

# Utjecaj aluminijskih dijelova na pojavu vodika u mjernom transformatoru

---

Tarandek, Željko

Scientific master's theses / Magistarski rad

2011

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:163663>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-14**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **Utjecaj aluminijskih dijelova na pojavu vodika u mjernom transformatoru**

MAGISTARSKI RAD

Mentor:

Dr.sc. Ivan JURAGA, red.prof.

Željko TARANDEK, dipl.inž.

Zagreb, 2011.

## **PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU**

---

UDK: 669.71:621.314.224.8

Ključne riječi: aluminij, aluminijske legure, mjerni transformator, transformatorsko ulje, vodik, korozija aluminijskih legura, zavarivanje, poroznost, vakuumsko sušenje

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Strojarstvo

Institucija u kojoj je rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

Mentor rada: Dr. sc. Ivan Juraga, red. prof.

Broj stranica: 117

Broj slika: 48

Broj tablica: 12

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 53

Datum obrane:

Povjerenstvo: Dr. sc. Zdravko Schauperl, izv. prof.  
Dr. sc. Ivan Juraga, red. prof.  
Dr. sc. Davor Pavlić, KONČAR - Mjerni transformatori d.d., Zagreb

Institucija u kojoj je rad pohranjen: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb  
Nacionalna i sveučilišna knjižnica, Zagreb



Zagreb, 30.06.2010.

## Zadatak za magistarski rad

Kandidat: Željko Tarandek, dipl.ing. strojarstva

Naslov zadatka: **UTJECAJ ALUMINIJSKIH DIJELOVA NA POJAVU  
VODIKA U MJERNOM TRANSFORMATORU**

Sadržaj zadatka:

Proizvođači mjernih transformatora, s ciljem zadržavanja konkurentnosti svojih proizvoda, trebaju kontinuirano unaprijeđivati proizvode. Takvo unaprijeđenje provodi se sistematskim i kontinuiranim poboljšavanjem tehnoloških proizvodnih procesa i primjenom materijala koji udovoljavaju novim zahtjevima.

Jedan od zahtjeva koji je potrebno ispuniti, odnosi se na smanjenje udjela vodika među otopljenim plinovima u transformatorskom ulju mjernog transformatora. Postojanje povećanog udjela vodika u transformatorskom ulju uzrokuje smanjenje pouzdanosti rada i povećava vjerojatnost kvara.

Analizom tehnoloških operacija i faza, vezanih uz aluminijske dijelove ugrađene u mjerne transformatore, moguće je prepoznati uzrok nastanka vodika u transformatorskom ulju.

U izradi rada će se:

- izložiti pregled važnih karakteristika mjernog transformatora i zahtjevanih karakteristika,
- opisati metodu određivanja plinova iz transformatorskog ulja mjernog transformatora
- obraditi teme povezane sa mogućom pojavnošću vodika u aluminijskim dijelovima ugrađenim u mjerni transformator,
- prikazati teorijske mogućnosti nastanka vodika,
- provjeriti mogućnost primjene, međusobno neovisnih, analiza za identifikaciju nastanka vodika,
- u eksperimentalnom dijelu simulirati stvarne tehnološke uvjete kojima su izloženi aluminijski dijelovi transformatora te izvršiti i analizirati njihovo djelovanje na pojavu vodika,
- također obraditi i mogućnost indirektnog utjecaja određenih tehnoloških operacija na aluminijskim dijelovima na promjenu kemijske strukture drugih materijala, te uz analizu utjecaja tih materijala na pojavu povećanog udjela vodika, potvrditi ili opovrgnuti promjene strukture.

Zadatak zadan: 13. 07, 2010.

Rad predan:

Mentor:

Prof.dr.sc. Ivan Juraga

Predsjednik Odbora za  
poslijediplomske studije:

Prof.dr.sc. Tomislav Filetin



Voditelj smjera:

Prof.dr.sc. Slobodan Kralj

*Zahvaljujem mentoru dr. sc. Ivanu Juragi, red. prof. na savjetima i uputama tijekom izrade ovog rada.*

*Članovi povjerenstva, sa svojim primjedbama i savjetima, također su pomogli povećanju kvalitete ovog rada.*

*Djelatnicima Laboratorija za materijalografiju, posebno, dr.sc. Suzani Jakovljević zahvaljujem na pomoći i vremenu koje smo zajednički utrošili na brojne analize i selekciju dobivenih rezultata koji su rezultirali većom kvalitetom prikazanog istraživanja.*

*Zahvaljujem Borisu Bojaniću, dipl.ing. i Darku Folnoviću, dipl. ing. koji su nesebično odvojili znatni dio svog vremena i znanja i omogućili ispitivanje te ocjenjivanje teoretskih postavki ovog istraživanja u praksi i industriji. Zahvaljujem djelatnicima tvrtke "KONČAR – Mjerni transformatori" iz Zagreba koji su sudjelovali u pokusima vezanim za ovaj rad.*

*Na kraju, posebno se zahvaljujem svojoj obitelji i roditeljima na razumijevanju i cjelokupnoj potpori u trenucima izrade ovog rada.*

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	VII
POPIS TABLICA.....	IX
POPIS OZNAKA .....	X
PREDGOVOR .....	XI
SAŽETAK RADA.....	XII
KLJUČNE RIJEČI.....	XII
SUMMARY .....	XIII
KEYWORDS .....	XIII
<b>1. UVOD .....</b>	<b>1-1</b>
1.1 UVODNA RAZMATRANJA .....	1-1
1.2 PRAĆENJE UDJELA PLINOVA U TRANSFORMATORSKOM ULJU .....	1-2
1.3 RAZLOZI POVEZIVANJA PRIMJENE ALUMINIJSKIH KOMPONENATA SA POVEĆANOM POJAVNOŠĆU VODIKA .....	1-4
1.4 FIZIKALNO-KEMIJSKI UVJETI KARAKTERISTIČNI ZA PRIMJENJENE TEHNOLOŠKE OPERACIJE ILI FAZE .....	1-6
<b>2. MJERNI TRANSFORMATORI .....</b>	<b>2-1</b>
2.1 NAMJENA I OSNOVNA PODJELA .....	2-1
2.2 NAPONSKI MJERNI TRANSFORMATORI.....	2-2
2.3 STRUJNI MJERNI TRANSFORMATORI.....	2-4
2.3.1 Mjerni strujni transformator tipa AGU .....	2-7
2.3.1.1 Tehnološki proces, faze i operacije prilikom proizvodnje mjernog strujnog transformatora tipa AGU .....	2-10
2.4 IZOLACIJSKI MATERIJALI MJERNIH TRANSFORMATORA.....	2-11
<b>3. TRANSFORMATORSKO ULJE .....</b>	<b>3-1</b>
3.1 KARAKTERISTIKE I KEMIJSKI SASTAV TRANSFORMATORSKOG ULJA .....	3-1
3.2 ODREĐIVANJE PLINOVA IZ TRANSFORMATORSKOG ULJA .....	3-5
3.2.1 Vrsta i reprezentativnost uzoraka.....	3-5
3.2.2 Ekstrakcija plinova iz ulja .....	3-6
3.2.3 Analiza plinova iz ulja.....	3-7
3.2.4 Interpretacija rezultata ispitivanja.....	3-8
3.3 POSTUPAK UZORKOVANJA TRANSFORMATORSKOG ULJA.....	3-9
<b>4. ALUMINIJ I ALUMINIJSKE LEGURE .....</b>	<b>4-1</b>
4.1 PRIMJENA.....	4-1
4.2 ALUMINIJ .....	4-4
4.3 POSTUPAK PROIZVODNJE ALUMINIJA .....	4-6
4.4 PRERADA ALUMINIJA.....	4-10
4.5 TEHNIČKI ALUMINIJ .....	4-12
4.6 ALUMINIJSKE LEGURE .....	4-14
4.6.1 Svrha i osnovni mehanizmi legiranja .....	4-14
4.6.2 Lijeване legure .....	4-16
4.6.3 Gnječene legure .....	4-19

4.6.4 Označavanje aluminijskih legura .....	4-22
4.6.4.1 Komercijalne aluminijske legure .....	4-23
<b>5. SVOJSTVA ALUMINIJSKIH LEGURA POVEZANA S NASTANKOM VODIKA.....</b>	<b>5-1</b>
5.1 KOROZIJSKA SVOJSTVA ALUMINIJA I ALUMINIJSKIH LEGURA .....	5-1
5.1.1 Korozivna postojanost aluminijskih legura .....	5-1
5.1.2 Antikorozivna zaštita aluminijskih i aluminijskih legura.....	5-4
5.2 ZAVARIVANJE ALUMINIJA I ALUMINIJSKIH LEGURA .....	5-6
5.2.1 Zavarivački postupci .....	5-6
5.2.2 Greške kod zavarivanja .....	5-8
5.3 USPOREDNA ANALIZA KEMIJSKOG SASTAVA I STRUKTURE ALUMINIJSKIH LEGURA .....	5-9
<b>6. PROVEDBA POKUSA.....</b>	<b>6-1</b>
6.1 PLANIRANJE POKUSA .....	6-1
6.2 PRIPREMA I PROVEDBA POKUSA .....	6-3
6.2.1 Uzorak 1 .....	6-5
6.2.2 Uzorak 2 .....	6-6
6.2.3 Impregnacija uzoraka 1 i 2 transformatorskim uljem .....	6-8
6.2.4 Uzorci 3 i 4.....	6-8
6.2.5 Sušenje uzoraka 3 i 4.....	6-10
6.2.6 Impregnacija uzoraka 3 i 4 transformatorskim uljem .....	6-12
6.3 REZULTATI POKUSA .....	6-14
<b>7. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>7-1</b>
7.1 REZULTATI RADA.....	7-1
7.2 SMJEROVI DALJNJEG ISTRAŽIVANJA .....	7-3
<b>8. PRILOZI .....</b>	<b>8-1</b>
PRILOG 1: POJEDNOSTAVLJENI PRIKAZ TEHNOLOŠKOG PROCESA PROIZVODNJE MJERNOG TRANSFORMATORA .....	8-2
PRILOG 2: KONCENTRACIJE PLINOVA U TRENUTKU PUNJENJA OBAJU KOTLOVA SA UZORCIMA 1 I 2 (NA POČETKU POKUSA).....	8-3
PRILOG 3: KONCENTRACIJE PLINOVA U UZORCIMA TRANSFORMATORSKOG ULJA 1 I 2 NAKON 8 TJEDANA .....	8-4
PRILOG 4: KONCENTRACIJE PLINOVA U UZORCIMA TRANSFORMATORSKOG ULJA 1 I 2 NAKON 14 TJEDANA .....	8-5
PRILOG 5: KONCENTRACIJE PLINOVA U UZORCIMA TRANSFORMATORSKOG ULJA 3 I 4 NAKON PUNJENJA – INICIJALNO STANJE .....	8-6
PRILOG 6: KONCENTRACIJE PLINOVA U UZORCIMA TRANSFORMATORSKOG ULJA 3 I 4 NAKON 5 TJEDANA .....	8-7
PRILOG 7: KONCENTRACIJE PLINOVA U UZORCIMA TRANSFORMATORSKOG ULJA 3 I 4 NAKON 9 TJEDANA I IZLAGANJA CIKLUSU SA POVIŠENOM TEMPERATUROM.....	8-8
<b>9. LITERATURA.....</b>	<b>9-1</b>
KRATKI ŽIVOTOPIS .....	XIV
SHORT BIOGRAPHY .....	XV

## POPIS SLIKA

---

Slika 1 - 1: Dijagram koncentracija vodika u transformatorskom ulju transformatora tipa AGU-72,5 .....	1-4
Slika 1 - 2: Dijagram koncentracija vodika u transformatorskom ulju transformatora tipa VPU-145 .....	1-5
Slika 1 - 3: Zavarivanje torusa i cijevi.....	1-5
Slika 2 - 1: Mjerni transformatori ugrađeni na TS 400/220/110 kV Žerjavinec.....	2-1
Slika 2 - 2: Osnovna konstrukcija epoksidnog naponskog mjernog transformatora tipa 4VPA1-12 .....	2-3
Slika 2 - 3: Osnovna konstrukcija uljnog naponskog mjernog transformatora tipa VPU a) presjek transformatora b) vanjski izgled transformatora ..	2-4
Slika 2 - 4: Epoksidni strujni transformator tipa APE 24 .....	2-6
Slika 2 - 5: Uljni strujni transformator tipa APU-245 .....	2-7
Slika 2 - 6: Strujni mjerni transformator tipa AGU [13] .....	2-8
Slika 2 - 7: Dijagram dielektrične čvrstoće papira impregniranog uljem ovisne o debljini papira [10] .....	2-13
Slika 2 - 8: Dielektrična čvrstoća transformatorskog ulja u ovisnosti o sadržaju vode Q [10] .....	2-14
Slika 2 - 9: Faktor dielektričnih gubitaka [10] .....	2-14
Slika 2 - 10: Dijagram 1-minutne efektivne vrijednosti dielektrične čvrstoće [10] .....	2-15
Slika 3 - 1: Molekula transformatorskog ulja [20] .....	3-2
Slika 3 - 2: Pribor za uzimanje uzoraka transformatorskog ulja .....	3-9
Slika 3 - 3: Sistem „luer lock“ na otvoru šprice sa pripadajućim čepom i ventilicom.....	3-10
Slika 3 - 4: Uzimanje uzorka ulja pomoću staklene šprice [25].....	3-11
Slika 4 - 1: Slijed analiza vezanih uz mogućnosti utjecaja aluminijskih dijelova ....	4-3
Slika 4 - 2: Periodni sustav elemenata [27] .....	4-4
Slika 4 - 3: Postupak pripreme boksita za daljnju preradu [31] .....	4-7
Slika 4 - 4: Postupak dobivanja glinice iz boksita [31].....	4-8
Slika 4 - 5: Postupak proizvodnje aluminija u talionici [33] .....	4-9
Slika 4 - 6: Dijagram stanja za Al-Si leguru [26] .....	4-17
Slika 5 - 1: Prijenosni XRF uređaj Innov-X DELTA .....	5-9
Slika 5 - 2: Kemijski sastav i struktura Sirovine 1.....	5-10



Slika 5 - 3: Kemijski sastav i struktura Sirovine 2.....	5-10
Slika 5 - 4: Kemijski sastav i struktura torusa .....	5-10
Slika 5 - 5: Kemijski sastav i struktura zavara torus-cijev.....	5-11
Slika 5 - 6: Kemijski sastav i struktura aluminijske cijevi.....	5-12
Slika 6 - 1: Plan pokusa prilikom istraživanja uzroka i istraživanja pojave vodika u transformatorskom ulju mjernih transformatora .....	6-2
Slika 6 - 2: Oblik isporuke sirovine 1- ljevani ingoti .....	6-3
Slika 6 - 3: Oblik isporuke sirovine 2 - kontinuirano ljevani ingoti.....	6-3
Slika 6 - 4: Vakuumstalne posude za provedbu pokusa .....	6-4
Slika 6 - 5: Izdvajanje područja zavarenog spoja cijev-torus .....	6-5
Slika 6 - 6: Uzorak 1 – odvojen od torusa.....	6-5
Slika 6 - 7: Uzorak 1 pripremljen za vakumiranje .....	6-6
Slika 6 - 8: Poroznost na dijelu površine uzorka torusa .....	6-6
Slika 6 - 9: Izrezani dijelovi torusa – uzorak 2 .....	6-7
Slika 6 - 10: Posuda sa uzorkom 2 (materijal torusa) prije zatvaranja.....	6-7
Slika 6 - 11: Dijelovi cijevi i umetnuti torus (uzorak 3) te svitak žica (dio uzorka 4) umetnut u otvor cijevi i torusa prije zvarivanja.....	6-8
Slika 6 - 12: Uzorak 3 – zabandažirani spoj cijevi i dijela torusa prije vakuuskog sušenja.....	6-9
Slika 6 - 13: Uzorak 4 – svitak žica obložen nomex papirom (izvan zavarene cijevi) .....	6-9
Slika 6 - 14: Praćenje procesnih parametara tijekom vakuuskog sušenja.....	6-10
Slika 6 - 15: Grafički prikaz temperatura tijekom postupka vakuuskog sušenja kojem je bio izložen uzorak 3 .....	6-11
Slika 6 - 16: Grafički prikaz tlaka tijekom postupka vakuuskog sušenja kojem je bio izložen uzorak 3.....	6-11
Slika 6 - 17: Umetnut uzorak 3 u posudu prije zatvaranja i vakuumiranja .....	6-12
Slika 6 - 18: Umetnut Uzorak 4 u posudu prije zatvaranja i vakuumiranja .....	6-12
Slika 6 - 19: Tijek promjene tlaka unutar kotlova prije punjenja uljem.....	6-13

## POPIS TABLICA

---

Tablica 2 - 1: Granice pogrešaka strujnih transformatora za mjerenje [10].....	2-5
Tablica 2 - 2: Raspodjela napona opreme kod nazivnih stupnjeva izolacije za primarne namote transformatora [1] .....	2-10
Tablica 4 - 1: Osnovna fizikalna i mehanička svojstva aluminijskih legura [26] .....	4-4
Tablica 4 - 2: Osnovna svojstva lijevanih aluminijskih legura [26] .....	4-16
Tablica 4 - 3: Kemijski sastav i mehanička svojstva lijevanih aluminijskih legura [39].....	4-18
Tablica 4 - 4: Usporedba svojstava i smjernice za primjenu lijevanih legura [39] .....	4-19
Tablica 4 - 5: Podjela i osnovne značajke gnječanih aluminijskih legura [39] .....	4-20
Tablica 4 - 6: Ostala važna svojstva gnječilačkih aluminijskih legura [26].....	4-21
Tablica 4 - 7: Numeričke oznake legura aluminijskih [40].....	4-22
Tablica 5 - 1: Korozijski produkti aluminijskih [42] .....	5-2
Tablica 6 - 1: Tijek postupka vakuumske sušenja kojim su bili izloženi uzorci 3 i 4 .....	6-10
Tablica 6 - 2: Proces vakuumske impregnacije uzoraka 3 i 4.....	6-13

## POPIS OZNAKA

---

$D_1$  - izbijanja male energije

$D_2$  - izbijanja velike energije

$d$ , mm – debljina papira

$E_p$ , kV/cm – probojna jakost električnog polja

$I_1$ , A – struja primarnog namota

$I_2$ , A – struja sekundarnog namota

$I_n$ , A – nazivna struja

$N_1$  - broj zavoja primarnog namota

$N_2$  - broj zavoja sekundarnog namota

ND - nije detektiran

PD - parcijalna izbijanja

$P_1$ , mbar – tlak unutar transformatora u trenutku prestanka vakuumiranja

$P_2$ , mbar – tlak unutar transformatora 15 minuta nakon prestanka vakuumiranja

$\Delta P_{15}$ , mbar – promjena tlaka nakon 15 minuta

$P$ , mbar – tlak unutar transformatora

$R_{p0,2}$ , N/mm<sup>2</sup> – konvencionalna granica tečenja (granica razvlačenja)

$Q$ , g/t – sadržaj vode

$U_1$ , V – primarni napon

$U_2$ , V – sekundarni napon

$U_p$ , V – probojni napon

## GRČKA SLOVA

$\delta$  - fazna pogreška

$\text{tg } \delta$  – faktor dielektričnih gubitaka

$\vartheta$ , °C – Celzsiusova temperatura

$\rho$ , kg/m<sup>3</sup> – gustoća

Ovaj rad je dio istraživačkog rada vezan uz povezanost pojave vodika u transformatorskom ulju i primjene određenih materijala od kojih su sačinjeni sastavni dijelovi mjernog transformatora. Svojstva materijala koji se koriste u uljnim transformatorima moraju zadovoljiti zahtjevima specifikacija normi i dodatnim tehničkim zahtjevima. Jedan od takvih dodatnih zahtjeva je kemijska i mehanička postojanost primjenjenih materijala prema transformatorskom ulju. Razmatran je utjecaj materijala na transformatorsko ulje u smislu nepovoljnog utjecaja na dielektričnu čvrstoću transformatorskog ulja i na njegovu trajnost.

U radu je, uz karakteristike transformatorskog ulja, obrađena tehnologija uzorkovanja transformatorskog ulja kao ključna za ispravnost rezultata kromatografskih analiza tvari sadržanih u hermetički zatvorenim sistemima.

Detaljnije je obrađen i aluminij (odnosno aluminijske legure) sa svhom upoznavanja karakteristika, svojstava, primjenjivosti, tehnoloških faza i operacija, počevši od rudače pa do proizvoda koji se ugrađuju u mjerni transformator.

Dio rada predstavlja praktičnu provjeru utjecaja teoretski utemeljenih pretpostavki vezanih za nastanak vodika u samim materijalima, njihovoj površini ili pak u njihovom međusobnom djelovanju. Provjera se temelji na praktičnim ispitivanjima i simulacijama pojedinih tehnoloških operacija i faza vezanih ne samo za aluminijske dijelove, već i za dijelove sastavljene od nekih drugih materijala ugrađenih u mjerne transformatore.

Rad je dio cjelokupnog istraživanja tvrtke **KONČAR-Mjerni transformatori d.d.** u Zagrebu, sa ciljem unaprijeđenja proizvoda - vezano za primjenu materijala i odgovarajućih proizvodnih tehnologija prilikom proizvodnje mjernih transformatora.

## **SAŽETAK RADA**

---

Konkurentnost na tržištu uvjetovana je brojnim zahtjevima, od kojih je jedan i kvaliteta proizvoda. Udio otopljenih plinova u transformatorskom ulju jedan je od pokazatelja kojim se može ocijeniti karakteristika mjernog transformatora važna za procjenu njegovog radnog vijeka.

Na samom početku rada opisana je podjela i osnovne karakteristike mjernih transformatora. Izdvojeni je uljni strujni mjerni transformator tipa AGU, te za taj tip transformatora vezani tehnološki proces, faze i operacije. Opisana je podjela i karakteristike izolacijskih materijala mjernih transformatora s posebnim naglaskom na primjenu transformatorskog ulja.

Kemijski sastav i karakteristike transformatorskog ulja sadržanog u mjernom transformatoru određuju se analizom uzorka izdvojenog iz ispitivanog transformatora uzorkovanjem. Ispravnost dobivenih rezultata ovisi o primijenjenoj metodi analize (u ovom slučaju kromatografske analize plinova) i, u najvećem dijelu, o postupku uzorkovanja transformatorskog ulja iz hermetički zatvorenog sistema – uljnog mjernog transformatora. Ukoliko se postupak dosljedno ne provodi prema zadanim normama, dobiveni rezultati uvelike odstupaju od prikaza stvarnog stanja.

Povezanost povremene pojave povišene koncentracije vodika otopljenog u transformatorskom ulju i aluminijskih dijelova mjernog transformatora, prihvaćena je nakon izdvajanja razlika i usporedbe sa transformatorima gdje ta pojava uopće ne postoji. Uz podjelu i klasifikaciju aluminijskih legura, u radu su prikazane metalurške osnove povežite uz teorijske mogućnosti nastanka vodika kod aluminijskih legura. Opisane su kemijske reakcije na površini aluminijskih dijelova i prilike za stvaranje vodika prilikom provođenja tehnoloških operacija zavarivanja. Prilikom planiranja pokusa određuje se trenutak provedbe laboratorijskih ispitivanja između raznih tehnoloških operacija i faza.

Provedba pokusa simulira fizikalno-kemijske uvjete kojima su izloženi aluminijski (ili drugi dijelovi) kao posljedica primjene određenih tehnoloških faza ili operacija prilikom proizvodnje mjernih transformatora. Uzorci predstavljaju izoliranu utjecajnu cjelinu koja predstavlja ispitivanje točno određenog materijala ili pak tehnološku fazu ili operaciju.

Potvrda ili odbijanje pretpostavke o utjecajnosti izolirane cjeline temelji se na rezultatu kromatografske analize plinova otopljenih u hermetički izoliranom sistemu uzorak-transformatorsko ulje.

### **Ključne riječi:**

aluminij, aluminijske legure, mjerni transformator, transformatorsko ulje, vodik, korozija aluminijskih legura, zavarivanje, poroznost, vakuumsko sušenje

## **SUMMARY**

---

Tough market competition is caused by a number of requirements, the product quality being one of them. The content of dissolved gases in transformer oil is an indicator that can be used to assess the performance of instrument transformers and can serve as an important characteristic for estimating the transformer lifetime.

At the beginning of this paper, a classification and basic characteristics of instrument transformers are given, with a special focus on the oil impregnated current transformer, type AGU, along with the related technological process, its phases and operations. A classification and characteristics of insulation materials for transformers are also given, with particular emphasis on the use of transformer oil.

Chemical composition and characteristics of the oil contained in each instrument transformer are determined through the analysis of samples taken from the tested transformers. The reliability of test results depends on the applied method of analysis (in this case the gas chromatography analysis) and, for the most part, on the oil sampling from a hermetically sealed system, i.e. the oil impregnated instrument transformer. If the procedure is not consistently carried out according to standards, the obtained results can differ greatly from the actual characteristics of the transformer oil.

A correlation between the occurrence of increased concentrations of hydrogen dissolved in the transformer oil and aluminium parts of the transformer has been found through a comparison with transformers in which this phenomenon was not registered. In addition to the classification of aluminium alloys, the paper discusses the conditions of metallurgical processing that could result in the occurrence of hydrogen in the aluminium alloys. Chemical reactions occurring on the aluminium surface (e.g. corrosion) and the chance of hydrogen being created during welding are also described. While planning the experiment, the intention was to determine between which technological phases the laboratory testing should be conducted.

The experiment simulates physical and chemical effects of some technological processes applied during the various production phases of the transformer on its parts, particularly those made of aluminium alloys. The samples represent isolated units on which a test of specific materials as well as a test of technological processes can be conducted.

In conclusion, the results of chromatography analysis of gases dissolved in a hermetically insulated system, i.e. the transformer oil, are used to test the hypothesis that these isolated units have a significant influence.

### **Key words:**

aluminum, aluminum alloys, instrument transformer, transformer oil, hydrogen, corrosion of aluminum alloys, welding, porosity, vacuum drying

# 1

## Uvod

---

### 1.1 Uvodna razmatranja

Skraćivanje razvoja i procesa konstruiranja proizvoda, povećanje konkurentnosti, brza izmjena tehnologije i raznolikost potrošačkih potreba dio su zahtjeva s kojima se susreću današnje tvrtke na globalnom tržištu. Jedan od načina zadovoljavanja navedenih zahtjeva je u široj ponudi asortimana proizvoda [1].

Nekontrolirana šira ponuda asortimana proizvoda ima za posljedicu i veće troškove razvoja, proizvodnje, montaže i održavanja [2].

Stoga tvrtke moraju zadovoljiti kontradiktorne zahtjeve: ostvarivanje šire ponude asortimana proizvoda na tržištu uz istovremeno smanjenje troškova. Jedna od metoda smanjenja troškova je povećanje udjela jednakih komponenata čime se smanjuju troškovi razvoja, proizvodnje, montaže i održavanja [3].

Težnja za povećanjem udjela jednakih komponenata podupire činjenicu o prihvatljivosti postojećih, već primjenjenih komponenata i u novom proizvodu. Prihvatljivost je tako uvjetovana npr. cijenom, dobavljivošću određene komponente, međusobnim utjecajem njihovih fizikalnih i kemijskih svojstava tj. zadovoljavanjem različitih standarda vezanih za kvalitetu proizvoda, itd.

Kako bi se dobio novi proizvod, koriste se iste komponente. Primjenom različitih tehnologija (npr. tehnologija međusobnog povezivanja tih komponenata – zavarivanjem, ljepljenjem, zakivanjem i sl.), tim istim komponentama daje se drugi oblik i namjena. Značajan je i utjecaj promjene redosljeda primjene istih tehnologija. Promjena redosljeda primjene istih, već upotrebljenih i provjerenih tehnologija spajanja narušava istovjetnost svojstava novonastalog sklopa sa poznatim poželjnim

svojstvima prethodnog sklopa. Skraćivanja trajanje razvoja i smanjenje troškova zbog razloga primjene istih komponenata i poznatih i primjenjivanih tehnologija omogućava investicije u području kontrole. Te su investicije potrebne kako bi se mogle na vrijeme uočiti nepoželjne karakteristike novonastalog sklopa. Povećana kontrola proizvoda, ili pak određenih dijelova proizvoda, značajno pridonosi zadovoljavanju zahtjeva vezanog uz kvalitetu proizvoda.

Na primjeru poslovanja u uvjetima slobodnog tržišta električne energije zahtjeva se brzo i jeftino očitavanje parametara mjerodavnih za obračun, nadzor i praćenje gubitaka, jednostavnu promjenu tarifnih stavova, pa i mogućnost ostvarenja upravljanja potrošnjom [3].

Takav trend, neizostavno na tržište postavlja zahtjev za sve većim brojem proizvoda koji će i ispuniti navedene zahtjeve. To opet uzrokuje pojavu sve većeg broja ponuđača takvih proizvoda. Konkurentnost nije više temeljena samo na cijeni proizvoda i mogućnošću kvantitativne realizacije, već uvelike ovisi, ne samo o zadovoljavanju postojećih standarda, nego i o zadovoljavanju novih, posebnih, zahtjeva kupaca. Proizvođači nude proizvode koji, ne samo da zadovoljavaju postojeće standarde, već zadovoljavaju nove još rigoroznije zahtjeve. Svaki proizvođač nastoji, istaknuti važnost zadovoljavanja upravo tih, rigoroznijih zahtjeva, u čijem je zadovoljavanju on najuspješniji ili ulažući u razvoj to misli postati.

Posebni zahtjev kupca odnosi se na količinu vodika otopljenom u transformatorskom ulju. Nekad prihvatljivu količinu vodika u transformatorskom ulju mjernog transformatora kupac danas više ne smatra prihvatljivom, a slijedeći taj trend moguće je očekivati da će budući standardi uvjetovati još nižu količinu vodika u transformatorskom ulju. Za sada, prezentacija proizvoda u kojem jedna od komponenata (u ovom slučaju transformatorsko ulje) zadovoljava izuzetno visoke standarde po pitanju kvalitete, nije samo uvjet za dobivanje mjesta na sve zahtjevnijem tržištu mjernih transformatora, već pokazuje i spremnost na znanstveno-istraživačke projekte kojima se uključuje u bitku za zadovoljavanjem još viših kriterija koji bi mogli biti postavljeni pred proizvođača takve mjerne opreme u bliskoj budućnosti.

Iz tog se razloga pristupilo – što ustvari i predstavlja motivaciju za istraživanje - detaljnijoj analizi utjecajnih parametara na pojavu otopljenih plinova u transformatorskom ulju, posebice vodika kao jednog od najutjecajnijih plinova na dielektričnost transformatorskog ulja.

## **1.2 Praćenje udjela plinova u transformatorskom ulju**

Uljni transformator - transformator punjen mineralnim uljem najčešći je i standardan proizvod tvrtke Končar – mjerni transformatori d.d., i za sada još nema značajnijih pokazatelja da će se izolacijski sustav sastavljen od mineralnog izolacijskog ulja i celuloznog papira zamijeniti drugim materijalima. Tijekom godina provedena su opsežna istraživanja pojedinačnih karakteristika materijala - ulja i papira - odnosno



njihovih karakteristika u različitim međusobnim kombinacijama, tako da su poznati njihovi utjecajni parametri, razine kvalitete i tijek degradacije. Spoznaja da su predmetni materijali međusobno kompatibilni temelji se na činjenici o postojanju proizvoda koji se nalaze u eksploataciji više desetaka godina i još uvijek besprjekorno rade. Postojanje i analiza takvih proizvoda upućuje na zaključak da su i tehnologije proizvodnje transformatora kojima se postiže zahtjevana kvaliteta izolacijskog sustava, dobro poznate. Unatoč svemu tome, postoje i oni drugi primjeri – primjeri proizvoda pri čijem je radu došlo do kvara. U nastojanju da se broj takvih proizvoda svede na što manji broj, provode se brojne kontrole kojima se nastoji utvrditi zajednička karakteristika upravo tih „loših“ proizvoda.

Brojni kemijski procesi (povećana oksidacija, onečišćenje drugim kemijskim elementima ili spojevima) vezani za transformatorsko ulje, posljedica su nepoželjnih procesa koji skraćuju radni vijek mjernog transformatora. Ti procesi najčešće su posljedica primjene određenih konstrukcijskih materijala čija su se svojstva vremenom promjenila (djelovanje korozije, umor materijala i sl.) ili su pak posljedica promjene kvalitete uslijed npr. smanjene kontrole dobavljača. Za ovaj slučaj kvaliteta podrazumjeva stalnost kemijskog sastava, garantirana mehanička svojstva, garantirano stanje površine, kemijsku postojanost prilikom kontakta sa određenim materijalima itd. Promjena kvalitete odabranih konstrukcijskih ili pomoćnih materijala, najčešće nije primjećena do trenutka same primjene u mjernom transformatoru i dobivanja rezultata redovite kontrole količine otopljenih plinova u ulju.

Konstrukcijski i pomoćni materijali u mjernom transformatoru su metali (željezo, bakar, cink, aluminij), drvo, ljepila, lak žica, impregnacijski lakovi, premazi, brtve i različiti plastični dijelovi, a njihova količina u odnosu na ulje može biti u širokom rasponu [4]. Samim time, značajna utjecajnost ne ovisi samo o stvarnoj utjecajnosti u jednakim masenim ili volumnim udjelima, već i o tim istim masenim ili volumnim omjerima utjecajnog materijala i transformatorskog ulja.

Svojstva materijala koji se koriste u uljnim transformatorima moraju zadovoljiti zahtjeve specifikacija normi, te dodatnim tehničkim zahtjevima kao što su otpornost materijala prema transformatorskom ulju i utjecaj na transformatorsko ulje. Ukoliko materijal pod utjecajem transformatorskog ulja ne mijenja svoja fizikalna i kemijska svojstva i istovremeno ne utječe na fizikalna i kemijska svojstva transformatorskog ulja smatra se da je taj materijal kompatibilan sa transformatorskim uljem. Metode ispitivanja kompatibilnosti nisu normizirane međunarodnim normama. Postoje pojedine nacionalne norme odnosno lokalni tehnički zahtjevi i interne laboratorijske metode [5].

Za punjenje mjernih transformatora i drugih električnih uređaja koriste se sintetske tekućine posebnih svojstava – transformatorska ulja - koje mogu različito utjecati na krute materijale i obrnuto – primjenjeni materijali mogu znatno utjecati na svojstva transformatorskog ulja. Kompatibilnost materijala s uljem može se definirati kao maksimalno dozvoljena interakcija između materijala i ulja u uvjetima pažljivo

odabranih testova [6].

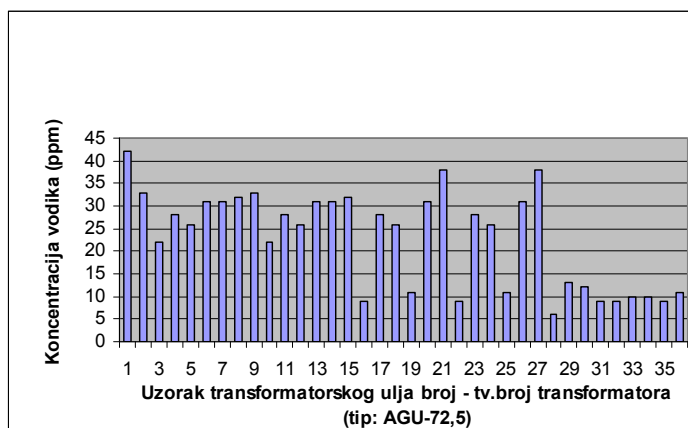
U preporuci IEC 60422 [7] za nadgledavanje i održavanje izolacijskih transformatorskih ulja u pogonu, naglašava se kompatibilnost izolacijskih ulja i navodi osnovni princip miješanja ulja i važnost ispitivanja.

Jedna od metoda ispitivanja kojom se potvrđuje ili odbacuje stanje zadovoljavajuće kompatibilnosti materijala i primjenjenih tehnologija jest i kromatografska analiza. Od sedamdesetih godina kromatografska analiza plinova otopljenih u ulju ili onih izdvojenih iz transformatorskog ulja, intenzivno se koristi za određivanje koncentracije devet plinova, od kojih je sedam karakteristično za razgradnju materijala izolacijskog sustava transformatora, ulje – papir (vodik, metan, acetilen, etilen, etan, ugljični monoksid i ugljični dioksid) [8].

Posljedica postojanja spomenutih plinova u transformatorskom ulju je smanjenje pouzdanosti transformatora i povećana vjerojatnost kvara.

