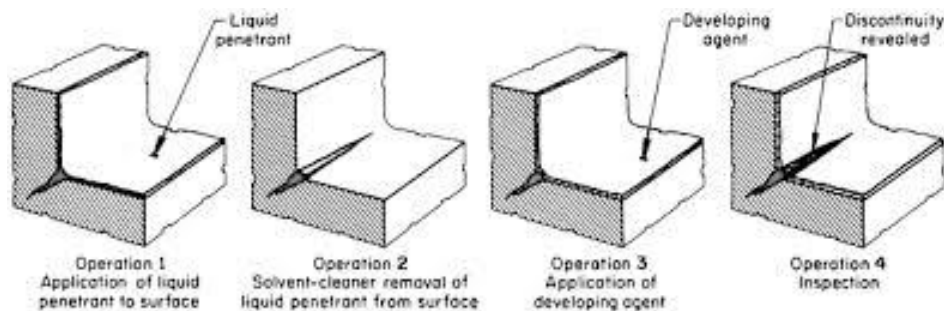
Izvor : <https://tehnickicentar-inspekt.com/ispitivanja-bez-razaranja/> (pristup 27.06.2024.)

## 5.5. Penetrantsko ispitivanje

Temeljna namjena metode penetrantske kontrole je otkrivanje površinskih prekidnosti, te propusnosti stijenke (cijevi posude). Metoda rabi tekuća kemijska sredstva: penetrant, razvijlač i odstranjivač, kao i pomoćna sredstva, npr. čistač, emulgator.

Osnovni uvjet penetrantske kontrole je da prekidnosti moraju biti otvorene prema površini. Radi velike mogućnosti primjene i relativno niske cijene provođenja ispitivanja ova metoda ima široku primjenu.

**Slika 13.** Proces ispitivanja penetrantom



Izvor: [https://www.grad.unizg.hr/\\_download/repository/2a\\_P-NDT-ispitivanje\\_penetrantima\\_%5BRead-Only%5D.pdf](https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/2a_P-NDT-ispitivanje_penetrantima_%5BRead-Only%5D.pdf) (pristup 27.06.2024.)

Prednosti PT kontrole :

- jednostavnost primjene
- velika osjetljivost na sitne prekidnosti površine
- primjenjivost na sve materijale (metale i nemetale, magnetične i nemagnetične, itd.)
- indikacije prekidnosti uočavaju se odmah na površini
- velike površine i dijelovi postrojenja neovisno o težini mogu se ispitati brzo i relativno jeftino
- nije potrebna električna struja za provedbu ispitivanja



Nedostaci PT kontrole :

- ograničenje samo na ispitivanje površini otvorenih pukotina
- primjenjivost samo na neporoznim materijalima
- kritičnost pripreme površine za ispitivanje
- hrapavost površine može utjecati na osjetljivost rezultata ispitivanja
- ostaci od završne obrade površine moraju se u potpunosti otkloniti
- pouzdanost rezultata ispitivanja u velikoj mjeri ovisi o preciznosti i iskustvu ispitivača

PT ispitivanje zasniva se na fizikalnom principu koji se naziva kapilarni efekt. Kapilarni efekt je svojstvo nekih tekućina da prodiru ili izlaze iz uskih cjevčica koje se zovu kapilare. Ukoliko se kapilare različitih promjera urone jednim krajem u neku tekućinu, vidjet će se da se tekućina uzdiže više na cjevčicama manjeg promjera nego na onima većeg promjera.

U penetrantska sredstva ubrajaju se sredstva za čišćenje, penetranti, sredstva za uklanjanje viška penetranta i razvijajući. Penetrant je tekućina koja, kada se nanese na ispitnu površinu, prodi u nepravilnosti i tamo se zadržava u količinama koje se mogu detektirati nakon uklanjanja penetranta s površine.

Ovisno o namjeni i načinu primjene penetranti se dijele

1. prema tehnici ispitivanja – obojani penetranti, fluorescentni penetranti, obojano – fluorescentni penetranti
2. prema načinu odstranjivanja penetranta s površine – vodom perivi, emulgatorom odstranjivi i otapalom odstranjivi
3. prema osjetljivosti – standardne , visoke i izrazito visoke osjetljivosti

**Slika 14.** PT kontrola transformatorskog kotla



Izvor: Arhiva autora

Razvijači su penetrantska sredstva koja pomažu izvući penetrant iz nepravilnosti i na površini stvoriti obris nepravilnosti. Standardni prahovi razvijača izrađeni su na bazi silikata ili karbonata i suspendiraju ili rastvaraju se u vodi ili otapalu.

Najvažnije karakteristike razvijača :

- stanje isporuke – može biti pakiran i pripremljen u posudi pod tlakom ili u otvorenim posudama.
- raspršivost – razvijač nakon miješanja mora izlaziti iz aerosol doze poput magle, bez kapljica, ali ne i suh. Mora osigurati glatki, ravni i jednolični sloj na površini.
- kontrast razvijača – mora imati zadovoljavajuću bjelinu kako bi na ispitnoj površini stvorio dovoljan kontrast u odnosu na penetrant.
- perivost razvijača – sve vrste razvijača moraju biti lako odstranjive s površine
- veličina zrna praška razvijača – utječe na osjetljivost sustava. Sitnije zrno znači veću osjetljivost

Klasifikacije razvijaača ovisno o namjeni i načinu primjene:

1. suhi razvijaač – može se upotrebljavati samo za fluorescentni penetrant, nanosi se jednoliko na površinu jednom od sljedećih tehnika: naprašivanjem, naprašivanjem u komori, pištoljem za razvijaač.
2. razvijaač rastvoren u vodi – tanki sloj razvijaača postiže se imerzijom u suspenziji koja se miješa. Vrijeme i temperatura imerzije određuju se preliminarnim pokusom prema uputama proizvođača.
3. razvijaač rastvoren u otapalu – razvijaač se nanosi prskanjem. Prskanje treba podesiti tako da razvijaač dospije na površinu dok je još rastvoren u otapalu čime se postiže jednoliki sloj. [5]

**Slika 15.** Primjena razvijaača na penetrant



Izvor: <https://kontrolingndt.com/penetrantsko.html> (pristup 27.06.2024.)

## **6. KONTROLA MATERIJALA U PROIZVODNJI TRANSFORMATORSKIH KOTLOVA**

Kontrola materijala u proizvodnji transformatorskih kotlova ključna je osiguranje dugovječnosti, pouzdanosti i sigurnosti transformatora. Transformatorski kotlovi moraju biti izrađeni od materijala koji mogu izdržati visoke napone i temperaturne promjene, a istovremeno osigurati učinkovitu izolaciju i hlađenje. Zbog toga kvalitetna kontrola materijala osigurava da svi korišteni materijali ispunjavaju stroge industrijske standarde i zahtjeve.

Primjena različitih metoda kontrole, od vizualne inspekcije do sofisticiranih tehnika poput ultrazvučnog i radiografskog ispitivanja, omogućuje proizvođačima da identificiraju i uklone potencijalne nepravilnosti prije nego što one postanu ozbiljan problem. Svaka metoda ima svoje prednosti i nedostatke, a izbor prave metode ovisi o specifičnim zahtjevima i karakteristikama materijala koji se ispituje. Kombinacija ovih metoda osigurava da transformatorski kotlovi zadovoljavaju sve industrijske standarde i specifikacije čime se postiže pouzdanost i učinkovitost transformatora u stvarnim radnim uvjetima.

### **6.1. Proces odabira materijala**

Prvi korak u procesu odabira materijala uključuje detaljnu analizu zahtjeva i specifikacija koje kotao mora zadovoljiti. Neki od ključnih faktora su :

- električna svojstva – materijali moraju imati visoku električnu otpornost kako bi se spriječili gubici zbog vrtložnih struja.
- termička svojstva – dobri termički vodljivi materijali su potrebni za učinkovito odvođenje topline.
- mehanička svojstva – materijali moraju biti dovoljno jaki i izdržljivi da izdrže mehanička naprezanja i vibracije.
- kemijska otpornost – materijali moraju biti otporni na koroziju i kemijske reakcije s uljima i drugim tekućinama unutar transformatora.

Nakon definiranja zahtjeva, odabiru se potencijalni materijali koji zadovoljavaju ove specifikacije. Primjeri takvih materijala su: čelik, bakar, aluminij, izolacijski materijali.

Najčešće korišteni materijali za proizvodnju transformatorskih kotlova su materijali temeljeni na čeliku kao npr. S235JR, S275JR i S355J2+N.

Čelik S235JR je nelegirani konstrukcijski čelik, što znači da se koristi za izradu različitih konstrukcija, ali ne sadrži značajne količine legirajućih elemenata. Karakteristike koje opisuju ovaj čelik :

- dobra zavarljivost – S235JR se lako može zavariti, što je ključno za izradu zavarene konstrukcije. Ova osobina je važna jer omogućava spajanje dijelova čelika bez smanjenja njegovih mehaničkih svojstava.
- sposobnost savijanja – može se savijati bez lomljenja ili pucanja, što omogućava njegovu upotrebu u različitim oblicima i strukturama.

- niska tvrdoća – čelik nije jako tvrd, što olakšava njegovu obradu, kao što je rezanje i oblikovanje.
- visoka granica razvlačenja – može podnijeti visoke sile prije nego što dođe do trajne deformacije. To je korisno za konstrukcije koje moraju izdržati značajna opterećenja.
- otpornost na trošenje i koroziju – iako nije najotporniji čelik na koroziju, S235JR pruža dovoljnu otpornost za mnoge primjene.
- lako obradiv odvajanjem čestica (rezanje) – lako se reže i obrađuje alatima za rezanje.

**Tablica 1.** Mehanička svojstva S235JR materijala

Test piece No	R <sub>m</sub> , MPa	R <sub>p0.2</sub> , MPa	E, GPa	ν, -
1	642	597	203	0,27
2	639	591	201	0,29
3	640	587	204	0,27
Average	640	592	203	0,28

Izvor: [https://www.researchgate.net/figure/Material-constants-of-S235JR-steel\\_tbl1\\_336880476](https://www.researchgate.net/figure/Material-constants-of-S235JR-steel_tbl1_336880476) (pristup 28.06.2024.)

Zbog ovih svojstava, S235JR je pogodan za izradu zavarene konstrukcije koje nisu izložene ekstremno niskim temperaturama (ispod -10°C). U ovim uvjetima, postoji rizik od krhkog loma, što znači da bi čelik mogao postati lomljiv i sklon pucanju.

**Tablica 2.** Kemijska svojstva S235JR materijala

Kemijski element	C	P	S	N
Maseni udio %	0,17	0,05	0,05	0,007

Izvor: <https://repositorij.vuka.hr/en/islandora/object/vuka%3A1723/datastream/PDF/view> (pristup 28.06.2024.)

S235JR je idealan za upotrebu u građevinskim i inženjerskim projektima gdje su zavareni spojevi često potrebni, a konstrukcija mora izdržati promjene temperature i opterećenja bez rizika od krhkog loma. U proizvodnji transformatorskih kotlova najčešće prevladava upravo ovaj materijal zbog dostupnosti i niske cijene materijala. [6]

Čelik S275JR je konstrukcijski čelik niskog udjela ugljika, koji se široko koristi u građevinskoj i strojarsoj industriji zbog svojih dobrih mehaničkih svojstava odlične zavarljivosti. Karakteristike ovog čelika su :

- niski udjel ugljika – ima manji sadržaj ugljika u svojoj kemijskoj kompoziciji. Ovo svojstvo doprinosi boljoj zavarljivosti i obradivosti materijala
- dobra zavarljivost – čelik je lako zavarljiv, što ga čini pogodnim za izradu konstrukcija koje zahtijevaju zavarene spojeve.
- visoka vlačna čvrstoća – može podnijeti velike sile prije nego što dođe do pucanja. Vlačna čvrstoća ovog čelika obično je u rasponu od 370 do 530 MPa.
- granica razvlačenja – ovaj faktor pokazuje koliko stresa materijal može izdržati prije nego što dođe do trajne deformacije. Granica razvlačenja za S275JR obično iznosi najmanje 275 MPa, što je i razlog zašto se ovaj čelik naziva „S275“.
- otpornost na trošenje i koroziju – S275JR ima umjerenu otpornost na trošenje i koroziju, što ga čini pogodnim za mnoge vanjske i unutarnje primjene, posebno kada je zaštićen premazima ili drugim antikorozivnim metodama.
- obradivost – lako je obradiv, što znači da se može lako rezati, savijati i oblikovati prema potrebama.

**Slika 16.** Mehanička svojstva S275JR materijala

Kvalitet čelika	Minimalna granica tečenja Reh MPa						Vlačna čvrstoća Rm MPa		Minimalno izduženje - A Lo=5,65 * √Tako (%)				
	Nazivna debljina mm						Nazivna debljina mm				Nazivna debljina mm		
	Manje ili jednako 16	>16 Manje ili jednako 40	>40 Manje ili jednako 63	>63 Manje ili jednako 80	>80 Manje ili jednako 100	>100 Manje ili jednako 125	>3 Manje ili jednako 100	>100 Manje ili jednako 125	>3 Manje ili jednako 40	>40 Manje ili jednako 63	>63 Manje ili jednako 100	>100 Manje ili jednako 125	
S275JR	275	265	255	245	235	225	410-560	400-540	23	22	21	19	

Izvor: <https://ba.coldrolledsteels.com/info/s275-structural-steel-plate-88828564.html> (pristup 28.06.2024.)

Čelik S275JR je pouzdan i svestran materijal široke primjene u građevinskoj i strojarскоj industriji. Njegova sposobnost da podnese velika opterećenja i otpornost na koroziju čine ga idealnim izborom za mnoge primjene, od izrade nosivih struktura do proizvodnje opreme i infrastrukturnih konstrukcija. U proizvodnji transformatorskih kotlova najčešće se koristi kod izrade cijevi i nekih posebnih pozicija. [7]

Čelik S355J2+N je visokokvalitetan konstrukcijski čelik poznat po svojim odličnim mehaničkim svojstvima i širokoj primjeni u građevinskoj i inženjerskoj industriji. Karakteristike ovog proizvoda su :

- visoka čvrstoća – njegova sposobnost da izdrži visoka opterećenja čini ga idealnim za zahtjevne konstrukcijske primjene.
- dobra zavarljivost – može se lako zavariti bez gubitaka mehaničkih svojstava, što je ključno za izradu kompleksnih konstrukcija.
- otpornost na koroziju - iako nije najotporniji na koroziju, svejedno pruža dovoljno zaštite za mnoge primjene, posebno kada je zaštićen premazima.
- obradivost – lako se reže, savija i oblikuje. [8]

Ovaj čelik isto ima dobra mehanička svojstva. Vlačnu čvrstoću ima u rasponu od 470 do 630 MPa što znači da može izdržati visoka naprezanja prije nego što dođe do trajne deformacije. Isto tako ima relativno dobro izduženje (minimalno 20%), što ukazuje na njegovu duktilnost , odnosno sposobnost da se rastegne bez pucanja.[9] Najčešće je koristan kod izrade transformatorskih kotlova koji moraju podnijeti vrlo visoku i vrlo nisku temperaturu. Zato postoji još jedan tip a to je S355NL (koji može izdržati temperaturu do -50°C). S355J2+N je ključni materijal koji doprinosi sigurnosti, pouzdanosti i dugovječnosti brojnih konstrukcija i proizvoda.

**Tablica 3.** Kemijski sastav S355J2+N materijala

Kemijski element	C	P	S	Si	Mn	N
Maseni udio %	0,2	0,05	0,05	0,55	1,5	0,007

Izvor: <https://repositorij.vuka.hr/en/islandora/object/vuka%3A1723/datastream/PDF/view>  
(pristup 28.06.2024.)

**Tablica 4.** Mehanička svojstva S355J2+N materijala

Tvrdoća HB	Vlačna čvrstoća N/mm <sup>2</sup>	Granica razvlačenja N/mm <sup>2</sup>			Izduženje %
		d≤16	16<d≤40	40<d≤100	
140-190	510-610	355	345	335	22

Izvor: <https://repositorij.vuka.hr/en/islandora/object/vuka%3A1723/datastream/PDF/view>  
(pristup 28.06.2024.)

## 6.2. Važnost kontrole kvalitete materijala prije i tijekom procesa proizvodnje

Kontrola kvalitete materijala prije i tijekom procesa proizvodnje ključna je za osiguranje da krajnji proizvodi zadovoljavaju sve potrebne specifikacije i standarde. Ovaj postupak ima nekoliko važnih aspekata i koristi koje pridonose uspjehu i održivosti proizvodnih procesa kao što su :

- osiguranje sigurnosti – osiguravaju da konačni proizvodi budu sigurni za upotrebu, smanjujući rizik od kvarova i nesreća te smanjuju rizik od ozljeda radnika tijekom proizvodnog procesa i kasnije tijekom korištenja proizvoda
- dosljednost proizvoda – osigurava da svi proizvodi zadovoljavaju određene standarde kvalitete, što je ključno za dosljednost i pouzdanost. Isto tako povećava zadovoljstvo kupaca jer oni dobivaju točno što očekuju, bez varijacija u kvaliteti.
- smanjenje troškova - kvalitetni materijali smanjuju količinu otpada jer je manje vjerojatno da će doći do grešaka i kvarova tijekom proizvodnje
- poboljšanje učinkovitosti proizvodnje – kvalitetni materijali omogućuju nesmetan tijek proizvodnog procesa, smanjujući zastoje i prekide. Efikasna uporaba materijala i smanjenje otpada pomažu u optimizaciji resursa i povećanju produktivnosti.
- inovacija i razvoj proizvoda – korištenjem kvalitetnih materijala i tehnologija, tvrtke mogu razviti inovativne proizvode koji pružaju konkurentsku prednost na tržištu [10]



**Slika 17.** Dimenzijska kontrola materijala



Izvor: Arhiva autora

Postoje tri procesa kod kontrole materijala, a to su: ulazna kontrola, procesna kontrola i izlazna kontrola. Ulazna kontrola provjerava kvalitetu materijala prije nego što uđu u proizvodni proces. Ovo uključuje inspekciju sirovina i dobavljača. Ukoliko se radi o većim dobavnim materijalima, dobavljač toga materijala šalje ateste u kojima pišu svi postupci ispitivanja tog istog materijala. Procesna kontrola je kontinuirano praćenje i testiranje materijala tijekom različitih faza proizvodnje kako bi se osigurala dosljednost i kvaliteta. Kod proizvodnje transformatorskih kotlova najviše se koristi vizualna i penetrantska kontrola. Zbog svih naprezanja i grijanja materijala velika je mogućnost da dođe do deformacije materijala, procesna kontrola mora brzo reagirati kako ne bi došlo do zastoja proizvodnje. Isto tako u procesnoj kontroli se odvija sama dimenzijska i pozicijska točnost materijala i zavarenih pozicija. Izlazna kontrola je zapravo završna inspekcija gotovih proizvoda prije isporuke kupcima, kako bi se osiguralo da zadovoljavaju sve specifikacije i standarde kvalitete. Kod izlazne kontrole najčešće se kontrolira antikorozivna zaštita, te se radi još jedna brzinska provjera svih pozicija postavljena na kotlu.

**Slika 18.** Deformacija materijala tijekom procesne kontrole



Izvor : Arhiva autora

### **6.3. Primjena metode ispitivanja bez razaranja u kontroli materijala**

Najčešća primjena ispitivanja bez razaranja kod ispitivanja materijala u proizvodnji transformatorskih kotlova je vizualna kontrola. Vizualna kontrola može otkriti da li materijal ima površinske greške koje bi mogle utjecati na kvalitetu proizvoda odnosno sam izgled proizvoda. Sama vizualna kontrola mora se obaviti tijekom ulazne kontrole dok dobavljač materijala dostavi kupcu traženi materijal.