### 1.3 Razlozi povezivanja primjene aluminijskih komponentata sa povećanom pojavnnošću vodika

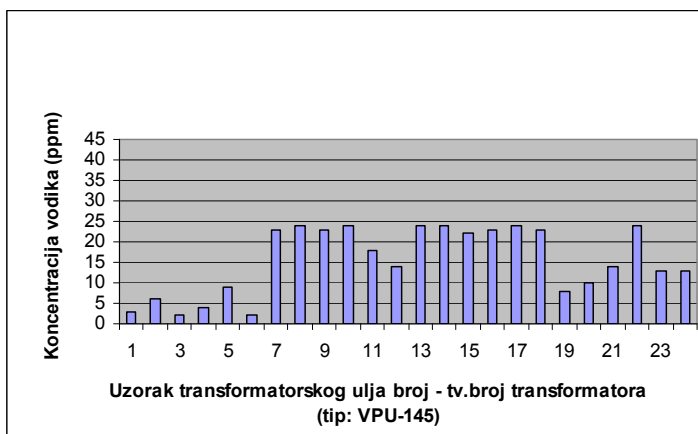
Tijekom višegodišnje proizvodnje mjernih transformatora primjećeno je da je pojavnost vodika u transformatorskom ulju ponekad karakteristična za cijelu seriju istog tipa proizvedenih transformatora. Ponekad je to značajka pojedinih proizvoda unutar ispravne serije ostalih transformatora i već (iz tog aspekta) provjerenog tipa i naponskog nivoa transformatora, a ponekad je povećani udio vodika konstanta za određeni tip transformatora (i naponski nivo) bez obzira na seriju. Problematika povećanog sadržaja vodika u transformatorskom ulju zapažena je kod tipa transformatora AGU-72,5, kao što je prikazano na slici 1 - 1.



Slika 1 - 1: Dijagram koncentracija vodika u transformatorskom ulju transformatora tipa AGU-72,5

Visok udio vodika u transformatorskom ulju zapažen je nakon uzorkovanja

transformatorskog ulja poslije završnog ispitivanja – testa dielektričnosti - koji je preduvjet za pozitivnu ocjenu transformatora i njegovu isporuku. Dozvoljena količina vodika otopljen u transformatorskom ulju definirana je od strane kupca, i ne smije prelaziti 25 ppm. Drugi tip transformatora (VPU-145), kao što je prikazano na slici 1 – 2, u potpunosti zadovoljava taj kriterij.



*Slika 1 - 2: Dijagram koncentracija vodika u transformatorskom ulju transformatora tipa VPU-145*

Prvo pitanje koje se postavlja u takvom slučaju je zbog čega se određeni tip transformatora razlikuje od ostalih? Nameću se odgovori vezani za različite dimenzije dijelova, različite materijale, primjenu različitih tehnologija kojima su različiti materijali dovođeni u stanje funkcionalnih pozicija u željenom proizvodu – mjernom transformatoru. Postavljena je sumnja da je povećana pojavnost vodika vrlo vjerojatno vezana uz aluminijske komponente transformatora - torusa i cijevi, koje se, za tip transformatora AGU-72,5 kao što je prikazano na slici 1 – 3, spajaju zavarivanjem .



*Slika 1 - 3: Zavarivanje torusa i cijevi*

Uzrok povećane pojave vodika vezan je i za tehnologiju zavarivanja primjenjenu prilikom sklapanja komponenata u sklop, a to je mogućnost pojave jednog od zavarivačkih problema – pojavnosti vodika u zavarenom spoju.

Sumnja se odnosi i na način dobivanja sirovine, odnosno prerade iste prilikom proizvodnje sastavnih dijelova sklopa torusa i cijevi. Sumnja se u prvom redu odnosi na zadržavanje garantiranog sastava materijala.

Tehnološki proces proizvodnje mjernih transformatora sadrži fazu vakuumske sušenja kojem je izložen promatrani zavareni sklop. Sumnja da su tijekom te faze, fizikalno-kemijski uvjeti unutar mjernog transformatora potaknuli „izlučivanje“ vodika i otapanje u transformatorskom ulju iz mikropukotina i pora, postaje opravdana. Vakuumsko punjenje transformatorskim uljem, koje u tom slučaju postaje otapalo vodik, podupire sumnju koju je potrebno detaljnije analizirati.

Slijedeće pitanje, vezano je za aluminijske dijelove i načine njihova međusobnog spajanja - zavarivanja: Ne utječe li možda razvijena toplina (uslijed zavarivanja) na ostale dijelove i materijale u tom sklopu i tako mijenja njihov kemijski sastav te njihovu dosadašnju kompatibilnost u spoju sa transformatorskim uljem, postavlja kao upitnu? Sva ova pitanja opisuju uzroke koje je potrebno raščlaniti i kao takve temeljito analizirati.

## **1.4 Fizikalno-kemijski uvjeti karakteristični za primjenjene tehnološke operacije ili faze**

Tijekom procesa proizvodnje mjernih transformatora, sastavni materijali prolaze kroz mnogobrojne tehnološke faze koje karakteriziraju mnogobrojna fizikalno-kemijska stanja. Tako se npr. tijekom nastanka torusa susreće sa rastaljenom legurom aluminijske koja je donekle, kao talina sposobna otapati i „upijati“ vodik. Već je u ovoj tehnološkoj fazi moguć nastanak poroznosti u materijalu odljevka – torusa koji tijekom procesa proizvodnje transformatora, sada kao krutina, prolazi još i tehnološku fazu vakumiranja odnosno vakuumske natapanja (propijanja) transformatorskim uljem.

Vakuum (manometarski tlak između 0,01 i 0,2 mbar) koji uvjetuje bitno različite fizikalno-kemijske procese (porast tlaka para, smanjenje volumena i sl.) od onih na tzv. atmosferskom tlaku, bitno utječe na izdvajanje vodika iz jednog materijala i pojavnost u drugom. Takav proces, pri atmosferskom tlaku možda ne bi bio moguć, ili se ne bi odvijao takvim intenzitetom, zbog toga ga je, prilikom provođenja pokusa, potrebno što vjernije simulirati.

Na rezultate pokusa utječu mnogi čimbenici: temperatura transformatorskog ulja, izloženost pojačanom strujanju zraka stanje površine, ljudski faktor, pomoćni alat i pribor, vlaga u okolišnjem zraku, temperatura okolišnjeg zraka. Tijekom pokusa, utjecaj tih čimbenika potrebno je izdvojeno i što vjerodostojnije simulirati kako bi se utvrdio točan trenutak (unutar određene tehnološke faze ili operacije) nastanka

razloga za pojavnost vodika u transformatorskom ulju. Sa tom se svrhom pristupilo izradi specijalnih posuda u kojima je moguće postići i održati željeni potlak (vakuum) i koje simuliraju istovjetne fizikalno-kemijske uvjete onima u mjernom transformatoru.

Nezaobilazan je i utjecaj topline razvijene usljed zavarivanja aluminijske – spajanja dijelova torusa i cijevi. Razvijena toplina direktno ili indirektno utječe na promjenu kemijskog sastava drugih materijala (npr. izolacije svitaka žice umotanim u zaštitnu oblogu) koji se nalaze u neposrednom kontaktu sa aluminijskim dijelovima i može biti uzrokom kasnije pojavnosti vodika u transformatorskom ulju. Iz tog se razloga, pri izradi uzoraka, zavarivanje provelo na istim, i sa istim, dijelovima, od kojih se proizvodi mjerni transformator. Na taj se način stvorila podjednaka količina topline koja utječe na promjenu postojećih fizikalno-kemijskih uvjeta. Dijelovi za koje se sumnja da su bili izloženi utjecaju povišene temperature u toj mjeri, da je njihova kompatibilnost postala upitna, izdvojeni su i nastavljaju se izlagati fizikalno-kemijskim uvjetima kojima bi bili izloženi u mjernom transformatoru. Nakon istog vremenskog intervala izloženosti tim uvjetima, kao i tijekom proizvodnje i implementacije u proizvodu, provodi se ponovna kontrola kompatibilnosti sa transformatorskim uljem.

## 2

## Mjerni transformatori

### 2.1 Namjena i osnovna podjela

Pri nadzoru, upravljanju i zaštiti električnih postrojenja, mreža i uređaja redovno treba mjeriti razne električne veličine: struju, napon, snagu, energiju, frekvenciju, fazni pomak i druge. Za izravno mjerenje tih veličina bili bi potrebni instrumenti različitih izvedbi, prilagođeni visini napona i veličini struje mjerenog kruga. Ako su struje i naponi imalo veći, izravno bi mjerenje bilo posve nepraktično i često gotovo neizvedivo, pa se tad upotrebljavaju mjerni transformatori koji mjerene struje i napone svode na vrijednosti prikladne za mjerenje [9]. Na slici 2 – 1 prikazano je tzv. polje mjernih transformatora ugrađenih na trafostanici Žerjavinec.



Slika 2 - 1: Mjerni transformatori ugrađeni na TS 400/220/110 kV Žerjavinec

Prednosti transformacije mjerenih struja i napona na vrijednosti prikladne za mjerenje su:

- mjerene struje i naponi vrlo različitih nazivnih iznosa transformiraju se na uvijek iste nazivne vrijednosti (redovno na struje od 1 A ili 5 A i napone od 100 V, 200 V,  $100\sqrt{3}$  V ili  $200\sqrt{3}$  V), što bitno smanjuje broj potrebnih tipova mjernih, zaštitnih i regulacijskih instrumenata i uređaja, te omogućuje da se oni serijski proizvode;
- pomoću mjernih transformatora mjerni se instrumenti i uređaji izoliraju od visokih napona u mjerenom krugu, tako da rukovanje njima postaje neopasno, a njihova se konstrukcija pojednostavnjuje jer ih ne treba izolirati za visoki napon;
- mjerni instrumenti i uređaji mogu biti prostorno znatno udaljeni od mjenoga strujnog kruga, što omogućuje da se postavljaju ondje gdje će to biti najpovoljnije za upravljanje postrojenjem, npr. u zajedničku komandnu prostoriju;
- udaljavajući mjerne instrumente i uređaje od mjenoga strujnog kruga sprječava se da na njihov rad utječu njegova, često snažna magnetska i električna polja;
- posebnim izvedbama mjernih transformatora zaštićuju se mjerni instrumenti i uređaji od štetnoga dinamičkog i termičkog učinka struja kratkog spoja u mjerenom strujnom krugu;
- dobiva se mogućnost galvanskog odvajanja strujnih krugova, što je često prijeko potrebno u raznim mjernim i drugim sklopovima.

Mjerni se transformatori, osim u posebnim izvedbama, sastoje od jezgre izrađene od magnetskog materijala, te od primarnog i sekundarnog namota, koji su međusobno odvojeni i izolirani, ovisno o visini napona u mjerenom krugu. Primarni se namoti uključuju u mjereni krug, a na sekundarne se priključuju mjerni instrumenti ili zaštita. Upotrebljavaju se dvije vrste mjernih transformatora: naponski i strujni. Na temelju ove dvije vrste pojavljuju se i treća – kombinirani transformatori.

Primarni namot naponskoga transformatora priključuje se paralelno potrošaču kojemu se mjeri napon. Pri tome struja kroz njegov primarni namot mora biti znatno manja od struje potrošača, slično kao i struja voltmetra kada se napon izravno mjeri. Primarni namot strujnog transformatora uključuje se u seriju s potrošačem, pa njime teče puna struja potrošača. Tu se zahtjeva da pad napona na njegovu primarnom namotu bude neznatan prema naponu potrošača, slično kao pad napona na ampermetru pri izravnom mjerenju struje [9].

## **2.2 Naponski mjerni transformatori**

Od naponskih mjernih transformatora zahtijeva se da transformiraju mjerene napone u jednom, stalnom omjeru, i gotovo bez faznog pomaka, na vrijednosti koje su prikladne za mjerenje mjernim instrumentima. Taj zahtjev bi u potpunosti ispunio samo idealan transformator - transformator u kojem ne nastaju nikakvi padovi napona i čija je struja magnetiziranja jednaka nuli. To bi bilo moguće jedino kad bi

njegovi namoti bili bez djelatnog otpora, a njegova jezgra neizmjerne magnetske vodljivosti. U tom bi slučaju, primarni i sekundarni namot trebali obuhvatiti čitav magnetski tok, bez rasipnih tokova. Takav fizikalni uvjet, upućuje na zaključak da između primarnog napona  $U_1$  i sekundarnog napona  $U_2$  idealnog transformatora, vlada uvijek stalan odnos, upravo jednak odnosu broja zavoja  $N_1$  i  $N_2$  primarnog i sekundarnog namota:

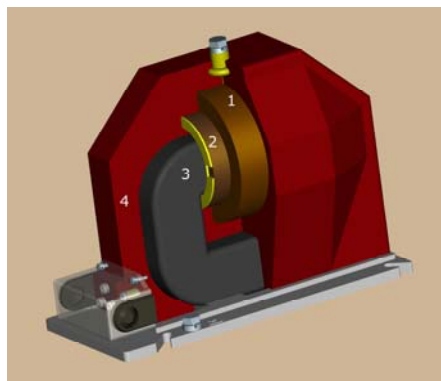
$$U_1 : U_2 = N_1 : N_2 \quad (2.1)$$

Pomoću idealnog transformatora može se jednostavno odrediti vrijednost napona priključenog na njegov primarni namot. Umnožak izmjerenog napona na sekundarnim stezaljkama i omjera broja zavoja  $N_1:N_2$  daje traženu vrijednost primarnog napona [10].

Realni su transformatori oni koji se trenutno proizvode i primjenjuju. U realnim se transformatorima susreće sa brojnim gubicima koji su jedan od glavnih razloga pogrešaka transformatora.

Poznato je da pogreške transformatora rastu s porastom tereta [9]. Zato se mjerni naponski transformator smije opteretiti, a da pri tome pogreške ne pređu dopuštene granice, samo do određene struje, odnosno do određenog tereta, koji je redovno naveden na natpisnoj pločici transformatora (nazivni teret). Teret se navodi u VA, koje uzima pri sekundarnom nazivnom naponu [10].

Na izvedbu mjernih naponskih transformatora bitno utječe pogonski napon. Na niskim pogonskim naponima upotrebljavaju se suhe izvedbe, a zaštita od vlage postiže se impregnacijom prikladnim izolacionim lakovima. Za pogonske napone do 38 kV sve više se koriste izvedbe s epoksidnim smolama. Na slici 2 -2 prikazan je djelomični presjek takvog transformatora.

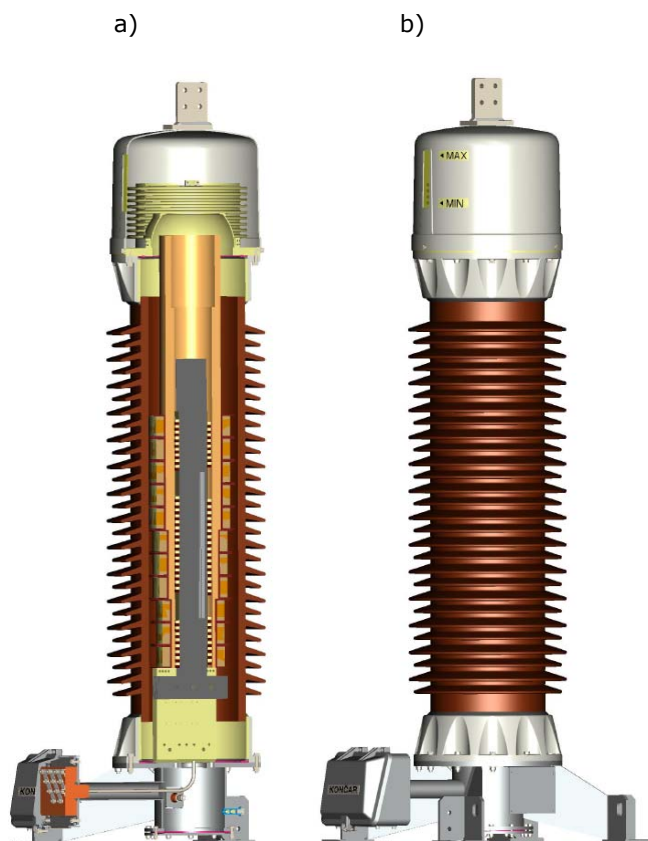


*Slika 2 - 2: Osnovna konstrukcija epoksidnog naponskog mjernog transformatora tipa 4VPA1-12*

Primarni namot (1) u koji je umetnut sekundar (2) zaliven je epoksidnom smolom (4), koja ujedno služi kao izolacija između tog namota, te sekundara i jezgre (3). Izvedba prikazana na slici 2 - 2 predviđena je za mjerenje nazivnog napona do 12 kV [11].



Za pogonske napone od nekoliko kilovolta pa do najviših napona upotrebljavaju se uljne izvedbe, gdje se jezgra s primarnim i sekundarnim namotom nalazi u kotlu napunjenom transformatorskim uljem. Na slici 2 – 3 prikazana je uljna izvedba naponskog induktivnog transformatora tipa VPU za mreže najvišeg napona do 525 kV [11].



Slika 2 - 3: Osnovna konstrukcija uljnog naponskog mjernog transformatora tipa VPU  
a) presjek transformatora b) vanjski izgled transformatora

## 2.3 Strujni mjerni transformatori

Identifikacije i analize zajedničkih komponenata, a vezano za utjecaj aluminijskih dijelova na pojavnost vodika u transformatorskom ulju, provedeni su na strujnim mjernim transformatorima tvrtke KONČAR – Mjerni transformatori. Strujni mjerni transformatori transformiraju mjerenu struju u stalnom omjeru i bez faznog pomaka na vrijednost koja je prikladna za napajanje mjernih instrumenata te zaštitnih i regulacijskih uređaja [9].

S obzirom na terete koji se priključuju na sekundarne stezaljke strujnih transformatora, razlikuju se strujni transformatori za mjerenje i strujni

transformatori za zaštitu. Kod strujnih transformatora za mjerenje, sekundarna struja pri kratkom spoju poraste samo za ograničenu vrijednost, dovoljnu da ne dođe do uništenja instrumenata. Kod strujnih transformatora za zaštitu, sekundarna struja mora prenijeti i struje mnogostruko veće od nazivnih [9].

Strujni transformatori se u svome radu približavaju idealnom transformatoru, čiji su primarni amperzavoji jednaki sekundarnim amperzavojima:

$$I_1 \cdot N_1 = I_2 \cdot N_2 \quad (2.2)$$

tj. omjer transformacije iznosi:

$$I_1 : I_2 = N_2 : N_1 \quad (2.3)$$

Ovo idealno stanje ne može se sasvim postići, jer je za protjecanje sekundarne struje potreban određeni napon, induciran u sekundarnom namotu. Taj napon služi kao nadomjestak padu napona u sekundarnom namotu i instrumentima. Za induciranje tog napona potreban je određeni dio amperzavoja primarnog namota, koji nije iskompensiran sekundarnim amperzavojima, već služi za magnetiziranje jezgre. Taj dio amperzavoja izravan je uzrok strujne i fazne pogreške strujnih transformatora, i nastoji ga se smanjiti. Sukladno zahtjevanoj klasi točnosti, kao što je prikazano u tablici 2 - 1, određene su i granice faznih pogrešaka.

Tablica 2 - 1: Granice pogrešaka strujnih transformatora za mjerenje [10]

Klasa točnosti	± granice strujnih pogrešaka u % pri				± granice faznih pogrešaka u minutama pri			
	0,1 $I_n$	0,2 $I_n$	1,0 $I_n$	1,2 $I_n$	0,1 $I_n$	0,2 $I_n$	1,0 $I_n$	1,2 $I_n$
0,1	0,25	0,2	0,1	0,1	10	8	5	5
0,2	0,5	0,35	0,2	0,2	20	15	10	10
0,5	1,0	0,75	0,5	0,5	60	45	30	30
1	2,0	1,5	1,0	1,0	120	90	60	60
3	0,5 do 1,2 $I_n$ : 3,0				nisu ograničene			
5	0,5 do 1,2 $I_n$ : 5,0				nisu ograničene			

Zbog nastojanja da se smanje pogreške, u strujnim se transformatorima većinom upotrebljavaju jezgre od visokopermeabilnih magnetskih materijala i odabiru niske magnetske indukcije. Iz istog razloga, otpor priključenih instrumenata ne smije prijeći određenu, redovno nisku vrijednost. Ako bi stezaljke strujnog transformatora ostale otvorene, čitava bi primarna struja služila za magnetiziranje željeza, što bi izazvalo vrlo visoku magnetsku indukciju, a time i visoki napon na sekundarnom

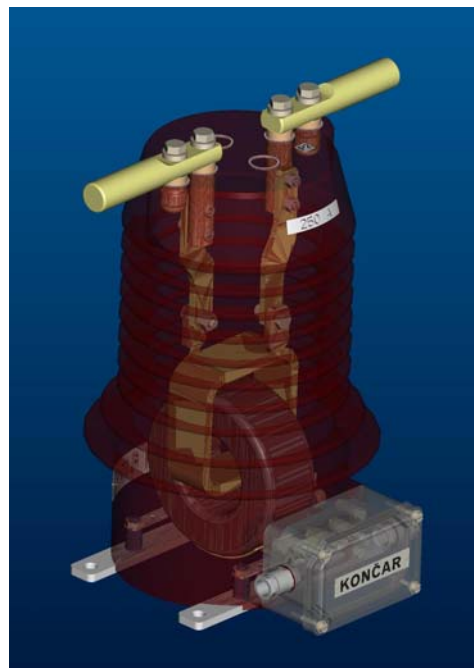
namotu. Napon bi mogao narasti do te mjere, da bi mogao postati opasan po život. Visoka indukcija uzrokuje velike gubitke u željezu i dovodi do pretjeranog zagrijavanja. Zbog toga sekundarne stezaljke strujnog transformatora ne smiju u pogonu nikada ostati otvorene. Ako se žele isključiti instrumenti, treba prethodno kratko spojiti sekundarne stezaljke.

Strujni transformatori koji služe za priključak mjernih instrumenata (strujni transformatori za mjerenje) razvrstani su prema preporukama IEC [12] u šest klasa točnosti: 0,1; 0,2; 0,5; 1; 3 i 5. Oznaka klase točnosti jednaka je apsolutnoj vrijednosti granice strujne pogreške u postocima pri nazivnom teretu i 120% nazivne primarne struje. Tako npr. strujni transformator klase točnosti 1 ima granice strujne pogreške  $\pm 1\%$  pri 120% nazivnoj primarnoj struji. Ovisnost granica strujne i fazne pogreške o primarnoj struji prikazana je u tablici 2 - 1.

Fazna pogreška ispitivanog transformatora označava se sa  $\delta$ .

Postoji mnogo rješenja tehničke izvedbe strujnih transformatora, ovisno o namjeni, primarnim strujama i pogonskom naponu.

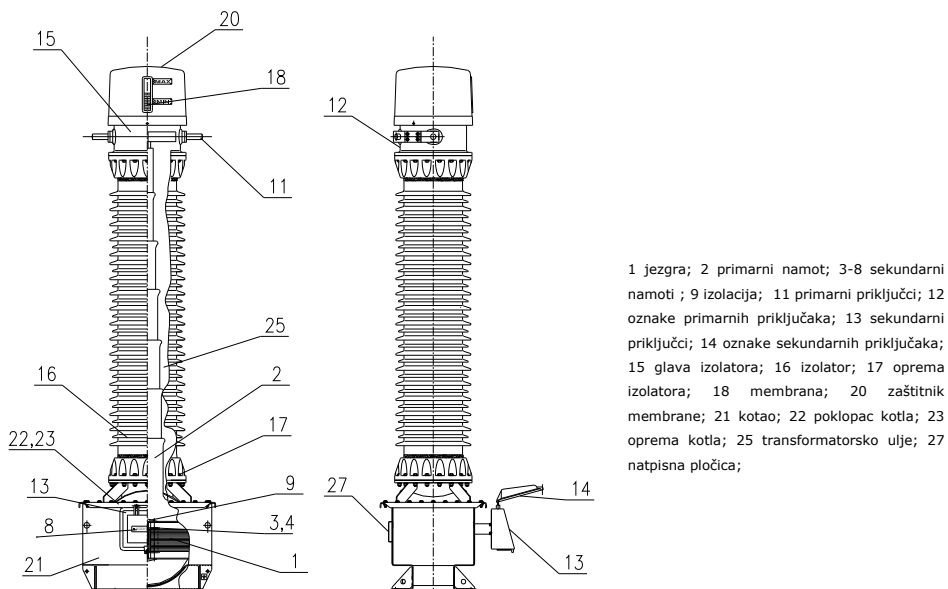
Niskonaponski strujni transformatori za ugradnju ne razlikuju se izvedbeno bitno od običnih niskonaponskih transformatora. U starijim izvedbama, za više napone, primarni se namot izolirao prema kućištu i sekundarnom namotu pomoću porculanskih izolatora posebnog oblika. Umjesto takvih izvedbi, kao što je prikazano na slici 2 - 4, danas su sve češće izvedbe kod kojih je primarni namot zaliven epoksidnom smolom.



Slika 2 - 4: Epoksidni strujni transformator tipa APE 24

Na slici 2 – 4, zbog preglednosti, epoksidna je smola prikazana kao poluprozirna, i izolira primarni namot (četvrtasti bakreni svitak) prema jezgri i sekundarnom namotu (svitak u obliku šupljeg valjka - koluta).

Izvedbe za više napone, pogotovo za one vrlo visoke, redovno su uljne. Jezgra, primarni i sekundarni namot nalaze se u uljnom kotlu i međusobno su izolirani debelom bandažom papira. Konstrukcija i sastavni dijelovi prikazani su na slici 2 - 5, koja prikazuje uljni strujni transformator tipa APU za nazivni napon do 245 kV.



Slika 2 - 5: Uljni strujni transformator tipa APU-245

### 2.3.1 Mjerni strujni transformator tipa AGU

Strujni uljni transformatori se koriste za odvajanje mjernih i zaštitnih uređaja od visokog napona kao i za transformaciju mjerenih struja na iznos prilagođen mjernim i zaštitnim uređajima. Primjenjuju se za mreže najvišeg napona do 765 kV.

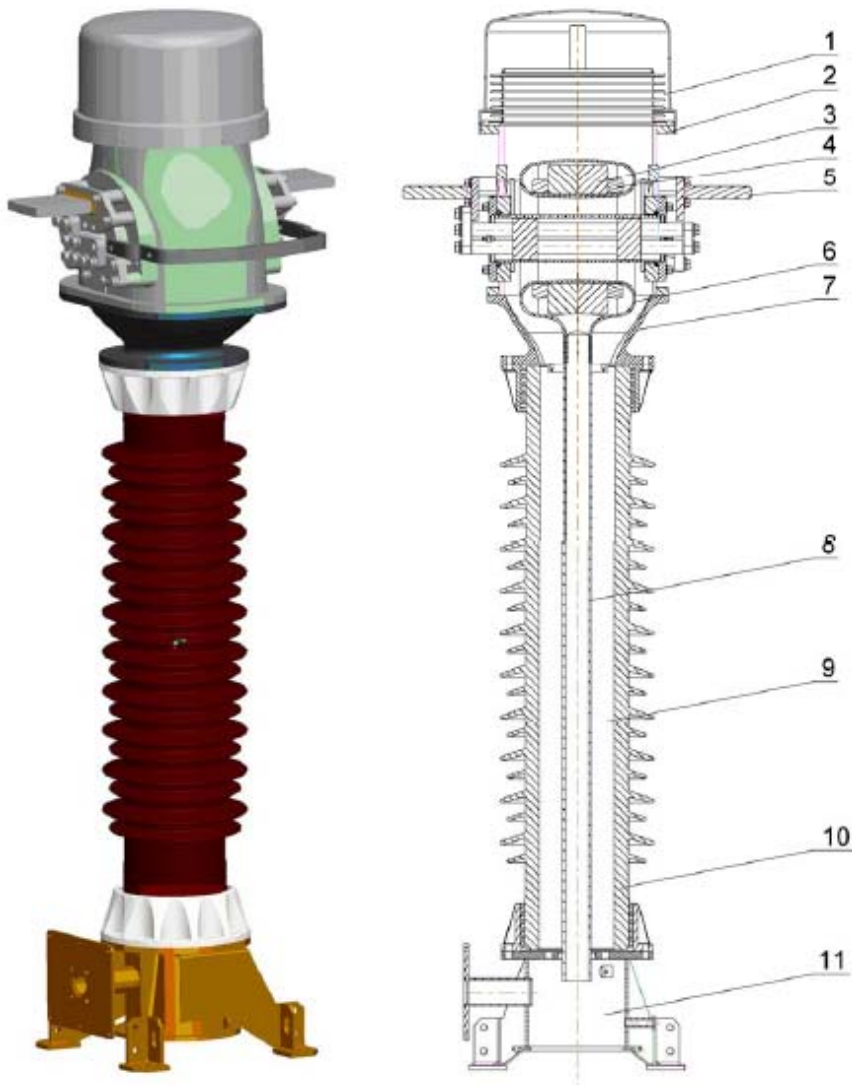
Strujni se transformatori izrađuju u skladu sa IEC, VDE, ANSI, BS ili drugim ugovorenim standardima.

Transformatori se izrađuju kao primarno prespojivi u omjeru 1:2:4 ili neprespojivi, a mogu biti i sekundarno prespojivi ili primarno i sekundarno prespojivi.

Kod primarno prespojivih izvedbi transformatora prespajanje se izvodi jednostavnim premještanjem spojnika na VN-priključcima.

Jezgre transformatora su radijalno namotane, izrađene od hladno-valjanog orijentiranog magnetskog lima ili mekog magnetskog materijala (Mumetal, NanoKristalin), ovisno o zahtjevanoj klasi točnosti.

Strujni mjerni transformator tipa AGU proizvođača Končar – Mjerni transformatori [13] prikazan je na slici 2 – 6.



- 1 membrana s zaštitnikom; 2 glava; 3 jezgra za mjerenje;  
 4 jezgra za zaštitu; 5 primarni namot; 6 torus; 7 vrat;  
 8 sklop cijevi; 9 transformatorsko ulje; 10 izolator; 11 postolje

*Slika 2 - 6: Strujni mjerni transformator tipa AGU [13]*

Kao što je prikazano na slici 2 – 6, sekundarni je namot, namotan duž oboda jezgre, a primarni namot prolazi kroz centar jezgre. Glavna izolacija je od izolacijskog papira impregniranog transformatorskim uljem u visokom vakuumu. Kondenzatorsko djelovanje električki vodljivih obloga, raspoređenih u glavnoj izolaciji, čini ove

transformatore otpornima na udarne napone atmosferskog porijekla. Transformatori su punjeni visoko-kvalitetnim uljem s dodatkom inhibitora koji poboljšava otpornost ulja na starenje. Otplinjavanje i dehidracija ulja provodi se pod visokim vakuumom do sadržaja vlage od 10 mikrograma po gramu, čime se postižu odlična dielektrička svojstva. Transformatorsko ulje, koje se koristi za mjerne transformatore, garantirano je bez polikloriranih bifenila (PCB) ili polikloriranih terfenila (PCT). Primarni priključci su izrađeni od elektrolitskog bakra ili aluminijskog bakra. Bakreni priključci zaštićeni su od korozije vrućim kositrenjem ili srebrenjem. Sekundarni priključci smješteni su unutar sekundarne priključne kutije, zajedno sa priključkom za uzemljenje sekundarnih namota. Izrađeni su od nehrđajućeg čelika, dimenzije navoja M8. Izolator je izrađen od visokokvalitetnog porculana cilindričnog oblika, smeđe ili druge boje prema zahtjevu. Klizna staza izolatora određuje se prema onečišćenosti atmosfere na mjestu ugradnje. Standardne vrijednosti duljine klizne staze su: 20, 25 ili 31 mm/kV najvišeg napona opreme, ovisno o zahtjevu kupca. Izolator, kao vanjska izolacija, osim od porculana može biti i kompozitni (GFK-silikon). Toplinsku dilataciju volumena ulja kompenziramo metalnom membranom izrađenom od nehrđajućeg čelika. Kućište je čelično, zavarene izvedbe. Visokokvalitetna, antikorozijska zaštita postiže se vrućim cinčanjem. Glava transformatora izrađena je od lijevanog aluminijskog aluminija.

Seizmička otpornost transformatora je veća od 0.3g.

Glavne karakteristike strujnog mjernog transformatora tipa AGU:

- Nazivne primarne struje su za:
  - primarno neprespojive transformatore do 6000A
  - primarno prespojive 1:2 do 2 x 2000A
  - primarno prespojive 1:2:4 do 4 x 1000A
- Nazivna sekundarna struja može biti 1,2 ili 5A.
- Broj jezgara, smještenih unutar aluminijskog torusa, nazivno opterećenje svake od jezgara, klasa točnosti, trajna termička struja su prema zahtjevu kupca i u skladu sa ugovorenim standardom.
- Nazivna kratkotrajna termička struja je:  $100 \times I_n$  ili max. 50 kA a nazivna dinamička struja:  $250 \times I_n$  ili max. 125 kA, osim kada se ne zahtjeva drugačije.
- Transformatori su standardno izrađeni za temperaturu okoline :  $-25 / +40^{\circ}\text{C}$ .

Dimenzije za model AGU-72,5 visina 2050 mm x 615 mm x 400 mm mase 350 kg [11].

Strujni mjerni transformatori kategorizirani su prema najvišim naponima opreme (naponskim nivoima) koji su standardizirani za nazivne stupnjeve izolacije.

Strujni mjerni transformatori tipa AGU imaju područje primjene napona opreme između 0,72 kV i 765 kV. Točna raspodjela napona opreme kod nazivnih stupnjeva izolacije prikazana je u tablici 2 - 2, prema standardu JUS N.H9.121 [14].

Tablica 2 - 2: Raspodjela napona opreme kod nazivnih stupnjeva izolacije za primarne namote transformatora [1]

Najviši napon opreme (efektivna vrijednost) (kV)									
0,72	1,2	3,6	7,2	12	17,5	24	38	52	

Najviši napon opreme (efektivna vrijednost) (kV)									
72,5	123	145	170	245	300	362	420	525	765

### 2.3.1.1 Tehnološki proces, faze i operacije prilikom proizvodnje mjernog strujnog transformatora tipa AGU

Tehnološki proces proizvodnje strujnog mjernog transformatora predstavlja niz tehnoloških faza. Tehnološka je faza sastavljena od brojnih tehnoloških operacija. Pojednostavljeni tablični prikaz tehnološkog procesa proizvodnje mjernog transformatora tipa AGU prikazan je u prilogu 1. Tehnološki proces proizvodnje strujnog mjernog transformatora predstavlja put koji prolaze zasebni dijelovi (torus, jezgra, izolatori, transformatorsko ulje) od trenutka njihove izrade, preko početka međusobne montaže pa do isporuke gotovog transformatora.

Tehnološka faza završnog spajanja torusa obuhvaća: spajanje polovica odljevaka aluminijskog torusa međusobno, i sa aluminijskom cijevi, nakon što su u torus umetnute jezgre sa izvodima. Spajanje i osiguravanje nepomičnosti spoja provodi se tehnološkom operacijom (postupkom) zavarivanja aluminijskih legura prikazanom na slici 1 - 1.

Dijelovi – polovice torusa - dobivene su tehnološkom operacijom (postupkom) lijevanja. Torus je dobiven spajanjem polovica torusa zavarivanjem.

Aluminijska cijev je opet rezultat tehnološke operacije (postupka) obrade metala deformiranjem – vučenja cijevi.

Formirani torus sa jezgrama i njihovim izvodima (kao rezultat jedne tehnološke faze) sada odlazi na drugu tehnološku fazu – bandažiranje (tzv. bandanje). Bandažiranje podrazumjeva omatanje izolacijskim papirom do željene debljine sloja glavne izolacije svitaka.

Nakon toga slijedi faza vakuumske sušenja svitaka, potom faza tzv. utopa ili umetanja osušenog svitka u prostor keramičkog izolatora. Slijedeća je faza hermetičkog zatvaranja svitka u prostor koji je tijekom faze punjenja transformatorskim uljem pod vakuumom. Prostor se ispunjava transformatorskim uljem koje propija svitak. Ovako potopljen svitak, impregniran je transformatorskim uljem.

## 2.4 Izolacijski materijali mjernih transformatora

Jedan od parametara kvalitete izolacijskih materijala jest i količina parcijalnih izbijanja. Izbijanja u plinovitim, tekućim i krutim dielektricima koja samo djelomice premošćuju izolaciju između elektroda te su ograničena na samo jedan dio dielektrika, nazivaju se parcijalna izbijanja [10]. Ona uzrokuju kvarenje svojstava izolacijskih materijala, njihovo prerano starenje, a u pojedinim prilikama i vrlo rani proboj izolacije. Osim toga, ona izazivaju elektromagnetske smetnje koje otežavaju prijem radiofonskih i televizijskih signala.