Dobavljeni materijali dolaze s dokumentacijom poznatom kao atesti, u kojima je navedeno od kojih je komponenti materijal napravljen odnosno kemijski sastav materijala, te koja ispitivanja su provedena, da li su to neka mehanička ili kemijska ispitivanja. Greške ustanovljene tijekom kontrole moraju se ili sanirati ili se materijal mora vratiti dobavljaču.

**Slika 19.** Vizualna kontrola materijala



Izvor: Arhiva autora

## **7. KONTROLA ZAVARENIH SPOJEVA U PROIZVODNJI TRANSFORMATORSKIH KOTLOVA**

Zavareni spojevi su ključni kod proizvodnje transformatorskih kotlova, pošto je kotao ispunjen uljem, velika je mogućnost, ukoliko je zavareni spoj loše napravljen da dođe do propuštanja. Samim time popravak istog zahtijeva puno vremena i troškovi su veliki.

Kontrola zavarenih spojeva obuhvaća niz metoda i postupaka kojima se provjerava kvaliteta zavarenih spojeva kako bi se detektirale eventualne greške i nedostaci. Najčešće metode kojima se provjeravaju zavareni spojevi su: vizualna kontrola, penetrantska kontrola i tlačno ispitivanje.

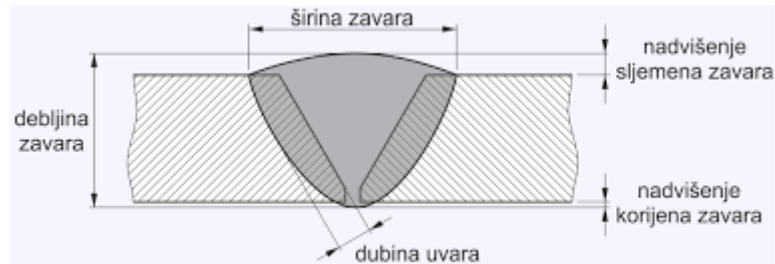
Svaka metoda ima svoje prednosti i nedostatke, te se često koristi kombinacija više metoda kako bi sa sigurnošću osigurala tražena kvaliteta proizvoda.

### **7.1. Značaj zavarenih spojeva u procesu proizvodnje**

U proizvodnji, zavareni spojevi omogućavaju spajanje metalnih komponenti u složenu strukturu, pružajući potrebnu čvrstoću, stabilnost i integritet konstrukcija. Zavarivanje je spajanje dvaju dijelova ili više dijelova, uz dodavanje ili bez dodavanja dodatnog materijala na takav način da spoj ima kontinuitet i što jedinstvena svojstva.

Zavareni spoj je karakterističan međusobnim položajem zavarenih dijelova i po potrebi oblikom njihovih zavarenih krajeva. Oblik krajeva dijelova koji su zavaruju moraju biti prilagođeni kako bi se postigao optimalan spoj.

**Slika 20.** Zavareni spoj



Izvor: <https://www.ffri.hr/~mdundjer/Elementi%20strojeva%20I/05-ZavareniIzalemljeniSpojevi.pdf> (pristup 30.06.2024.)

Transformatorski kotlovi rade pod velikim pritiskom i temperaturama, stoga zavareni spojevi moraju biti dobro napravljeni kako ne bi došlo do gubitaka mehaničkih svojstava ili integriteta materijala. [11]

## 7.2. Tehnike zavarivanja u proizvodnji

Proizvodnja kotlova je složen proces koji zahtijeva visoke standarde kvalitete i sigurnosti. Različite tehnike zavarivanja koriste se kako bi se osigurala strukturni integritet, otpornost na visoke temperature i pritiske, te dugotrajnost kotlova. Glavne tehnike zavarivanja koje se koriste kod proizvodnje kotlova su :

- MIG zavarivanje
- TIG zavarivanje
- MAG zavarivanje

MIG zavarivanje, koristi inertni zaštitni plin i kontinuirani dovod čvrste žice kako bi se spojili metalni dijelovi. Ova tehnika zavarivanja je popularna zbog svoje efikasnosti, kvalitete zavara i relativne lakoće učenja.

## Slika 21. MIG zavarivanje



Izvor: <https://metron.ba/mig-mag-postupak-zavarivanja/> (pristup 30.06.2024.)

Inertni plinovi kao što su argon ili mješavine argona i CO<sub>2</sub> koriste se za zaštitu zavara od atmosferske kontaminacije. Ovi plinovi stvaraju zaštitni omotač oko zavara, čime sprječavaju reakciju sa kisikom i vlagom, koje mogu uzrokovati nedostatke u zavaru poput poroznosti ili pucanja.

Žica koja se koristi kao elektroda i dodani materijal se neprekidno dovodi kroz pištolj za zavarivanje. Ova žica se topi kod električnog luka i stvara zavareni spoj. Kontinuirani dovod osigurava konstantan unos materijala, što pomaže u postizanju postojanog i kvalitetnog zavara.

Prednosti MIG zavarivanja :

- visoka produktivnost – zbog kontinuiranog dodavanja žice, MIG zavarivanje je brže od mnogih drugih tehnika, što ga čini pogodnim u metalnoj industriji.
- kvaliteta zavara - proces omogućuje stabilan i kontroliran zavar, što rezultira zavarenim spojevima visokog kvaliteta s minimalnim prskanjem.
- svestranost – može se koristiti za zavarivanje širokog spektra materijala uključujući čelik, aluminij i nehrđajući čelik, čineći ga pogodnim za različite aplikacije u industriji.
- jednostavnost učenja - MIG je relativno lako naučiti u usporedbi s drugim tehnikama zavarivanja. Stabilan luk i jednostavnost rukovanje pištoljem za zavarivanje čine ga popularnim izborom za početnike i amatere.

Nedostaci MIG zavarivanja :

- oprema i troškovi – oprema za MIG zavarivanje može biti skuplja u usporedbi s opremom za druge vrste zavarivanja, kao što je ručno elektro-lučno zavarivanje.
- ograničenja u okruženju – proces zavarivanja može biti otežan na otvorenom ili u vjetrovitim uvjetima, jer zaštitni plin može biti raznesen što dovodi do kontaminacije zavara.

MIG zavarivanje je učinkovita i pouzdana tehnika koja nudi brojne prednosti, uključujući brzinu, kvalitetu zavara i svestranost. Iako ima određene nedostatke, kao što su troškovi opreme i ograničenja u specifičnim uvjetima, njegova popularnost među profesionalcima i amaterima svjedoči o njegovim mnogobrojnim prednostima. [12]

**Slika 22.** Postupak MIG - MAG zavarivanja



Izvor: <https://pvtr-skz.com.hr/wp-content/uploads/2020/10/5.-Postupak-zavarivanja-MIG-MAG-skripta.pdf> (pristup 30.06.2024.)

MAG zavarivanje je postupak koji koristi aktivni plin za zavarivanje kako bi se stvorili čisti i jaki zavari. Kao MIG zavarivanje, MAG koristi kontinuirani dovod čvrste žice, no razlika je u vrsti plina koji se koristi za zaštitu zavara.

MAG zavarivanje koristi aktivne plinove, najčešće čisti ugljični dioksid ( $\text{CO}_2$ ) ili mješavinu plinova kao što su argon +  $\text{CO}_2$ . Ovi plinovi ne samo da štite zavar od atmosfere

kontaminacije, već i aktivno sudjeluju u procesu zavarivanja, poboljšavajući karakteristike zavara.

Kao i kod MIG zavarivanja, žica se neprekidno dovodi kroz pištolj za zavarivanje, gdje se topi pod djelovanjem električnog luka i stvara zavareni spoj. Najčešće se koristi CV (Constant Voltage) kao izvor napajanja, što omogućuje stabilan luk i konzistentnu kvalitetu zavara.

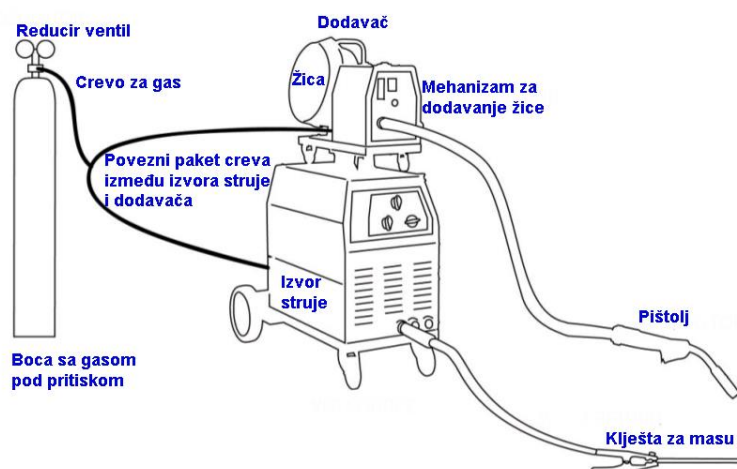
Prednosti MAG zavarivanja :

- kvaliteta i čistoća zavara – aktivni plinovi poboljšavaju penetraciju i profil zavara, što rezultira čistim i jakim zavarenim spojem.
- svestranost – može se koristiti na različitim metalima, uključujući čelik, niskolegirane čelike i druge željezne metale.
- efikasnost – omogućava visoku brzinu zavarivanja i dobru kontrolu nad zavarem, što povećava produktivnost.
- automatizacija – može se koristiti za poluautomatsko i automatsko zavarivanje, što ga čini idealnim za industrijske procese gdje je potrebna visoka produktivnost i konzistentnost.

Nedostaci MAG zavarivanja :

- plin i oprema – korištenje aktivnih plinova može povećati troškove u usporedbi s nekim drugim metodama zavarivanja. Također, oprema za MAG zavarivanje može biti skuplja.
- kontrola prskanja – aktivni plinovi poput CO<sub>2</sub> mogu uzrokovati više prskanja tijekom zavarivanja, što može zahtijevati dodatne korake za čišćenje zavara. [13]

**Slika 23.** Dijelovi aparata za zavarivanje (MIG ili MAG)



Izvor: <https://var.rs/sve-o-zavarivanju/migmag-zavarivanje-co2-zavarivanje/> (pristup 30.06.2024.)

TIG zavarivanje temelji se na uspostavljanju i održavanju električnog luka između volframove netaljive elektrode i radnog komada. Proces koristi neutralni ili inertni plin, poput argona ili helija, za zaštitu zavara od kontaminacije.

Električni luk se uspostavlja između volframove elektrode i radnog komada. Ovaj mali intenzivan luk idealan je za precizno i visokokvalitetno zavarivanje. Njihova funkcija je stvaranje zaštitne atmosfere koja sprječava kontaminaciju zavara kisikom i drugim plinovima iz okoline.

Postupak je izvediv iz bilo kojeg položaja i može se izvesti na radne komade debljine manjeg od milimetra. Najčešće se koristi za zavarivanje cijevi ili nekih drugih pozicija koji imaju mokre zavare (zavari koji imaju doticaj s uljem).

Prednosti TIG zavarivanja :

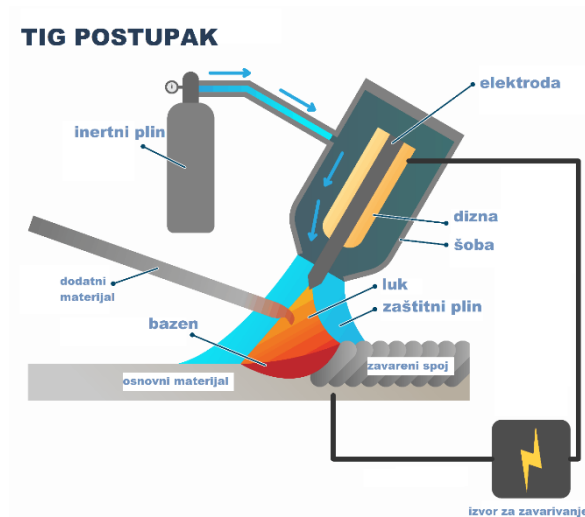
- visoka kvaliteta zavara – omogućava stvaranje vrlo stabilnog luka, što rezultira dobrom estetikom i izvrsnim mehaničkim svojstvima.
- mogućnost korištenja na zahtjevnim materijalima – može se koristiti kod nehrđajućih čelika, aluminija, titanij, bakra itd.
- preciznost – idealan je za zavarivanje tankih materijala i može se koristiti u bilo kojem položaju.



Nedostaci TIG zavarivanja :

- mala brzina zavarivanja – proces je jako spor, s brzinom zavarivanja od 10 do 15 cm u minuti.
- visoki troškovi – oprema za TIG zavarivanje je skupa, uključujući volframove elektrode i zaštitni plin (argon).
- sekundarna zaštita – zbog oksidacije, često je potrebna dodatna zaštita za osiguranje kvalitete zavara. [14]

**Slika 24.** TIG postupak



Izvor: <https://metron.ba/tig-postupak-zavarivanja/> (pristup 31.06.2024.)

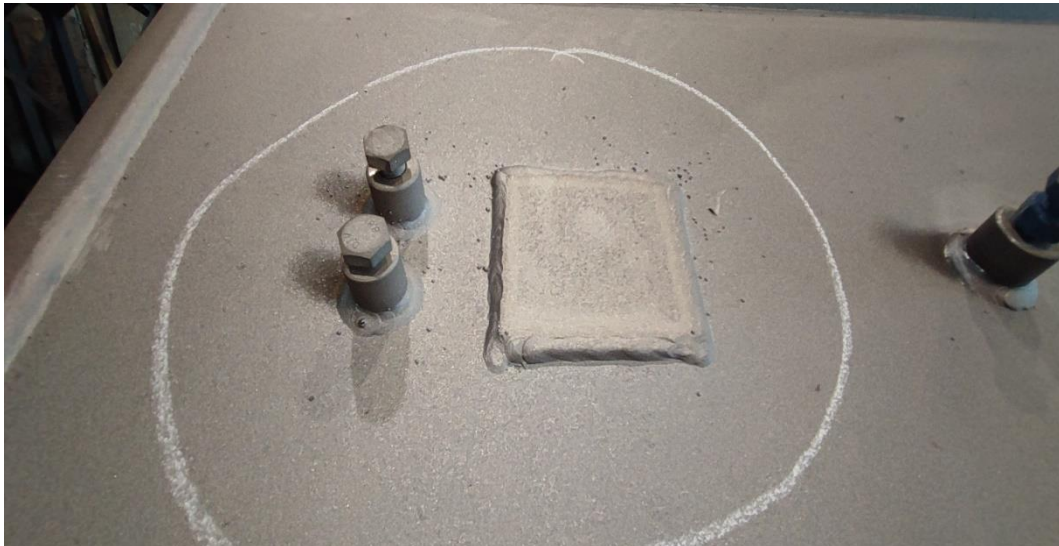
### 7.3. Metode ispitivanja bez razaranja primijenjene na zavarene spojeve

Kod zavarenih spojeva koriste se tri vrste kontrole u proizvodnji kotlova, a to su: vizualna kontrola, penetrantska kontrola i tlačno ispitivanje.

Vizualna kontrola zavarenih spojeva se primjenjuje kada je zavareni spoj površinski pripremljen, odnosno kada je prošao proces pjeskarenja ili sačmarenja. Pjeskarenje i sačmarenje su postupci mehaničkog čišćenja i obrade površina metalnih i drugih materijala pomoću abrazivnih čestica. Oba postupka koriste se za uklanjanje nečistoća, korozije, starih premaza, te za pripremu površina za daljnju obradu, poput bojanja.

Zbog ovakvog grubog postupka prema materijalu, zavareni spoj nakon pjeskarenja ili sačmarenja može dobiti pukotine ili rupice na sebi, te je zato najbolje primijeniti vizualnu kontrolu nakon toga procesa.

**Slika 25.** Vizualna kontrola kotla nakon sačmarenja



Izvor: Arhiva autora

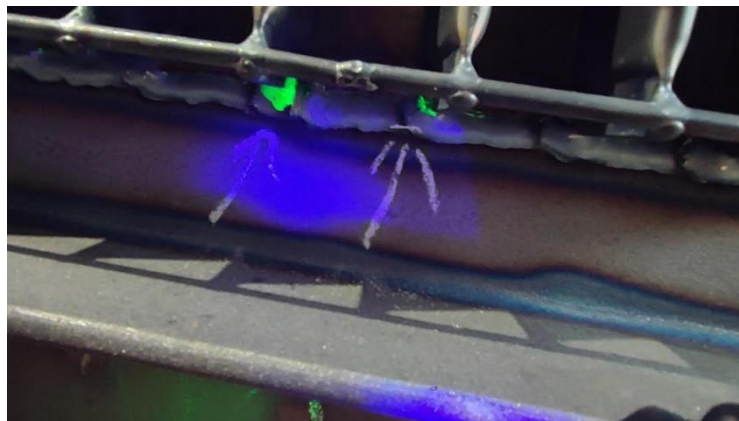
PT kontrola je najčešća pri izradi transformatorskih kotlova. Za lakšu provjeru indikacija koristi se fluorescentni penetrant. Ona se primjenjuje na sve zavare koji imaju doticaj s uljem. Ova metoda se mora primijeniti vrlo pažljivo i precizno, jer može doći do jakih sitnih i neprimjetnih indikacija puštanja penetranta. Nakon zavarivanja unutarnjeg dijela kotla, površina se mora dobro očistiti od nečistoća kako ne bi smetala penetrantu tijekom penetriranja. Penetrant se primjenjuje na vanjskom dijelu kotla, te se prema određenom standardu mora čekati vrijeme penetriranja ( od 8-12h ). Nakon što je vrijeme penetriranja prošlo, osoba koja ima certifikat za ovu vrstu kontrole, dolazi sa UV-lampom i gleda sve zavarene spojeve i indikacije koje pokazuje. Ukoliko dođe do indikacije propuštanja poduzimaju se određene mjere popravka, te se ispitani komad opet ispituje.

**Slika 26.** Mazanje kotla sa fluorescentnim penetrantom



Izvor: Arhiva autora

**Slika 27.** Indikacija puštanja penetranta



Izvor: Arhiva autora

Tlačno ispitivanje kotla je postupak kojim se provjerava čvrstoća i nepropusnost kotla. Ovaj postupak osigurava da kotao može sigurno podnijeti radne uvjete bez rizika od propuštanja ili pucanja. Samo tlačno ispitivanje ima određene postupke koje se treba pridržavati.

Prvi korak je priprema kotla. Kotao se mora temeljito čistiti kako bi se uklonile sve nečistoće koje bi mogle utjecati na rezultate ispitivanja. Zatim, nakon čišćenja, certificirana osoba za

vizualnu inspekciju pregledava sve zavarene spojeve i cijevi kako bi se osiguralo da nema očitih oštećenja ili nepravilnosti

Drugi korak je priprema i postavljanje opreme. Jedan on najvećih nedostataka ovog ispitivanja je utrošeno vrijeme na pripremu. Uglavnom, sve rupe i cijevi koje se nalaze na kotlu, potrebno je ugraditi brtvu te ih zatvoriti. Zatim se ugrađuje precizan manometar na kotao kako bi se pratila razina tlaka tijekom ispitivanja.

**Slika 28.** Zatvaranje kotla i postavljanje manometra



Izvor: Arhiva autora

Nakon pripreme i postavljanja opreme dolazi treći korak a to je povećavanje tlaka i zadržavanje tlaka. Tlak se postupno povećava do razine ispitnog tlaka, najčešća razina varira od 0,4 do 0,8 bar, ovisno o konstrukciji i veličini ispitnog kotla. Tijekom povećanja tlaka pažljivo se prati manometar i provjerava se stabilnost tlaka. Tlak se održava na ispitnom tlaku određeno vrijeme, obično 10-60 minuta, opet zavisno o veličini i konstrukciji kotla.