Uzrok parcijalnim izbijanjima je ionizacija koja nastaje u šupljinama i uključcima krutih dielektrika, u zračnim mjehurićima tekućeg dielektrika, uzduž površina krutog dielektrika koji je u plinu ili tekućini, te oko vodiča s oštrim rubovima i šiljcima.

Bego [9] je pokazao da je za točnost mjernih transformatora povoljno da prozor jezgre bude što manji. Prozor jezgre je prostor omeđen jezgrom. Stoga se kod mjernih transformatora za visoke napone, gdje najveći dio prozora jezgre ispunjava izolacija, upotrebljavaju najkvalitetniji izolacijski materijali i posebna tehnološka rješenja.

U mjernim transformatorima za niske napone, gdje izolacija zauzima relativno malo prostora, često se izoliranje provodi kao kod malih energetskih transformatora. Tu su namoti smješteni u izolacijske okvire izradene od prešpana, tvrda papira, bakelita ili sličnih materijala. Za izolaciju između slojeva i namota obično se upotrebljava uljni papir, uljna svila ili uljno platno. Radi zaštite od vlage, veće mehaničke čvrstoće i bolje toplinske vodljivosti impregnira se ili cijeli transformator ili samo namot prikladnim impregnacijskim sredstvom.

Uljni papir dobiven je impregnacijom natronskog celuloznog papira uljnim lakom. Izrađuje se od 0,02 do 0,3 mm debljine. Kod debljine uljnog papira od 0,02 mm probojni napon mora biti veći od 0,6 kV, a kod debljine od 0,3 mm veći od 8 kV.

Uljna svila dobivena je impregnacijom svilene tkanine uljnim lakom, debljine od 0,05 do 0,15 mm, s ravnim ili dijagonalnim usmjerenjem vlakana. Kod debljine od 0,05 mm, njezin probojni napon mora biti veći od 2 kV, a za 0,15 mm veći od 7,5 kV. Odlikuje se velikom savitljivošću i mehaničkom čvrstoćom, pa se njome u malim transformatorima najčešće izoliraju pojedini namoti kad se zahtijeva veća mehanička otpornost ili pouzdanija izolacija [9].

Uljno platno je uljnim lakom impregnirano fino tkano platno od 0,1 do 0,6 mm debljine s ravnim ili dijagonalnim usmjerenjem vlakana. Kod debljine od 0,1 mm probojni bi napon trebao biti veći od 3 kV, a za 0,3 mm veći od 11 kV. Jedina razlika između uljnog platna i uljne svile jest da je uljno platno nešto manje savitljivo od uljne svile.

Impregnacijom namota, ispunjavaju se pore i šupljine zaostale u namotu, suhim lakom koji ima znatno bolja svojstva od odstranjenog zraka. Time se postiže veća dielektrična čvrstoća, bolja toplinska vodljivost i hlađenje, manja higroskopsnost,



poboljšanje kompaktnosti i mehaničkih svojstava. Također se povećava toplinska postojanost jer se zbog sprječavanja dodira sa zrakom smanjuje oksidacija organskih izolacijskih materijala. Upotrebljavaju se impregnacijski lakovi s otapalima u kojima ima od 40 do 60 % neisparivih tvari, kao što su smole, sušiva ulja i slično. Ostatak čine otapala i razrjeđivači te impregnacijski lakovi bez otapala, kao što su nerazrijeđene umjetne smole (poliesteri i epoksidi), koji otvrdnjavaju uz pomoć katalizatora.

Na sam postupak impregnacije utječu osobine upotrijebljenog laka, izvedba namota i njegova toplinska klasa izolacije te postavljeni zahtjevi na izolacijska svojstva. Impregnacija se provodi tako, da se namot najprije suši na temperaturi većoj od 100°C kako bi se uklonila vlaga, a zatim još topli namot, temperature od oko 40°C do 50°C, uroni u lak i drži sve dok se na površini laka pojavljuju mjehurići zraka. Nakon toga se lak cijedi neko vrijeme pri sobnoj temperaturi, a onda suši u peći u dvije faze. U prvoj fazi, kod niže temperature, postupno se isparavaju otapala i razrjeđivači, a u drugoj se fazi završava stvrdnjivanje laka pri višoj temperaturi, koja se odabire ovisno o vrsti laka. Pri većim zahtjevima s obzirom na izolacijska svojstva namot se u vakuumu suši i puni lakom [9].

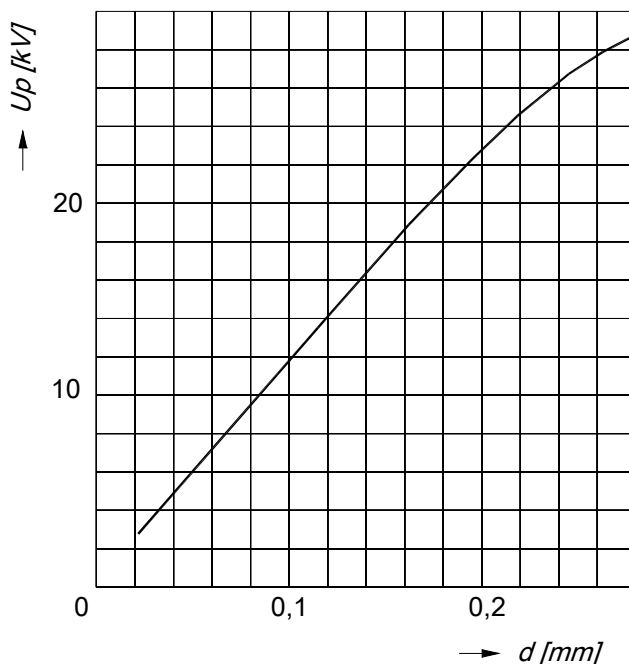
Na već opisani način obično se izoliraju mjerni međutransformatori i mjerni transformatori za niske napone u raznim mjernim uređajima. U mjernim transformatorima za rasklopna postrojenja nazivnog napona do 35 kV danas gotovo redovito kao izolacijski i konstrukcijski materijal služe epoksidne smole. One mehanički povezuju, a električki izoliraju pojedine dijelove transformatora, tvoreći njegovu unutrašnju i vanjsku izolaciju. To su spojevi viševalentnih fenola i njihovih derivata s epiklorhidrinom, kojima se prije upotrebe dodaje sredstvo za skrućivanje (otvrdnjivači). Ovisno o vrsti smole, skrućivanje nastaje pri temperaturama od sobne pa do otprilike 200°C. Volumen im se pri tom malo smanjuje, što je njihova velika prednost. Struktura odljeva sačinjenih od skrutnutih epoksidnih smola je monolitna i kompaktna, što daje izvanredna električna svojstva. Dielektrična čvrstoća im je oko 35 kV/mm, faktor gubitaka oko 0,001, specifični otpor  $10^{15}$  Ωcm, a relativna dielektrična konstanta 4,09. Njihova mehanička svojstva također su vrlo dobra. Vrijednost vlačne čvrstoće kreće se u granicama od 80 do 90 N/mm<sup>2</sup>, tlačna čvrstoća im je od 210 do 230 N/mm<sup>2</sup>, dok im je savojna čvrstoća u granicama od 90 do 100 N/mm<sup>2</sup>. Odlikuju se malom toplinskom rastezljivošću, oko  $35 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ . Epoksidne smole su toplinski postojane do temperature od 140°C.

Epoksidne smole miješaju se s punilima od anorganskih materijala. Mljevenjem odabranih anorganskih materijala nastaju praškaste tvorevine, čestica manjih od 0,1 mm. Najčešća punila su mljeveni kvarc, staklo, porculan i slično. Punila poboljšavaju neka svojstva smola: smanjuju temperaturni koeficijent istezanja i skupljanja pri stvrdnjivanju, povećavaju toplinsku postojanost i toplinsku vodljivost, te bitno smanjuju cijenu odljeva. Ovisno o vrsti smole i namjeni, dodaje se od 150 do 400% punila.

Epoksidne smole neznatno upijaju vodu, otporne su prema gljivicama, plijesnima,

bakterijama i termitima, te zadovoljavaju i u tropskim uvjetima. Uobičajene vrste slabo su otporne na ultraljubičaste zrake, koje smanjuju njihovu otpornost na električni luk. Zato su se pri izvedbama za vanjsku montažu odljevci od takvih smola morali zaštititi porculanskim izolatorom. Danas se, za transformatore izložene djelovanju sunčevih zraka, pretežno koriste cikloalifatske epoksidne smole, koje su znatno otpornije na ultraljubičasto zračenje, pa i bez posebne površinske zaštite pružaju zadovoljavajuću sigurnost.

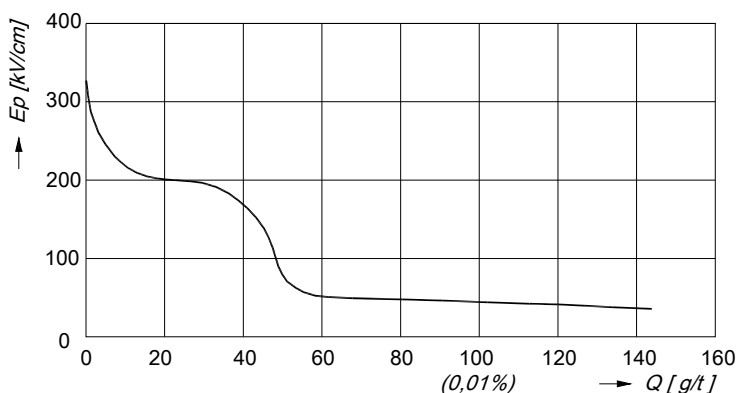
Namoti mjernih transformatora za vrlo visoke nazivne napone izoliraju se gotovo redovito papirom impregniranim uljem. Upotrebljava se papir izrađen iz natronsko sulfatne celuloze, obično debljine od oko 0,05 mm, gustoće od 0,67 do 70 g/cm<sup>3</sup>, vrlo homogen i kemijski čist. On se impregnira transformatorskim uljem, kondenzatorskim uljem ili nezapaljivim sintetičkim tekućinama. Kombinacijom papira i ulja dobiva se sredstvo vrhunske dielektrične čvrstoće čije su vrijednosti prikazane na slici 2 - 7. Uzrok je tome, što papir, razdvaja ulje u više tankih slojeva i time sprječava stvaranje kontinuiranih lanaca nečistoća u smjeru električnog polja. Zbog toga je dielektrična čvrstoća kombinacije znatno veća od one koju pruža samo ulje. Dielektrična konstanta pri sobnoj temperaturi iznosi od 3,5 do 4,3, već prema gustoći papira, a poraste za nekoliko postotaka na temperaturi od 90°C. Faktor dielektričnih gubitaka pri 20°C je od 0,003 do 0,005.



Slika 2 - 7: Dijagram dielektrične čvrstoće papira impregniranog uljem ovisne o debljini papira [10]

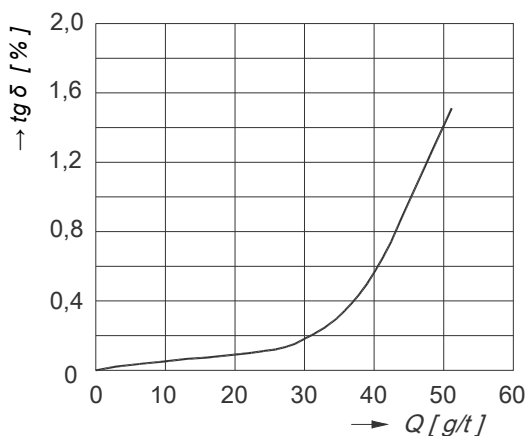
Iznijeti podaci o dielektričnoj čvrstoći i faktoru dielektričnih gubitaka vrijede za papir u ulju s neznatnim sadržajem vlage. Međutim, već i mala vlažnost ulja ili papira

impregniranoga uljem izrazito smanjuje njihovu dielektričnu čvrstoću i povećava faktor dielektričnih gubitaka [9]. Na slici 2 – 8 prikazana je dielektrična čvrstoća novoga transformatorskog ulja prosječne kvalitete ovisno o sadržaju vlage.



Slika 2 - 8: Dielektrična čvrstoća transformatorskog ulja u ovisnosti o sadržaju vode  $Q$  [10]

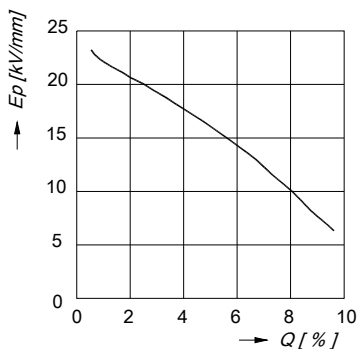
Na slici 2 – 8 vidljivo je da već nekoliko grama vode na tonu ulja smanjuje njegovu dielektričnu čvrstoću od 300 na 200 kV/cm. Porast sadržaja vode između 40 i 60 g vode po toni ulja, izaziva nagli pad dielektrične čvrstoće. Dalji porast sadržaja vode, međutim, malo utječe, pa dielektrična čvrstoća ostaje praktički konstantna sve do 1% vode u ulju, što je najveći mogući postotak pri 20°C i iznosi oko 30 kV/cm. Upotrebljavanim i vlažnim uljima vrijednosti su još niže (oko 20 kV/cm). Vlaga u ulju znatno kvari njegov faktor dielektričnih gubitaka, što utječe na porast fazne pogreške, kako je to prikazano na slici 2 – 9.



Slika 2 - 9: Faktor dielektričnih gubitaka [10]

Slično tome ponaša se papir impregniran uljem. Njegova dielektrična čvrstoća i faktor dielektričnih gubitaka jako ovise o vlazi.

Slika 2 - 10 prikazuje kako probojni napon papira impregniranoga uljem ovisi o sadržaju vlage i predstavlja 1-minutnu efektivnu vrijednost dielektrične čvrstoće papira impregniranog uljem za debljine veće od 10 mm ovisno o sadržaju vode u postocima. Porast sadržaja vlage značajno smanjuje vrijednost probojnog napona. Nizak postotak sadržaja vlage postiže se sušenjem papirne izolacije.



Slika 2 - 10: Dijagram 1-minutne efektivne vrijednosti dielektrične čvrstoće [10]

Postupak sušenja je dugotrajan, osobito kod mjernih transformatora za vrlo visoke napone, koji imaju debelu papirnu izolaciju. Provodi se tako da se aktivni dio transformatora sa papirnom izolacijom najprije jedan do dva dana suši u peći pri temperaturi od oko  $80^{\circ}\text{C}$  i atmosferskom pritisku. Zatim se smješta u tzv. vakuumsku peć i nastavlja se sušiti. Suši se postupno, smanjujući pritisak sve do npr.  $0,017$  mbar. Tijekom sušenja nadzire se i količina kondenzirane vode. Kada se postigne željena „suhooća“ izolacije aktivni dio transformatora umeće se, „utapa“, u kućište transformatora i poklapa tzv. poklopcem. Slijedi vakumiranje cijele unutrašnjosti transformatora uključivši i papirnu izolaciju. Nakon toga se transformator, pod vakuumom, puni već prije osušenim transformatorskim uljem.

Papir od kojeg se izrađuje izolacija sadrži na početku sušenja i do 12 % vode, pa u transformatoru sa 100 kg papirne izolacije može biti i do 12 kg vode. Da bi se tijekom upotrebe mjernih transformatora spriječio prodor vlage u njihovu izolaciju, upotrebljavali su se, u starijim izvedbama, konzervatori slični onima kod energetskih transformatora. Takva rješenja nisu bila sasvim uspješna, i postotak vlage u izolaciji se postupno povećavao. Brojna su mjerenja i ispitivanja pokazala, [15] i [16], da se najviše vlage prikuplja u papirnoj izolaciji, gdje se nakon 5 do 20 godina, ovisno o konstrukciji i pogonskim uvjetima, postigne iznos od nekoliko postotaka, pa čak do 10%. Ako se to na vrijeme ne uoči, takva vlažnost može izazvati proboj izolacije, osobito u onim izvedbama u kojima je ona oskudnije dimenzionirana.

Jednako je važno, da tijekom transporta ili montaže aktivnog dijela transformatora, nakon što je osušena, papirna izolacija ponovo ne upije određeni postotak vlage iz zraka. Nakon što je aktivni dio sa papirnom izolacijom smješten i zatvoren u kućište transformatora, potrebno je osigurati da tijekom njegove dugogodišnje upotrebe vlaga ne bi prodrila u njegovu izolaciju. Novije izvedbe malouljnih mjernih transformatora redovito su hermetički zatvorene, čime je onemogućen pristup

vanjske vlage u unutrašnjost transformatora. Ipak, i u njih, zbog neispravne montaže ili naknadno oštećenog sistema brtvljenja, može prodrijeti vlaga, pa je iz tog razloga potrebno povremeno provjeravati stanje njihove izolacije. To se provodi mjerenjem faktora dielektričnih gubitaka  $\tan \delta$  u izolaciji transformatora ili, što je mnogo jednostavnije, mjerenjem otpora izolacije UI-metodom [17]. Smatra se da uz faktor dielektričnih gubitaka lošiji od 3% pri 20°C treba transformatoru ponovo sušiti izolaciju. Mjernim transformatorima kojima je nazivni napon 110 kV i faktor gubitaka 3%, odgovara otpor izolacije od otprilike 10 G $\Omega$  pri 20°C. Izolacijski otpor mjeri se deset minuta nakon uključivanja istosmjernog napona kako bi se izbjegao učinak polarizacije u izolaciji [9].



---

## TRANSFORMATORSKO ULJE

---

### 3.1 Karakteristike i kemijski sastav transformatorskog ulja

Izolacijska ulja su tekući izolacijski materijali proizvedeni od mineralnih uljnih sirovina koji se koriste za izolaciju i hlađenje razne opreme za proizvodnju i distribuciju električne energije kao što su transformatori, mjerni transformatori, preklopke, uljem punjeni kablovi i sl.

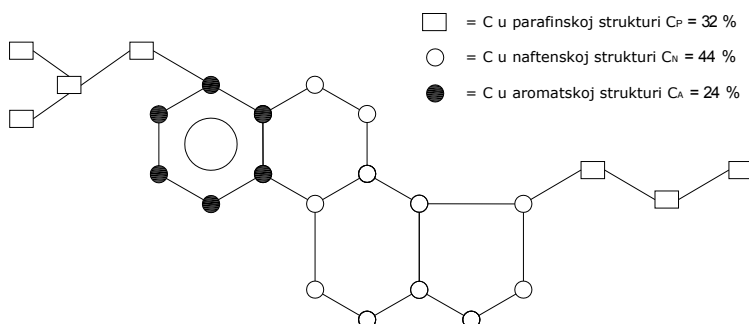
Visokoučinkovita izolacijska ulja koja se koriste u transformatorima ili mjernim transformatorima često se nazivaju transformatorska ili trafo ulja. Transformatorska ulja proizvedena su s ciljem osiguranja sigurnog rada tijekom radnog vijeka mjernog transformatora bez potrebe za regeneracijom ili izmjenom. Od proizvođača mjernih transformatora očekuje se garancija takvog radnog vijeka unutar četrdeset godina [18].

Transformatorsko ulje ima naglašena elektro-izolacijska svojstva od kojih je najvažnija visoka dielektrička čvrstoća. Sadrži inhibitore oksidacije koji usporavaju starenje ulja u prisutnosti kisika, željeza i bakra. Fizikalno-kemijska svojstva transformatorskog ulja bitna za primjenu u mjernim transformatorima su:

- visoki specifični izolacijski otpor,
- niski faktor dielektričkih gubitaka,
- niska isparljivost,
- izvanredna kemijsku stabilnost,
- svojstvo apsorpcije plinova,
- niska viskoznost kod niskih temperatura.

Transformatorsko ulje ima veliku graničnu površinsku napetost, dobra svojstva gašenja električnog luka i dugi vijek upotrebe - specifikacija kvalitete prema IEC-60296 [19].

Transformatorska ulja se proizvode iz sirove nafte posebnim postupkom rafinacije i predstavljaju rafinirane vakuum destilate odgovarajuće viskoznosti. Po svom kemijskom sastavu predstavljaju smjesu naftenskih, parafinskih i aromatskih ugljovodika povezanih u molekularne strukture različitih vrsta. Na slici 3 - 1 je prikazana tipična molekula transformatorskog ulja [20].



Slika 3 - 1: Molekula transformatorskog ulja [20]

Ovisno o tome da li je ulje proizvedeno iz naftenske ili parafinske nafte ono sadrži veći ili manji postotak naftenskih odnosno parafinskih ugljikovodika pa se prema tome ulja dijele na parafinska i naftenska. Sadržaj treće grupe ugljikovodika, aromatskih, koji je i najvažniji za kvalitetu ulja, sličan je kod oba tipa i kreće se od 4 do 18%. Ulja mogu biti inhibirana ili neinhibirana, ovisno o tome da li u svom sastavu sadrže inhibitor oksidacije ili ne. Kod inhibiranih ulja, inhibitor oksidacije je naknadno dodan u procesu proizvodnje ulja.

Kvaliteta transformatorskog ulja je svojstvo transformatorskog ulja, da u trenutku proizvodnje postigne i tijekom eksploatacije zadrži određene fizikalne, kemijske i električne karakteristike.

Transformatorsko ulje, bez obzira da li je novo ili je iz eksploatacije, mora imati odgovarajuće vrijednosti svojih karakteristika. Te su karakteristike propisane odgovarajućim standardima, što se redovito provjerava u kemijskom laboratoriju.

Da bi se transformatorsko ulje nakon punjenja u transformatore moglo koristiti kao izolacijsko i rashladno sredstvo, ulje mora i dalje zadovoljiti određenim standardima zahtjevane fizičke, kemijske i električne karakteristike. Zadržavanje zadovoljavajuće kvalitete transformatorskog ulja, odmah nakon punjenja i tijekom eksploatacije, može biti ostvareno, pod uvjetom da su u transformatoru ugrađeni dijelovi od kompatibilnih materijala i da je postignuta zadovoljavajuća „suhoća“ izolacijskog

sustava. Sadržaj vode u transformatorskom ulju mjeri se u miliontnim dijelovima vode sadržanim u postojećoj količini ulja tzv. ppm (*eng. parts per million*). Mali sadržaj vode u ulju, karakteristika je „suhog“ ulja, i postiže se dobrom obradom ulja i aktivnog dijela transformatora prilikom prvog punjenja uljem tijekom proizvodnje ili servisa. Mali sadržaj vode u ulju zadržava se odgovarajućom zaštitom sistema tijekom eksploatacije od prodiranja vanjske atmosfere vlage.

Voda nastaje i tijekom eksploatacije transformatora kao jedan od produkata starenja ulja pa je uvjet za dugogodišnju upotrebu izolacijskog sustava transformatora upotreba ulja sa dobrim kemijskim karakteristikama.

Oksidacijska stabilnost ulja ili otpornost ulja prema starenju, kojem je ulje podložno tijekom dugogodišnje eksploatacije, najvažnija je kemijska karakteristika. Tijekom eksploatacije mjernog transformatora, najznačajniji utjecaj na starenje ulje ima:

- radna temperatura;
- oksidacijsko djelovanje otopljenog kisika;
- katalitičko djelovanje kiselih produkata starenja ulja;
- korozijski produkti metalnih konstrukcijskih dijelova i sl.

Druga osnovna uloga ulja je hlađenje izolacijskog sustava transformatora, i sa tom svrhom ulje mora biti dovoljno pokretljivo. Takva pokretljivost može se definirati uz pomoć slijedećih osnovnih fizičkih karakteristika:

- viskoznost;
- niskotemperaturne karakteristike;
- gustoća i sl.

Fizičke se karakteristike postižu odabirom odgovarajuće sirovine za proizvodnju ulja i tijekom samog procesa proizvodnje.

Navedene i druge karakteristike ulja se provjeravaju ispitivanjem u kemijskom laboratoriju prema stranim i domaćim standardima. Ulje zadovoljava uvjete za upotrebu u visokonaponskoj opremi ako zadovoljava sve kriterije definirane u osnovnim standardima i to za svaku pojedinačnu karakteristiku ulja [20].

Mineralno transformatorsko ulje sastoji se od različitih molekula ugljikovodika, koji sadrže kemijske grupe ugljika i vodika,  $-CH_3$ ,  $-CH_2$  i  $-CH$  međusobno povezane C – C vezama. Kao posljedica električnih i termičkih kvarova može doći do kidanja nekih C – H i C – C veza, uz stvaranje malih nestabilnih dijelova, radikala ili iona, kao i mnogih drugih složenih oblika. Svi se oni brzo pregrupiraju u molekule plinova, vodika ( $H_2$ ), metana ( $CH_4$ ), etana ( $C_2H_6$ ), etilena ( $C_2H_4$ ) ili acetilena ( $C_2H_2$ ). Mogu nastati i plinovi s više ugljikovih atoma u molekuli ( $C_3$  i  $C_4$ ), krute čestice ugljika (grafit) i polimeri ugljikovodika (X – vosak). Nastali plinovi se otapaju u ulju ili, ako se stvaraju brzo u većim količinama, izdvajaju iz ulja kao slobodni plin [21].

Energije koje razaraju molekule ulja mogu se grupirati u sljedeće razine:



- niska energija kao što su parcijalna izbijanja tipa hladne plazme izazivaju preko reakcija ionizacije kidanje najslabijih C-H veza (338 kJ/molu) i stvaranje velike količine vodika;
- veće energije i/ili više temperature potrebne su za kidanje veza C-C i njihovu pretvorbu u plinove s jednostrukom vezom C-C (607 kJ/molu), dvostrukom vezom C=C (720 kJ/molu) ili trostrukom vezom C≡C (960 kJ/molu).

Na kemijski sastav transformatorskog ulja u eksploataciji utječe i izolacijski materijal aktivnog dijela transformatora, koji je uronjen – potopljen u ulje. Transformatorskim uljem propijen papir, prešpan ili drvo čine izolacijski sustav.

Kruta celulozna izolacija (papir, prešpan, komadi drveta) sastoji se od polimernih lančanih molekula građenih od velikog broja jediničnih prstenova glukoze. Slabe molekularne C-O veze u celulozi i kemijske veze unutar glukoze termički su nestabilnije od kemijskih veza ugljikovodika ulja i razgrađuju se kod nižih temperatura. Značajna je brzina kidanja polimernih lanaca kod temperatura iznad 105°C, uz potpunu razgradnju i karbonizaciju iznad 300°C. Uglavnom nastaju ugljični monoksid i dioksid, te voda, u znatno većim količinama nego kod oksidacije ulja kod iste temperature. Nastaju također spojevi furana i neznatne količine ugljikovodika. Analiza furana provodi se prema metodi određenoj standardom IEC 61198 [22] i dobra je dopuna kromatografskoj analizi plinova kad se procjenjuje intenzitet degradacije celulozne izolacije. Sadržaj CO i CO<sub>2</sub> povećava se s temperaturom, sadržajem kisika u ulju i sadržajem vode u izolaciji.

Plinovi u ulju ne znače uvijek greške u izolacijskom sustavu transformatora. U nekim slučajevima oni mogu nastati i kao produkt korozije i drugih kemijskih reakcija na površini čelika, nezaštićenih metalnih površina ili zaštitnih prevlaka (AKZ). Unutarnje prevlake transformatora, kao što su alkidne boje i modificirani poliuretani koji sadrže masne kiseline, također mogu razvijati plinove. Ovakve pojave međutim nisu česte i mogu se najpouzdanije otkrivati plinsko kromatografskom analizom na novoj opremi, prije stavljanja pod napon ili testovima kompatibilnosti materijala. Reakcijom čelika s vodom nastaje vodik, kad je u okolnom ulju prisutan kisik. Za takve reakcije nije neophodno da transformator bude pod naponom. Vodik se može stvarati i kod reakcije slobodne vode sa specijalnim prevlakama AKZ na metalnim površinama, ili kod katalitičkih reakcija nekih vrsta čelika s uljem, pogotovo kod povišenih temperatura kad ulje sadrži kisik. Vodik može dospjeti u čelik ili aluminijske legure prilikom proizvodnje ili zavarivanja, a zatim se polagano oslobađa i prelazi u ulje. Vodik nastaje također pri razgradnji tankog sloja ulja između pregrijanih limova jezgre kod temperatura od 1400°C i više.

Nadalje, sekundarni uzroci pojave plinova u ulju mogu biti i sljedeći:

- zaostali plinovi od starog kvara, ako kod sanacije transformatora ulje nije otplinjeno;
- atmosferska onečišćenja;

- kvar motora za pumpanje ulja;
- transformator transportiran s CO<sub>2</sub>.

## **3.2 Određivanje plinova iz transformatorskog ulja**

U ovom radu korišteni su rezultati metode plinske kromatografije provedene u Laboratoriju za fizikalno-kemijska ispitivanja (KONČAR – Institut za elektrotehniku d.d.). Metode ispitivanja provedene su prema IEC 60567 [23] i IEC 61181, a rezultati su prikazani u prilogima 2 do 7.

Provedba kromatografske analize plinova iz ulja odvija se u nekoliko faza koje se odnose na:

- 1) Reprezentativni uzorak ulja (plina)
- 2) Izdvajanje plina iz ulja – ekstrakcija plinova iz ulja
- 3) Analizu plina pomoću plinskog kromatografa (razdvajanje plinova; prepoznavanje vrste pojedinog plina; izračunavanje količine svakog plina)
- 4) Interpretaciju rezultata

### **3.2.1 Vrsta i reprezentativnost uzoraka**

Reprezentativan uzorak je kontrolirano izdvojen dio veće količine materijala čije stanje predstavlja. Postupci uzimanja uzoraka opisani su u normi IEC 60567 [23]. I ovdje postoje varijante, za koje se pojedini laboratoriji mogu sami odlučiti. Mjesta uzimanja uzoraka na transformatorima uvjetovana su konstrukcijskim izvedbama, odnosno smještajem ventila za uzimanje uzoraka, ispuštanje ili dopunjavanje ulja. Uobičajeno je uzimanje uzoraka ulja za redovnu kontrolu iz donjeg nivoa kotla. Prilikom uzimanja kontrolnih ili izvanrednih uzoraka, koriste se ostala raspoloživa mjesta. U slučaju izvanrednih pojava s naglim razvijanjem plinova, u početku je raspodjela plinova po volumenu ulja nejednolika, dok nakon izvjesnog vremena dolazi do izjednačenja. Zato je u pojedinim slučajevima korisno uzeti više uzoraka, na različitim mjestima, čim prije nakon uočene pojave. Uzimanje uzoraka provodi se ponovno nakon određenog kraćeg vremena.

Označavanje uzoraka potrebno je provesti s dovoljnim brojem podataka, nužnim za kasniju identifikaciju i interpretaciju rezultata mjerenja.

Uzorci na kojima se provodi kromatografska analiza plinova dijele se na slijedeći način [23]:

- Etaloni (potvrđeni referencijski materijali i radni etaloni) podrazumijevaju materijale koji služe za kalibraciju i rekalkibraciju instrumenta, odnosno za provjeru rezultata ispitivanja. To su smjese plinova s poznatim udjelima pojedinog plina, pripremljene kod ovlaštenih proizvođača ili laboratorija, popraćene potvrđnicom (certifikatom). Po mogućnosti, udio pojedinog plina u

kalibracijskoj smjesi treba biti što sličniji sastavu ispitivanog plina. Pojedini laboratoriji nastoje sami pripremiti radne etalone transformatorskog ulja s određenom količinom otopljenog plina, koji se analiziraju prema certificiranim etalonima u više laboratorija. Svaki laboratorij također ima svoje interne kontrolne etalone, koji služe za češću provjeru pokazivanja instrumenta.

- Referentni uzorci mogu biti uzorci ulja iz istog transformatora, prije stavljanja pod napon, uzorci prethodnih mjerenja, koji odgovaraju normalnom stanju, ili uzorci iz istovjetnih, paralelnih odnosno sličnih transformatora, a koji služe za usporedbu.
- Početni uzorci uzimaju se prije stavljanja pod napon, prije nastavka pogona, nakon popravaka, prije praćenja neke pojave.
- Kontrolni uzorci (ponovljeni) su oni koji se uzimaju istovremeno ili kratko vrijeme nakon planiranih, sa istog mjesta, za naknadnu provjeru ili dodatna ispitivanja, zatim uzeti s različitih mjesta, za provjeru distribucije plinova unutar ukupne mase ulja.
- Uzorci za redovnu kontrolu uzimaju se u pravilnim odnosno dogovorenim vremenskim razmacima, u pravilu uvijek s istog mjesta i na jednak način,
- Izvanredni uzorci uzimaju se neposredno nakon izvanrednih događanja u mreži, ispada transformatora proradom zaštite i sl.

Za uzimanje uzoraka, prema IEC 60567 [23], propisano je korištenje staklenih šprica nepropusnih za plin, što se provjerava postupkom provjere brzine propuštanja vodika. U praksi se često koriste i metalne posude.

Staklene šprice, volumena prilagođenog ispitnoj metodi, dozvoljavaju promjenu volumena s temperaturom, propisane su normom IEC 60567 [23]. Nedostatak je relativno visoka cijena, lomljive su i potrebna je posebna ambalaža za transport. Ispitivanje treba provesti unutar određenog vremena. Potrebna je povremena provjera nepropusnosti s obzirom na plin.

Metalne posude sadrže veću količinu uzorka, dovoljnu za sva ispitivanja. Pogodne su za korištenje u terenskim uvjetima, mogu se sigurno držati u pričuvi, nisu lomljive, zahtijevaju veću pažnju kod uzimanja uzoraka i uzorak nije vidljiv. Iz tog se razloga ne mogu zapaziti mjehuri plina, talozi ili druge važne vidljive promjene. Koriste se za dulje stajanje, nisu normirane, zahtijevaju povremenu provjeru usporedbom sa uzorcima uzetim špricom.

### **3.2.2 Ekstrakcija plinova iz ulja**

Uzorci ulja moraju se najprije pripremiti za analizu i to tako da se plin izdvoji iz ulja. Postoji više metoda, od potpune i djelomične ekstrakcije u posebnim vakuumskim uređajima punjenim živom, zatim automatske, računalno vođene vakuumske ekstrakcije, "istjerivanja" plinova iz ulja inertnim plinom ("stripping") i metode uspostavljanja ravnotežnog stanja između plina i ulja ("head space").

Kod "stripping" metode vrlo mala količina ulja (0,25 do 5 ml) uvodi se u uređaj za istjerivanje plinova pomoću struje inertnog plina ("stripper") koji je priključen na ulazni ventil plinskog kromatografa. Ova metoda nema dovoljnu osjetljivost za ispitivanje kod novih transformatora.

Kod metode "head space" provodi se djelomično termičko otplinjavanje ulja i nakon uspostavljanja ravnotežnog stanja između ulja i plina, analiziraju se djelomično izdvojeni plinovi.

Izbor metode ovisi o tehničkim mogućnostima pojedinog laboratorija.

U Laboratoriju za fizikalno-kemijska ispitivanja koristi se metoda potpune ekstrakcije plinova iz ulja u vakuumskom uređaju sa živom. Plinska bireta u kojoj se skuplja i odmjerava plin izdvojen iz ulja direktno je spojena na ulazni ventil plinskog kromatografa.

Svaka od navedenih metoda ima svoje prednosti i nedostatke, ali je važno napomenuti da se kod uspoređivanja rezultata ispitivanja različitih laboratorija moraju uzeti u obzir i metode pripreme uzoraka, te da se za praćenje stanja i utvrđivanje brzine porasta plinova analize moraju provoditi na isti način.

### **3.2.3 Analiza plinova iz ulja**

Metoda plinske kromatografije jedina je pouzdana metoda za određivanje kemijskog sastava smjese plinova. Instrumenti su danas izvanredno osjetljivi, do razine milijuntog dijela jediničnog volumena. Pri analizi plinova otopljenih u ulju, dovoljno je odrediti devet plinova iz relativno male količine uzorka (nekoliko mikrolitara plina). Plinovi koje je potrebno odrediti su: 1) vodik ( $H_2$ ); 2) metan ( $CH_4$ ); 3) acetilen ( $C_2H_2$ ); 4) etilen ( $C_2H_4$ ); 5) etan ( $C_2H_6$ ); 6) ugljični monoksid ( $CO$ ); 7) ugljični dioksid ( $CO_2$ ); 8) kisik ( $O_2$ ); 9) dušik ( $N_2$ ). Nekoliko različitih procedura koristi se za analizu plinova otopljenih u transformatorskom ulju. Uređaj za ekstrakciju plina može biti direktno povezan s jednim kromatografom, ili se ekstrakcija plinova provodi u odvojenom uređaju i plin injektira špricom u jedan ili više kromatografskih sustava.