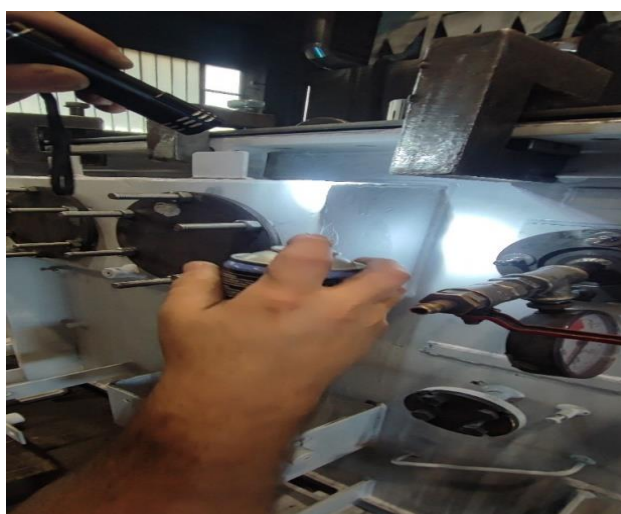
**Slika 29.** Držanje određenog tlaka u kotlu



Izvor: Arhiva autora

Posljedni, odnosno najvažniji korak je ispitivanje i vizualna inspekcija kotla pri zadržavanju određenog tlaka. Ispitivanje se vrši tako da se sa sprejom prolazi prema svim željenim zavarenim spojevima. Tijekom ispitivanja treba biti pažljiv da se ni u kojem slučaju ne bi preskočili zavari koji imaju doticaj s uljem. Nakon ispitivanja provjerava se cijela površina kotla, posebno zavari i spojevi. Ukoliko dođe do utvrđivanja da zavareni spoj propušta poduzimaju se mjere za popravak, te se kotao opet ispituje kako bi se utvrdila nepropusnost zavara.

**Slika 30.** Vizualni pregled kotla pod tlakom



Izvor: Arhiva autora

**Slika 31.** Propuštanje kotla tijekom tlačnog ispitivanja



Izvor: Arhiva autora

#### **7.4. Identifikacija i rješavanje nedostataka u zavarenim spojevima**

Iako su trendovi u proizvodnji zavarivanjem takvi da se kvaliteta više ne dovodi u pitanje te se uglavnom fokusira na rokove i cijenu, nesuglasice vezane uz pojavu određenih nepravilnosti i pogrešaka, kao i njihova tumačenja i utjecaj, i dalje predstavljaju značajan problem. Jasno je da je zavarivanje, zahvaljujući razvoju opreme, dodatnih i osnovnih materijala te uspostavi sustava osiguranja kvalitete, dostiglo zavidnu razinu. Ipak, ne smije se isključiti mogućnost pogrešaka uzrokovanih temeljitim nerazumijevanjem ili grubim propustima u kvaliteti osnovnog ili dodatnog materijala.

Pogreške u zavarenom spoju dijele se na :

- vidljive, tj. one koje se mogu otkriti, raspoznati, definirati i ocijeniti vizualnim pregledom ili nekom od metoda nerazornih ispitivanja.
- nevidljive – latentne, koje se ovim metodama ne mogu otkriti, ali znatno utječu na svojstva zavarenog spoja, a posljedično i na sposobnost konstrukcije u ispunjenju namjene. Zanimljiv primjer latentnih pogrešaka je fenomen „riblje oči“ koji je povezan s postojanjem vodika u metalu zavara.

U najgorem slučaju pogreške, nažalost, mogu biti otkrivene otkazivanjem ili havarijom proizvoda. Svaki proizvod treba ispunjavati tri bitna uvjeta, a to su: trajnost, pouzdanost i sigurnost.

Prema međunarodnoj klasifikaciji, pogreške u zavarenom spoju pri zavarivanju taljenjem svrstane su u šest osnovnih skupina prema normi HRN EN ISO 6520-1:2008, a to su :

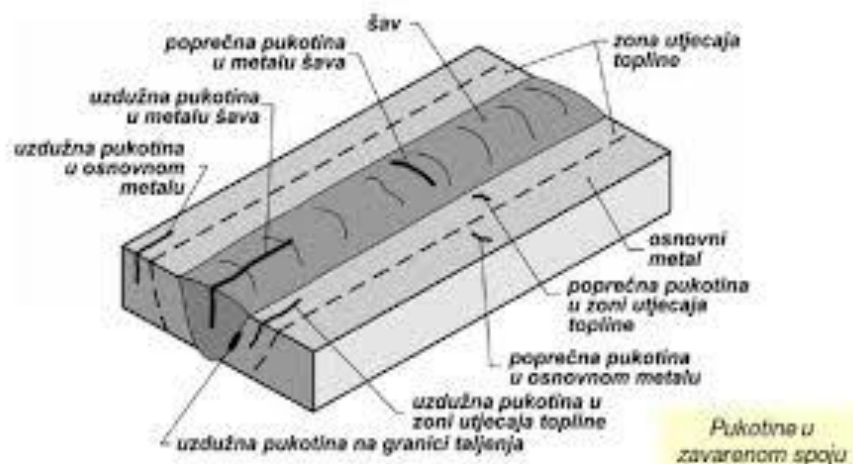
1. 100 pukotine
2. 200 šupljine i poroznost
3. 300 čvrsti uključci
4. 400 nepotpuno spajanje i provarivanje
5. 500 nepravilni oblik i dimenzije
6. 600 ostale nepravilnosti

Takvom klasifikacijom osnovne vrste nepravilnosti svrstane su u skupine koje su karakteristične po obliku, ali i mehanizmu nastanka te je osim identifikacije na ovaj način olakšana ocjena i definiranje mjerila prihvatljivosti.

Pukotine se smatraju najopasnijim pogreškama u zavarenom spoju i u pravilu nisu dopuštene zbog njihove sklonosti širenju te složenosti predviđanja njihovog rasta, što ovisi o karakteristikama pukotine. Mehanizmi nastanka pukotina su raznovrsni i, u određenim situacijama, izuzetno složeni, što čini proučavanje pukotina i dalje ključnim područjem interesa u istraživačkoj zajednici.

S obzirom na kompleksan spektar mehanizama nastanka pukotina, one se dijele na tople i hladne pukotine, koje su po učestalosti najčešće u zavarivačkoj praksi. Tople pukotine nastaju pri visokim temperaturama tijekom hlađenja taline do čvrstog stanja. Prostiru se duž granica zrna materijala, najčešće po dužini u središtu zavara, ali moguće su i u zoni utjecaja topline. Glavni uzrok nastanka toplih pukotina je gubitak sposobnosti metala zavara da izdrži naprezanja izazvana skupljanjem tijekom posljednje faze skrućivanja na visokim temperaturama. Hladne pukotine, s druge strane, nastaju nakon zavarivanja, pri temperaturama nižim od 300°C. Mogu se pojaviti nekoliko sati nakon zavarivanja, zbog čega je u praksi uobičajeno čekanje od 24 do 48 sati prije provođenja ispitivanja bez razaranja. Hladne pukotine se najčešće pojavljuju kod zavarivanja čelika povišene i visoke čvrstoće, posebno kod materijala većih debljina.

Slika 32. Vrste pukotina u zavarenom spoju



Izvor: <https://repositorij.unipu.hr/islandora/object/unipu%3A6294/datastream/PDF/view>  
(pristup 02.07.2024.)

Šupljine su prostori ispunjeni stlačenim plinom unutar metala zavara. Poroznost zavara objašnjava se činjenicom da se topivost plinova u rastaljenom metalu povećava. Vodik i dušik se izravno rastapaju u metalu, dok se kisik veže s ugljikom. Tokom hlađenja taline, plinovi naglo izlaze iz metala u obliku mjehurića. Ako je brzina oslobađanja plinova manja od brzine skrućivanja metala, plinovi ostaju zarobljeni u zavaru, što dovodi do poroznosti.

Neki od tipičnih primjera šupljine su :

- plinski uključci
- plinski mjehurić (pora)
- plinski mjehurići (poroznost)
- gnijezdo plinskih mjehurića



**Slika 33.** Šupljine na zavaru od kotla



Izvor: Arhiva autora

Čvrsti uključci mogu biti nemetali, poput troske i prašine, ili metali, kao što su volfram ili bakar kod zavarivanja na bakrenoj podlozi. Najčešće nastaju zbog nedovoljnog čišćenja između slojeva zavara. Troska se ponekad teško uklanja, naročito u dubokim žljebovima i oštrim uglovima. Neiskusni ili nedovoljno temeljit zavarivač često pokušava takva mjesta pretaliti primjenom pojačane struje, no to obično ne uspijeva, te se problem rješava brušenjem.

Općenito, nemetalni uključci, kao i uključci stranih metala, smanjuju čvrstoću zavarenog spoja zbog nehomogenosti i smanjenja presjeka materijala zavara. Osim toga, na tim mjestima dolazi do povećanih koncentracija naprezanja u zavaru. Utjecaj na čvrstoću zavarenog spoja ovisi o količini, obliku i veličini uključaka.

**Slika 34.** Čvrsti uključak na transformatorskom kotlu



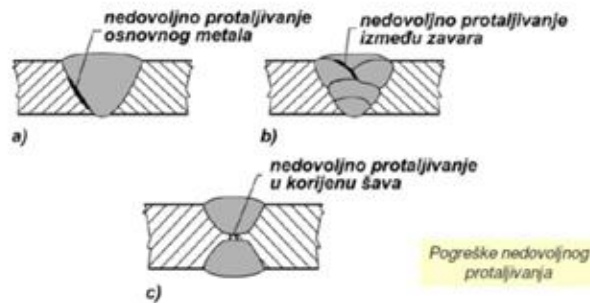
Izvor: Arhiva autora

Naljepljivanje je pogreška koja nastaje zbog nepostojanja čvrste strukturne veze u zavarenom spoju ili navaru. Kod zavarivanja taljenjem dolazi do „nalijeganja“ taline dodatnog materijala na „hladnu“ nepretaljenu površinu spoja ili prethodnog sloja zavara. Ovo se također može dogoditi kod navarivanja. Na takvim mjestima izostaje čvrsta strukturna veza u zavarenom spoju.