Nešto je drugačiji princip kod analizatora za on-line praćenje plinova u transformatoru. Senzor, koji je u direktnom kontaktu s uljem, ima polupropusnu membranu kroz koju prolazi dio plinova u elektrolitsku ćeliju, koja je u dodiru sa zrakom i pretvara naboj na elektrodi u električni signal. Druga verzija plinskih detektora, izvedenih za transformatore sa zatvorenim sustavom disanja, ima senzor neposredno u plinu iznad ulja, detektira vrstu i količinu plinova i preračunava na sadržaj plinova u ulju na temelju topivosti plinova kod određene temperature.

Metoda koju pojedini laboratorij odabire mora osiguravati granice detekcije i ponovljivost mjerenja koje zahtjeva norma.

U Laboratoriju za fizikalno-kemijska ispitivanja, nakon što je u plinskoj bireti skupljen i odmjeren, plin se ubacuje u kromatograf. Plin za analizu ubacuje se u

struju inertnog plina, prolazi kroz kolone punjene selektivnim adsorbensima na kojima se razdvaja u komponente tako da u detektore dolaze pojedinačni plinovi u točno određenim vremenskim razmacima. Rezultat analize je kromatogram, koji je određen na apscisi vremenom pojavljivanja plina u detektoru, a na ordinati visinom električnog signala. Vrijeme je prema tome kvalitativna karakteristika pojedinog plina, a površina ispod krivulje proporcionalna je količini. Umjeravanje se provodi pomoću etalonskih uzoraka [21].

### **3.2.4 Interpretacija rezultata ispitivanja**

Rezultati analize plinova u ulju se iskazuju koncentracijom, tj. omjerom volumena plina,  $\mu\text{L}$ , sadržanog u 1 litri ulja ( $\mu\text{L/L}$ ). Ako analizom neki plin nije nađen, korektno iskazivanje rezultata je: "ispod granice detekcije za dotični plin", ili npr.: ND (nije detektiran).

Na temelju rezultata analize plinova moguće je dijagnosticirati tri temeljna uzroka degradacije izolacije, koji su prema standardu IEC 60599 [24] podjeljeni na šest tipičnih grešaka, sa sljedećim vidljivim posljedicama:

1. parcijalna izbijanja (PD) tipa korone izazivaju taloženje X-voska na papirnoj izolaciji, a ako je prisutno slabo iskrenje, nastaju rupice veličine vrha pribadače, karbonizirana rupičavost papira, koji se ponekad teško pronaze;
2. izbijanja male energije ( $D_1$ ), iskrenje u ulju i/ili papiru, vidljiva su većim karboniziranim perforacijama papira, karbonizacijama površine papira ("tracking") ili česticama ugljika u ulju;
3. izbijanja velike energije ( $D_2$ ), električni luk podržavan mrežom, u ulju i /ili papiru, prepoznatljiv je kao veliko razaranje i karbonizacija papira, s tragovima taljenja metala na krajevima izbijanja, izraženom karbonizacijom ulja, a u nekim slučajevima rezultiraju ispadom transformatora;
4. termički kvar, lokalno ili opće pregrijavanje u ulju i papiru, do  $300\text{ }^\circ\text{C}$  ( $\vartheta_1$ ), kad je papir smeđkast;
5. termički kvar, u ulju i papiru, iznad  $300^\circ\text{C}$  ( $\vartheta_2$ ), kad je papir karboniziran;
6. termički kvar temperatura iznad  $700^\circ\text{C}$  ( $\vartheta_3$ ), još nije izražena karbonizacija ulja (kod promjene boje metala radi se o  $800^\circ\text{C}$ , a taljenje metala nastaje iznad  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ ).

Često se događa da jedna pojava prelazi u drugu, ili se dvije pojave događaju istovremeno. Dodatne informacije dobivaju se iz sadržaja i omjera ostalih analiziranih plinova.

Plinovi nastali razgradnjom celuloze kod normalnog starenja su  $\text{CO}_2$  i CO u omjeru  $\text{CO}_2 / \text{CO}$  od 3 do 10. Kod visokih temperatura brže se stvara CO, pa je kod omjera manjeg od 3 visoka vjerojatnost da je došlo do oštećenja papira i eventualno karbonizacije. Prije računanja omjera  $\text{CO}_2 / \text{CO}$  treba provesti korekciju za udio  $\text{CO}_2$

iz zraka i oduzeti plinove nastale normalnim starenjem. Kod transformatora sa zatvorenim sustavom disanja, može doći do propuštanja zraka, što utječe na povećanje koncentracije CO<sub>2</sub>.

Kisik i dušik iz atmosfere otapaju se u ulju kod normalnog tlaka zraka do 10 % vol. ulja, od toga je približno 3 % kisik, 7 % dušik, a CO<sub>2</sub> iznosi do 300 µL/L. Normalni omjer O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> približno je 0,5. Smanjeni omjer može biti znak povećanog utroška kisika kod ubrzanog starenja.

### 3.3 Postupak uzorkovanja transformatorskog ulja

Postupak uzimanja uzoraka plina i ulja iz uljem punjenih transformatora provodi se na način koji osigurava dobivanje reprezentativnih uzoraka i nepromijenjenost sastava za kromatografsku analizu plinova iz transformatorskog ulja, prema normi IEC 60567 [23] i radnoj uputi RU 52-K-013 [25].

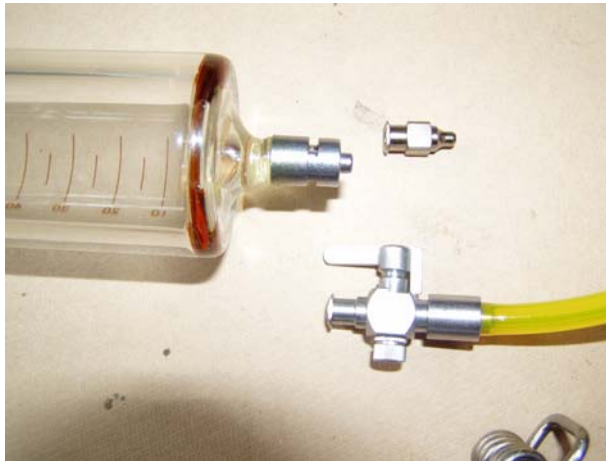
Prilaz transformatoru u pogonu (ili u slučaju uzimanja uzoraka iz spremnika - posuda sa uljem i uzorcima 1, 2, 3 i 4 za potrebe pokusa opisanog u ovom radu) i samo uzimanje uzoraka provodi se u skladu s lokalnim pogonskim propisima osobne i tehničke zaštite. Uzorak ulja uzima se u staklenu špricu prikazanu na slici 3 - 2, neposredno iz uređaja, kako ne bi došao u dodir sa zrakom. Hermetički spoj šprice i transformatora onemogućava miješanje plinova iz okoliša sa uzorkom. Uzorak se uzima na za to predviđenom ventilu iz donjeg nivoa transformatora. Transformatorski ventil za punjenje transformatora uljem i uzimanje uzoraka uljem naziva se još ispusni ventil ili ispus. Ispusni ventil uređaja tvornički je izveden za uzimanje uzorka na način koji omogućava hermetičko priključivanje naprave na kraju crijeva.



Slika 3 - 2: Pribor za uzimanje uzoraka transformatorskog ulja

Za uzimanje, označavanje i transport uzoraka, potreban je slijedeći pribor:

- Graduirana staklena šprica volumena 100 do 250 ml sa staklenim klipom i metalnim zatvaračem sa tzv. „luer lock” sistemom prema ISO 594:1986 prikazanim na slici 3 – 3 . Količina uzorka u jednoj šprici mora biti dovoljna za analizu.



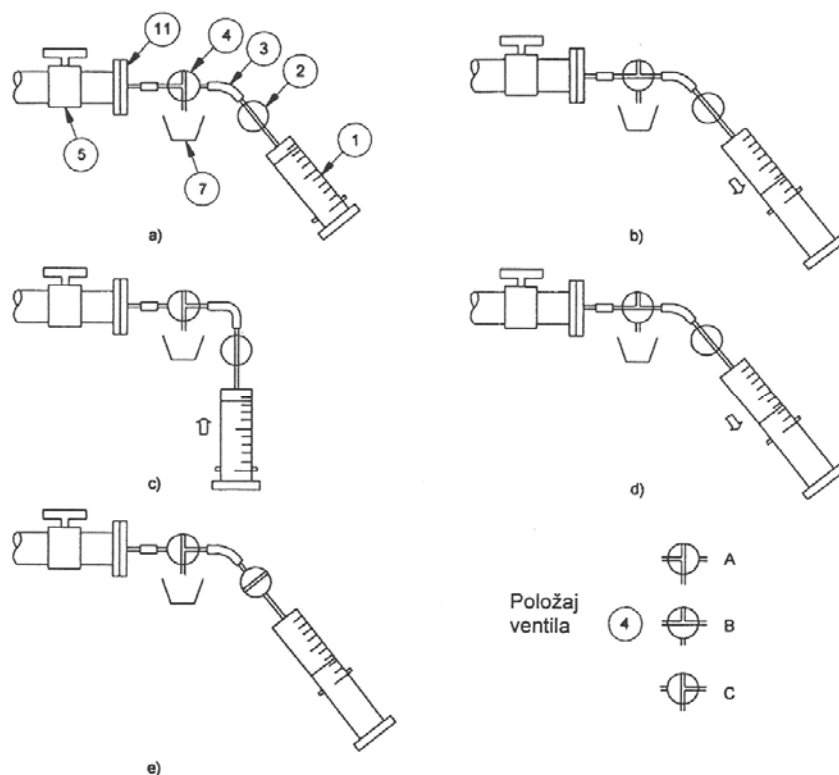
*Slika 3 - 3: Sistem „luer lock” na otvoru šprice sa pripadajućim čepom i ventilicom*

- Nepropusno, uljostalno, fleksibilno, što je moguće kraće, crijevo (unutarnjeg promjera 6-8 mm) s pripadajućim trokrakim (ili dvokrakim) ventilicom, za spajanje šprice i crijeva. Crijevo s ventilicom, prikazano na slici 3 – 2, na jednom kraju spaja se na špricu dok se na drugom kraju spaja, naprava za hermetičko priključivanje na ventil za punjenje transformatora uljem (ispusni ventil).
- Transportna oprema mora omogućiti da su šprice učvršćene tijekom transporta, a da se klip može slobodno gibati kod dilatacije ulja radi promjene temperature.
- Termometar za mjerenje temperature okoline.
- Etikete ili kartice za označavanje uzoraka.

Prije uzorkovanja transformatorskog ulja potrebno je provesti brzu kontrolu nepropusnosti šprice i ventilica. Kontrola nepropusnosti se provodi povlačenjem klipa šprice prema oznaci maksimuma u trenutku kada je ventilic zatvoren. Nakon desetak sekundi klip se pusti nakon čega se vraća u svoj početni položaj. Ukoliko se klip nije vratio u svoj početni položaj i između njega i tijela šprice postoji određena zračnost, šprica ili ventilic nisu nepropusni. Bolje brtvljenje klipa postiže se nauljivanjem šprice s transformatorskim uljem. Ukoliko i nakon nauljivanja nije postignuta nepropusnost, potrebno je zamjeniti ili špricu ili ventilic, ili oboje.

Postupak uzimanja uzorka ulja prikazan je na slici 3 – 4 i provodi se na slijedeći način:

- Ispust (ventil) na transformatoru za uzimanje uzoraka očisti se čistom i suhom krpom,



a	Ispiranje ventila	1	Staklena šprica
b	Nauljivanje i ispiranje šprice	2	Ventil
c	Pražnjenje šprice	3	Elastična spojna cijev
d	Upuštanje uzorka	4	Trokraki ventil
e	Odvajanje šprice	5	Ventil za uzimanje uzorka
		7	Posuda za otpadno ulje
		11	Prirubnica

Slika 3 - 4: Uzimanje uzorka ulja pomoću staklene šprice [25]

- Sa šprice se ukloni metalni zatvarač i priključi se ventilić,
- Izvadi se klip šprice i naulji ga se čistim uljem,
- Provjeri se nepropusnost šprice i ventilića,
- Otvori se ventil na transformatoru, ventilić se okrene (položaj A) i ispusti se od 1 do 2 litre ulja, u posudu za otpadno ulje. Ispiranje ventila transformatora je prikazano na slici 3 – 4 a),
- Spaja se šprica, ventilić se otvara (položaj B) i ulje se upušta u špricu do oznake maksimalnog volumena – postupak je prikazan na slici 3 – 4 b),
- Ventilić se okreće (položaj C) i ispušta se sva količina ulja u posudu za otpadno



ulje - ispiranje šprice je prikazano na slici 3 – 4 c),

- Ventilić se vraća u položaj B i ponovo se upušta ulje do oznake maksimalnog volumena – upuštanje uzorka prikazano je na slici 3 – 4 d),
- Ventilić šprice i ventil na transformatoru se zatvaraju, nakon čega slijedi odvajanje šprice, prikazano na slici 3 – 4 e),
- Šprica se okreće okomito, tako da ventilić bude okrenut prema gore. Ventilić se odvaja od šprice i laganim potiskivanjem klipa iz prostora uzorka istiskuju se mjehurići zraka,
- Šprica se zatvara zatvaračem, i označava se vješanjem kartice s podacima,
- Šprice s uzorcima se zaštite od svjetla, te se odlažu u transportnu kutiju ili kofer gdje su zaštićene od mogućeg oštećenja.

Kisik otopljen u ulju može tijekom stajanja uzorka reagirati oksidacijski. Reakcija se usporava zaštitom uzorka od svjetla.



---

## Aluminij i aluminijske legure

---

### 4.1 Primjena

Širenje primjene aluminijskih legura u svim granama industrije te nezaobilazna i sve veća primjena predmeta široke uporabne primjene prilikom svakodnevnog života, rezultira još većim brojem primjena. Primjeri primjene aluminija i aluminijskih legura dostupni su sve širem broju korisnika proizvoda od tradicionalnih materijala, koji se, uvidjevši prednosti korištenja aluminijskih legura, unatoč povećanim troškovima sve češće odlučuju za korištenje aluminijskih izvedbi istog proizvoda. Razvoj novih tehnologija iz drugih grana industrije, uz manje modifikacije i prilagodbe, omogućuje raznovrsniju proizvodnju predmeta od aluminija i aluminijskih legura. Predmeti od aluminija i aluminijskih legura, na taj su način, još više komercijalizirani i približeni čovjeku u njegovom svakodnevnom životu. Razlozi tako naglog širenja aluminija su različiti. U građevinarstvu cijeni se mala gustoća, kao i potpuna antikorozivnost prema atmosferilijama te se aluminij upotrebljava za mostove, krovove, prozore, vrata, namještaj i drugo. Ne zanemaruje se i mogućnost eloksiranja i bojanja vanjske površine aluminija. To su postupci kojima se aluminiju daju sve pastelne boje, kojima se može, s obzirom na stanje i efekt površine, imitirati plemenite metale, porculan i drugo. Transportna industrija cijeni aluminij radi male gustoće i dobrih mehaničkih svojstava. Ostala dobra svojstva aluminija, kao što su lakoća obrade, veliki izbor profila i nezapaljivost, proglašavaju ga materijalom budućnosti.

Odabir aluminijskih legura prilikom konstruiranja proizvoda široke potrošnje i specijalnih te vrlo zahtjevnih proizvoda, više ne predstavlja isključivo luksuz, već je financijski opravdano i optimalno rješenje prilikom odabira materijala. Sve je to omogućeno razvojem tehnoloških postupaka vezanih za proizvodnju i preradu aluminija i aluminijskih legura.

Najveće tržište aluminijske industrije predstavljaju građevine i gradilišta. U brojnim novosagrađenim domovima koristi se aluminijskim vratima, fasadama, prozorima, pokrovima, odvodima i žlijebovima, koji zahtijevaju minimalno održavanje, a vrlo su dugotrajni. Danas je aluminij također i glavni industrijski građevni proizvod. Njegova otpornost na atmosferske utjecaje čini ga idealnim za sve klimatske uvjete i lokacije. Aluminijske legure posebno su primjenjive su uvjetima priobalnog područja, gdje je morska sol vrlo štetna za ostale metale. Uz anodiziranje - bojanje elektrolitnim postupkom koje pruža i dodatnu površinsku zaštitu, aluminij se javlja u konstrukciji vanjskih oplata i pregradnih zidova mnogih, u svijetu najviših zgrada.

Drugo najveće tržište je tržište transporta i transportne tehnike. U automobilima, aluminij je primjenjen u unutrašnjosti i na vanjskim površinama, kotačima i klima uređajima. Neki dijelovi automobila, blokovi motora i karoserije napravljene su od aluminijske legure kako bi se smanjila težina i povećala iskoristivost goriva. Aluminij se također nalazi i u karoseriji brzih prijevoznih sredstava, dijelovima motora za dizel lokomotive, teretnim željezničkim vagonima, motorima autobusa i kamiona, kovanim kotačima teretnih vozila, teretnim kontejnerima, cestovnim znakovima, žaluzinama, te rasvjetnim tijelima. Zbog male gustoće i otpornosti na koroziju, aluminij se ugrađuje se u trup brodova, spremnike plina na brodovima koji prenose tekući prirodni plin i palubna spremišta za brodska plovila.

U zrakoplovnoj industriji aluminij se nalazi u motorima zrakoplova, okvirima, oblogama, opremi za slijetanje i interijeru. Otpornost na atmosferske utjecaje, mala gustoća, dobra toplinska vodljivost, učinili su ga najpoželjnijim materijalom u izgradnji satelita i ostalih svemirskih objekata.

U ambalažnoj industriji, aluminij se koristi prilikom pakiranja hrane i pića, i čuva proizvode tijekom distribucije i skladištenja. Brzo hlađenje, lako otvaranje, mala gustoća i reciklirajuće značajke legura aluminijske, pozitivno su utjecale na korištenje aluminijskih spremnika prilikom pakiranja napitaka. Omoti od folija i aluminijske vrećice, zatvaranje zavrtnjem, i lako otvaranje uvelike su obogatili ambalažnu industriju prehrambenih proizvoda.

U električnoj primjeni, glavni su proizvodi aluminijske žice i kablovi. U podzemnim električnim kablovima sadržane su velike količine aluminijske žice. Aluminijske žice se također koriste u rezidentnim, komercijalnim i industrijskim građevinama.

Početak dvadesetog stoljeća, s aluminijskim priborom za kuhanje počela je potrošačka uporaba aluminijske legure. U suvremenim domaćinstvima aluminij se javlja u obliku kuhinjske folije, opreme za domaćinstvo, alata, prenosivih uređaja, klima uređaja, zamrzivača i hladnjaka. U kemijskoj industriji aluminij i aluminijski spojevi se koriste u više stotina različitih primjena. Aluminijski prah se koristi u bojama, raketnom gorivu, eksplozivima, te kao kemijski reduktant.

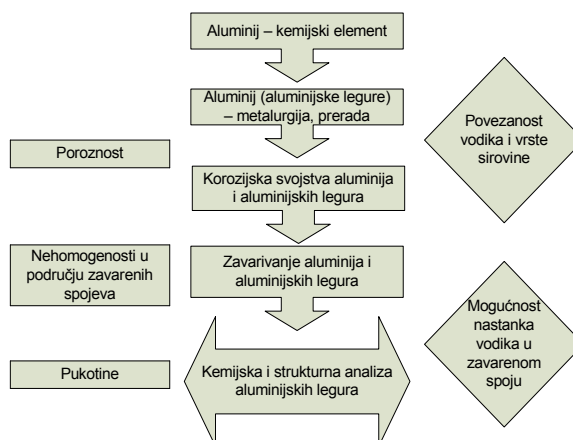
Svjesni činjenice da ništa nije savršeno, sa primjenom aluminijske legure trebamo biti posebno oprezni. Dokazi o štetnom djelovanju na ljudsko zdravlje - izazivanje Alzheimerove bolesti koju uzrokuje korištenje aluminijskog posuđa

prilikom pripreme hrane i aluminijske folije za pakiranje hrane, mogu biti dovoljan razlog za izbacivanjem aluminija iz takve primjene.

Neka neugodna svojstva aluminija, kao što su niska dinamička izdržljivost, sklonost puzanju pri povišenim temperaturama, velika sklonost širenju pukotina, i mali modul elastičnosti prisiljavaju nas, da se s punom pažnjom pristupa konstrukcijama iz aluminija.

Elektrotehnička industrija naročito je zainteresirana za veliku električnu vodljivost aluminija te se primjena čistog i niskolegiranog aluminija u raznim tehničkim modifikacijama sve više širi. Primjenu bakra pomalo ograničava prognoza da će svjetske zalihe postojećih bakrenih ruda uz današnji tempo iskorištenja trajati još samo 20 do 25 godina, dok su zalihe aluminijevih ruda, računajući i glinu, u usporedbi sa bakrenim vrlo velike.

Proizvodi u kojim je značajno zastupljen aluminij u obliku dijelova sačinjenih od aluminijevih legura **AlSi10Mg** i **AlMgSi0,5** su i mjerni transformatori proizvođača Končar - Mjerni Transformatori d.d. S obzirom na sustav kontrole kvalitete i sve strože standarde u području mjernih transformatora, teži se što manjem udjelu plinova u izolatorskom ulju u koji su potopljeni aktivni dijelovi mjernih transformatora. Jedan od nepoželjnih plinova jest i vodik, za koji se sumnja da je posljedica implementacije određenih aluminijevih dijelova, povezanom sa nepravilnom primjenom proizvodnih tehnologija. Kao što je prikazano na slici 4 - 1, pojava vodika u transformatorskom ulju pokrenula je slijed analiza vezanih uz primjenjenu aluminijevu leguru. Nakon analize aluminija kao kemijskog elementa i postupka proizvodnje i prerade aluminija, razmatraju se ostale metalurške značajke vezane za aluminijevu leguru. Korozijski procesi, priprema i stanje površine, provedba zavarivačkih postupaka i drugi parametri tijekom proizvodnje mogu utjecati na pojava vodika u transformatorskom ulju i ograničiti primjenu odabranih legura.

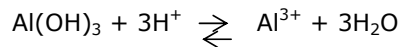


Slika 4 - 1: Slijed analiza vezanih uz mogućnosti utjecaja aluminijevih dijelova

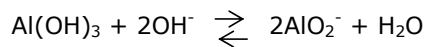


su lagane, čvrste i lako se oblikuju mnogim metaloprerađivačkim postupcima. Lako se spajaju, lijevaju, strojno obrađuju, uz mogućnost postizanja mnogobrojnih estetskih i funkcionalnih površinskih efekata. Zbog brojnih povoljnih fizičkih, kemijskih i metalurških svojstava, aluminij je postao najprošireniji neželjezni metal.

Aluminij je stabilan na zraku i korozijski postojan u onečišćenoj gradskoj atmosferi. Nepostojan je u alkalnim otopinama i amfoteran. Amfoternost je svojstvo tvari da se ponašaju ili kao kiseline ili kao lužine ovisno o okruženju. Tako će se aluminij-hidroksid u reakciji s kiselinama ponašati kao lužina [29].



a u reakcijama s lužinama kao kiselina



Aluminij je najzastupljeniji metalni element na Zemlji i Mjesecu, ali se u prirodi nikada ne nalazi samostalno. Rasprostranjen je u biljkama i skoro svim stijenama, koje sadrže aluminij u obliku minerala aluminij silikata (grupa  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ ). Kada se ovi minerali pretvore u vodenu otopinu, aluminij se može odijeliti iz otopine. Odjeljeni aluminijev hidroksid, u mineralnom obliku, naziva se boksit. Boksit je dakle neobrađeni sirovi materijal – osnovna sirovina za proizvodnju aluminija.

Iako se aluminij u prirodi nalazi u obliku oksida i smjese oksida, metal je moguće izdvojiti skupim elektrolitskim postupkom. Općenito se metal ekstrahira iz oksidne rude zagrijavanjem zajedno s jeftinim redukcijskim sredstvom (ugljik u obliku koksa), a dobiveni sirovi metal se rafinira, čime se omogućuje oksidacija većine prisutnih nečistoća.

Visoki afinitet aluminija prema kisiku onemogućuje takav postupak redukcije redovnim kemijskim postupkom jer se svi prateći elementi lakše reduciraju od aluminija. Svako drugo redukcijsko sredstvo je termodinamički preskupo [30].

Prvi aluminij proizveden je uporabom skupog redukcijskog sredstva u obliku metalnog kalija. Uspjelo je to danskom kemičaru H.C. Orstedu 1825. godine [28]. Zbog toga se govorilo da su uvaženi strani gosti na dvoru Napoleona III. bili privilegirani upotrebljavajući vilice i žlice od aluminija, dok se francusko plemstvo moralo zadovoljiti priborom od čistog zlata i srebra. U osamdesetim godinama devetnaestog stoljeća aluminij je još držan rijetkim i dragocjenim metalom, sve dok nisu 1886. god. C.M. Hall i P. Herault otkrili relativno jeftin postupak za proizvodnju aluminija. Osnovni problem visokog tališta glinice ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) je riješen dodatkom kriolita ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ). Smjesa glinice i kriolita tali se na oko 950 °C iz koje se aluminij dobiva elektrolitičkom redukcijom na katodnom dnu ili katodi.

Uz Bayerov postupak za proizvodnju glinice iz boksita, glavne rude za dobivanje aluminija, koji je otkriven 1889.godine, Hallovo i Heraultovo otkriće predstavlja

početak industrijske proizvodnje aluminija. Sljedeći korak u razvoju bilo je otkriće postupka za povećanje čvrstoće aluminijskih legura precipitacijskim očvršćivanjem. Time su stvoreni preduvjeti za korištenje posebnih kemijskih i fizikalnih svojstava aluminija.

Tri su glavna svojstva koja određuju primjenu aluminija kao inženjerskog materijala:

1. Povoljan omjer čvrstoće i gustoće ( $R_m/\rho$  je tzv. specifična čvrstoća), posebno kad se koristi u obliku neke od svojih legura. Gustoća aluminija je oko jedne trećine gustoće čelika, pa se aluminij i njegove legure prvenstveno koriste u proizvodnji zrakoplova i vozila, ali i za druge namjene. Legiranjem i precipitacijskim očvršćivanjem mogu se proizvesti legure koje imaju specifičnu čvrstoću kao i mnogi čelici;
2. Omjer električne vodljivosti i gustoće najpovoljniji je među svim metalima. Zbog toga aluminij istiskuje bakar iz uporabe za prijenos električne energije;
3. Aluminij ima velik afinitet prema kisiku, a korozijska postojanost mu je ipak relativno velika i na njoj se osniva široka primjena aluminija u graditeljstvu [26].

### **4.3 Postupak proizvodnje aluminija**

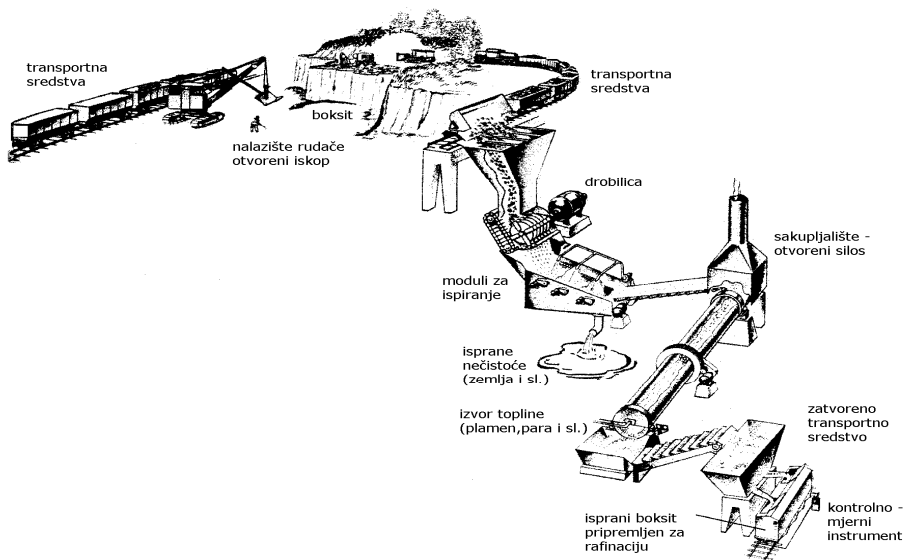
Skoro sve stijene, posebice vulkanske stijene, sadrže aluminij u obliku aluminij silikatnog minerala. Ukoliko su stijene izložene određenom atmosferskom djelovanju tijekom dužeg vremenskog perioda, ovi se minerali javljaju u otopinama, te, ovisno o kemijskim okolnostima aluminij se izdvaja iz otopine kao glineni mineral, kao aluminij hidroksid ili kao oboje. Kremenjci ostaju relativno netaknuti unutar matične stijene te se talože kao pijesak. U uvjetima koji izdvajaju glinene minerale i otapaju željezo, lužinu i zemljane alkalne metale stvaraju se naslage visokokvalitetne kaolin gline. Ponekad se javlja prirodno ispiranje ili mehaničko odvajanje ispiranjem koje odvaja glinu od pijeska, te povećava čistoću taloga. U uvjetima koji izdvajaju aluminij prvenstveno u hidroksid mineralnom obliku i u potpunosti ispiru lužinu i zemljane alkalne metale, te željezo u različitim postotcima, stvara se boksit. Također je moguće glinene minerale desilicirati u aluminij hidroksid, te se isto tako i aluminij hidroksid može resilicirati u glinene minerale.

Boksit sadrži mješavinu sljedećih minerala u različitim postotcima: gipsit, također poznat kao hirdargilit ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), bemit i dijaspor ( $\text{AlO}(\text{OH})$ ), glinene minerale kao što su kaolinit ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), kremen ( $\text{SiO}_2$ ), anatas, rutil, i brukit ( $\text{TiO}_2$ ). Ponekad su prisutne i manje količine magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ) i korunduma ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Uz gore navedene minerale boksit obično sadrži i tragove drugih netopivih oksida kao cirkonij, vanadij, galij, krom i magnezij. Izraz aluminij trihidrat se često koristi za gipsitni mineral, a izraz aluminij monohidrat za boemit i dijaspor minerale. Međutim, minerali nisu u punom smislu riječi hidrati, ali se u svrhu prerade boksit često klasificira kao trihidratni boksit i monohidratni boksit - ovisno od sadržaja glavnog minerala ili minerala koji sadrže aluminij koji se može ekstrahirati. Općenito, europski boksit je monohidratnog tipa i geološki je stariji od boksita u tropskim

državama, koji se obično javlja kao trihidratni tip. Ovo, međutim nije isključivo pravilo. Neki europski boksiti sadrže gipsit zajedno s boemitom i dijasporom, a karibski boksit sadrži male do srednje količine boemita zajedno s gipsitom. Tipični boksit koji se koristi za proizvodnju aluminija sadrži od 40 do 60% ukupnog aluminija ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), od 1 do 15% silicija ( $\text{SiO}_2$ ), od 7 do 30%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , od 1 do 5% titana ( $\text{TiO}_2$ ) i od 12 do 30% kombinirane  $\text{H}_2\text{O}$  [31].

Prikladnost boksita kao sirovog materijala za proizvodnju aluminija uvjetovana je ne samo količinom sadržanog aluminija već također i količinom kombiniranog silicija, koji je obično u obliku kaolinitnog minerala. Kaolinit ne samo da sadrži aluminij koji se ne može biti izdvojiti u Bayerovom procesu već reagira sa natrij-aluminatnom otopinom uzrokujući gubitak natrij hidroksida. Kod pojedinih boksita glineni minerali su koncentrirani u razmjeru veličine finih čestica. U ovom slučaju, postignuta je ekonomičnost, boksit se može obraditi ispiranjem kako bi se uklonile znatne količine gline, te se time ostvario proizvod sa većim postotkom aluminija i manjim postotkom kombiniranog silicija nego kod originalnog boksita.

Najproširenija tehnologija za proizvodnju aluminija uključuje dva koraka: ekstrakciju i čišćenje alumina iz ruda i elektrolizu oksida nakon što je otopljena u fuziranom kriolitu. Boksit je najproširenija sirovina koju je prije procesa izdvajanja glinice, potrebno posebno pripremiti – postupak je prikazan na slici 4 – 3.



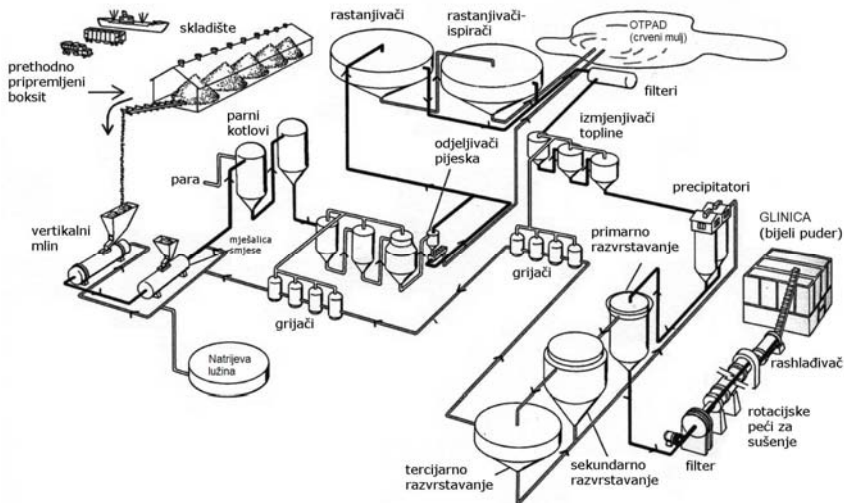
Slika 4 - 3: Postupak pripreme boksita za daljnju preradu [31]

Glinicu je moguće izdvojiti i iz ostalih sirovina kao što su glina, anortosit, nefelin sienit i alunit. Međutim u Sjedinjenim Američkim Državama ovi procesi nisu konkurentni Bayerovom procesu. Uz trenutno vrlo promjenjivu ekonomičnost proizvodnje boksita neki od navedenih alternativnih procesa u budućnosti mogu



postati konkurentni. Od navedenih se pojedine alternativne sirovine koriste kao izvori za glinicu u Europi i Aziji [32].

Glinica (bezvodni  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), poznata i pod nazivom alumina, dobija se čišćenjem boksitne rude od primjesa u mokrom Bayerovom postupku. Općeniti prikaz Bayerovog procesa prikazan je na slici 4 - 4. Na početku postupka, boksit je zdrobljen i usitnjen, zatim prerađen na povišenoj temperaturi od 140 do 230°C pri tlaku od 5 do 8 bara u jakoj otopini kaustične sode (od 80 do 110 g NaOH / l vode).



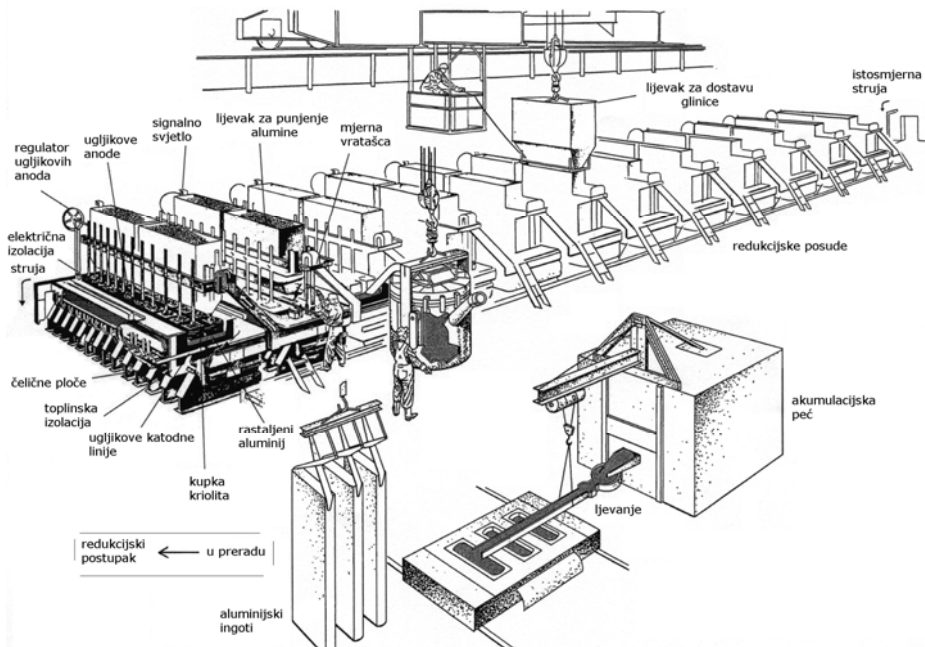
Slika 4 - 4: Postupak dobivanja glinice iz boksita [31]

Gibsit, boemit ili dijaspor u boksitu reagira sa natrij hidroksidom formirajući topivi natrij aluminat. Ostatci, koji se nazivaju crveni mulj, sadrže netopljive nečistoće i natrij aluminij silikatni spoj, koji je desilicirani proizvod, oblikovan reakcijom mineralne gline sa natrij hidroksidnom otopinom. Crveni mulj se izdvaja iz otopine obrnutim odlijevanjem i filtriranjem i odlaže se na posebna odlagališta. Nakon hlađenja, otopina je superzasićena s obzirom na glinicu. Kristalizacija glinice je zametnuta cijepljenjem otopine recikliranim sintetičnim gibsitom (alumina trihidratom) i agitirana. Veliki dio glinice u otopini se kristalizira kao gibsit. Ovaj gibsit se klasificira u proizvod ili zrno. Zrno se reciklira, a proizvod se ispiri. Voda za ispiranje i potrošeni alkohol, nakon koncentracije isparavanjem, recikliraju se u sustavu prerade. Za metalnu industriju, proizvod se vapnenizira na temperaturama do 1300°C za proizvodnju glinice, koja sadrži oko 0,3 do 0,8% kaustične sode, manje od 0,1% željeznog oksida plus silicij, i ostalih oksida u tragovima. Dio izdvojenog gibsit se prodaje kemijskoj industriji. Posebno izdvojen gibsit pigmentne kvalitete koristi se za gume, polimere i papirna punjenja te završni sloj papira. Koristi se kao desikans i katalizator [31].

Potpuno vapnenizirana glinica koristi se u proizvodnji keramike, sredstava za brušenje i vatrostalnih materijala. Razvijeni su postupci za tretiranje ostalih ruda koji

sadrže vapneniziranje ili fuziju rude sa vapnencem kako bi se stvorio kalcij aluminat, iz kojeg se izdvaja glinica natrij karbonatnom otopinom. Taj postupak se koristi u Rusiji za tretiranje nefelin sienita kako bi se dobila glinica (alumina) i sporedni proizvod aluminatni cement.

Glinica služi kao osnovna sirovina u talionicama gdje se provodi elektrolitička redukcija - taljenje. Iako je uglavnom nepromijenjen, današnji proces taljenja se u pojedinim detaljima i omjerima razlikuje od originalnog procesa kojeg su otkrili Hall and Heroult. Tehnologija prerade je doživjela značajan napredak u opremi, materijalima i nadzoru procesa te je smanjila energetske i manipulativne potrebe, a time i krajnje troškove proizvodnje osnovnog metala.



Slika 4 - 5: Postupak proizvodnje aluminija u talionici [33]

U modernoj talionici prikazanoj na slici 4 - 5 glinica (alumina) se rastapa u tzv. stanicama. Stanice su sastavljene od redno povezanih pravokutnih čeličnih posuda obloženih ugljenom. U stanicama se nalazi elektrolit - kupka koja se sastoji od rastaljenog kriorita ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ). U kupki se otapa od 2 do 8% glinice. Kupki se dodaju dodatni aluminijški fluoridi i kalcij fluorid kako bi se smanjila točka tališta. Dobivena otopina ima talište oko  $950^\circ\text{C}$  što je dvostruko niže od tališta same glinice (postupak Heroulta i Halla). Ugljične anode se vješaju sa vrha stanica gdje niži krajevi dosežu do 3,8 cm od otopljenog metala, koji formira sloj ispod površine rastopljene kupke. Toplina potrebna za održavanje kupke u tekućem stanju ostvaruje se električnim otporom kupke dok njome prolazi električna struja. Količina topline koja se razvija sa određenom strujom uvjetovana je dužinom strujnog kruga kroz elektrolite, odnosno razmakom između anode i katode, koji se prilagođava prema potrebi za održavanje

željene temperature, od 960 do 970°C. Prema površini se izdvaja rijedša talina kriolita koja se skrućuje. Na površini i na stijenkama stanice formira se kora skrnutog kriolita, debljine od 2,5 do 7,5 cm, koja štiti aluminij od oksidacije. Glinica se površinski dodaje kupki ili na koru, gdje joj se toplinom iz stanice odstranjuje vlažnost. Dok se na kori predgrijava dodatak glinice, novododana glinica služi kao toplinska izolacija. Povremeno kora se lomi i glinica se miješa s kupkom te održava odgovarajuću koncentraciju.

Strujanje jednosmjerne struje kroz elektrolite, rastavlja otoplenu glinicu. Metal se taloži na katodama, a ugljični dioksid postepeno oslobađa na istrošenoj anodi. Postupak taljenja je kontinuiran. Dodaje se glinica, anode se zamjenjuju, a otopljeni aluminij se taloži na dnu kupke i povremeno se izdvaja. Rastaljeni aluminij se izdvaja iz stanica za taljenje u velike retorte. Od tamo se metal može izljevati direktno u kalupe za proizvodnju lijevanih ingota ili se premješta u skladišta drugih talionica za daljnju preradu. Kako pristize iz stanice primarni aluminij je u prosjeku 99,8% čistoće [34].

Niz stanica može sadržavati od 50 do 200 posuda sa ukupnim naponom do 1000 V uz jačinu struje od 50.000 do 225.000 A. Električna energija je jedna od najskupljih sirovina u proizvodnji aluminijske legure.

Proizvođači aluminijske legure su neprestano tražili ekonomičnije izvore (npr. hidroelektrane), ali su također trebali izgrađivati postrojenja za proizvodnju struje od fosilnih goriva. U proteklih pola stoljeća tehnološki napredak je značajno smanjio količinu električne energije potrebne za proizvodnju aluminijske legure i samim time proizvodnju aluminijske legure učinio ekonomičnijom i ekološki prihvatljivijom.

## 4.4 Prerada aluminijske legure

Prerada aluminijske legure i njegovih legura provodi se pogonima koji nisu u neposrednoj blizini talionica. U tim se pogonima rastaljuju prikupljene količine sekundarnog aluminijske legure, što podrazumjeva tvorničke otpatke ili vraćene otpatke sa dovoljno primarnog metala kako bi se ostvarila kontrola sastava. Za proizvodnju aluminijskih ingota obično se koriste talionice sa plamenim pećima na plinski ili naftni pogon. Zbog vrlo velikog utroška energije pri proizvodnji aluminijske legure, a i iz ekoloških razloga, nastoji se u što je moguće većoj mjeri iskoristiti otpadni materijal - aluminij i njegove legure koje su već bile u uporabi ili otpatke od primarne proizvodnje (strugotina od obrade i sl.). Pretaljanjem otpadnog materijala dobiva se tzv. sekundarni aluminij, čiji se ingoti pretežno koriste kao sirovina za izradu odljevaka. Sekundarni aluminij je nepovoljniji od primarnog jedino u slučajevima kada se od materijala prvenstveno očekuju dobra električna vodljivost i antikorozivnost.

Recikliranje otpadaka je tijekom godina postiglo značajnu ekonomsku važnost, te pruža vrijedan izvor aluminijske legure po znatno nižem energetske trošku nego primarni metal. Dugi niz godina, sekundarni proizvođači su nabavljali otpatke i ponovno ih obrađivali obično stvarajući lijevane ingote za ponovno taljenje. Prvobitni proizvođači

su također kupovali velike zalihe tvorničkog otpada, kao što su odbačene limenke, te ih reciklirali u ingote koji su se koristili za proizvodnju limova za nove konzerve. Ovaj tip zatvorenog kruga recikliranja štedi energiju, pomaže u očuvanju okoliša i održava kvalitetu sirovine na najvišoj razini. Nakon ponovnog taljenja, rastopljene aluminijske smjese se moraju obraditi kako bi se uklonio rastopljeni vodik, sastavni dijelovi kao što su oksidi stvoreni za vrijeme ponovnog taljenja ili sa površine ukupne količine rastaljenog materijala, te neželjeni elementi u tragovima, kao što je natrij u pojedinim smjesama. Uobičajena je praksa upuštanje klora ili mješavine dušika i klora kroz otopinu putem grafitnih cijevi. U modernoj primjeni imamo široku paletu sistema u kojima se metal obrađuje filtriranjem ili slijevanjem, ili oboje, za vrijeme premještanja između jedinica skladištenja i lijevanja. Ovi postupci su učinkovitiji od slijevanja taline, te se njihovom uporabom smanjuje onečišćenje zraka, popravlja kvaliteta metala i štedi na vremenu proizvodnje [31].

Iako se mnoge metode lijevanja ingota duže vremena već tradicionalno koriste, danas se većina ingota za proizvodnju, lijeva postupkom direktnog hlađenja ili pojedinim postupcima izvedenim iz istog. Ovaj se postupak ostvaruje na kontinuiranom principu vertikalnog lijevanja i na kontinuiranom principu horizontalnog lijevanja. Proces direktnog hlađenja sastoji se od izlivanja metala u kratke kalupe. Temelj kalupa je odvojena platforma koja se postupno spušta dok se metal skrućuje. Skrutnuta, vanjska stjenka metala zadržava onaj dio metala koji je još u tekućem stanju, nakon što oblik napusti stjenku kalupa. Za hlađenje ingota koristi se voda, a vodeni mlaz na stjenci kalupa također rashlađuje ingot za vrijeme njegovog spuštanja. Dužina ingota ograničena je jedino dubinom do koje se platforma može spustiti. Kod horizontalnog lijevanja, primjenjuju se ista načela, ali se ingot i baza okreću na način da se baza pomiče horizontalno, što uklanja prepreku dubine. Horizontalnom metodom se praktički mogu lijevati mnogo duži ingoti. Piljenje ingota za tijekom procesa lijevanja, sam postupak čini neprekinutim.

Aluminijske smjese izrađuju se svim metodama poznatim metalurgiji i komercijalno su dostupne u obliku: odljevaka; u izrađenim formama proizvedenim valjanjem, istiskivanjem, kovanjem ili izvlačenjem; u kompaktnim i sinteriranim oblicima pripremljenim od praha; te u ostalim monolitnim formama pripremljenim u širokom spektru procesa. Načini izrade dijele se na:

- *Lijevanje*. Pri lijevanju aluminijskih smjesa rastaljeni metal se lijeva ili utiskuje u kalupe gdje se zatim hladi i skrućuje. Temperatura smjese je obično od 620 do 760 °C, ovisno od sastava smjese i vrste kalupa. Za lijevanje alata i trajnih kalupa, kalupi su metalni i moguće ih je višekratno koristiti. Ostali postupci koriste potrošne jednokratne kalupe pripremljene od pijeska ili gipsa.
- *Valjanje*. Valjanje je postupak stanjenja materijala metodom provlačenja između dvaju valjaka. Valjani proizvodi od aluminijskih smjesa uključuju profile debljine 6 mm ili deblje, listove debljine od 2 do 6 mm i folije ispod 2 mm debljine. Početni proizvod je ingot, koji može dosezati do 900 cm dužine, 180 cm širine i 66 cm debljine. Početno smanjenje debljine provodi se „na toplo“ (od 420 do 590 °C,

ovisno o smjesi) i provodi se u povratnom pogonu. Naknadni postupci valjanja mogu se izvršiti u višedijelnim kontinuiranim pogonima ili samostojećim pogonima, te mogu biti topli ili hladni ovisno o debljini i svojstvima krajnjeg proizvoda. Ostali valjani proizvodi od aluminija uključuju poluge i šipke, koje se provlače kroz žljebaste valjke.

- *Ekstruzija.* Ekstruzijom aluminijskih smjesa, ingot ili početni obradak se jakim pritiskom istiskuje iz spremnika kroz otvor kalupa kako bi se formirao produženi oblik ili valjak, obično na temperaturi metala od 290 do 565°C. Koriste se hidraulični tijesci koji silama od  $4,5 \times 10^6$  do  $1,2 \times 10^8$  N istiskuju tražene profile. Određene količine koje se proizvode istiskivanjem također se naknadno oblikuju dubokim vučenjem i kovanjem uz ostale postupke obrade metala.
- *Kovanje.* Otkivci se proizvode pritiskom ili kovanjem ingota aluminijske smjese ili početnog obratka u jednostavni pravokutni ili zaobljeni oblik na ravnim površinama i u složene oblike u udubljenim kalupima. Koriste se hidraulični tijesci koji proizvode silu do  $6,60 \times 10^8$  N (75000 tona) i mehanički tijesci kapaciteta sila do  $1,4 \times 10^8$  N (16000 tona). Čekići za kovanje imaju težinu udara od  $2,2 \times 10^3$  N do  $5 \times 10^5$  N. Obično se koriste pri temperaturama metala od 315 do 471°C ovisno o smjesi i tipu kovine.
- *Duboko vučenje.* Aluminijske smjese se mogu formirati u duboko izvučene oblike, od kojih su lonci i zdjele i limenke za napitke uobičajeni primjeri, i nastaju utiskivanjem listova ili folije u duboke rupe ili izdubine željenih oblika. Ostali vučeni proizvodi kao što su žice i valjci, proizvode se vučenjem smotanih ili istisnutih zaliha kroz kalupe.
- *Sažimanje i sinteriranje.* Aluminijski prahovi proizvedeni atomiziranjem mogu biti zbijeni ili samostalno ili u mješavini s prahovima drugih elemenata u kalupima složenih oblika. Smjesa se zatim ugrijava do visokih temperatura kako bi se potaklo dodatno vezivanje između čestica u cilju postizanja željenih oblika.
- *Ostali postupci.* Aluminijski poluproizvodi koji se tehnologijama obrade odvajanjem čestica dovode do krajnjeg oblika i dimenzija. Pod time se podrazumjeva obrada na standardnim alatnim strojevima (bušilice, brusilice, glodalice, tokarilice i sl.)
- *Spajanje.* Aluminijski poluproizvodi oblikovani bilo kojim gore navedenim postupkom mogu se spajati zavarivanjem, lemljenjem, lijepljenjem i mehaničkim postupcima kao što su podvijanje, obrublivanje, spajanje vijcima, zakivanje i sl [34].

## 4.5 Tehnički aluminij

Nelegirani se aluminij koristi uglavnom zbog male gustoće, korozijske postojanosti kao i lijepog izgleda. Prema položaju u nizu elektrokemijskih potencijala metala aluminij nije plemenit metal. Njegova se antikorozivnost temelji na postojanju

gustog nepropusnog oksidnog filma koji se stvara na površini metala na zraku i vodenim otopinama. Ukoliko se oksidni sloj ošteti, odmah se oksidacijom nadomješta novim. Što je jače oksidiran, to je nastali sloj otporniji, tako da je aluminij otporan i na koncentriranu dušičnu kiselinu.

Aluminij je neotporan na tvari koje razaraju zaštitni oksidni sloj. To su u prvom redu lužine koje ga otapaju u koncentriranom stanju. Za aluminij su štetni i mort i građevno vapno. U graditeljstvu se iz tog razloga mora aluminijske dijelove i profile zaštititi plastičnim folijama ili nekim drugim prikladnim mjerama zaštite, dok ne završe radovi s materijalima štetnim za aluminij.

Prirodni oksidni sloj je debeo tek oko 0,01  $\mu\text{m}$  i pun je sitnih pora. Mjestimične razlike u kemijskom sastavu aluminijskog uslijed prisutnih nečistoća ili precipitata, posebno bakra i željeza, mogu izazvati točkastu koroziju (*eng. pitting*). Ova vrsta korozije može se spriječiti:

- ograničavanjem udjela štetnih primjesa,
- umjetnim stvaranjem neporoznog zaštitnog sloja.

Zbog teškoća rafinacije, sirovi aluminij trgovačke kvalitete sadrži najčešće oko 99,0% metala. Specijalnim postupcima pročišćivanja može se dobiti aluminij čistoće 99,99% i više, ali uz visoke troškove.

Kvaliteta prirodnog oksidnog sloja može se poboljšati postupcima poput kemijskog fosfatiranja i kromatiranja. Važnija i poznatija je elektrokemijska oksidacija - anodizacija. Anodizacija je postupak umjetnog podebljanja prirodnog oksidnog filma, a poznata je pod različitim zaštićenim imenima kao npr. eloksiranje. Izvodi se u kupkama sa sumpornom ili kromnom kiselinom, a nastali zaštitni sloj je ravnomjeran, gust i staklasto-proziran što je posebno prikladno kad se aluminij koristi u dekorativne svrhe. Raznim dodacima elektrolitima može se sloj i obojiti. Budući da je aluminijski oksid vrlo tvrd, njegovim podebljanjem povećava se i otpornost na trošenje. Lagana površinska poroznost oksidnog sloja osigurava prionljivost za boje organskog ili anorganskog podrijetla.

Na fizikalna i prerađena svojstva aluminijska koja su ovisna o mikrostrukturi može se dalje utjecati toplinskom obradom. Električna vodljivost primarnog aluminijskog koji sadrži manje količine željeza i silicija može doseći gotovo vrijednosti najčistijeg aluminijskog žarenjem na temperaturama od 250 do 300 °C, jer su ovi elementi u aluminiju slabo topivi, pa dolazi do njihovog izlučivanja.

Uz dobru korozijsku postojanost aluminij ima i visoku električnu i toplinsku vodljivost. Električna vodljivost iznosi 62% IACS (*eng. International Annealed Copper Standard*). IACS je jedinica za električnu vodljivost metala povezana sa standardnim odžarenim bakrenim vodičem. IACS vrijednost od 100% upućuje na vodljivost od  $58 \times 10^7 \text{ S/m}$ . Računajući masu za masu, aluminij je bolji vodič od bakra i istiskuje ga iz uporabe u elektrotehnici, posebno tamo gdje ne smeta veći volumen materijala i gdje se ne zahtijeva dobra lemljivost [26].

Zbog malog modula elastičnosti, nosači izrađeni od aluminija znatno su žilaviji u usporedbi s istovrsnim konstrukcijama od čelika. Slično vrijedi za toplinsku rastezljivost koja je dvostruko veća od one kod čelika, što se može iskoristiti kod izrade posuda i cjevovoda u tehnici hlađenja.

Aluminij je metal koji kristalizira u plošno centriranoj kubičnoj rešetki (tzv. FCC rešetki) i izvanredno je dobro toplo i hladno oblikovljiv deformiranjem. Postupcima isprešavanja mogu se proizvoditi profili vrlo složenih oblika za raznovrsne namjene. Valjanjem se mogu proizvesti folije od samo nekoliko  $\mu\text{m}$  debljine koje se upotrebljavaju za pakiranje niza industrijskih i prehrambenih proizvoda. Za te namjene mogu se koristiti samo kvalitetnije vrste aluminija bez nemetalnih uključaka i intermetalnih spojeva željeza i silicija koji u postupku valjanja uzrokuju nastanak pora i malih rupica u foliji. Aluminij je moguće vrlo dobro polirati na visoki sjaj, što opet ovisi o uključcima koji su i u ovom slučaju nepoželjni. Za visokovrijedne površine poput zrcala reflektora kao i za sve druge dijelove kod kojih je sjaj u dekorativne svrhe najvažniji, mora se upotrijebiti najčistiji aluminij.

Najčistiji aluminij ima i najbolju korozijsku postojanost i iz tog se razloga upotrebljava za platiniranje neotpornijih aluminijskih legura, posebno visokočvrstih i precipitacijski očvrstljivih koje sadrže magnezij, silicij ili bakar.

Primarni aluminij upotrebljava se samo u gnječenom stanju. Ovisno o čistoći i stupnju ugnječenosti tijekom hladne obrade deformiranjem mehanička svojstva kreću se u granicama navedenim u tablici 4 - 1.

Kako je aluminij relativno mekan s niskom vlačnom čvrstoćom, za inženjersku primjenu upotrebljava ga se u pravilu u legiranom stanju [26].

## **4.6 Aluminijske legure**

### ***4.6.1 Svrha i osnovni mehanizmi legiranja***

Legiranje ima za cilj prvenstveno poboljšanje mehaničkih svojstava, prije svega vlačne čvrstoće i tvrdoće, zatim krutosti, rezljivosti, katkada žilavosti ili livljivosti [35].

Aluminijske legure upotrebljavaju se i u lijevanom i u gnječenom stanju. Mnogima od njih mogu se mehanička svojstva dalje poboljšati precipitacijskim očvrstnućem. Brojne se koriste bez bilo koje takve obrade.

Najvažniji legirni elementi su bakar (Cu), magnezij (Mg), silicij (Si), cink (Zn) i mangan (Mn). Kao dodaci ili primjese (nečistoće) prisutni su u manjoj količini željezo (Fe), krom (Cr) i titan (Ti). Kompleksnije legure nastaju njihovom međusobnom kombinacijom i uz dodatak i drugih legirnih elemenata koji poboljšavaju svojstva osnovne legure kao npr. čvrstoću i tvrdoću, omogućuju toplinsko očvrstnuće, pospješuju usitnjenje zrna, poboljšavaju rezljivost itd. Dodaci za posebne svrhe su nikel (Ni), kobalt (Co), litij (Li), srebro (Ag), vanadij (V), cirkonij (Zr), kositar (Sn),

olovo (Pb), kadmij (Cd) i bizmut (Bi). Elementi berilij (Be), bor (B), natrij (Na) i stroncij (Sr) dodaju se u vrlo malim količinama. Svi legirni elementi su pri dovoljno visokim temperaturama potpuno topivi u rastaljenom aluminiju. Topljivost elemenata je ograničena u kristalima mješancima. Neotopljeni elementi stvaraju vlastite faze ili intermetalne spojeve. Topljivost legirnih elemenata u aluminiju, kao i udio, veličina, oblik i raspodjela intermetalnih spojeva, određuje fizikalna, kemijska i proizvodna svojstva legura [36].

Utjecaj legirnih elemenata na mikrostrukturu prikazuje se dijagramima stanja. Iz dijagrama stanja vidljiv je tijek skrućivanja, nastajanje faza i topljivost u čvrstom stanju u ovisnosti o temperaturi i sastavu. Dijagrami stanja vrijede za čiste legure u termodinamičkoj ravnoteži. Pri proizvodnji i preradi tehničkih legura ti preduvjeti nisu ispunjeni i zato su moguće razlike između ravnotežnog i stvarnog stanja.

Dijagrami stanja aluminijskih legura i najvažnijih legirnih elemenata s aluminijem imaju polje eutektičkog tipa, ograničeno polje kristala mješanaca u graničnom području prema aluminiju i polje prijelaznih faza (intermetalnih spojeva) u području prema višim udjelima legirnih elemenata. Za praktično djelovanje odlučujući je relativni međusobni položaj ovih značajki u dijagramu stanja. S obzirom na najčešću primjenjivost određenih legura najčešće spominjani su dijagrami stanja aluminij-silicij, aluminij-magnezij i aluminij-bakar [37].

Od trokomponentnih legirnih sustava važan je sustav aluminij-magnezij-silicij u kojem u dijagramu stanja na stranici magnezij-silicij nastaje prijelazna faza  $Mg_2Si$ . To dovodi, za razliku od Al-Si i Al-Mg sustava, uz odgovarajuću toplinsku obradu do značajnog očvrnuća. Najviše čvrstoće postižu se sustavima koji imaju iste mogućnosti precipitacijskog očvrnuća, a to su sustavi aluminij-bakar-magnezij i aluminij-cink-magnezij. Kod posljednjeg nastaje intermetalni spoj  $MgZn_2$ . Na osnovi ova tri sustava razvijen je niz tehnički važnih precipitacijski očvrstljivih legura. Precipitacijsko očvrnuće može se primijeniti i na druge legure pogodnog sastava drugih sustava u kojima se mijenja topivost legirnih elemenata s temperaturom [36].

Precipitacijsko očvrnuće zajednička je pojava mnogim legurama u kojima dolazi do promjene topljivosti nekih konstituenata u osnovnom metalu promjenom temperature, ali se najviše koristi u odgovarajućim aluminijskim legurama. Pojavu je prvi uočio njemački istraživač A. Wilm, koji je 1906. godine primijetio da Al-Cu legura gašena u vodi s temperature od oko  $500^{\circ}C$  očvrstne stajanjem na temperaturi okoline. Čvrstoća porasla tim postupkom postiže maksimum za tjedan dana. Ta prva legura patentirana je pod imenom "dural". Prva značajna uporaba durala bila je tijekom I. svjetskog rata i to za konstrukcijske elemente zračnog broda poznatog pod imenom "Graf von Zeppelin"[34].

Postupak očvrnuća nakon gašenja držanjem legure na temperaturi okoline, nazvan prirodno "dozrijevanje", može se ubrzati i tako postići veće čvrstoće ako se gašena legura zagrijava do temperature od oko  $180^{\circ}C$  [38]. Takva obrada bila je prvobitno prozvana očvršćenje umjetnim dozrijevanjem, ali su oba ova opisa zamijenjena u novijem nazivlju pojmom "precipitacijsko očvrnuće" ili "precipitacijsko



otvrdnjavanje". Mnoge hipoteze su predlagane godinama za objašnjenje prirode ove pojave, a danas se svi slažu da je prirast čvrstoće i tvrdoće direktno povezan sa stvaranjem koherentnih precipitata unutar rešetke osnovnog kristala mješanca.

#### 4.6.2 Lijewane legure

Lijewane legure mogu se svrstati u tri osnovne grupe:

1. Al-Si;
2. Al-Mg;
3. Al-Cu.

Njihovom međusobnom kombinacijom, kao što prikazuje tablica 4 – 2, mogu se dobiti legure s poboljšanim nekim od osnovnih svojstava. Aluminijske legure mogu se lijevati jednako dobro u pijesak, u kokilu i tlačno, ako je izbor dobro izvršen, što je povoljnije nego li kod ostalih metala. Neke od njih mogu se dodatno precipitacijski očvrnuti, a neke se mogu i gnječiti, ali su osnovno lijevačke legure.

Legure koje nisu namijenjene toplinskom očvršćivanju koriste se za opće namjene gdje su krutost, dobra korozijska postojanost i žitkost taljevine od veće važnosti nego li čvrstoća.

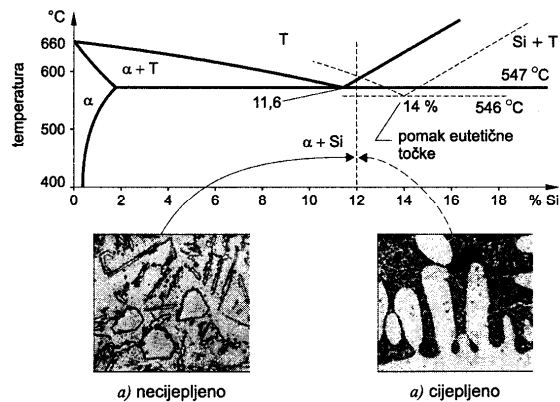
Tablica 4 - 2: Osnovna svojstva lijevanih aluminijskih legura [26]

Mehanička otpornost	Livljivost	Rezljivost	Otpornost na koroziju	Tip legure	Predstavnik	
mala	srednja	dobra	vrlo dobra	Al-Mg	AlMg3, AlMg5	
				Al-Si-Mg	AlSi10Mg AlSi7Mg1	<b>Mg</b> omogućuje toplinsko očvršnuće
mala	vrlo dobra	slaba	dobra	Al-Si	AlSi12	
				Al-Si-Cu	AlSi5Cu1 AlSi6Cu2	<b>Si</b> negativno utječe na rezljivost, <b>Cu</b> omogućuje smanjenje <b>Si</b> , ali pogoršava otpornost na koroziju
osrednja (uz toplinsku obradu)	slaba	dobra	vrlo slaba	Al-Cu	AlCu4MgTi	<b>Ti</b> i <b>Mg</b> usitnjuju zrno

Osnovne značajke legura iz tablice 4 - 2 su sljedeće:

- Kod Al-Si legura silicij je osnovni element koji doprinosi dobroj livljivosti aluminijskih legura pa su to najrasprostranjenije legure u grupi lijevanih legura ("silumin"), posebno one s 10 % do 13 % Si i rijetko s malom količinom bakra. Te su legure približno eutektičkog sastava što ih čini osobito prikladnim za tlačni lijev budući da je njihov interval skrućivanja uzak. Prilično grubu eutektičku mikrostrukturu koja nastaje kod pješčanog lijeva može se usitniti postupkom cijepjenja ili modifikacije [37]. Cijepjenje se izvodi neposredno prije ulijevanja taljevine u kalupe dodatkom male količine natrija (manje od 0,1 % mase šarže) u obliku soli. Cilj je odgoditi nukleaciju silicija kad se dostigne normalna eutektička

temperatura i pomak eutektičke točke sastava u desno na dijagramu stanja Al-Si prikazanog na slici 4 - 6. Zbog toga i više od 14 % Si može biti prisutno u cijepljenoj leguri bez pojave primarnih kristala silicija u mikrostrukturi. Pretpostavlja se da se natrij skuplja u taljevini na međupovršini s novonastalim kristalima silicija, usporavajući i odgađajući njihov rast. Dolazi do pothlađenja što ubrzava nastajanje velikog broja klica silicija, a što rezultira relativno sitnozrnatom eutektičkom mikrostrukturom [26].



Slika 4 - 6: Dijagram stanja za Al-Si leguru [26]

Pretaljivanjem se vraća početna mikrostruktura zbog gubitka natrija oksidacijom. Postupak cijepljenja povisuje vlačnu čvrstoću legure od 120 N/mm<sup>2</sup> na oko 200 N/mm<sup>2</sup> i istezljivost od 5 % na više od 15 %. Razmjerno visoku duktilnost ove eutektičke legure posjeduju zbog činjenice da α-kristal mješanac aluminija u eutektiku čini blizu 90 % ukupne mikrostrukture. Kristali mješanci su zbog toga neprekinuti u mikrostrukturi i djeluju kao jastuk nasuprot pretjeranoj krhkosti koja potječe od tvrde silicijeve faze. Osim eutektičkih lijevaju se podeutektičke i nadeutektičke legure, bez obzira da li su prisutni ili nisu i drugi legirni elementi.

Eutektičke legure koriste se za tlačni lijev i druge vrste ljevova sa zahtjevnim presjecima, budući da posjeduju malu viskoznost, malo skupljanje i uski interval skrućivanja. Dobra kemijska postojanost čini ih uporabljivim u pomorstvu, a činjenica da su nešto manje gustoće od Al-Cu legura čini ih pogodnim za primjenu u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji. Odljevci od eutektičkih legura mogu se primijeniti do najviše 200 °C.

- Glavna značajka Al-Mg legura je dobra korozivna postojanost zbog čega se kod ovih legura može postići visoki sjaj. Neke od njih su i otporne na udarce pa se mogu uporabiti za umjereno opterećene dijelove u pomorstvu. Najbolju kombinaciju čvrstoće i žilavosti ima legura s 10 % Mg. Nažalost, ona je jedna od najteže livljivih legura zbog pojava poroznosti, stvaranja troske i velike viskoznosti. Zbog toga su u uporabi najviše legure s 3 % i 5 % Mg.

- Eutektičke Al-Si-Mg legure su precipitacijski očvrstljive uz dodatak od 0,2 % do 0,5

% Mg. Odlikuju se dobrom livljiivošću koja se pogoršava smanjenjem udjela silicija. Imaju mali temperaturni interval skrućivanja (do 30 °C) i malo linearno skupljanje (1 %). Kod lijevanja u pijesak moraju se cijepiti. Pješčani odljevci mogu se zavarivati, kokilni odljevci samo ograničeno, a tlačni odljevci nikako zbog većeg sadržaja plinova. Radna temperatura uporabe odljevaka je do 200 °C.

- Al-Cu legure su toplinski očvrstljive legure s relativno visokom čvrstoćom, srednjom ili velikom osjetljivošću materijala na krhki lom, i dobro rezljive. Nadalje, slabe su livljivosti, a korozijska postojanost im je najslabija među svim aluminijским legurama. Pri skrućivanju sklone su pogrubljenju zrna radi čega im se dodaju magnezij (do 0,3 %) i/ili titan (do 0,2 %). Podnose radne temperature do 300 °C.

- Al-Si-Cu legure su legure Al-Si kojima je dodan bakar radi poboljšanja čvrstoće i rezljivosti, uz cijenu gubitka livljivosti i otpornosti na koroziju smanjenjem udjela silicija i povećanjem udjela bakra. Čvrstoća i tvrdoća mogu se dalje poboljšati rastvornim žarenjem i precipitacijom. Precipitacijski očvrstnute legure, kao što je prikazano u tablici 4 – 3, postižu  $R_{p0,2}$  i do 200 N/mm<sup>2</sup>. Dodatkom titana postiže se sitnozrnata mikrostruktura i zato ove legure imaju dobru žilavost, otporne su na udarce i dobro su obradljive odvajanjem čestica.

U skupinu lijevanih legura ubraja se i grupa legura koju se često izdvaja prema namjeni kao posebnu grupu legura, tzv. "legure za stapove". Od njih se zahtijeva: dobra toplinska vodljivost, dobra mehanička svojstva pri povišenim temperaturama, otpornost na trošenje, mala masa, mala toplinska rastezljivost, dobra livljivost itd. [39].

Tablica 4 - 3: Kemijski sastav i mehanička svojstva lijevanih aluminijских legura [39]

KEMIJSKI SASTAV I MEHANIČKA SVOJSTVA LIJEVANIH ALUMINIJSKIH LEGURA-DIN 1725/2-IZVOD									
Oznaka materijala		Kemijski sastav u mas. %			Mehanička svojstva				Gustoća kg/m <sup>3</sup>
DIN	HRN	legirni elementi	dopušt.nečistoće maks.	$R_{p0,2}$ N/mm <sup>2</sup>	$R_m$ N/mm <sup>2</sup>	$A_5$ %	HB 5/250	≈	
<b>Legure za pješčani i kokilni lijev za opću uporabu</b>									
G-ALSi12 GK-ALSi12	P.ALSi12.01 K.ALSi12.02	Si 10,5-13,5 Mn 0,001-0,4 Al ost.	Cu 0,05 Mg 0,05 Zn 0,1 Al ost.  Ostalo: pojed.in. 0,05 ukupno 0,15	Fe 0,5 Ti 0,15	70-100 80-110	150-200 170-230	5-10 6-12	45-60 50-65	2650
G-ALSi10Mg wa GK-ALSi10Mg wa	P.ALSi10Mg.01 K.ALSi10Mg.02	Si 9-11,0 Mg 0,2-0,5 Mn 0,001-0,4 Al ost.	Cu 0,05 Ti 0,15 Al ost.  Ostalo: pojed.in. 0,05 ukupno 0,15	Fe 0,5 Zn 0,1	180-260 210-280	220-320 240-320	1-4 1-4	80-110 85-115	2650
G-ALSi6Cu4 GK-ALSi6Cu4	P.ALSi6Cu4.01 K.ALSi6Cu4.02	Si 5,0-7,5 Cu 3,0-5,0 Mn 0,1-0,6 Al ost.	Fe 1,0 Pb 0,3 Ti 0,15 Al ost.  Ostalo: pojed.in. 0,05 ukupno 0,15	Ni 0,3 Sn 0,1 Zn 2,0	100-150 120-180	160-200 180-240	1-3 1-3	65-90 75-110	2750

Prvo je u Engleskoj razvijena tzv. Y-legura s oko 4 %Cu, 2 %Ni i 1,5 %Mg [30]. Očvršćuje precipitacijom intermetalnih spojeva  $Al_2Cu$  i  $Al_3Ni$  i, iako je to u pravilu legura za lijevanje, može se primijeniti i u gnječenom stanju. Daljnji razvoj doveo je do nadeutektičkih sastava legura iz sustava Al-Si. Eutektičke legure Al-Si imaju u temperaturnom području od 20 do 200 °C toplinsku rastezljivost od  $20 \cdot 10^{-6}/K$ . Porastom udjela silicija opada toplinska rastezljivost aluminijskih legura i kod 25% Si iznosi oko  $(16...17) \cdot 10^{-6}/K$ . Za poboljšanje čvrstoće na povišenim temperaturama legiraju se bakrom i niklom. Stapovi se lijevaju u metalne kalupe. Brzim hlađenjem u kalupu, u odljevku zaostaju naprezanja, a nastali kristali mješanci su prezasićeni. Oboje može dovesti u pitanje konstantnost volumena stapova kod kasnije uporabe. Zbog toga se odljevci žare pri čemu se razgrađuju zaostala naprezanja i legure se dovode što je moguće bliže termodinamičkoj ravnoteži. Treću grupu čine legure na osnovi bakra s dodacima elemenata koji tvore intermetalne spojeve, što omogućuje očvrstnuće legure precipitacijom.

U tablicama 4 – 3 i 4 – 4 prikazana su neka svojstva koja predstavljaju kriterije odabira određene legure i s obzirom na tehnološke postupke koji se očekuju tijekom izrade proizvoda ali i s obzirom na eksploatacijske uvjete.