Geometrijski, ove pogreške su najbliže pukotinama i smanjuju čvrstoću zavarenog spoja, a mogu predstavljati prolaznu točku loma u uvjetima iskorištavanja. Pogreške naljepljivanja u zavarenom spoju obično nisu dopuštene, iako se u izuzetnim slučajevima mogu prihvatiti na manje opterećenim konstrukcijama.

Nepotpuni provar odnosi se na nedovoljno protaljivanje po cijelom presjeku zavarenog spoja, odnosno neprovarivanje korijena zavara. Može biti vanjska, vidljiva pogreška, ali također može biti i pogreška unutar zavara koja se otkriva prozračivanjem ili prozvučivanjem. Pogreške nedovoljnog provara smanjuju čvrstoću zavarenog spoja i mogu biti početna točka loma u eksploatacijskim uvjetima.

**Slika 35.** Pogreške nedovoljnog protaljivanja



Izvor: <https://repositorij.unipu.hr/islandora/object/unipu%3A6294/datastream/PDF/view>  
(pristup 03.07.2024.)

Pogreškom oblika zavara smatra se svako odstupanje od zadanog oblika zavara. Naširoko je poznato da su pogreške oblika zavara nisu samo estetske prirode, već je njihov utjecaj u smanjenju nosivosti zavarenog spoja vrlo značajan, naročito kod dinamički opterećenih konstrukcija. Sve ove pogreške dobro su vidljive i mjerljive vizualnim pregledom.

Neki primjeri pogreške oblika zavara su :

- nepravilan oblik zavara
- zajedni uza zavara
- zajedni između prolaza
- mjestimični isprekidani zajed
- preveliko nadvišenje zavara

**Slika 36.** Nepravilan oblik zavara



Izvor: Arhiva autora

Ostale pogreške su sve pogreške koje se ne mogu svrstati u već navedene. To su uglavnom oštećenja površine materijala pri zavarivanju ili u pripremi zavarivanja, kao:

- oštećenje električnim lukom
- onečišćenje kapljicama metala
- mehanička oštećenja površine osnovnog materijala
- podbrušenje [15]

## **8. ISO STANDARDI**

ISO standardi su međunarodni standardi koje razvija i objavljuje Međunarodna organizacija za standardizaciju (ISO). Ovi standardi postavljaju specifikacije i kriterije za proizvode, usluge i sisteme kako bi se osigurala njihova kvaliteta, sigurnost i efikasnost. ISO je zapravo nevladina međunarodna organizacija sa članstvom od 163 nacionalnih tijela za standardizaciju. Osnovana je 1947. godine, a sjedište joj je u Ženevi, Švicarska.

ISO objavljuje konstantno praćenje međunarodnih trendova i ima širok spektar ovlasti. Neki od najpoznatijih ISO standarda uključuju :

- ISO 9001 : standard za sustav upravljanja kvalitetom
- ISO 14001 : standard za sustav upravljanja okolišem
- ISO 45001 : standard za sustav upravljanja zdravljem i zaštitom na radu
- ISO 27001 : standard za sustav upravljanja informacijskom sigurnosti
- ISO 37001 : standard za sustav upravljanja suzbijanjem podmićivanja
- ISO 50001 : standard za sustav upravljanja energijom.

ISO sustavi korišteni kod proizvodnje transformatorskih kotlova su :

1. ISO 9001:2015
2. ISO 14001:2015

ISO 9001 je međunarodni standard za sustave upravljanja kvalitetom (Quality Management Systems – QMS), koji je razvijen od strane Međunarodne organizacije za standardizaciju (International Organization for Standardization – ISO).

Ovaj standard specificira zahtjeve za QMS koje organizacija mora ispuniti kako bi dosljedno isporučivala proizvode i usluge koji zadovoljavaju potrebe kupaca i zakonske zahtjeve.

Menadžment ili upravljanje kvalitetom je ključan korak u povećanju poslovne učinkovitosti. Ovaj pristup nije ograničen veličinom poduzeća, jednako je važan za sva poduzeća.

Jedan od temelja QMS-a je filozofija kontinuiranog poboljšanja. Tvrtke koje uspješno primjenjuju QMS stalno teže usvojiti nove elemente kvalitete kako bi zadržale prednost nad konkurencijom. To uključuje uvođenje novih tehnologija, metoda i alata koji poboljšavaju kvalitetu proizvoda ili usluga.

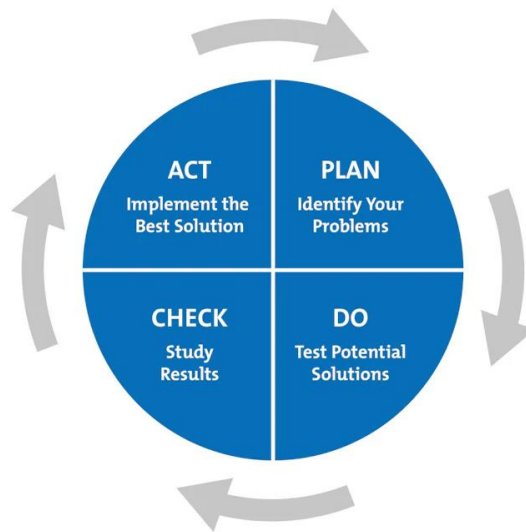
ISO 9001 pruža okvir za upravljanje kvalitetom u organizaciji i može se primijeniti na bilo koju organizaciju. Ključne karakteristike su :

1. procesni pristup – organizacije trebaju upravljati i kontrolirati svoje procese kako bi osigurale dosljednu kvalitetu proizvoda i usluga. Fokus je na razumijevanju i zadovoljavanju zahtjeva kupaca, procjenjivanju rizika i prilika.
2. temeljno razmišljanje – naglašava važnost identifikacije i upravljanje rizicima i prilikama koje mogu utjecati na sposobnost organizacije da postigne ciljeve kvalitete. Ovaj pristup omogućava proaktivno djelovanje kako bi se spriječili neželjeni rezultati i iskoristile prilike za poboljšanje.
3. kontekst organizacije – zahtijeva da organizacija razumije svoj kontekst, uključivajući unutarnje i vanjske čimbenike koji mogu utjecati na njenu sposobnost da postigne ciljeve kvalitete. To uključuje identifikaciju dionika i razumijevanje njihovih zahtjeva i očekivanja.
4. vodstvo – naglašava važnost vodstva i angažmana višeg menadžmenta u uspostavi i održavanju QMS-a.
5. dokumentacija – zahtijeva dokumentiranje određenih procesa, politika i procedura koje su ključne za QMS. Pomaže osigurati dosljednost i omogućava organizaciji da prati i mjeri performanse svojih procesa.
6. Plan-Do-Check-Act (PDCA) ciklus
  - plan – utvrđivanje ciljeva i procesa potrebnih za ispunjenje zahtjeva kupaca i organizacije
  - do – implementacija planiranih procesa
  - check – praćenje i mjerenje procesa i proizvoda u odnosu na ciljeve i zahtjeve
  - act – poduzimanje radnji za kontinuirano poboljšanje performansi procesa.

ISO 9001 je sveobuhvatan standard za upravljanje kvalitetom koji pruža okvir za osiguranje dosljedne kvalitete proizvoda i usluga, povećanje učinkovitosti, smanjenje rizika i poboljšanje zadovoljstva kupaca. Implementacija ISO 9001 zahtijeva predanost i angažman svih razina organizacije, ali donosi značajne dugoročne koristi koje mogu poboljšati konkurentski položaj i osigurati održivi rast.

**Slika 37.** PDCA ciklus

Figure 1: The Plan-Do-Check-Act Cycle



Izvor: <https://www.mindtools.com/as215i1/pdca-plan-do-check-act> (pristup 04.07.2024.)

ISO 14001 je međunarodni standard za sustave upravljanja okolišem (Environmental Management Systems -EMS), razvijen od strane Međunarodne organizacije za standardizaciju. Standard pruža okvir koji organizacijama omogućuje da identificiraju, kontroliraju i smanjuju utjecaj svojih aktivnosti na okoliš, kao i da se pridržavaju relevantnih zakonskih i regulatornih zahtjeva.

ISO 14001 zahtijeva da organizacije uspostave sustavni pristup upravljanju okolišem, što uključuje :

- razvijanje i implementaciju politike zaštite okoliša
- poboljšanje sustava upravljanja okolišem
- uspostava procesa za postizanje ciljeva i zadataka

- praćenje i mjerenje napretka prema zadanim ciljevima

Prvi korak u implementaciji ISO 14001 je procjena trenutnog stanja upravljanja okolišem u organizaciji. To uključuje identificiranje svih aspekata okoliša povezanih s aktivnostima, proizvodima i uslugama organizacije, te procjenu njihovog utjecaja na okoliš. Isto kao ISO 9001, ISO 14001 koristi PDCA (Plan-Do-Check-Act) ciklus za kontinuirano poboljšanje.

Organizacija treba uspostaviti procese za praćenje i mjerenje ključnih karakteristika svojih operacija koje mogu imati značajan utjecaj na okoliš. U to se uključuje prikupljanje i analiza podataka kako bi se procijenila sukladnost s politikom zaštite okoliša.

ISO 14001 pruža okvir za poboljšanje okolišnih performansi, smanjenje negativnih utjecaja na okoliš, povećanje usklađenosti s propisima i postizanje poslovne održivosti. [16]

## **9. PRIMJENA METODA ISPITIVANJA BEZ RAZARANJA U KONTROLI ZAVARENIH SPOJEVA KOD TRANSFORMATORSKIH KOTLOVA**

Praktična primjena ispitivanja odvijala se u tvrtki „METAL DEKOR d.o.o.“, te se za ispitani objekt uzeo mali transformatorski kotao, kao što je vidljivo na slici 38.

**Slika 38.** Mali transformatorski kotao, projekt DEWA



Izvor: Arhiva autora

Na ispitanom objektu provodit će se tri metode ispitivanja bez razaranja, a to su :

- vizualno ispitivanje
- penetrantsko ispitivanje
- tlačno ispitivanje

Prva i osnovna metoda ispitivanja je penetrantska kontrola. Ova metoda koristi se prva pošto je potrebno ispitati unutarnji var transformatorskog kotla. Prvi korak kod ispitivanja je taj da se ispitan var očisti od svih nečistoća. Zatim se uzima penetrant koji je prikazan na slici 39. te se lagano primjenjuje na željeni ispitan var kotla, slika 40.

**Slika 39.** Vrsta korištenog penetranta



Izvor: Arhiva autora



**Slika 40.** Primjenjivanje penetranta na zavar kotla



Izvor: Arhiva autora

Čekanje prodiranja penetranta ovisi o samom penetrantu te o ispitanom zavaru. Za ovo ispitivanje odredilo se vrijeme čekanja od 12h za prodiranje penetranta. Pri isteku zadanog vremena uzima se UV lampa te pažljivo započinje ispitivanje kotla.

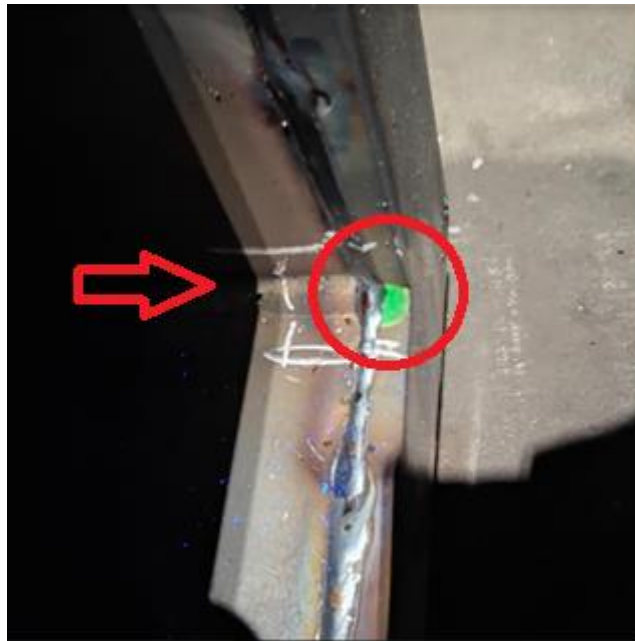
**Slika 41.** UV lampa za ispitivanje kotla



Izvor: Arhiva autora

Tijekom ispitivanja ustanovilo se da kotao pušta na 3 mjesta, slika 42, 43 i 44.

**Slika 42.** Prvo propuštanje kotla



Izvor: Arhiva autora

**Slika 43.** Drugo propuštanje kotla



Izvor: Arhiva autora

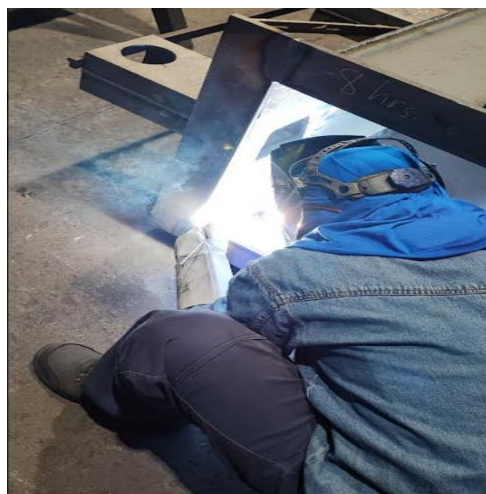
**Slika 44.** Treće propuštanje kotla



Izvor: Arhiva autora

Nakon utvrđivanja propuštanja vara poduzima se sljedeći korak, a to je popravak neispravnih varova. Za njihov popravak koristi se TIG postupak, zbog boljeg taljenja materijala. TIG varioc pregledava mjesta na kojim varovi propuštaju te zatim izvršava popravak istog, slika 45 i 46.

**Slika 45.** Popravljanje propuštanja TIG-om



Izvor: Arhiva autora

**Slika 46.** Izgled zavora nakon popravka TIG-om



Izvor: Arhiva autora

Nakon popravka, zavar koji je popravljen malo se uredi (pobrusi, počisti) te sam kotao može ići u daljnju fazu proizvodnje.

Druga metoda ispitivanja je vizualno ispitivanje. Što se tiče vizualnog ispitivanja, ona se većinom odvija nakon penetrantskog ispitivanja.

U proizvodnji transformatorskih kotlova, pri samom završetku procesa proizvodnje kotla, kotao se šalje na sačmarenje ili pjeskarenje, te nakon tog istog procesa kotao se vizualno pregledava. Kod vizualnog pregleda ustanovljene greške su prikazane u sljedećim slikama.

**Slika 47.** Nedostatak zavora na kotlu



Izvor: Arhiva autora

**Slika 48.** Poroznost na pobrušenom zavaru



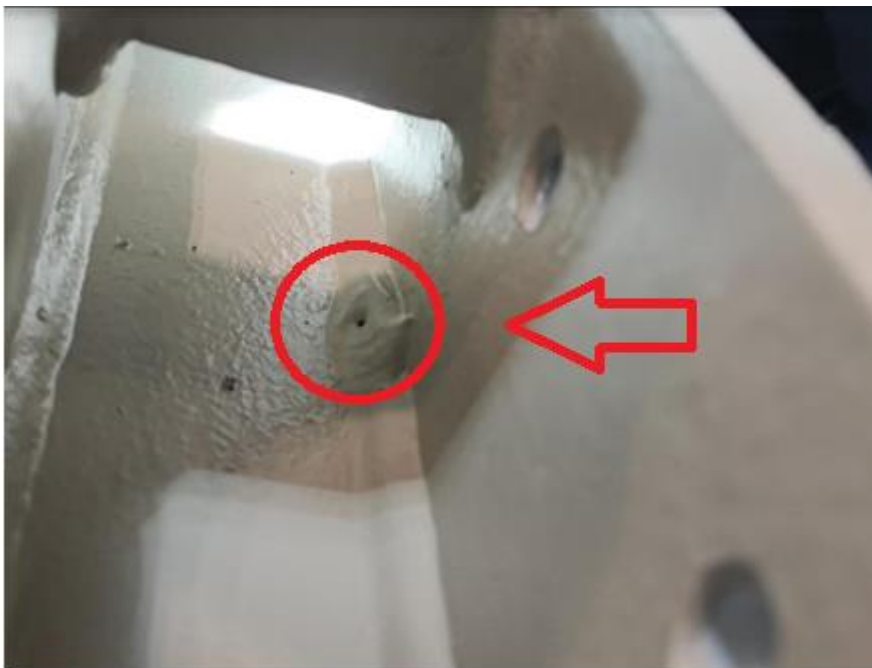
Izvor: Arhiva autora

**Slika 49.** Oštećen materijal na kotlu



Izvor: Arhiva autora

**Slika 50.** Rupa na mokrom zavaru



Izvor: Arhiva autora

Treća metoda ispitivanja je tlačno ispitivanje. Tlačno ispitivanje se većinom ne primjenjuje, pogotovo kod većih transformatorskih kotlova. Za ovaj primjer uzeo se isti kotao kao i kod penetrantskog ispitivanja. Ovaj postupak se sastoji od nekoliko procesa koja će se ukratko objasniti.

Prvi proces kod tlačnog ispitivanja je priprema samog kotla. Kod same pripreme misli se na čišćenje od metalne prašine te priprema brtvi potrebni za zatvaranje kotla. Drugi dio je zatvaranje svih otvora na kotlu pomoću pripremljenih brtvi i prirubnica, te postavljanje manometra, kao što je vidljivo na slikama 51, 52 i 53.

**Slika 51.** Zatvaranje rupa na kotlu



Izvor: Arhiva autora

**Slika 52.** Zatvaranje okvira kotla



Izvor: Arhiva autora

**Slika 53.** Postavljanje manometra



Izvor: Arhiva autora

Zatim se kotao stavlja pod tlak od 0,5 – 0,8 bara, te se tako ostavlja na 10 minuta.



Nakon toga uzima se sprej za ispitivanje, slika 54, te se sa sprejom ispituje cijeli kotao. Pri završetku ispitivanja kotao se ostavlja na par minuta, ukoliko kotao ima neko vrlo malo propuštanje, mjehurićima (koji se vide pri propuštanju) treba jedno vrijeme da se nakupe.

**Slika 54.** Sprej za tlačno ispitivanje



Izvor: Arhiva autora

**Slika 55.** Ispitivanje sprejom



Izvor: Arhiva autora

Sljedeći korak je pregledavanje kotla vizualno, i uočavanje propuštanja. Ukoliko kotao ima propuštanje pokazat će se nakupina mjehurića. Na ovom kotlu utvrđena su 2 propuštanja, slika 56 i 57.

**Slika 56.** Prvo propuštanje kotla



Izvor: Arhiva autora

**Slika 57.** Drugo propuštanje kotla



Izvor: Arhiva autora

Ukoliko su se utvrdila propuštanja, iz samog kotla se pušta zrak, te zatim sa TIG strojem se uklanjaju propuštanja, slika 58. Nakon popravka popravljene var se mora malo urediti te se sam kotao opet ispituje.

**Slika 58.** Popravak propuštanja TIG-om



Izvor: Arhiva autora

Nakon što se utvrdilo da kotao nema više propuštanja možemo ga slati na daljnji proces proizvodnje.

## 10. ZAKLJUČAK

Kontrola materijala i zavarenih spojeva metodom ispitivanja bez razaranja igra ključnu ulogu u postizanju visoke kvalitete i pouzdanosti transformatorskih kotlova. Integracija NDT metoda u proizvodni proces omogućava učinkovitu identifikaciju i korekciju potencijalnih problema, doprinosi sigurnosti i ekonomičnosti te osigurava usklađenost s industrijskim standardima.