Tablica 4 - 4: Usporedba svojstava i smjernice za primjenu lijevačkih legura [39]

USPOREDBA POSEBNIH SVOJSTAVA LIJEVANIH ALUMINIJSKIH LEGURA I SMJERNICE ZA PRIMJENU-DIN 1725/2-IZVOD									
Oznaka materijala		Livjivost	Obrada površine		Kemijska postojanost na		Obrada odvajanjem čestica	Zavarljivost	Smjernice za primjenu
DIN	HRN		meh. polir.	anod. oksid.	vrem. pril.	morsku vodu			
<b>Legure za pješčani i kokilni lijev za opću upotrebu</b>									
G/GK-ALSi12	P/K.ALSi12	5	5	-	4	3	3	5	Za komplicirane tankostjene odljeveke otporne na tlak i vibracije, uz vrlo dobru korozijsku postojanost.
G/GK-ALSi10Mg wa	P/K.ALSi10Mg.62	5	3	-	4	3	4	5	Kao G/GK-ALSi12 toplinski očvrstnute. Višestruko upotreblijiva legura otporna pri povišenim temperaturama
G/GK-ALSi6Cu4	P/K.ALSi6Cu4	4	3	-	1	-	4	3	

#### 4.6.3 Gnječene legure

Osnovna podjela gnječenih aluminijskih legura temelji se na kemijskom sastavu i mogućnosti precipitacijskog očvrstnuća. Od legura koje očvršćuju hladnim deformiranjem zahtijeva se dovoljna čvrstoća i krutost u hladnom stanju, kao i dobra korozijska postojanost. Većina ovih legura ima mikrostrukturu koja se potpuno sastoji od čvrste otopine. To je dodatni faktor u prilog njihovoj visokoj duktilnosti i

visokoj korozivskoj postojanosti. Legure s većim udjelom magnezija imaju odličnu postojanost u morskoj vodi i pomorskoj atmosferi tako da se koriste za brodsku nadgradnju. Željena mehanička svojstva, poput vlačne čvrstoće navedene u tablici 4 – 5, postižu se stupnjem ugnječanja primijenjenim u zadnjoj fazi hladnog oblikovanja deformiranjem, pa se legure obično isporučuju u mekom stanju ili nakon određenog stupnja hladnog ugnječanja. Glavni im je nedostatak u tome da se mehanička svojstva materijala, proizvedenog na konačne dimenzije, ne mogu više mijenjati osim mekšanja postupkom žarenja.

Precipitacijski očvrstljive legure imaju prednost kada se traži povoljan omjer čvrstoće i gustoće. Osnovu precipitacijski očvrstljivih legura čine legirni elementi bakar, magnezij, cink i silicij koji stvaraju intermetalne spojeve s aluminijem (bakar) ili međusobno (magnezij, silicij i cink). Očvršnuće postignuto precipitacijom je veće od onog hladnim oblikovanjem, pa je precipitacijsko očvršnuće osnovni postupak za povećanje čvrstoće i tvrdoće prethodno gnječenih legura. Drugi elementi poboljšavaju određena svojstva: titan nalazi primjenu kao dodatak za sitnije zrno, olovo i bizmut poboljšavaju rezljivost, a krom pospješuje precipitacijsko očvršnuće.

Od precipitacijski očvrstljivih legura za izbor su na raspolaganju osnovne skupine legura prema tablici 4 – 5 s mnogostrukim varijantama.

Tablica 4 - 5: Podjela i osnovne značajke gnječenih aluminijskih legura [39]

Vrsta legure	Način otvrdnuća	$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>
1. Al-Mn	deformiranjem u hladnom stanju	200 ... 350
2. Al-Mg		
3. Al-Mg-Mn		
4. Al-Mg-Si	precipitacijom	~ 330
5. Al-Cu-Mg		~ 450
6. Al-Zn-Mg		~ 400
7. Al-Zn-Mg-Cu		~ 550
8. Al-Li-Cu-Mg		~ 500

Osnovne su im značajke:

- Al-Mg-Si legure ("antikorodal") imaju  $R_m < 330$  N/mm<sup>2</sup>, umjetnim dozrijevanjem  $R_{p0,2}$  oko 240 N/mm<sup>2</sup>, a prirodnim dozrijevanjem oko 110 N/mm<sup>2</sup>. Ove legure otporne su na koroziju, uvjetno pogodne za zavarivanje, anodizaciju i poliranje.

U hladno očvrstnutom stanju deformiranjem i precipitacijski očvrstnutom stanju imaju posebno visok omjer čvrstoće i električne vodljivosti, pa se koriste za prijenos električne energije.

- Al-Cu-Mg legure ("dural") mogu postići vrijednosti  $R_{p0,2}$  do 290 N/mm<sup>2</sup> i  $R_m$  do 450 N/mm<sup>2</sup>, ovisno o načinu dozrijevanja nakon gašenja s temperature rastvornog žarenja. Dodatak magnezija ubrzava očvršnuće stvaranjem intermetalnih spojeva. Zbog povećanog udjela bakra ove legure imaju umjerenu otpornost na koroziju;
- Al-Zn-Mg legure ne dosežu potpuno čvrstoću Al-Cu-Mg legura ali su zato otpornije od ovih na kemijske utjecaje. One predstavljaju dobar kompromis glede čvrstoće i korozijske postojanosti i uz to imje zavarljivost zadovoljavajuća (AlZn4Mg1);
- Al-Zn-Mg-Cu legure ("konstruktal") sa srednjom čvrstoćom u precipitacijski očvršnutom stanju od oko 550 N/mm<sup>2</sup> su legure s najvećom čvrstoćom među svim aluminijskim legurama. Posebno su osjetljive na napetosnu koroziju, a za njezino sprječavanje razvijen je danas niz termomehaničkih postupaka radi njihove pouzdane primjene u zrakoplovnoj industriji.

Krajem 70-tih godina dvadesetog stoljeća započinje, a u devedesetim se intenzivno nastavlja razvoj aluminijskih legura s litijem (Al Cu-Mg-Li i Al Li-Cu-Mg). U odnosu na konvencionalne aluminijske legure ove legure imaju sljedeće prednosti: od 7 do 10% manju gustoću, 10% veći modul elastičnosti i mehaničko-proizvodna svojstva slična legurama iz grupe "durala" i "konstrukta" (Al-Cu-Mg, odnosno Al-Zn-Mg-Cu). Prvenstveno su namijenjene zrakoplovnoj industriji. U tablici 4 – 6 navedena su karakteristična svojstva ostalih najčešće primjenjivanih gnječilačkih aluminijskih legura [39].

Tablica 4 - 6: Ostala važna svojstva gnječilačkih aluminijskih legura [26]

Oznaka legure		Toplinski očvrstjiva	Eloksal kvalitete	Otporna u morskoj vodi	Za statički opt. konstrukcije	Dobro zavarljiva	Za obradu na automatima
DIN	Stara HRN						
AlMn1	AlMn1		x	x		x	
AlMg1	AlMg1		x	x		x	
AlMg3 AlMg5	AlMg3 AlMg5		x <sup>1)</sup>	x x	x x	x x	x
AlMg2Mn0,8 AlMg4,5Mn	AlMg2Mn —			x x	x x	x x	
AlMgSi0,5	AlMgSi0,5	x	x	x	x	x	
AlCuBiPb	AlCu5PbBi	x					x
AlCuMg1 AlCuMg2	AlCu4MgSi AlCu4Mg1	x x			x x		
AlZnMgCu1,5	AlZn5Mg3Cu1,5	x			x		

Izraženo svojstvo legura označeno je oznakom „x“

<sup>1)</sup> ograničeno primjenjivo

#### 4.6.4 Označavanje aluminijskih legura

Aluminijske legure označavaju se numerički, oznakama koje su prikazane u tablici 4 - 7. Prvi broj numeričke oznake označava glavni legirni element tj. seriju kojoj legura pripada, druga znamenka pokazuje modifikaciju legure, a zadnje dvije znamenke decimalni % Al (npr. 1060 označava leguru 99.6% Al). U slučaju numeričkih oznaka legura za lijevanje, zadnja znamenka označava proizvodni oblik, 1 ili 2 se odnosi na ingot (ovisno o čistoći), a 0 je oznaka za lijevanje. Za definiranje osnovnih metalurških stanja aluminija i njegovih legura namijenjenih gnječenju, primjenjuje se standard EN 515. Ovim standardom metalurško stanje legura označava se slovnim simbolima iza kojih slijedi brojana oznaka do tri znamenke, što ovisi o vrsti legure aluminija [40].

Tablica 4 - 7: Numeričke oznake legura aluminija [40]

legure za valjanje		
1xxx	komercijalno čisti Al (>99% Al)	ne očvršćavaju starenjem
2xxx	AlCu i Al-Cu-Li	očvršćavaju starenjem
3xxx	Al-Mn	ne očvršćavaju starenjem
4xxx	Al-Si i Al-Mg-Si	očvršćavaju starenjem u slučaju prisutnog Mg
5xxx	Al-Mg	ne očvršćavaju starenjem
6xxx	Al-Mg-Si	očvršćavaju starenjem
7xxx	Al-Mg-Zn	očvršćavaju starenjem
8xxx	Al-Li, Sn, Zr ili B	očvršćavaju starenjem
9xxx	još nisu u uporabi	
legure za lijevanje		
1xx.x.	komercijalno čisti Al (>99% Al)	ne očvršćavaju starenjem
2xx.x.	Al-Cu	očvršćavaju starenjem
3xx.x.	Al-Si-Cu ili Al-Mg-Si	neke legure ove serije su pogodne za očvršćavanje starenjem
4xx.x.	Al-Si	ne očvršćavaju starenjem
5xx.x.	Al-Mg	ne očvršćavaju starenjem
7xx.x.	Al-Mg-Zn	očvršćavaju starenjem
8xx.x.	Al-Sn	očvršćavaju starenjem
9xx.x.	još nisu u uporabi	

Metalurška stanja legura za gnječenje definiraju se slijedećim slovnim simbolima:

- F: označava sirovo stanje nakon prerade. Primjenjuje se na proizvode dobivene plastičnom deformacijom bez da su postupci toplinske ili mehaničke obrade izvođeni pod posebnim nadzorom. Granične vrijednosti mehaničkih osobina ovakvih legura nisu precizno određene.
- O: označava žareno stanje legura (*engl. annealed*). To je stanje najveće oblikovljivosti koje može biti postignuto zadržavanjem legure na umjerenoj temperaturi određeno vrijeme.
- H: označava stanje materijala očvrsnuto hladnom plastičnom deformacijom i djelomično omekšano (*engl. strain hardened*). Primjenjuje se za legure

očvrsnute plastičnom deformacijom, s naknadnim zadržavanjem ili bez naknadnog zadržavanja, na temperaturi koja izaziva djelomično omekšavanje metala. Stanja H primjenjuju se za toplinski neočvrstljive legure aluminijske t.j. za legure serija 1000, 3000 i 5000. Iza ove oznake slijede uvijek najmanje dva broja. Prvi označava vrstu toplinske obrade, a drugi stupanj hladnog otvrdnjavanja.

- W: označava toplinski obrađeno labilno stanje. To je metalurški nestabilno stanje, koje se primjenjuje samo za legure koje nakon rastopnog žarenja spontano otvrdnjavaju pri sobnoj temperaturi. Ova oznaka je precizna (važea) samo onda kada joj je pridruženo i vrijeme koje prođe od rastopnog žarenja do temperature na kojoj je proizvod zadržan, npr. vrijeme 60 minuta do 15 °C (W/60 min/15 °C). Iza oznake W obično nema nikakvih brojčanih simbola.
- T: ova oznaka vrijedi za proizvode koji stabilno stanje postižu toplinskom obradom, sa ili bez hladnog očvršćavanja. Označava toplinski očvrstnuto stanje postignuto toplinskom obradom za postizanje stanja drugačijih od F, O ili H. To znači da se ovo stanje primjenjuje isključivo za toplinski očvrstljive legure aluminijske, t.j. za legure serije 2000, 6000, 7000. Iza oznake T uvijek stoji jedan ili više brojeva koji označavaju specifični redoslijed različitih postupaka.

Brojevi koji slijede iza slova, označavaju iznos očvršćavanja pod naprezanjem, točan tip toplinske obrade, ili druge specijalne aspekte proizvodnje legure [40].

#### **4.6.4.1 Komercijalne aluminijske legure**

**Serija 1xxx** - legure ove serije mogu se podijeliti u dvije skupine: rafinirane i nerafinirane. Rafinirane legure (1199 i 1198) imaju postotak čistoće 99.9 i 99.999%. Ovisno o čistoći koriste se za proizvodnju elektroničkih kondenzatora, rasvjetnih uređaja, primjenjuju se u dekorativne svrhe u građevinarstvu i u industriji ambalaže. Ove legure se obično prethodno anodiziraju.

Legure serije 1000 imaju visoku električnu i toplinsku vodljivost, izvrsnu otpornost na koroziju, veliku mogućnost obrade, ali i nešto lošija mehanička svojstva, te se primjenjuju najviše u kemijskoj i električnoj industriji. Glavne nečistoće ove skupine legura su željezo i silicij. Legura 1050A čistoće 99.5% jedna je od najčešće korištenih legura ove serije. Primjenjuje se za proizvodnju ambalaže, metalnih ploča u građevinarstvu, cijevi za izmjenjivače topline, električnih vodiča i sl. Legure 1100 (99.0 do 99.3% Al) i 1145 (99.45 do 99.60% Al) koriste se za proizvodnju aluminijskih folija i ambalažnih spremnika [40].

**Serija 2xxx** - glavni legirni element legura ove serije je Cu (do 6%), a mogu sadržavati u manjoj mjeri i Si te Mg. Ove legure se toplinski obrađuju sa ciljem postizanja optimalnih svojstava. Mehanička svojstva ovih legura su slična, a u nekim slučajevima i bolja od mehaničkih svojstava niskougljičnog čelika. Primjenjuju se u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji, vojnoj industriji, za izradu različitih dijelova



konstrukcija, te dijelova koji zahtijevaju veliku čvrstoću pri temperaturama do 150 °C.

Glavni predstavnici ove serije legura su:

- legura 2017A, poznatija kao duraluminij;
- legura 2024 vrhunskih mehaničkih svojstava i velike primjene osobito u zrakoplovnoj industriji;
- legura 2014 s visokim sadržajem silicija, koja se također koristi u zrakoplovnoj industriji;
- legura 2618A koja se koristi za izradu konstrukcijskih dijelova nadzvučnih zrakoplova;
- legura 2219 s najvećim sadržajem bakra, uz dodatak i drugih elemenata kao što su vanadij, mangan, cirkonij i titan, a koja zbog dobrih mehaničkih osobina pri visokim i niskim temperaturama nalazi primjenu i za izradu dijelova svemirskih letjelica.

Negativna osobina ovih legura je njihova slabija korozijska otpornost, te loša zavarljivost [40].

**Serija 3xxx** - Glavni legirni element ove serije aluminijskih legura je mangan. Sadržaj mangana u industrijskim legurama ove serije je između 1 i 1.5%. Mangan značajno poboljšava mehanička svojstva ovih legura, povećava korozijsku otpornost te mogućnosti dobre oblikovnosti ovih legura. Legure ove serije nisu toplinski obradive, a imaju oko 20% veću čvrstoću u odnosu na legure serije 1000.

Glavni predstavnik ove serije je legura 3003 koja ima izvrsnu deformabilnost, otpornost na koroziju i dobru zavarljivost te se zbog svojih dobrih mehaničkih svojstava koristi u građevinarstvu, u proizvodnji ploča za oblaganje i krovnih ploča, cijevi za izmjenjivače topline, za proizvodnju opreme za prehranbeni i kemijsku industriju i sl. [40].

**Serija 4xxx** - glavni legirni element ove serije je silicij, koji može biti prisutan u legurama i do 12%. Dodatak silicija dovodi do značajnog smanjenja temperature taljenja, pa se aluminij-silicij legure koriste za proizvodnju žica za zavarivanje te kao legure za lemljenje. Većina legura ove serije nisu toplinski obradive. Prisutnost silicijevog oksida daje pri eloksiranju sivkastu boju površine, pa se ove legure primjenjuju u građevinarstvu u dekorativne svrhe. Legura 4032, koja ima nizak koeficijent temperaturnog širenja, primjenjuje se za proizvodnju ventila i klipova za motore [40].

**Serija 5xxx** - magnezij je glavni legirni element ove serije legura, dok su sporedni legirni elementi mangan, krom i titan. Čvrstoća legura raste s povećanjem sadržaja Mg, međutim ne preporuča se dodatak magnezija u količinama većim od 5% jer se iznad ovog postotka stabilnost legura narušava i postaju podložne koroziji zbog naprezanja, te osjetljive na povišenu temperaturu. Ove legure su vrlo pogodne za

zavarivanje, osim legura koje sadrže od 1.8 do 2.2% Mg, imaju dobra mehanička svojstva pri nižim temperaturama, te veliku korozivnu otpornost. Mogućnost oblikovanja ovih legura je dobra, a opada porastom sadržaja magnezija. Površinskom obradom npr. anodizacijom mogu dobiti atraktivan izgled, osobito legure koje u svom sastavu imaju silicija i željeza (legura 5657), pa se koriste u građevinarstvu, za izradu dijelova konstrukcija brodova i automobila i sl. Najznačajnije legure serije 5000 su sljedeće:

- Legura 5005 koja sadrži do 0.6% Mg zamijenila je legure 1050A i 1200 u svim primjenama u kojima se traže nešto bolja mehanička svojstva. Anodizirane ploče ove legure koriste se u građevinarstvu.
- Legura 5657 ima dekorativniji izgled, pa se također primjenjuje u građevinarstvu te proizvodnji ukrasne aluminijske ambalaže.
- Legura 5052 s 2.5% Mg te dodatkom kroma, ima dobar odnos između mehaničkih svojstava, mogućnosti oblikovanja, otpornosti na zamor materijala i otpornosti na koroziju. Ima veliku primjenu u prehrambenoj industriji, automobilske industriji, pri proizvodnji prometnih znakova i drugim primjenama.
- Legura 5049 je varijacija legure 5052, ali ne sadrži krom. Koristi se za proizvodnju ploča te za toplinsku izolaciju.
- Legure 5454, 5754 i 5154A, u kojima je sadržaj magnezija od 2.5 do 4% uz prisutnost malih količina Mn i Cr, imaju veliku primjenu u građevinarstvu, industriji prijevoznih sredstava i industriji strojeva.
- Legura 5154A koristi se za proizvodnju aluminijskih zakovica, a od nje izrađuju i prozorske zaštitne mreže.
- Legure 5086 i 5083 koje sadrže između 3.5 i 5% Mg uz Mn i Cr, imaju najbolja mehanička svojstva od svih legura serije 5000 čak i pri vrlo niskim temperaturama. Pogodne su za zavarivanje i imaju dobru otpornost na koroziju u morskom okruženju. Njihova primjena bilježi sve veći rast osobito u industriji prijevoznih sredstava te vojnoj industriji. Najviše korištena legura za izradu brodskih trupova je legura 5083. Tako se može navesti primjer putničkog broda The Queen Elizabeth 2, u koji je ugrađeno oko 1000 tona konstrukcijskih dijelova izrađenih od legure 5083.
- Legura 5182 sadrži 4 do 5% Mg, uz manji sadržaj željeza i silicija ima dobar odnos između mehaničke otpornosti i mogućnosti oblikovanja na povišenim temperaturama. Primjenjuje se u automobilske industriji.
- Legura 5019 s 5% Mg koristi se u prehrambenoj industriji te u proizvodnji zakovica [40].

**Serijska 6xxx** - legure ove serije kao glavne legirne elemente sadrže silicij i magnezij, u količini koja je potrebna za formiranje magnezij silicida ( $Mg_2Si$ ), koji omogućava toplinsku obradu ovih legura. Čvrstoća legura serije 6000 je niža od legura 2000 i

7000, ali ove legure imaju dobru mogućnost oblikovanja, zavarljivosti, strojne obrade, visoku korozivsku postojanost, te atraktivan izgled nakon površinske obrade. Zbog ovih osobina našle su brojnu primjenu u različitim granama industrije, kao što su automobilska i brodograđevna industrija, građevinarstvo, proizvodnji dijelova strojeva, izmjenjivača topline i sl.. Legure serije 6000 uz legure serije 5000 najviše se koriste u proizvodnji transportnih sredstava. Ovdje treba istaknuti legure 6009, 6010, 6016, 6111, te 6181A od kojih se izrađuju automobilski limovi. Legure 6070 te 6351 se koriste za izradu cijevi u industriji prerade nafte. Legure 6201 i 6101 služe za proizvodnju električnih žica.[40]

**Serijska 7xxx** - cink je glavni legirni element ove serije legura, a njegov sadržaj može varirati od 1 do 8%. Ukoliko se uz cink kao drugi legirni element nalazi Mg, nastale legure su toplinski obradljive srednje do vrlo visoke čvrstoće. Također se kao legirni elementi u ovim legurama mogu naći i Cu i Cr. Legure ove serije koje sadrže Cu imaju najveću čvrstoću pa nalaze primjenu u zrakoplovnoj industriji kao primarni konstrukcijski materijal, u automobilskoj industriji, naročito u proizvodnji sportskih automobila, elektronskoj industriji, proizvodnji sportske opreme te proizvodnji dijelova koji moraju podnositi visoka opterećenja.

Glavni predstavnici ove serije legura su:

- legura 7075, koja se primjenjuje u avionskoj industriji za izradu dijelova koji moraju imati visoku čvrstoću, umjerenu žilavost i umjerenu korozivsku otpornost;
- legura 7475 koja se primjenjuje za izradu limova za krila zrakoplova te za oblaganje trupova zrakoplova;
- legure 7050 i 7150, koje su namijenjene za dijelove zrakoplova od kojih se zahtijeva visoka čvrstoća, visoka otpornost na koroziju pod opterećenjem te velika žilavost [40].

**Serijska 8xxx** - legure ove serije imaju vrlo raznolik kemijski sastav, uslijed dodavanja različitih legirnih elemenata. Čvrstoća ovih legura kreće se od srednje do visoke, a mogu zamijeniti neke od legura serije 2000 i 7000 u određenim područjima primjene. Dvije najpoznatije legure ove serije su legura 8006 te 8011. Obje legure koriste se u proizvodnji izmjenjivača topline. Pojedine legure serije 8000 uslijed boljih mehaničkih svojstava u primjeni zamjenjuju neke legure serije 1000 [40].

# 5

## Svojstva aluminijskih legura povezana s nastankom vodika

---

### 5.1 Korozijska svojstva aluminija i aluminijskih legura

#### *5.1.1 Korozijska postojanost aluminijskih legura*

Korozijska postojanost u mnogim medijima jedan je od bitnih razloga sve šire primjene aluminija i njegovih legura u različitim granama tehnike. Ostale prednosti navedenih konstrukcijskih materijala (relativno niska cijena, prilično povoljna mehanička svojstva, mala gustoća, visoka električna i toplinska vodljivost, ekološka prihvatljivost, mogućnost prerade i obrade svim tehnološkim postupcima itd.) ne bi došle do izražaja da aluminij i njegove legure nisu pod određenim okolnostima (prije svega, u dodiru s vodom i kisikom) sklone pasivaciji stvaranjem opne aluminijeva oksida ili hidratiranog oksida, što snažno sprječava koroziju iako za nju postoji velika sklonost.

Aluminij je trovalentan, a standardni ravnotežni potencijal mu je  $-1,66$  V pa je, u aktivnom stanju vrlo neplemenit. Od konstrukcijskih metala jedino magnezij ima još niži standardni potencijal. Ipak, korozijski potencijal aluminija u aeriranim vodenim otopinama, koje nisu ni jako kisele ni jako lužnate (pH između 4 i 9), iznosi obično oko  $-0,6$  V zbog pasivacije. U takvim je uvjetima od aluminija neplemenitiji i cink. Zato je u mnogim elektrolitima moguće katodno zaštititi aluminij kontaktom s cinkom kao žrtvovanom anodom (protektorom) [41]. Korozijskom potencijalu aluminija najbliži je vrlo često korozijski potencijal kadmija pa su za spajanje aluminijskih elemenata najprikladniji kadmirani čelični vijci, matice, klinovi, zatici i sl. Međutim, zbog velike toksičnosti kadmija i njegovih spojeva takva se kombinacija danas izbjegava. Kontakt s drugim metalima, osobito s onima koji su od aluminija,

pa i onda kada je u pasivnom stanju, mnogo plemenitiji, znatno ubrzava njegovu koroziju u elektrolitima. U tom je smislu nepovoljan kontakt s kositrom, olovom, niklom, bakrom, plemenitim metalima i njihovim legurama. Pasivaciju aluminijska potpuno onemogućuje površinsko amalgamiranje (legiranje sa živom) pa je za aluminij, čak i u vlažnom zraku, izvanredno opasan dodir sa živom i s otopinama njezinih spojeva.

Najčešći korozijski produkti aluminijska u vrućem zraku i u vodenim otopinama prikazani su u tablici 5 - 1. Navedeno je i talište metala jer ono ograničava njegovu primjenu na povišenim temperaturama iako, mehanička svojstva redovito bitno slabe već daleko ispod tališta.

Tablica 5 - 1: Korozijski produkti aluminijska [42]

Metal (talište)	K o r o z i j s k i   p r o d u k t i		
	u vrućem zraku čvrste tvari (PB -omjer)	u vodenim otopinama	
		ioni	čvrste tvari
Aluminij (660°C)	$Al_2O_3$ (1,31)	$Al^{3+}$ , $Al(OH)_4^-$ , $Al(OH)_6^{3-}$	$AlO(OH)$ , $Al(OH)_3$ , $Al_2O_3$

Omjer između volumena oksida nastalog korozijom u vrućem zraku i volumena metala koji je oksidirao naveden je u tablici 5 - 1. Po istraživačima koji su prvi upozorili na njegovo značenje, taj je omjer nazvan Pilling-Bedworthovim omjerom. Ako je on nešto veći od jedan, kao za  $Al_2O_3$ ,  $Al_2O_3$  može pokriti metalnu površinu i, eventualno, spriječiti daljnju oksidaciju. To se pri izlaganju aluminijska vrućem zraku i događa. Ioni kao produkti korozije nastaju u agresivnim elektrolitima, i to  $Al^{3+}$  obično u kiselim otopinama, a  $Al(OH)_4^-$  i  $Al(OH)_6^{3-}$  u lužnatim otopinama. Aluminij, dakle može korodirati i u kiselinama i u lužinama pa pripada skupini tzv. amfoternih metala, zajedno s cinkom, olovom i kositrom. Čvrste korozijske produkte daje redovito korozija aluminijska u slabo kiselim, neutralnim i slabo lužnatim elektrolitima [42].

#### Aluminij je postojan:

- u vrućem zraku,
- u vlažnom zraku,
- u otopinama većine organskih kiselina i u koncentriranoj dušičnoj kiselini,
- u živežnim namirnicama,
- u otopinama amonijeva, natrijeva, kalijeva, kalcijeva, magnezijeva, manganova, kadmijeva, cinkova i aluminijska sulfata, nitrata, fosfata i acetata,
- i u mnogim suhim plinovima (npr.  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $H_2S$ ,  $NO_x$  i  $NH_3$ ).

**Aluminij je nepostojan:**

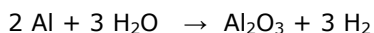
- u klorovodičnoj (solnoj), fluorovodičnoj, mravljoj i trikloroctenoj kiselini,
- u jakim lužinama: NaOH, KOH, LiOH, Ba(OH)<sub>2</sub>, Ca(OH)<sub>2</sub> (gašeno vapno),
- u lužnatim sredstvima za pranje i čišćenje,
- u otopinama soli teških metala, npr. Hg, Cu, Ag, Au itd.,
- u otopinama natrijeva i kalcijeva hipoklorita, tj. u sredstvima za bijeljenje tekstila,
- u nekim vlažnim plinovima, npr. SO<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub> i NH<sub>3</sub>,
- i u bezvodnim kloriranim ugljikovodicima (npr. CCl<sub>4</sub>) i vrućim bezvodnim alkoholima.

Kao i na drugim metalima, koji se pasiviraju tankim opnama, na aluminiju i njegovim legurama javlja se u nekim elektrolitima jamičasta korozija (*engl. pitting*) ili korozija u procijepima (fugama) na dosjednim plohama. Obje su pojave posljedica lokalne depasivacije, čemu osobito pogoduju kloridi (Cl<sup>-</sup>) u otopini, npr. u morskoj vodi. Opasnost se zamjetno povećava ako u vodi ima i iona Cu<sup>2+</sup>, odnosno Fe<sup>3+</sup>.

Što je aluminij čišći, to je otporniji prema koroziji, ali su mu mehanička svojstva lošija. Uklanjanjem elemenata-pratilaca (prvenstveno Fe, Si i Cu) bitno se poboljšava korozijsko ponašanje, pa je visokorafinirani, tzv. rafinal sa 99,99 % Al, u tom pogledu najpovoljniji, ali je vrlo mekan [42].

Legure aluminijske su redovito korozijski lošije od tehničkog, čistog aluminijske, a pogotovo od rafinala. Najmanje je štetno legiranje sa Mn i Mg, najštetnije je legiranje s Cu koje je u mehaničkom smislu vrlo povoljno. Mehanička svojstva aluminijskih legura bitno mijenjaju toplinskom obradom i hladnim deformiranjem, što utječe i na korozijsko vladanje. Pri grijanju se iz mnogih legura intergranularno izlučuju plemenitije faze (npr. CuAl<sub>2</sub> i FeSiAl<sub>5</sub>) pa može doći do interkristalne korozije, naročito uz vlačna naprezanja /napetosti (pukotine), i to najčešće u kiselim ili lužnatim otopinama. To se izbjegava žarenjem u području visokih temperatura, pri kojima su plemenitije faze topljive u metalnoj matrici, a pri gašenju (naglom hlađenju) ne stignu se izlučiti intergranularno. Tako se, npr., vrlo važne legure, durali s 3,5 do 5,0 % Cu, do 1,8 % Mg, do 0,8 % Mn i oko 0,5 % Si žarenjem na 490°C i gašenjem štite od interkristalne korozije zbog precipitacije CuAl<sub>2</sub>, što utječe na mehanička svojstva legure [43].

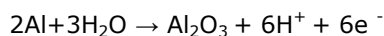
Treba istaknuti da je područje zavara i zona utjecaja topline na aluminiju i njegovim legurama obično korozijski osjetljivije od osnovnog metala. Zanimljivo je da su odljevci od Al-legura (npr. od silumina) katkad porozni zbog razvijanja vodika pri lijevanju oksidacijom (tj. korozijom) s vodenom parom prema jednadžbi:



pa se mora spriječiti dodir litine s vlagom.

### 5.1.2 Antikorozivna zaštita aluminija i aluminijskih legura

Korozivsku postojanost aluminija i njegovih legura u mnogim medijima moguće je povećati različitim postupcima, među kojima se ističu metode anodizacije ili anodne oksidacije koja se u hrvatskom tehničkom žargonu obično naziva eloksiranjem po njemačkom patentnom nazivu "ELOXAL" (skraćeno "elektrolitička oksidacija aluminija"). Dobivene prevlake su srodne prirodnim filmovima aluminijskih oksida i hidratiranih oksida, ali su mnogo deblje (do 30  $\mu\text{m}$ ). Površina metalne podloge sudjeluje u stvaranju prevlake tako da se ona, zapravo, ne nanosi nego nastaje konverzijskim postupkom, tj. pretvorbom površine obratka. Zato pri anodizaciji aluminija i Al-legura otprilike samo s 1/3 debljine prevlaka doprinosi povećanju dimenzija obratka, tj. većim dijelom ona urasta u podlogu. Obraci se uranjaju u prikladni elektrolit i spajaju s pozitivnim polom izvora istosmjerne struje (redovito s ispravljačem). Glavni anodni proces prikazuje jednažba:



dok se na katodi, uglavnom, razvija vodik:



pri čemu je anodno iskorištenje struje po Faradayevu zakonu dosta nisko (obično ispod 70 %) zbog sporednih procesa, kao što su otapanje aluminija u obliku  $\text{Al}^{3+}$  i razvijanje kisika. Naprotiv, katodno je iskorištenje 100 %-tno. Izborom elektrolita moguće je postići potpuno anodno iskorištenje (npr. u bornoj kiselini), ali tada bi nastali oksid bio neporožan pa bi ubrzo električki izolirao obradak i prekinuo anodizaciju. Oksidni bi sloj ostao vrlo tanak (ispod 1  $\mu\text{m}$ ). Takvi se slojevi i koriste u proizvodnji električnih kondenzatora, ali nisu upotrebljivi za zaštitu od korozije. Osim toga, deblji slojevi služe i za:

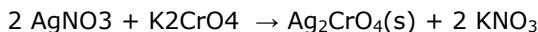
- zaštitu od trošenja trenjem,
- postizanje mnogih dekorativnih efekata,
- pripremu podloge za nanošenje drugih prevlaka (osobito naliča).

U nekim granama tehnike (npr. u arhitekturi, u proizvodnji vozila i predmeta široke potrošnje) primjena aluminija i Al-legura uopće ne bi bila moguća bez relativno debelih oksidno-hidroksidnih slojeva, dobivenih anodizacijom. Zbog spomenute poroznosti tehnološki proces obično završava tzv. siliranjem (*engl. seal*, pečat) ili "zgušnjavanjem", tj. začepeljivanjem pora.

Najvažnija je metoda anodizacije obrada u 10 do 20 %-tnoj sumpornoj (sulfatnoj) kiselini,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , pri 18 do 25°C uz 1 do 3  $\text{A}/\text{dm}^2$  (10 do 20 V na izvoru struje) tijekom 20 do 45 min uz katode od Pb, Al, nehrdajućeg čelika ili grafitu. Metoda se često naziva GS-postupkom (od *njem. gleichstrom*, istosmjerna struja, i S, sumpor). Postoji i mogućnost primjene izmjenične struje iz mreže (50 Hz) jer u katodnom razdoblju ne dolazi do znatnijeg oštećivanja  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . U tom slučaju na oba izvoda transformatora mogu biti priključeni obraci. Postupak, ipak, daje nešto lošije prevlake, a često se naziva WS (prema *njem. wechselstrom*, izmjenična struja).

I ostale metode se služe kiselim otopinama, i to oksalne, kromne (kromatne), fosforne (fosfatne), sulfosalicilne ili sulfoftalatne kiseline, natrijeva hidrogensulfata, kalijeva titanil-sulfata itd. Za potapanje obradaka služe nosači od Al-legura s Mg i Si, odnosno od titana [44].

GS i WS-postupci daju bezbojne oksidne slojeve koji se prije zgušnjavanja mogu obojiti anorganskim ili organskim tvarima, istaloženima u porama, čime se postižu izvrsni dekorativni efekti. Bojanje se često provodi organskim bojilima, otopljenima u vodi, ali neka takva obojenja blijede na svjetlu. Anorganski se pigmenti talože u porama dvofaznom obradom. Tako se, npr., crveni srebrni kromat taloži uzastopnim uranjanjem u otopine srebrnog nitrata i kalijeva kromata prema jednadžbi:



a na sličan se način dobiva žuti barijev kromat,  $\text{BaCrO}_4$ , crni kobaltov sulfid,  $\text{CoS}$  itd.

Neke metode anodizacije daju integralno obojene slojeve, tj. nijansu čine tvari uklopljene u aluminijev oksid, a ne u njegove pore. Tako nastaju žuta ("zlatna"), smeđa ("brončana") i crna obojenja, primjerice, anodizacijom Al-legura sa Si, Mn, Cu i/ili Cr u oksalnoj kiselini. Ipak se najljepše nijanse od svijetložute do crne boje postižu dvofaznom elektrolitičkom obradom, tj. GS-anodizacijom i bojenjem izmjeničnom strujom u otopini neke soli Ni, Co ili Sn, čime se na dnu pora talože čestice tih metala i njihovih hidroksida.

Najjednostavnija metoda začepijavanja pora, tj. zgušnjavanja (siliranja) sloja obavlja se u vreloj vodi. Pritom dolazi do hidratacije oksida u bemit,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ili  $\text{AlO}(\text{OH})$ , uz povećanje volumena (bubrenje), pa se ušća pora zatvaraju. Još je kvalitetnije, ali često nepotrebno, zgušnjavanje oksida u vrućim otopinama Ni-i/ili Co-acetata, odnosno kalijeva dikromata,  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ . Lošije je hladno zgušnjavanje u fluoridnim otopinama Ni-soli.

Anodizacijom dobiveni slojevi nisu stabilni u jakim lužinama i u nekim kiselinama (npr. HCl). Slojevi su krhki, pa oblikovanje obradaka deformacijom treba provesti prije anodizacije. Tvrdća slojeva po Mohsu iznosi 7 do 9 [42]. Veliki udjeli Si, Cu i Mn u Al-legurama onemogućuju kvalitetnu anodizaciju, osobito za dekorativne svrhe. U području zavara i zona utjecaja topline često dolazi do promjene nijanse obojenih anodiziranih proizvoda [41].