Reklamacije mogu značajno povećati ukupne troškove proizvodnje i imati negativne posljedice na reputaciju proizvođača. Nezadovoljni kupci mogu izgubiti povjerenje u proizvođača, što može smanjiti prodaju i dovesti do gubitka tržišnog udjela. Dugoročni utjecaj na reputaciju može biti značajan, pogotovo u industrijama gdje je povjerenje klijenata ključno. U nekim slučajevima, ako kvar nije moguće popraviti na terenu, kotao se mora vratiti u tvornicu, što dodatno povećava troškove.

Ukoliko se reklamacija odnosi na serijski problem, to može dovesti do zastoja u proizvodnji dok se problem ne riješi. Takvi zastoji mogu izazvati kašnjenja u isporuci, što može dodatno povećati troškove kroz penale ili gubitak budućih narudžbi. Sami troškovi reklamacija mogu biti iznimno veliki, cijene mogu varirati od par stotina eura do par tisuća eura.

Pravovremena identifikacija nedostataka omogućava poduzimanje korektivnih mjera prije nego što komponente budu ugrađene u finalni proizvod, čime se smanjuje rizik od kvara tijekom operativnog vijeka kotlova. Kontinuirano praćenje i kontrola kvalitete materijala i zavarenih spojeva rezultiraju boljim proizvodima koji zadovoljavaju visoke standarde industrije i očekivanja kupaca.

## 11. Izjava o autorstvu

MEDIMURSKO VELEUČILIŠTE U ČAKOVCU

Bana Josipa Jelačića 22/a, Čakovec

### IZJAVA O AUTORSTVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, internetskih i drugih izvora) bez pravilnog citiranja. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom i nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, KRISTIJAN STRAHVA (ime i

prezime studenta) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću,

izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog rada pod naslovom

KONTROLA MATERIJALA I ZAVARENIH SPOJEVA METODOM

ISPITIVANJA BEZ RAZARANJA U PROIZVODNJI

TRANSFORMATORSKIH KOTLOVA

te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi

tuđih radova.

Student/ica:

Strahva  
(vlastoručni potpis)

## 12. Literatura

- [1] [http://ss-ios-pu.skole.hr/upload/ss-ios-pu/images/static3/883/attachment/ES\\_2-\\_1-Jednofazni\\_transformator.pdf](http://ss-ios-pu.skole.hr/upload/ss-ios-pu/images/static3/883/attachment/ES_2-_1-Jednofazni_transformator.pdf) (Datum pristupa: 20.06.2024.)
- [2] <https://e-elektro.blogspot.com/2012/08/povijesni-razvoj-transformatora.html> (Datum pristupa: 20.06.2024.)
- [3] <https://zir.nsk.hr/islandora/object/riteh%3A3757/datastream/PDF/view> (Datum pristupa: 22.06.2024.)
- [4] <https://core.ac.uk/download/pdf/198146248.pdf> (Datum pristupa: 23.06.2024.)
- [5] <https://zir.nsk.hr/islandora/object/unin%3A1174/datastream/PDF/view> (Datum pristupa: 23.06.2024.)
- [6] <https://repositorij.vuka.hr/en/islandora/object/vuka%3A1723/datastream/PDF/view> (Datum pristupa: 24.06.2024.)
- [7] <https://italfaber.it/bs/s275jr-karakteristike%2C-svojstva-i-upotreba-%C4%8Delika/> (Datum pristupa: 24.06.2024.)
- [8] <https://repositorij.vuka.hr/en/islandora/object/vuka%3A1723/datastream/PDF/view> (Datum pristupa: 24.06.2024.)
- [9] <https://hr.coldrolledsteels.com/alloy-steel-plate/s355j2-grade-steel.html> (Datum pristupa: 25.06.2024.)
- [10] [https://edu.asoo.hr/wp-content/uploads/2024/03/152\\_Kontrola-kvalitete\\_DORADA-1-FINAL.pdf](https://edu.asoo.hr/wp-content/uploads/2024/03/152_Kontrola-kvalitete_DORADA-1-FINAL.pdf) (Datum pristupa: 25.06.2024.)
- [11] <https://core.ac.uk/download/pdf/198146248.pdf> (Datum pristupa: 26.06.2024.)
- [12] [https://www.pfri.uniri.hr/web/dokumenti/uploads\\_nastava/20180302\\_095155\\_bernecic\\_ZAVARIVANJE.2015.pdf](https://www.pfri.uniri.hr/web/dokumenti/uploads_nastava/20180302_095155_bernecic_ZAVARIVANJE.2015.pdf) (Datum pristupa: 27.06.2024.)
- [13] <https://repository.ffri.uniri.hr/islandora/object/ffri%3A826/datastream/PDF/view> (Datum pristupa: 28.06.2024.)
- [14] <https://tsi.webador.com/tois-tig-postupak-zavarivanja> (Datum pristupa: 29.06.2024.)
- [15] <https://repositorij.unipu.hr/islandora/object/unipu%3A6294/datastream/PDF/view> (Datum pristupa: 29.06.2024.)
- [16] <https://repositorij.unipu.hr/islandora/object/unipu%3A3877/datastream/PDF/view%20> (Datum pristupa: 02.07.2024.)

## 13. Popis ilustracija

<b>Slika 1.</b> Transformatorski kotao u pogonskoj jedinici .....	2
<b>Slika 2.</b> Dijelovi transformatorskog kotla .....	4
<b>Slika 3.</b> Izgled prvog transformatora .....	5
<b>Slika 4.</b> Izgled namotaja transformatora .....	6
<b>Slika 5.</b> NDT metoda .....	8
<b>Slika 6.</b> Oprema za vizualnu kontrolu .....	9
<b>Slika 7.</b> Vizualna kontrola objekta .....	10
<b>Slika 8.</b> Ultrazvučna kontrola .....	11
<b>Slika 9.</b> Princip rada ultrazvučne metode .....	11
<b>Slika 10.</b> Ispitivanje zavora magnetom .....	12
<b>Slika 11.</b> Princip rada radiografskog ispitivanja .....	13
<b>Slika 12.</b> Uređaj za RT ispitivanje .....	14
<b>Slika 13.</b> Proces ispitivanja penetrantom .....	15
<b>Slika 14.</b> PT kontrola transformatorskog kotla .....	17
<b>Slika 15.</b> Primjena razvijaača na penetrant .....	18
<b>Slika 16.</b> Mehanička svojstva S275JR materijala .....	21
<b>Slika 17.</b> Dimenzijska kontrola materijala .....	24
<b>Slika 18.</b> Deformacija materijala tijekom procesne kontrole .....	25
<b>Slika 19.</b> Vizualna kontrola materijala .....	26
<b>Slika 20.</b> Zavareni spoj .....	27
<b>Slika 21.</b> MIG zavarivanje .....	28
<b>Slika 22.</b> Postupak MIG - MAG zavarivanja .....	29
<b>Slika 23.</b> Dijelovi aparata za zavarivanje (MIG ili MAG) .....	31
<b>Slika 24.</b> TIG postupak .....	32
<b>Slika 25.</b> Vizualna kontrola kotla nakon sačmarenja .....	33
<b>Slika 26.</b> Mazanje kotla sa fluorescentnim penetrantom .....	34
<b>Slika 27.</b> Indikacija puštanja penetranta .....	34
<b>Slika 28.</b> Zatvaranje kotla i postavljanje manometra .....	35
<b>Slika 29.</b> Držanje određenog tlaka u kotlu .....	36
<b>Slika 30.</b> Vizualni pregled kotla pod tlakom .....	36
<b>Slika 31.</b> Propuštanje kotla tijekom tlačnog ispitivanja .....	37

<b>Slika 32.</b> Vrste pukotina u zavarenom spoju .....	39
<b>Slika 33.</b> Šupljine na zavaru od kotla .....	40
<b>Slika 34.</b> Čvrsti ključak na transformatorskom kotlu .....	41
<b>Slika 35.</b> Pogreške nedovoljnog protaljivanja .....	42
<b>Slika 36.</b> Nepravilan oblik zavara.....	42
<b>Slika 37.</b> PDCA ciklus .....	45
<b>Slika 38.</b> Mali transformatorski kotao, projekt DEWA .....	46
<b>Slika 39.</b> Vrsta korištenog penetranta .....	47
<b>Slika 40.</b> Primjenjivanje penetranta na zavar kotla.....	48
<b>Slika 41.</b> UV lampa za ispitivanje kotla .....	48
<b>Slika 42.</b> Prvo propuštanje kotla .....	49
<b>Slika 43.</b> Drugo propuštanje kotla .....	49
<b>Slika 44.</b> Treće propuštanje kotla .....	50
<b>Slika 45.</b> Popravljanje propuštanja TIG-om .....	50
<b>Slika 46.</b> Izgled zavara nakon popravka TIG-om .....	51
<b>Slika 47.</b> Nedostatak zavara na kotlu .....	52
<b>Slika 48.</b> Poroznost na pobrušenom zavaru .....	52
<b>Slika 49.</b> Oštećen materijal na kotlu .....	53
<b>Slika 50.</b> Rupa na mokrom zavaru .....	53
<b>Slika 51.</b> Zatvaranje rupa na kotlu .....	54
<b>Slika 52.</b> Zatvaranje okvira kotla .....	55
<b>Slika 53.</b> Postavljanje manometra.....	55
<b>Slika 54.</b> Sprej za tlačno ispitivanje.....	56
<b>Slika 55.</b> Ispitivanje sprejom .....	56
<b>Slika 56.</b> Prvo propuštanje kotla .....	57
<b>Slika 57.</b> Drugo propuštanje kotla .....	57
<b>Slika 58.</b> Popravak propuštanja TIG-om .....	58



## 14. Popis tablica

<b>Tablica 1.</b> Mehanička svojstva S235JR materijala.....	20
<b>Tablica 2.</b> Kemijska svojstva S235JR materijala .....	20
<b>Tablica 3.</b> Kemijski sastav S355J2+N materijala.....	22
<b>Tablica 4.</b> Mehanička svojstva S355J2+N materijala .....	23