Nepovoljna je značajka klasične anodizacije ograničena debljina sloja (maksimalno oko 45  $\mu\text{m}$ ) jer se dužom obradom zbog izolatorskoga karaktera prevlake naglo usporava njezin rast. Tome se donekle može doskočiti GS-postupkom uz hlađenje na cca 0°C (tzv. tvrda anodizacija), pri čemu se dobiju slojevi debeli do 250  $\mu\text{m}$  koji su povoljni za zaštitu od trošenja trenjem[45].

Osim elektrolitičkog postupka anodizacije, za formiranje konverzijskih prevlaka na aluminiju i Al-legurama služe i kemijska oksidacija, kromatiranje i fosfatiranje, ali je njihov zaštitni učinak mnogo slabiji. Zato im je najčešća zadaća priprema tih metala za nanošenje boja i lakova koji dosta slabo prijanjaju na "gole" aluminijske površine i



skloni su "podlokavanju". Adhezija naliča na oksidirane, kromatirane ili fosfatirane podloge mnogo je bolja. Uz slabo korozivne okolnosti, ipak se i kemijskom konverzijom površine postiže zaštita, i to prije svega na rafinalu i na reflektalu koji je, u stvari, rafinal legiran s oko 1 % Mg. To se, primjerice, ostvaruje bemitiranjem, tj. izlaganjem rafinala ili reflektala vreloj vodi ili - još bolje - vodenoj pari u autoklavu, pri čemu se dobiva nevidljivi film bemita,  $\text{AlO}(\text{OH})$ , debeo samo oko 0,5 pm, ali otporan prema vrelim živežnim namirnicama. Kemijskom konverzijom u okside, hidratirane okside, kromate ili fosfate nastaju slojevi debljine do 2  $\mu\text{m}$ . Često su takvi slojevi smjese spomenutih tvari, tj. radi se o miješanim konverzijskim postupcima. Na aluminij slično djeluje i nanošenje specijalnog, tzv. reaktivnog temeljnog premaza, koji daje fosfatno-kromatne konverzijske prevlake.

Treba još spomenuti da se nerafinirani aluminij ili neke njegove legure (osobito durali) štite od korozije mehaničkim platiranjem s rafinalom ili reflektalom, i to jednostrano ili obostrano. Takav je "bimetal" (ili "trimetal") poznat pod nazivom "Alclad" što u prijevodu sa engleskog znači „obučeni aluminij“ [46].

## 5.2 Zavarivanje aluminija i aluminijskih legura

### 5.2.1 Zavarivački postupci

Plinsko zavarivanje ( $\text{C}_2\text{H}_2 + \text{O}_2$ ) s reducirajućim plamenom - viškom acetilena, da plamen ne bude oksidirajući. Koriste se topitelji u obliku prašaka i paste (kloridi i fluoridi alkalnih metala) kako bi se kemijski vezali i odstranili Al oksid. Ostatke topitelja nakon zavarivanja treba odstraniti, jer uzrokuju koroziju.

REL zavarivanje koristi elektrode sa oblogom sličnoj topitelju oksida kod plinskog zavarivanja. I plinsko i REL zavarivanje se najviše koristilo od 1910. god. do poslije drugog svjetskog rata.

TIG zavarivanje koristi efekt razbijanja oksidne kože, pomicanjem katodne mrlje, mjesta izlaska elektrona, što znači da se zavar - radni komad priključuje na negativan pol izvora istosmjerne struje - na katodu, a Wolframova (W) elektroda se priključuje na plus pol, koji jače zagrijava W elektrodu. Kako se W elektroda ne bi grijala, koristi se izmjenična struja, pa se efekt "čišćenja" oksida događa, kada je zavar-radni komad negativan, a elektroda pozitivna. Za vrijeme druge poluperiode W elektroda se "hladi", kada je na minus polu. TIG se koristi za tanke limove i predmete do 6 mm.

MIG zavarivanje se koristi za deblje materijale, npr. preko 6 mm.

Hladno zavarivanje je veoma efikasno za sučeono zavarivanje debelih presjeka. Pritiskom se ostvaruju velike sile na sučeljenim površinama, javljaju se velike trajne deformacije, oksidna kožica puca i čisti Al materijal se spaja, jer atomi dolaze na dovoljnu međusobnu udaljenost djelovanja međuatomskih kohezionih sila.

Elektrootporno zavarivanje zbog dobre vodljivosti električne struje i topline treba

provoditi s velikim jakostima struje (do 100 kA) i kratkim vremenima (npr. 4 - 15 perioda izmjenične struje 50 Hz) za točkasto zavarivanje [47]. Teškoće se mogu očekivati zbog prisutnog sloja Al-oksida koji djeluje kao izolator.

Osim navedenih postupaka koriste se i drugi postupci zavarivanja odnosno druge tehnike spajanja[47]:

- difuzijom,
- kondenzatorsko s pražnjenjem (slično elektrotopnom),
- ultrazvukom,
- trenjem,
- snopom elektrona,
- eksplozijom,
- plazmom (i mikroplazmom za debljine 0,2 do 1,5 mm),
- pod prahom,
- ljevačko zavarivanje,
- lemljenje,
- ljepljenje.

Od svih postupaka TIG i MIG se najviše koriste. Za oba postupka preporučuje se rad sa impulsnim strujama pomoću kojih se upravlja prijelazom kapljica u luku i ostvaruje kvalitetniji spoj. Postupci zavarivanja pritiskom: hladno, trenjem, ultrazvukom i eksplozijom su prigodni za zavarivanje Al materijala s drugim materijalima; npr. spoj čelik- Al, Cu - Al, Ti - Al, Al - staklo, Al - keramika (ultrazvuk, difuzijsko) [47].

Priprema rubova zavarenih spojeva treba omogućiti: čišćenje od nečistoća, odmašćivanje od prethodnih operacija i odstranjivanje oksidne kožice, ako je deblja. Oksidna kožica može biti deblja nakon npr. toplinske obrade. Odstranjivanje je moguće mehaničkim obradama ili kemijskim sredstvima. Potrebno je napomenuti da će se nakon kratkog vremena u slobodnoj atmosferi formirati vrlo tanki sloj oksida. Alat za čišćenje treba se koristiti samo kod zavarivanja aluminijskih legura. Četke trebaju biti od nerđajućeg čelika. Radni prostor za obradu aluminijskih legura treba biti odvojen od prostora za obradu čelika ili drugih materijala zbog čestica koje se mogu unijeti u aluminijske materijale, a koje će kasnije uzrokovati koroziju [47].

Dodatni materijal također treba čistiti - odmastiti (alkoholom, acetonom, trikloretilenom). Preporučuje se da se žica provlači kroz manji otvor, koji je na ulazu oštar da skida tanki sloj površine. Tako prije upotrebe "ogulimo" oksidnu kožicu. U električnom luku izgaraju elementi npr. Mg. Potrebno je npr. koristiti žicu s cca 5% Mg za zavarivanje legure s 3 % Mg, jer će dio Mg iz žice izgoriti tijekom zavarivanja [47].

Toplinska obrada zavarenih Al-legura obuhvaća tri koraka:

1. Homogenizacija (470 - 530 °C)
2. Hlađenje određenom brzinom
3. Dozrijevanje pri sobnoj ili povišenoj temperaturi pod kontrolom - umjetno dozrijevanje. Moguće je i prirodno dozrijevanje, pri sobnim temperaturama koji traje duže (nekoliko mjeseci).

Mehanička obrada. Zavaren spoj ima grubozrnatu (ljevačku) strukturu s niskom čvrstoćom. Hladnom deformacijom ZT čekićanjem ili provlačenjem kroz valjke od tvrde gume ili čelika može se povećati Rm, Re i tvrdoća zavara. Zone u ZUT mogu ostati mekane [47].

### **5.2.2 Greške kod zavarivanja**

Poroznost je najčešća greška koja se može javiti u zavarima, a uzrokovana je vodikom zbog [48]:

- prisustva vodika u atmosferi luka (vlaga, masnoće, čistoća zaštitnog plina),
- velike topivosti vodika u talini, a zatim smanjenja topivosti u krutom stanju za oko 10 puta.

I sloj Al oksida na OM i DM apsorbira vlagu, pa može uzrokovati poroznost. Potrebno je spriječiti ulaz vodika (odstraniti moguće izvore vodika) i/ili omogućiti efuziju (izlaz) vodika odgovarajućim postupkom i režimom zavarivanja [49].

Predgrijavanje smanjuje odvođenje topline i smanjuje vjerojatnost pojave poroznosti. Pored vodika Mg i Zn - lako isparljivi elementi pri visokim temperaturama zavarivanja mogu uzrokovati poroznost. Topljivost vodika u aluminju naglo raste iznad temperature taljenja. Jedan od glavnih izvora vodika je aluminijski oksid, koji je porozan te apsorbira vlagu. Velike količine vodika, mogu se apsorbirati u talini, a kasnije izlaze u obliku mjehurića ili ostaju u krutini kao difuzijski vodik koji u rešetci tvori visoki tlak, koji uzrokuje hladne pukotine[50].

Istraživanja su pokazala da ukoliko se zona spoja temeljito čisti, da je osnovni uzrok poroznosti vodik unešen elektrodnom žicom. Kod statički opterećenih spojeva, poroznost u dozvoljenim granicama (ASME - karta poroznosti) ne utječe na nosivost [51].

Tople (solidifikacijske) pukotine. Tople pukotine se mogu javiti, a one su posljedica poprečnih reakcijskih naprezanja pri stezanju. Smjer kristalizacije i veličina kristala, te sadržaj nečistoća utječu na pojavu pukotina. Za spriječavanje toplih pukotina danas se koriste dodatni materijali s dodacima Ti, Zr i Cr do 0.1%. Ovi elementi će dati sitnije zrno jer stvaraju više klica kristalizacije pri skrućivanju. Predgrijavanje i pravilan slijed zavarivanja će smanjiti vjerojatnost pojave toplih pukotina.

Može se sumirati da na pojavu toplih pukotina utječu [50]:

- kemijski sastav OM i DM,
- reakcijska naprezanja,
- režim zavarivanja (veličina i oblik kupke, brzina hlađenja) i miješanje OM i DM.

Kod zavarivanja Al-Si legura pukotinska je osjetljivost izražena kod povećanja sadržaja Si od 0.5 do 3%.

Magnezij u količini 0.5 do 3.0% čini metal zavara osjetljivim na pukotine. Također uz sadržaj manji od 2.8%Mg, Al-Mg legura može se zavariti sa Al-Si (4xxx) žicom ili AlMg (5xxx) žicom, zavisno o zahtijevanim performansama. Ako legura ima više od 2.8% Mg, ne može se normalno zavariti AlSi žicom, jer se tvori suviše  $Mg_2Si$ , koji ruši duktilnost i povisuje osjetljivost na pucanje. Kod zavarivanja AlMgSi legura - 1%Mg<sub>2</sub>Si - izaziva maksimalnu osjetljivost na pucanje – zato je potrebno koristiti dodatne materijale AlSi ili AlMg serije [52].

### 5.3 Usporedna analiza kemijskog sastava i strukture aluminijskih legura

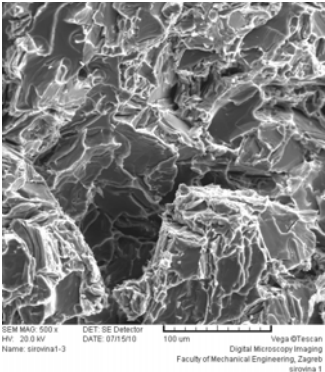
Prilikom izrade određenog dijela (u ovom slučaju torusa sačinjenog od legure AlSi10Mg) tehnologijom ljevanja u pijesak, potrebno je zadržati istovjetnost *kemijskog sastava odljevka sa kemijskim sastavom sirovine*. Odstupanje kemijskog sastava izradka (odljevka) od propisanih, nakon utopa u transformatorsko ulje i tijekom eksploatacije tog dijela u mjernom transformatoru, može biti uzrokom povećane koncentracije vodika. Na slikama 5 – 2, 5 – 3, 5 – 4, 5 – 5 i 5 – 6 usporedno je prikazan kemijski sastav korištenih sirovina, torusa, zavara i aluminijske cijevi i njihova struktura. Indeks poklapanja naveden u slikama 5 – 2 do 5 – 6 označava stupanj razlikovanja kemijskog sastava uzorka od onog materijala sa kojim se legura uspoređuje. Što je indeks poklapanja manji, poklapanje je točnije.

Određivanje kemijskog sastava materijala provedeno je prijenosnim XRF analizatorom materijala Innov-X DELTA prikazanom na slici 5 - 1, tvrtke INNOV-X SYSTEMS, koji je za potrebe istraživanja ustupila tvrtka Elimp d.o.o., Zagreb. XRF analizatori određuju kemijski sastav uzorka nerazornom metodom, mjereći spektar karakterističnih rendgenskih zraka emitiranih od različitih elemenata u uzorku kada je osvijetljen sa rendgenskim zrakama.



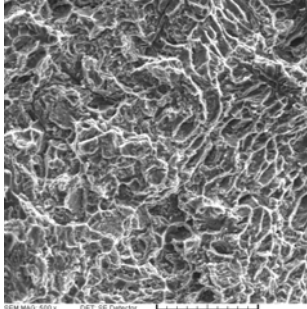
Slika 5 - 1: Prijenosni XRF uređaj Innov-X DELTA

<b>Sirovina 1- AlSi10Mg lijevani ingoti – Indeks poklapanja: 2.4</b>			
Element	%	+/-	Al-356
Mn	0,084	0,007	[ 0,00 – 0,35]
Fe	0,42	0,02	[ 0,00 – 0,60]
Ta	0,018	0,003	Tramp
Mg	0,81	0,34	[ 0,20 – 0,60]
Si	8,73	0,14	[ 6,50 – 7,50]
Al	89,94	0,48	[ 89,75 – 93,30]



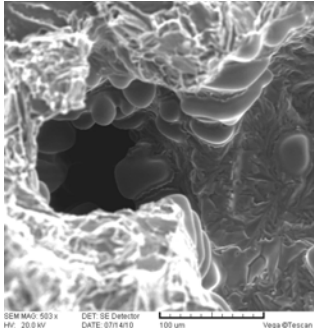
Slika 5 - 2: Kemijski sastav i struktura Sirovine 1

<b>Sirovina 2 – AlSi10Mg kontinuirano lijevani ingoti - Točno poklapanje</b>			
Element	%	+/-	Al-356
Ti	0,062	0,019	[ 0,00 – 0,25]
Mn	0,10	0,01	[ 0,00 – 0,35]
Fe	0,39	0,02	[ 0,00 – 0,60]
Mg	0,70	0,34	[ 0,20 – 0,60]
Si	6,75	0,13	[ 6,50 – 7,50]
Al	92,00	0,49	[ 89,75 – 93,30]



Slika 5 - 3: Kemijski sastav i struktura Sirovine 2

<b>Torus - AlSi10Mg - Indeks poklapanja: 4.3</b>			
Element	%	+/-	Al-356
Ti	0,10	0,02	[ 0,00 – 0,25]
Mn	0,10	0,01	[ 0,00 – 0,35]
Fe	0,38	0,02	[ 0,00 – 0,60]
Si	10,58	0,21	[ 6,50 – 7,50]
Al	88,83	0,65	[ 89,75 – 93,30]

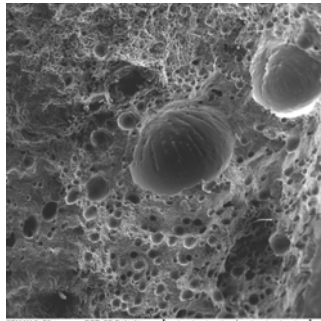


Slika 5 - 4: Kemijski sastav i struktura torusa

Tijekom provjere kemijskog sastava Sirovine 1 prikazanog na slici 5 – 2 pronađen je smanjeni udio Si u leguri od propisanog. Visoka čvrstoća legura ovog tipa postiže se toplinskom obradom, koja ima potpuni učinak tek kada su dodatni elementi magnezij i silicij u točno određenom omjeru. Magnezijev silicid  $Mg_2Si$  koji se stvara u temperaturnom intervalu kristalizacije uvjetuje najvažnija svojstva ovih legura. Ako ga je premalo, ne postiže se efekt toplinske obrade. Ako ga je previše, taloži se na granicama zrna i uzrokuje jake unutrašnje napetosti, te izaziva krhkost materijala, i izrazito visoku osjetljivost na tople pukotine [37]. Najveća odstupanja kemijskog sastava od propisanog, zapažena su kod odljevka torusa, i to ne samo u udjelu Si nego i u udjelu Al u cjelokupnom kemijskom sastavu.

Analiza mikrokemijskog sastava i snimke mikrostrukture presjeka uzoraka napravljeni su na pretražnom elektronskom mikroskopu TESCAN Vega Serie, u Laboratoriju za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Na slici 5 – 2, pri povećanju od 500 puta, vidljive su poroznosti u sirovini 1 i znatno su manje nego kod torusa, čije su poroznosti vidljive na slici 5 – 4, definitivno najveće. Odstupanje od propisanog kemijskog sastava najveće je kod torusa (kao i poroznosti).

Zavar torus – cijev (AlSi10Mg + SG-AlSi5+ AlMgSi0,5) - Indeks poklapanja: 0.1			
Torus+ dodatni materijal+cijev			
Element	%	+/-	Al-356
Mn	0,039	0,006	[ 0,00 – 0,35]
Fe	0,35	0,02	[ 0,00 – 0,60]
Ta	0,015	0,003	Tramp
Si	6,42	0,14	[ 6,50 – 7,50]
Al	93,18	0,54	[ 89,75 – 93,30]



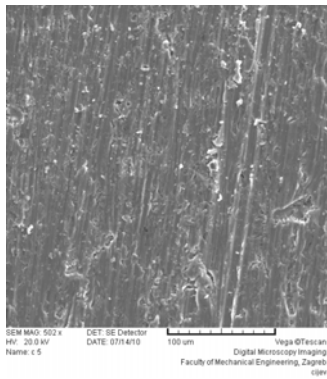
SEM MAG: 70x DET: SE Detector  
 HV: 20.0kV DATE: 07/14/10 1mm Vega S/Tracer  
 Name: az 2 Digital Microscopy Imaging  
 Faculty of Mechanical Engineering, Zagreb  
 ipoljem.zavara

Slika 5 - 5: Kemijski sastav i struktura zavara torus-cijev

Kemijski sastav zavara i aluminijske cijevi, što je vidljivo na slikama 5 – 5 i 5 - 6, poklapa se sa propisanim. U mikrostrukтури aluminijske cijevi praktično ne postoje poroznosti, za razliku od mikrostrukture zavara gdje su uočljive globularne poroznosti. U poroznostima zavara „zarobljen“ je njihov plinoviti sadržaj. Iz razloga nepropusnosti tog plinovitog sadržaja, koji može uključivati i vodik, pod pritiskom se stvarala globularna struktura poroznosti. Takva poroznost ne predstavlja opasnost jer štetni plinovi, nakon hlađenja, ostaju i dalje zarobljeni u materijalu pod manjim pritiskom, što je još povoljnije. Pojava pukotina, bilo iz mehaničkih razloga ili pak uslijed poprečnih reakcijskih naprezanja pri naizmjeničnom zagrijavanju i hlađenju

zavara, omogućila bi izlazak štetnih plinova iz zavara u npr. transformatorsko ulje.

Aluminijska cijev –AlMgSi0,5 - <b>Točno poklapanje</b>			
Element	%	+/-	Al-6063
Mn	0,017	0,004	[ 0,00 – 0,10]
Fe	0,40	0,02	[ 0,00 – 0,35]
Zn	0,010	0,001	[ 0,00 – 0,10]
Mg	1,17	0,38	[ 0,45 – 0,90]
Si	0,17	0,04	[ 0,20 – 0,60]
Al	98,23	0,54	[ 97,75 – 99,35]



Slika 5 - 6: Kemijski sastav i struktura aluminijske cijevi

Razlika kemijskog sastava određenih aluminijskih legura često rezultira i razlikom u strukturi i može biti uzrokom različitih kemijskih procesa čija je posljedica generiranje vodika (ili spojeva koji sadrže vodik) i njegovo „zarobljavanje“ u nastalim šupljinama tijekom stvaranja taline i njene kristalizacije. Transformatorsko ulje, odmah (ili tijekom vremena), penetrira u te šupljine – ovisno o njihovoj vrsti, rasprostranjenosti ili volumenu – i otapa vodik (ili spojeve koji sadrže vodik).

Važnost korištenja aluminijske legure sa garantiranim kemijskim sastavom i redovita kontrola bitna je za zadovoljavajuću kvalitetu proizvoda – mjernog transformatora. Promjena kemijskog sastava uzrokuje promjenu korozijske postojanosti, od one provjerene u kontaktu sa transformatorskim uljem. Odabir dodatnog materijala za zavarivanje optimaliziran je s obzirom na kemijski sastav materijala koji se zavaruje i u slučaju promjene nije više kompatibilan s tim osnovnim materijalom. Pojavnost vodika otopljenog u transformatorskom ulju samo je jedna od posljedica takve nekompatibilnosti.

# 6

## Provedba pokusa

---

### 6.1 Planiranje pokusa

Na temelju proučenog i navedenog u prethodnom tekstu, postoje osnovane sumnje da na pojavnost vodika u transformatorskom ulju utječe vrsta i tip prerade Al ingota, tehnologija pretaljivanja i ljevanja određenih pozicija (npr. torusa) ili neodgovarajuća provedba tehnologije zavarivanja. Sa svrhom prepoznavanja tehnološke faze ili trenutka tijekom faze, u kojem se na bilo koji način primjećuje porast koncentracije vodika ili njegovih spojeva, potrebno je provesti pokuse – kako je to prikazano na slici 6 – 1.

Količinu otpuštenog vodika iz pojedinih dijelova transformatora sačinjenih od odabranih Al legura moguće je odrediti uranjanjem uzorka u trafo ulje u kojem ne postoji otopljeni vodik. Nakon određenog vremena i izlaganja uronjenog uzorka djelovanju transformatorskog ulja, pod utjecajem različitih tlakova i temperatura, uzimaju se uzorci transformatorskog ulja i to na način opisan u trećem poglavlju ovog rada. Kromatografskom analizom određuje se koncentracija otopljenog vodika u transformatorskom ulju. Rezultati analize ulja dokazuju ili opovrgavaju činjenicu da ispitivana legura otpušta vodik. Iz razloga dugačkog trajanja pokusa (svaki uzorak uronjen je nekoliko tjedana) potrebno je prvo započeti sa takvim pokusima.

Na slici 6 – 1 prikazan je plan i redosljed pokusa vezanih za kemijsku i strukturnu analizu uzoraka. Plan pokusa slijedi utjecaj kemijskog sastava sirovine na konačni kemijski sastav zavarenog spoja torusa i cijevi. Posljedica promjene kemijskog sastava očituje se i u promjeni mikrostrukture tijekom određenih tehnoloških operacija – u ovom slučaju tijekom lijevanja i zavarivanja. Započinje se uzorkovanjem Al legure prije taljenja - uzorkovanje sirovine.



Plan pokusa prilikom istraživanja uzroka pojave vodika u transformatorskom ulju mjernih transformatora



Slika 6 - 1: Plan pokusa prilikom istraživanja uzroka i istraživanja pojave vodika u transformatorskom ulju mjernih transformatora

Za lijevanje torusa koriste se dva oblika odljevaka legure AlSi10Mg. Sirovina 1 se isporučuje u obliku lijevanih ingota, dok se sirovina 2 isporučuje u obliku kontinuirano lijevanih ingota. Legura AlSi10Mg, zadana u sastavnici torusa, slijedećeg je kemijskog sastava:

- Si 9.0 do 11.0 %
- Fe najviše do 0.55 %
- Cu najviše do 0.05 %
- Mn najviše do 0.45 %
- Mg 0.2 do 0.45 %
- Ni najviše do 0.05 %
- Zn najviše do 0.10 %
- Pb najviše do 0.05 %
- Sn najviše do 0.05 %
- Ti najviše do 0.15 %
- Al ostatak [53]

Kontrolira se istovjetnost kemijskog sastava sirovina sa propisanim kemijskim sastavom. Potom se kontrolira istovjetnost kemijskog sastava torusa sa kemijskim sastavom sirovine od koje se lijeva. Nakon zavarivanja kontrolira se kemijski sastav zavara.

## 6.2 Priprema i provedba pokusa

Pretaljivanjem sirovine 1 ili sirovine 2 i ponovnim lijevanjem u pješčane kalupe nastaju odljevci polovica torusa. Na slikama 6 - 2 i 6 - 3 prikazan je oblik isporuke sirovine – legure AlSi10Mg



*Slika 6 - 2: Oblik isporuke sirovine 1- ljevani ingoti*



*Slika 6 - 3: Oblik isporuke sirovine 2 - kontinuirano ljevani ingoti*

Uzorkovane su obje sirovine, a rezultati kemijske i strukturne analize prikazani su na slikama 5 - 2 i 5 - 3.

Kemijska analiza sirovine 4 – dodatnog materijala prilikom MIG zavarivanja nije provedena. Pretpostavka da se radi o traženom sastavu temelji se na osnovi certifikata dostavljenih od proizvođača.

Sa svrhom provedbe eksperimentalnog dijela analize utjecajnosti aluminijskih dijelova na pojavnost vodika u trafo ulju pristupa se planiranju pokusa. Prilikom planiranja pokusa optimaliziraju se slijedeći parametri:

- troškovi analize (što manji broj uzoraka);

- vremensko trajanje pokusa;
- mogući efekti pokusa (iskoristivost rezultata).

Prije svega, iz razloga visokih troškova provođenja pokusa (zauzeće kapaciteta, izrada specijalnih vakuumstalnih posuda, troškova kromatografskih analiza uzoraka transformatorskog ulja) i iz razloga angažmana jednog dijela proizvodnih resursa što opet uzrokuje zastoj u provedbi plana proizvodnje, pokus treba uklopiti u proizvodni proces proizvodnje odabranog tipa mjernog transformatora tipa AGU- 72,5.

Pokusom se simulira utjecaj određenih fizikalno-kemijskih uvjeta na točno jednu vrstu materijala u točno određenoj fazi nastanka mjernog transformatora. Kako bi bilo vrlo neekonomično u tu svrhu koristiti same transformatore (odnosno kućišta transformatora) pokušalo se simulirati istovjetne uvjete.

Sa svrhom provedbe pokusa, izrađene su, kao što se vidi na slici 6 - 4, dvije vakuumstalne posude. Izrađene su od tzv. nehrđajućeg čelika i volumen svake posude iznosi 15 dm<sup>3</sup>.



*Slika 6 - 4: Vakuumstalne posude za provedbu pokusa*

Konstrukcija, izrada i materijal posuda odabran je sa svrhom postizanja što sličnijih fizikalno-kemijskih uvjeta onima u transformatoru, isključivši utjecaj materijala posude na transformatorsko ulje tijekom pokusa.

Tako su priključci na kojima se provodi punjenje uljem odnosno uzorkovanje, potpuno isti kao i kod transformatora. Sama faza vakumiranja i punjenja kotla uljem provodi se na isti način i na istom postrojenju od strane istih djelatnika koji tu tehnološku fazu provode i u redovnom proizvodnom procesu.

Pokus je podjeljen u dvije vremenski odvojene faze koje sveukupno uključuju četiri uzorka.

Prva je faza započela 21.07.2009. i odnosi se na pokus sa uzorkom 1 i uzorkom 2.

### 6.2.1 Uzorak 1

Uzorak 1 predstavlja uzorak zavarenog spoja sklopa torusa i cijevi sačinjene od aluminijske legure AlMgSi0,5. Primjenjeni postupak zavarivanja vidljiv je na slici 1 – 3 i primjenjuje se kao standardna tehnološka operacija zavarivanja u procesu proizvodnje mjernog transformatora. Kako je takav sklop dimenzionalno velik, izdvojeno je kritično mjesto. Kritično mjesto predstavlja onaj dio sklopa za koji se sumnja da je mjesto izlučivanja vodika i uključuje dio torusa, kompletan zavar i dio cijevi. Slika 6 – 5 i slika 6 – 6 prikazuju izrezivanje i dimenzioniranje uzorka 1 na dimenzije koje dozvoljavaju smještaj u kotao/posudu za vakuumiranje.



Slika 6 - 5: Izdvajanje područja zavarenog spoja cijev-torus



Slika 6 - 6: Uzorak 1 – odvojen od torusa

Masa tako pripremljenog uzorka iznosi 558 g. Masa od 93 g odnosi se na dio materijala torusa. Pokusom na uzorku 1 treba ispitati mogućnost pojavnosti vodika prilikom primjene tehnološke operacije zavarivanja (opisane u glavi 5 ovog rada). Zavar je obrađen ručnom četkom sa nehrđajućom žicom i potpuno istovjetno

pripremljen za pokus kao što se priprema u procesu proizvodnje transformatora.



Slika 6 - 7: Uzorak 1 pripremljen za vakumiranje

### 6.2.2 Uzorak 2

Uzorak 2 odnosi se na torus. Iz razloga ekonomičnosti prilikom provedbe pokusa, redosljed ispitivanja prilagođava se mogućnostima. Pristupa se uzorkovanju ostatka materijala jer je neupotrebljiv za daljnju proizvodnju, pa se želi, u što je većoj mjeri moguće, iskoristiti preostali dio – torus.

Tijekom tehnološke operacije vakumiranja transformatora, dio aktivnog dijela – torus, izložen je djelovanju vakuuma. S obzirom na mogućnosti opisane u glavama 4 i 5 ovog rada, sumnja se da je pojavnost vodika u transformatorskom ulju posljedica izvlačenja vodika iz pora torusa, prikazanih na slici 6 – 8 i otapanja istog tog vodika u trafo ulju.



Slika 6 - 8: Poroznost na dijelu površine uzorka torusa

Uzorak 2 predstavlja uzorke materijala torusa izrezane na manje komadiće vidljive



na slici 6 – 9. Izrezivanje je potrebno provoditi izuzetno sporo uz primjenu nove pile kako ne bi došlo do povećanog generiranja topline, njenog utjecaja na materijal i mogućeg utjecaja na rezultate pokusa.



*Slika 6 - 9: Izrezani dijelovi torusa - uzorak 2*

Posuda s uzorkom 2 prikazana je na slici 6 – 10 i sadrži 2471 g usitnjenih dijelova torusa. Kotao je hermetički zatvoren i tako pripremljen čeka na postupak vakuumiranja i punjenja uljem.



*Slika 6 - 10: Posuda sa uzorkom 2 (materijal torusa) prije zatvaranja*

Razlog zbog kojeg je maseni udio materijala u transformatorskom ulju uzorka 1 višestruko manji nego kod onog u uzorku 2 jest taj da se maksimalno moguće minimalizira utjecaj materijala (posebice materijala torusa u masi uzorka 1 - cca 17 % mase uzorka 1) na pojavnost vodika u transformatorskom ulju uzorka 1. Taj se utjecaj ionako isključivo ispituje na uzorku 2.

### 6.2.3 Impregnacija uzoraka 1 i 2 transformatorskim uljem

Hermetički zatvorene posude sa uzorkom 1 i sa uzorkom 2 spajaju se na razvod transformatorskog ulja. Priključak za ulje se nalazi u donjem djelu posuda. U gornjem dijelu posuda nalazi se poklopac na koji se spaja vakuumsko postrojenje. Poklopac posuda izveden je tako da je priključak na vakuumsko crijevo isti kao i kod membrane transformatora tipa AGU. Započinje se sa vakumiranjem posuda. Vakumiranje se provodi do stalnog tlaka od 0,025 mbar. Iz razloga metalnih uzoraka i hermetičnosti posuda odmah je ostvaren i zadržan navedeni potlak.

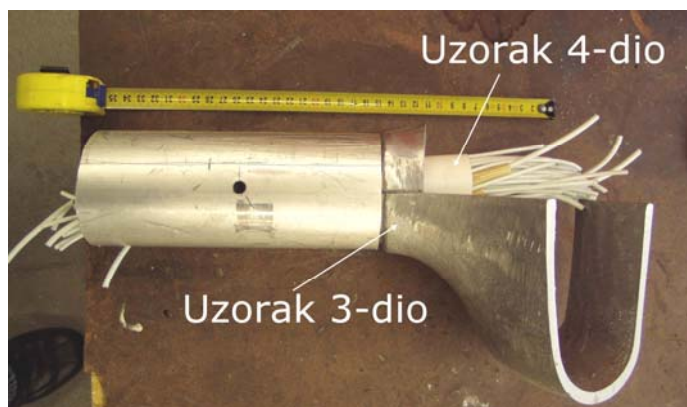
Nakon što su kotlovi vakumirani i napunjeni uljem uzimaju se uzorci ulja koji pokazuju početno stanje – početna koncentracija plinova otopljenih ulju – inicijalno stanje uzorka 1 i uzorka 2.

Druga je faza uslijedila nakon dobivanja rezultata ispitivanja i određivanja koncentracije plinova otopljenih u transformatorskog ulja iz kotlova/posuda sa uzorcima 1 i 2 nakon 8 odnosno 14 tjedana. Razlog tome bilo je određivanje smjernica budućih pokusa upravo na temelju rezultata kromatografskih analiza.

### 6.2.4 Uzorci 3 i 4

Druga faza obuhvatila je uzorke 3 i 4 .

Na slici 6 – 11 prikazan je dio uzorka 3 prije spajanja zavarivanjem i bandažiranja te dio uzorka 4 koji se, prilikom zavarivanja dijelova uzorka 3 izlaže djelovanju topline

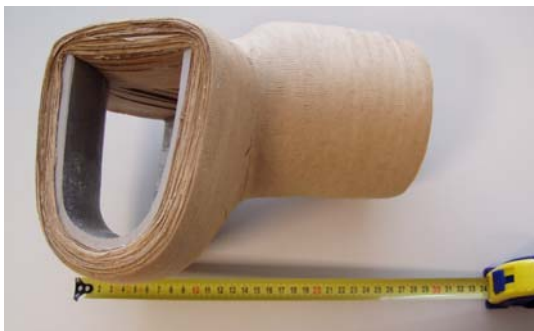


*Slika 6 - 11: Dijelovi cijevi i umetnuti torus (uzorak 3) te svitak žica (dio uzorka 4) umetnut u otvor cijevi i torusa prije zvarivanja*

Prilikom sastavljanja uzorka 3, a prije zavarivanja dijelova torusa i cijevi, u unutrašnjost se umetnuo svitak izoliranih žica zaštićenih nomex papirom vidljiv na slici 6 – 11 kao uzorak 4 - dio. Tijekom zavarivanja razvija se određena količina topline koja utječe na kemijski satav izolacije žica. Istovremeno se želi proučiti utjecaj te razvijene topline na svitak žica zaštićen nomex papirom, koji se na isti način zaštićuje i prilikom montaže transformatora.

Slika 6 - 12 prikazuje uzorak 3 koji se sastoji samo od zavarenih dijelova cijevi i torusa zabandažiranih krep papirom. Sumnja pojave vodika povezuje se sa postupkom „kuhanja“ aluminijskih dijelova u pari koja nastaje prilikom vakuumskeg sušenja krep papira i nastanka pojačane oksidacije aluminijskih dijelova ili drugih mogućih kemijskih procesa.

Nastavak formiranja uzorka 3 uljučuje bandažiranje samo spoja cijevi i dijela torusa - kao što je to prikazano na slici 6 - 12. Pokusom na uzorku 3 ponovo se istražuje i utjecajnost zavara na pojavnost vodika. Za ovaj slučaj uzorak je pripremljen što je sličnije poluproizvodu zabandažiranog torusa za zadani naponski nivo. Debljina sloja papirne izolacije iznosi 25 mm.



*Slika 6 - 12: Uzorak 3 – zabandažirani spoj cijevi i dijela torusa prije vakuumskeg sušenja*

Svitak iz zavarenog uzorka 3 sa slike 6 – 11 vadi se i umeće unutar dvije aluminijske cijevi, te se prilikom čeonog zavarivanja cijevi, još jednom, direktnije, izlaže utjecaju topline. Kao takav, svitak je prikazan na slici 6 – 13 i zajedno sa zavarenim aluminijskim cijevima čini uzorak 4. Direktni toplinski utjecaj ima svrhu pojačavanja toplinskog učinka na promjenu kemijskog sastava nomex obloge ili izolacije vodiča - ukoliko on postoji.

Provedbom pokusa na uzorku 4, trebala bi se potvrditi ili opovrgnuti sumnja da je nastanak vodika posljedica tehnologije zavarivanja aluminijskog torusa i aluminijske cijevi koja generira dovoljno topline za promjenu kompatibilnosti nomex obloge i izolacije vodiča sa transformatorskim uljem. Svrha omatanja nomex zaštitnim omotačem jest zaštititi izolaciju vodiča od toplinskog i mehaničkog utjecaja tehnologije montaže.



*Slika 6 - 13: Uzorak 4 – svitak žica obložen nomex papirom (izvan zavarene cijevi)*



Zavar na cijevima obrađuje se sukladno obradi svih zavara u proizvodnom procesu mjernih transformatora.

### 6.2.5 Sušenje uzoraka 3 i 4

Uzorci 3 i 4, zajedno sa skupinom dijelova transformatora AGU 72,5 prikazanom na slici 6 - 14, odlaze na vakuumsko sušenje tijekom kojeg se kontrolira i prati proces prikazan dijagramima promjene temperature i tlaka tijekom perioda sušenja.

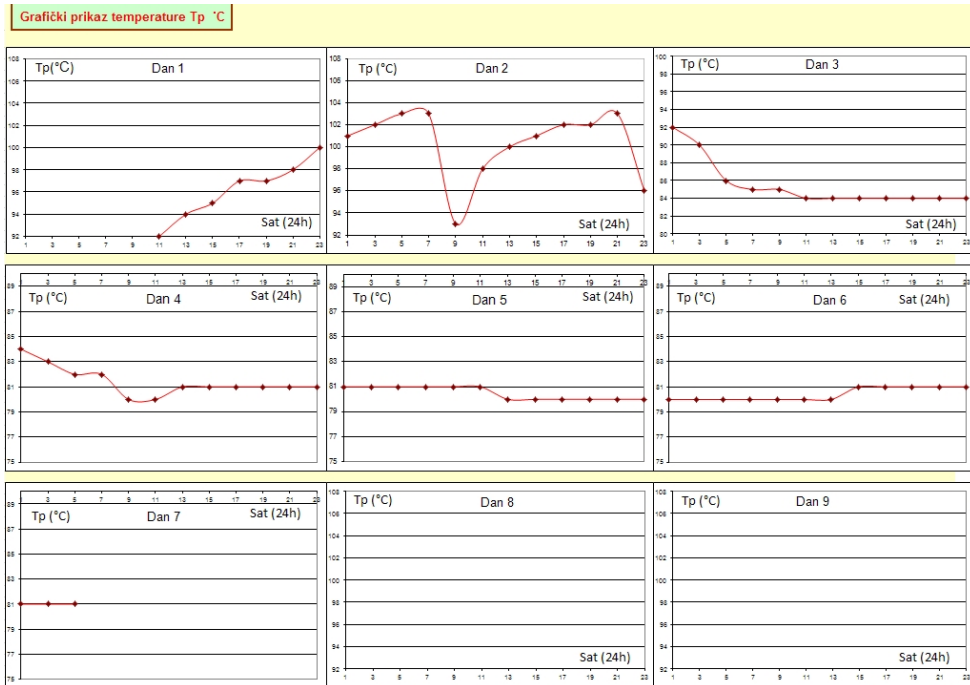


Slika 6 - 14: Praćenje procesnih parametara tijekom vakuumskog sušenja

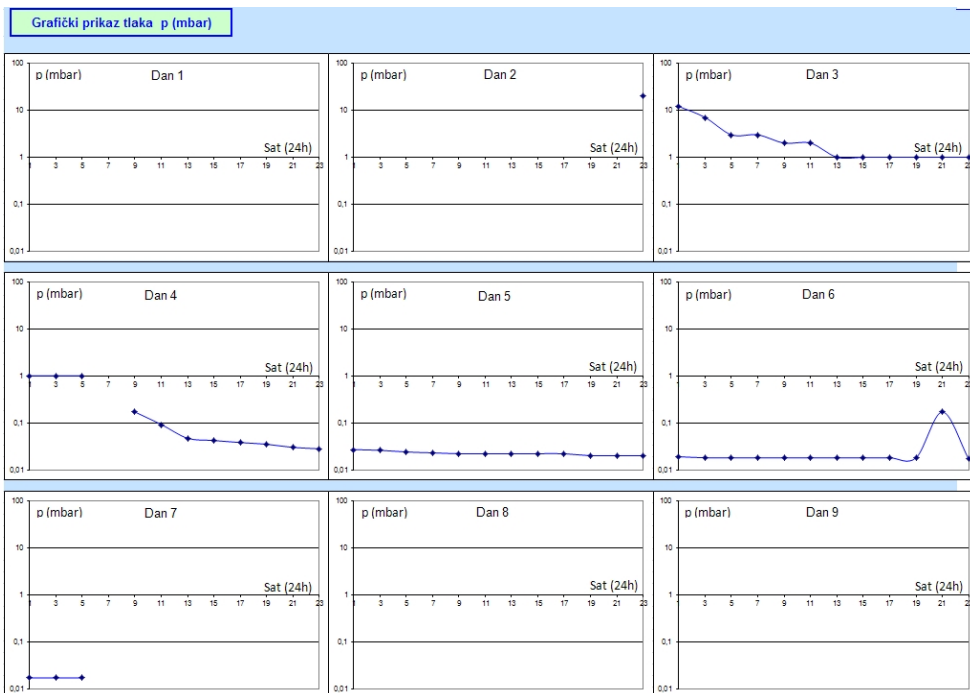
Procesni parametri prikazani su u tablici 6 - 1 i slikama 6 - 15 i 6 - 16.

Tablica 6 - 1: Tijek postupka vakuumskog sušenja kojem su bili izloženi uzorci 3 i 4

METALNA					KONTROLNI LIST procesa vakuumskog sušenja					SI-max = 123 kV	kom: 24	OB 712														
dat: 12.1.2010		dan: Utorak			dat: 13.1.2010		dan: Srijeda			dat: 14.1.2010		dan: Četvrtak		dat: 15.1.2010		dan: Petak		dat: 16.1.2010		dan: Subota						
0	Temp	Tlak			1	Temp	Tlak			2	Temp	Tlak			3	Temp	Tlak			4	Temp	Tlak				
	Tp	Pk	gornja	polja																						
sat	°C	mbar			sat	°C	mbar			sat	°C	mbar			sat	°C	mbar			sat	°C	mbar				
1	78			GI	1	78			GI	1	101			GI	1	92	12			GI	1	84	1		GI	
3				GI	3	82			GI	3	102			Jl	3	90	7			Jl	3	83	1		Jl	
5				GI	5	83			GI	5	103			GI	5	86	3			GI	5	82	1		Jl	
7				ZG	7	88			ZG	7	103		Vak. 2	Tl	7	85	3			ZG	7	82			Start Roots	Z.S
9				ZG	9	90			ZG	9	93			Tl	9	85	2	Bypass	ZG	9	80	0,17				Z.S
11				ZG	11	92			ZG	11	98			Z.S	11	84	2		ZG	11	80	0,092				Z.S
13				ZG	13	94			ZG	13	100			Z.S	13	84	1		ZG	13	81	0,047				Z.S
15				ZG	15	95			ZG	15	101			ZG	15	84	1		ZG	15	81	0,042				ZG
17				ZG	17	97		Poklopac	ZG	17	102			ZG	17	84	1		ZG	17	81	0,038				ZG
19				ZG	19	97		Vak. 1	ZG	19	102			ZG	19	84	1		ZG	19	81	0,035				ZG
21	70	START	PROC.	ZG	21	98			ZG	21	103		V.kont	ZG	21	84	1		ZG	21	81	0,03				ZG
23	74			GU	23	100			Jl	23	96	20		Jl	23	84	1		Jl	23	81	0,028				Jl
Napomene:					Napomene:					Napomene:					Napomene:					Napomene:						
dat: 17.1.2010		dan: Nedjelja			dat: 18.1.2010		dan: Ponedjeljak			dat: 19.1.2010		dan: Utorak			dat: 20.1.2010		dan: Srijeda			dat: 21.1.2010		dan: Četvrtak				
5	Temp	Tlak			6	Temp	Tlak			7	Temp	Tlak			8	Temp	Tlak			9	Temp	Tlak				
	Tp	Pk	gornja	polja																						
sat	°C	mbar			sat	°C	mbar			sat	°C	mbar			sat	°C	mbar			sat	°C	mbar				
1	81	0,027		Jl	1	80	0,019		Jl	1	81	0,017		Z.S	1					1						
3	81	0,026		Jl	3	80	0,018		Jl	3	81	0,017		Z.S	3					3						
5	81	0,024		Jl	5	80	0,018		Jl	5	81	0,017		Z.S	5					5						
7	81	0,023		Z.S	7	80	0,018		ZG	7					7					7						
9	81	0,022		Z.S	9	80	0,018		ZG	9					9					9						
11	81	0,022		Z.S	11	80	0,018		ZG	11					11					11						
13	80	0,022		Z.S	13	80	0,018		ZG	13					13					13						
15	80	0,022		ZG	15	81	0,018		GI	15					15					15						
17	80	0,022		ZG	17	81	0,018		GI	17					17					17						
19	80	0,02		ZG	19	81	0,018		GI	19					19					19						
21	80	0,02		ZG	21	81	0,17		GI	21					21					21						
23	80	0,02		Jl	23	81	0,017		Z.S	23					23					23						
Napomene:					Napomene:					Napomene:					Napomene:					Napomene:						



Slika 6 - 15: Grafički prikaz temperatura tijekom postupka vakumskog sušenja kojem je bio izložen uzorak 3



Slika 6 - 16: Grafički prikaz tlaka tijekom postupka vakumskog sušenja kojem je bio izložen uzorak 3

Vakuumsko sušenje provodi se 6 dana, i kao što je vidljivo u tablici 6 – 1 i slikama 6 – 15 i 6 - 16, nakon četverodnevnog zagrijavanja uzoraka, započinje se sa vakuumiranjem peći. Tijekom procesa maksimalno postignute temperature unutar peći iznose 103°C i postignute su nakon 19 odnosno 33 sata od početka postupka. Maksimalno postignut potlak u peći iznosi 0,017 mbara i postignut je na kraju procesa vakuumskog sušenja.

Odmah nakon sušenja uzorci se brzo smještaju u za to pripremljene posude kako ne bi bili izloženi ponovnom upijanju vlage . Njihov smještaj unutar posuda prikazan je na slikama 6 - 17 i 6 - 18.



*Slika 6 - 17: Umetnut uzorak 3 u posudu prije zatvaranja i vakuumiranja*



*Slika 6 - 18: Umetnut Uzorak 4 u posudu prije zatvaranja i vakuumiranja*

### **6.2.6 Impregnacija uzoraka 3 i 4 transformatorskim uljem**

Uzorci 3 i 4 su za razliku od prva dva, prethodno prošli fazu vakuumskog sušenja.

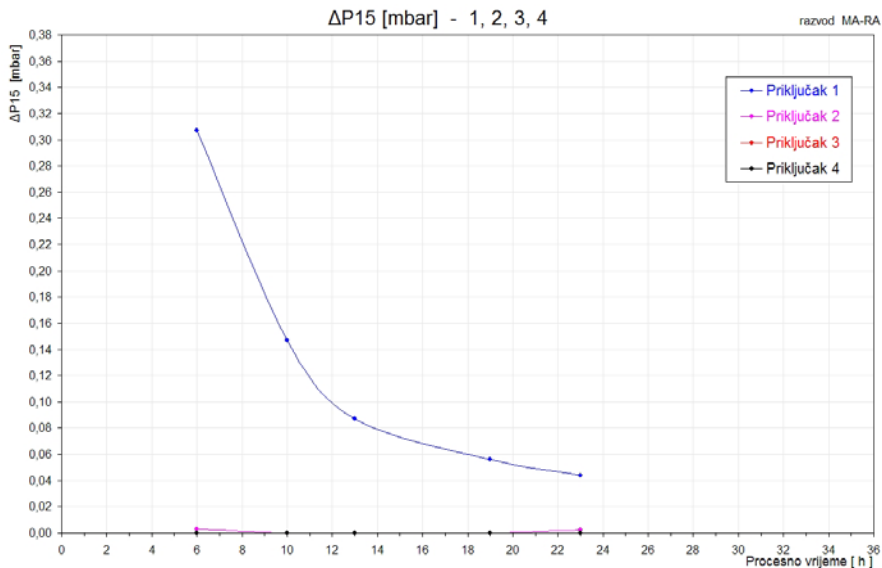
Faza (postupak) vakuumskog sušenja uzoraka koja prethodi vakuumskoj impregnaciji uljem provedena je prema parametrima u tablici (Tablica 6 - 1).

Nakon sušenja uzorci se smještaju u kotlove/posude, hermetički zatvaraju i kao

takvi vakumiraju do tlaka od 0,023 mbar. Prije punjenja kotlova/posuda uljem, uzorci se drže na zadanom potlaku, kako je to prikazano dijagramom na slici 6 – 19 dobivenim na temelju podataka iz tablice 6 – 2.

Tablica 6 - 2: Proces vakuumske impregnacije uzoraka 3 i 4

PROCES VAKUUMSKE IMPREGNACIJE								
Početak vakuumiranja:				Datum: (dd.mm.gggg)				
red.br. mjerenja	MJERENJE $\Delta P15$ [mbar]	Datum dd.mm.gg	Sat hh:mm	vrijeme procesa	1	2	3	4
					MODEL br: 4	MODEL br: 3		
1	P1	19.1.10.		6,00	0,023	0,023		
	P2		16:00		0,330	0,026		
	$\Delta P15$				0,307	0,003	0,000	0,000
2	P1	19.1.10.		10,00	0,023	0,023		
	P2		20:00		0,170	0,022		
	$\Delta P15$				0,147	-0,001	0,000	0,000
3	P1	19.1.10.		13,00	0,023	0,024		
	P2		23:00		0,110	0,021		
	$\Delta P15$				0,087	-0,003	0,000	0,000
4	P1	20.1.10.		19,00	0,027	0,027		
	P2		5:00		0,083	0,027		
	$\Delta P15$				0,056	0,000	0,000	0,000
5	P1	20.1.10.		23,00	0,029	0,030		
	P2		9:00		0,073	0,032		
	$\Delta P15$				0,044	0,002	0,000	0,000



Slika 6 - 19: Tijek promjene tlaka unutar kotlova prije punjenja uljem

Razlog takvom postupku tijekom vakuumiranja posude sa uzorcima, pronalazi se u činjenici da se na taj način ispituje propusnost korištene opreme, odnosno dolazi li

do mogućih kemijskih reakcija koje su uzrok porastu tlaka. Sada slijedi punjenje kotlova uljem, nakon čega slijedi inicijalno uzorkovanje ulja. Tijekom uzimanja uzoraka bitno je ispiranje šprice, redosljed uzimanja nakon 1 slijedi 2 , nakon 3 slijedi 4.

### **6.3 Rezultati pokusa**

Nakon impregnacije uzoraka 1 i 2 uzeti su uzorci ulja kako bi se utvrdilo inicijalno stanje i početna koncentracija plinova. Rezultati kromatografske analize otopljenih plinova u transformatorskom ulju prikazani su u glavi 8 ovog rada - PRILOG 2.

Koncentracija otopljenog vodika kod uzorka 1 iznosi 2 ppm, a kod uzorka 2 vrijednost otopljenog vodika manja je od 2 ppm. Te su vrijednosti toliko male da se mogu smatrati granicom detektabilnosti vodika. Ovakve vrijednosti upućuju na zaključak da je ulje praktično bez vodika, i da je i punjenje i uzorkovanje provedeno ispravno i prema proceduri [23].

Slijedeća analiza provedena je nakon 8 tjedana. Rezultati te analize prikazani su u PRILOGU 3, glava 8. Koncentracija vodika kod uzorka 1 (zavareni spoj cijevi i torusa) je ostala nepromjenjena (2 ppm) dok je kod uzorka 2 (materijal torusa) izmjerena koncentracija vodika od 6 ppm.

Slijedeća, treća analiza, uslijedila je nakon 14 tjedana. Rezultati prikazani u PRILOGU 4 pokazuju da je u uzorku 1 ponovno izmjerena ista koncentracija vodika od 2 ppm, dok je ulje iz posude sa uzorkom zadržalo povećanu koncentraciju od 5 ppm.

Nakon ispitivanja „otpuštanja“ vodika uzoraka 1 i 2 posude su se ispraznile i očistile od svih ostataka prethodnog transformatorskog ulja. Slijedi umetanje uzoraka 3 i 4 u iste posude, impregnacija transformatorskim uljem i uzorkovanje ulja odmah po punjenju. Rezultati analize inicijalnog stanja uzoraka 3 i 4 prikazani su u PRILOGU 5. Početna koncentracija vodika kod uzorka ulja uzoraka 3 i 4 manja je od 2 ppm, i takva se, što je prikazano u PRILOGU 6, i zadržala tijekom slijedećih 5 tjedana.

PRILOG 7 sadrži rezultate koncentracije vodika nakon 9 tjedana i u tom periodu izlaganja uzoraka temperaturi 90°C u trajanju od 24h. Djelovanje temperature ostvareno je odlaganjem posuda sa uzorcima u peći na početku 6-tog tjedna. Rezultati analize pokazuju da je koncentracija otopljenog vodika i kod uzorka 3 i kod uzorka 4 porasla na vrijednosti 7 ppm odnosno 8 ppm.



## Zaključak

---

### 7.1 Rezultati rada

Tijekom dvogodišnjeg praćenja pojavnosti vodika u transformatorskom ulju i pokušaja povezivanja povećanih koncentracija vodika u transformatorskom ulju sa primjenom pojedinih materijala prilikom proizvodnje određenih tipova transformatora, pristupa se istraživanju te povezanosti. Razmatranje teorijskih metalurških postavki vezanih uz proizvodnju aluminijskih dijelova i povezivanje sa zapažanjima ljevača aluminijskih dijelova primjenjenih u kritičnom tipu transformatora, usmjerava istraživanje uzroka nastanka vodika prema uzrocima nastanka vodika kod aluminijskih i aluminijskih legura. Razlika u količini nečistoća i troske prilikom rastaljivanja ingota iste šarže sirovine, upućuje na zaključak da unatoč certifikatima proizvođača, postoji mogućnost redovne ili povremene neujednačenosti kvalitete sirovine.

Pojava vodika u transformatorskom ulju ovisi o brojnim utjecajnim čimbenicima, među kojima je kompatibilnost primjenjenih materijala sa transformatorskim uljem. Kompatibilnost se potvrđuje ili opovrgava za točno određeni materijal određenog kemijskog sastava. Sirovina koja se dobavlja za lijevanje torusa i sam materijal torusa specificirani su oznakom AlSi10Mg. Uzorkovanjem i određivanjem kemijskog sastava sirovine 1, kao što je prikazano na slici 5 – 2, utvrđeno je da se kemijski sastav uzorka ne poklapa sa kemijskim sastavom niti jedne standardne legure. Na slici 5 – 3 predložen je kemijski sastav sirovine 2 koji u potpunosti zadovoljava garantirani sastav standardne legure Al-356, ali ne i legure AlSi10Mg. Indeks poklapanja najveći je kod torusa (4.3), i kao što je vidljivo na slici 5 – 4, razlog tako visokom indeksu jest nepostojanje Mg u sastavu legure torusa.

Mikrostruktura, odnosno veličina pukotina u mikrostrukтури, pokazuju sličan trend

---

kao i indeks poklapanja. Mikrostruktura sirovine 2 ne sadrži pukotine dok u mikrostrukturi sirovine 1 postoje vidljive pukotine. Najveće pukotine vidljive su kod uzorka torusa. Vezano za skrutnuto okruženje tih pukotina, primjećuje se zaobljeni, glatki kapljičasto-kontinuirani oblik krutine. Šupljikava struktura torusa, pruža pogodnu lokaciju za smještaj i kasnije otpuštanje vodika.

Mogućnost kemijske reakcije određenog materijala, njegovih korozivskih produkata ili pak produkata nastalih prilikom zavarivanja, sa transformatorskim uljem, usmjerava provedbu istraživanja pojavnosti vodika kod ispitivanog materijala, isključivo u njegovom kontaktu sa transformatorskim uljem, pod simuliranim fizikalnim uvjetima - istovjetnim onima u mjernom transformatoru.

Rezultati kromatografske analize ulja kod uzoraka 1 i 2, pokazali su da je povećanje koncentracije vodika zabilježeno kod uzorka 2 (narezan materijal torusa), dok zavareni dijelovi nisu „ispustili“ praktično nikakve količine vodika.

Koncentracija otopljenog vodika u ulju, nakon 5 tjedana izlaganja, pri temperaturi od 21°C, kod uzoraka 3 i 4 ostala je nepromjenjena. Nakon izlaganja uzoraka 3 i 4 djelovanju topline i zadržavanja 24 sata na temperaturi 90°C, nakon 9 tjedana rezultati kromatografske analize, prikazani u prilogu 7, pokazali su povećanje koncentracije vodika. Zaključuje se, da primjenjena proizvodna tehnologija zavarivanja (MIG), unatoč njenom tehnološki ispravnom provođenju i uz primjenu argona zadovoljavajuće kvalitete (ARGON 4.8 specijal – Ar ≥99,998 vol. %) u slučaju uzoraka 3 i 4 jest uzrokom porasta vodika u maloj količini transformatorskog ulja i to isključivo nakon zagrijavanja na temperaturi od 90°C.

Kada se uzme u obzir da je količina ulja u kojoj su uronjeni zavareni spojevi znatno manja nego ona u transformatoru, a da je količina zavara istovjetna onome na transformatoru, izmjerena količina vodika u uzorku od 8 ppm ne predstavlja preveliku koncentraciju. Koncentracija od 8 ppm u uzorku ulja podrazumjeva višestruko manju koncentraciju u sveukupnoj količini trafo ulja i prihvatljiva je za mjerne transformatore. Zaključuje se, da **zavar nije uzrokom** koncentracije vodika od 20 do 40 ppm.

Utjecaj materijala torusa (znatno manje količine nego što se nalaze u mjernom transformatoru) na pojavu vodika u transformatorskom ulju, u usporedbi sa prethodnim utjecajem zavara, znatno je veći nego kod utjecaja zavara. Tu tvrdnju podupire i činjenica da je torus ispustio vodik i bez izlaganja povišenim temperaturama. Uzevši u obzir stvarni omjer količine materijala torusa i količine transformatorskog ulja u mjernom transformatoru, **postoji utjecaj materijala torusa** na pojavu vodika u mjernom transformatoru.

Dakle, primjenom zasebnih analiza tehnoloških operacija i faza vezanih za aluminijske dijelove mjernih transformatora moguće je prepoznati uzrok nastanka vodika u transformatorskom ulju.

---

## 7.2 Smjerovi daljnjeg istraživanja

Daljnje bi se istraživanje trebalo temeljiti na slijedećem:

1. sustavno istraživati i evidentirati kemijski sastav i mikrostrukturu sirovine od koje se lijevaju dijelovi mjernih transformatora,
2. prilikom lijevanja svake šarže posebno, odlijati ispitni uzorak (ili ga izdvojiti od uljevnog sustava) te evidentirati njegov kemijski sastav i mikrostrukturu,
3. tijekom lijevanja evidentirati pojave vezane uz talinu (otplinjavanje, nečistoće i sl.) uključivši i sva zapažanja lijevača,
4. ispitati kromatografskom analizom plinova uzorke ulja iz niza transformatora u koje su ugrađeni praćeni dijelovi sačinjeni od aluminijskih legura,
5. ispitivati kromatografskom analizom plinova uzorke transformatorskog ulja i iz transformatora drugog tipa u kojima su ugrađeni aluminijski dijelovi (npr. tip VAU),
6. posebno ispitati utjecaj povišene temperature na transformatorsko ulje (bez aluminijskih dijelova)

Dakle, nakon uvođenja temeljite slijedivosti vezane za aluminijske dijelove moguće je provesti obradu i analizu većeg broja uzoraka i povezati ih sa pojavnošću vodika.

U budućem bi istraživanju, više pažnje trebalo posvetiti detaljnijoj analizi mikrostrukture i kemijskog sastava aluminijskih legura, odnosno metalurškim čimbenicima koji u nekim slučajevima utječu na pojavu poroznosti kod aluminijskih legura i otpuštanje vodika (i drugih plinova) u transformatorsko ulje.





---

## **PRILOZI**

---

PRILOG 1: Pojednostavljeni prikaz tehnološkog procesa proizvodnje mjernog transformatora

PRILOG 2: Koncentracije plinova u trenutku punjenja obaju kotlova sa uzorcima 1 i 2 (na početku pokusa)

PRILOG 3: Koncentracije plinova u uzorcima transformatorskog ulja 1 i 2 nakon 8 tjedana

PRILOG 4: Koncentracije plinova u uzorcima transformatorskog ulja 1 i 2 nakon 14 tjedana

PRILOG 5: Koncentracije plinova u uzorcima transformatorskog ulja 3 i 4 nakon punjenja – inicijalno stanje

PRILOG 6: Koncentracije plinova u uzorcima transformatorskog ulja 3 i 4 nakon 5 tjedana

PRILOG 7: Koncentracije plinova u uzorcima transformatorskog ulja 3 i 4 nakon 9 tjedana i izlaganja ciklusu sa povišenom temperaturom

## PRIOLOG 1: Pojednostavljeni prikaz tehnološkog procesa proizvodnje mjernog transformatora

Proces proizvodnje mjernog transformatora											
Proces	Izrada sastavnih dijelova	Izrada jezgri	Namatanje sekundarnih namota	Kompletiranje torusa (umetanje jezgara)	Završno spajanje torusa	Namatanje glavne izolacije - tzv. bandaža	Sušenje	Izrada sekundarnih ploča	Završna montaža	Impregnacija	
Tehnološka operacija	Lijevanje i obrada torusa od alum. legure	Manipulacija i doprema sirovine (lim)	Manipulacija i doprema jezgara	Odobir potrebnih dijelova	Doprema dijelova na radno mjesto	Doprema i pozicioniranje torusa	Doprema dijelova u peč	Priprema kalupa (premazivanje, umetanje priključaka, grijanje)	Priprema i montaža svih dijelova	Doprema	
	Lijevanje i vučenje aluminijskih cijevi	Namatanje	Zaštita (oblaganje)	Umetanje	Pripremanje i učvršćivanje dijelova – gornje polovice torusa i cijevi	Priprema papirne bandaže (rezanje, namatanje na kolutove)	Sušenje	Priprema smjese (dvokomponentna epoksidna mješavina, kvarcno brašno, boja)	Umetanje aktivnog dijela	Vakumiranje	
	Vučenje bakrene žice	Mjerenje i odrezivanje	Pozicioniranje na stroju za namatanje	Formiranje priključaka i izvoda (zaštita nomex papirom i sl.)	Zavarivanje aluminijskih dijelova (polovina torusa-polovina torusa, torus gjev)	Omatanje – bandažiranje aktivnog dijela			Lijevanje	Punjenje uljem	
	Lakiranje barene žice	Zavarivanje	Namatanje	Učvršćivanje kompleta jezgara	Brušenje zavara			Pečenje			
	Baliranje papirnih obloga	Žarenje		Zaklapanje drugom polovinom torusa	Formiranje izvoda i označavanje aktivnog dijela			Raskalupljivanje i dorada			
									Izrada sekundarnih ploča		
									Priprema kalupa (premazivanje, umetanje priključaka, grijanje)		
									Priprema smjese (dvokomponentna epoksidna mješavina, kvarcno brašno, boja)		
									Lijevanje		
									Pečenje		

PRIOLOG 2: Koncentracije plinova u trenutku punjenja obaju kotlova sa uzorcima 1 i 2 (na početku pokusa)

<b>KONČAR</b> <b>INSTITUT</b> <b>za elektrotehniku</b> Laboratorij za fizikalno-kemijska ispitivanja	<b>IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU</b>		17025 · HAA  1174/09
	Br. 50-K-371-09	Str. / Uk. 1 / 1	

Laboratorij za fizikalno-kemijska ispitivanja osposobljen je prema zahtjevima norme HRN EN ISO/IEC 17025:2007 za ispitivanja fizikalno-kemijskih značajki transformatorskog ulja-ovlasnica br. 1174 od HAA, Hrvatska  
 Lab.br.: PK-1030/PK-1031, RN 281/09

KROMATOGRAFSKA ANALIZA ULJA IZ SPREMNIKA

Naručitelj ispitivanja: K- MJERNI TRANSFORMATORI / TEHNOLOGIJA  
 Ugovor. 21550 -0013/09

Vrsta ispitivanja: Kromatografska analiza plinova otopljenih u ulju  
 Metode ispitivanja: Prema IEC 60567 i IEC 61181  
 Instrument: Transformer oil analyzer Varian CP 3800

**PODACI O UZORKU**

Uzorak uzet iz SPREMNIKA S2

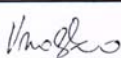
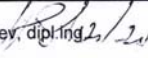
- (1) 21.07.2009. UZORAK br.1  
 (2) 21.07.2009. UZORAK br.2

Vrsta ulja: Shell Diala GX

Datum dostavljanja uzorka: 21.07.2009.

Datum ispitivanja: 22.07.2009.

PLIN	KONCENTRACIJA, µl/l (ppm)	
	(1)	(2)
Vodik, H <sub>2</sub>	2	<2
Metan, CH <sub>4</sub>	0,3	0,3
Acetilen, C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	ND	ND
Etilen, C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	ND	ND
Etan, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	ND	ND
Uglični monoksid, CO	1	1
Uglični dioksid, CO <sub>2</sub>	41	39
Kisik, O <sub>2</sub>	8464	2084
Dušik, N <sub>2</sub>	32584	8052
Ukupno plina, mL/L	4,0	10,3


Datum: 24.07.2009.	Ispitale: D. Vrsaljko, dipl. ing 	Odobrila: A. Hadži-Skerlev, dipl. ing 
-----------------------	---	---

KONČAR - Institut za  
 elektrotehniku d. d.  
 ZAGREB 11  
 Adresa: KONČAR – Institut za elektrotehniku d.d.  
 Laboratorij za fizikalno-kemijska ispitivanja  
 10002, Zagreb, Fallerovo šetalište 22

Telefon: 385 1 36 56 294  
 Fax: 385 1 36 67 319  
<http://www.koncar-institut.hr>

fiet 52K13/H

PRILOG 3: Koncentracije plinova u uzorcima transformatorskog ulja 1 i 2 nakon 8 tjedana

<b>KONČAR</b> <b>INSTITUT</b> za elektrotehniku Laboratorij za fizikalno-kemijska ispitivanja	<b>IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU</b>		17025-HAA  1174/09
	Br. 50-K-452-09	Str. / Uk. 1 / 1	

Laboratorij za fizikalno-kemijska ispitivanja osposobljen je prema zahtjevima norme HRN EN ISO/IEC 17025:2007 za ispitivanja fizikalno-kemijskih značajki transformatorskog ulja-ovlasnica br. 1174 od HAA, Hrvatska  
 Lab.br.: PK-1231/PK-1232, RN 327/09

KROMATOGRAFSKA ANALIZA ULJA IZ SPREMNIKA

Naručitelj ispitivanja: K- MJERNI TRANSFORMATORI / TEHNOLOGIJA  
 Ugovor. 21550 -0013/09

Vrsta ispitivanja: Kromatografska analiza plinova otopljenih u ulju  
 Metode ispitivanja: Prema IEC 60567 i IEC 61181  
 Instrument: Transformer oil analyzer Varian CP 3800

PODACI O UZORKU

Uzorci uzeti iz SPREMNIKA S2

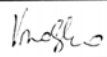
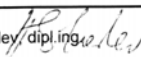
- (1) 14.09.2009. UZORAK br.1 - iz posude 1 nakon 8 tjedana stajanja  
 (2) 14.09.2009. UZORAK br.2 - iz posude 2 nakon 8 tjedana stajanja

Vrsta ulja: Shell Diala GX

Datum dostavljanja uzorka: 15.09.2009.

Datum ispitivanja: 16.09.2009.

PLIN	KONCENTRACIJA, µl/l (ppm)	
	(1)	(2)
Vodik, H <sub>2</sub>	2	6
Metan, CH <sub>4</sub>	0,3	0,4
Acetilen, C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	ND	ND
Etilen, C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	ND	ND
Etan, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	ND	ND
Ugljični monoksid, CO	3	3
Ugljični dioksid, CO <sub>2</sub>	41	68
Kisik, O <sub>2</sub>	4668	7029
Dušik, N <sub>2</sub>	21776	29407
Ukupno plina, mL/L	26,6	36,8

Datum: 17.09.2009.	Ispitale: D. Vrsaljko, dipl. ing 	Odobrila: A. Hadži-Skerley, dipl. ing 
-----------------------	---	---

Adresa: KONČAR – Institut za elektrotehniku d. d.  
 Laboratorij za fizikalno-kemijska ispitivanja  
 10002, Zagreb, Fallerovo šetalište 22

KONČAR - Institut za  
 elektrotehniku d. d.  
 Z A G R E B 11

Telefon: 385 1 36 56 294  
 Fax: 385 1 36 67 319  
<http://www.koncar-institut.hr>

fiet 52K13/H

PRILOG 4: Koncentracije plinova u uzorcima transformatorskog ulja 1 i 2 nakon 14 tjedana

<b>KONČAR</b> <b>INSTITUT</b> za elektrotehniku Laboratorij za fizikalno-kemijska ispitivanja	<b>IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU</b>		
	Br. 50-K-536-09	Str. / Uk. 1 / 1	

Laboratorij za fizikalno-kemijska ispitivanja osposobljen je prema zahtjevima norme HRN EN ISO/IEC 17025:2007 za ispitivanja fizikalno-kemijskih značajki transformatorskog ulja-ovlasnica br. 1174 od HAA, Hrvatska  
 Lab.br.: PK-1546/PK-1547, RN 393/09

KROMATOGRAFSKA ANALIZA ULJA IZ SPREMNIKA

Naručitelj ispitivanja: K- MJERNI TRANSFORMATORI / TEHNOLOGIJA  
 Ugovor. 21550 -0013/09

Vrsta ispitivanja: Kromatografska analiza plinova otopljenih u ulju  
 Metode ispitivanja: Prema IEC 60567  
 Instrument: Transformer oil analyzer Varian CP 3800

**PODACI O UZORKU**

Uzorci uzeti iz SPREMNIKA S2

- (1) UZORAK br.1 - iz posude 1 nakon 14 tjedana stajanja  
 (2) UZORAK br.2 - iz posude 2 nakon 14 tjedana stajanja

Vrsta ulja: Shell Diala GX

Datum dostavljanja uzorka: 27.10.2009.

Datum ispitivanja: 27.10.2009.

PLIN	KONCENTRACIJA, µl/l (ppm)	
	(1)	(2)
Vodik, H <sub>2</sub>	<2	5
Metan, CH <sub>4</sub>	0,3	0,5
Acetilen, C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	ND	ND
Etilen, C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	ND	ND
Etan, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	ND	ND
Ugljični monoksid, CO	1	3
Ugljični dioksid, CO <sub>2</sub>	83	103
Kisik, O <sub>2</sub>	17107	18628
Dušik, N <sub>2</sub>	47062	50099
Ukupno plina, mL/L	66,1	70,0

Datum: 29.10.2009.	Ispitale: D. Vrsaljko, dipl. ing <i>Vrsaljko</i>	Odobrija: A. Hadži-Skerlev, dipl.ing <i>A. Hadži-Skerlev</i>
-----------------------	---	---

KONČAR - Institut za  
 elektrotehniku d.d.  
 Laboratorij za fizikalno-kemijska ispitivanja  
 10002, Zagreb, Fallerovo šetalište 22  
 Z A G R E B 11

Telefon: 385 1 36 56 294  
 Fax: 385 1 36 67 319  
<http://www.koncar-institut.hr>

fiet 52K13/H

PRILOG 5: Koncentracije plinova u uzorcima transformatorskog ulja 3 i 4 nakon punjenja – inicijalno stanje

<b>KONČAR</b> <b>INSTITUT</b> za elektrotehniku Laboratorij za fizikalno-kemijska ispitivanja	<b>IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU</b>		17025-HAA
	Br. 50-K-021-10	Str. / Uk. 1/2	17/4/09

Laboratorij za fizikalno-kemijska ispitivanja osposobljen je prema zahtjevima norme HRN EN ISO/IEC 17025:2007 za ispitivanja fizikalno-kemijskih značajki transformatorskog ulja-ovlasnica br. 1174 od HAA, Hrvatska

Lab. br. PKv-034-035, RN 009/10

Vrsta ispitivanja: KROMATOGRAFSKA ANALIZA PLINOVA OTOPLJENIH U ULJU

Naručitelj: K- MJERNI TRANSFORMATORI/ TEHNOLOGIJA

Ugovor br: 21550 - U0013/09

**PODACI O UZORKU**

Uzorci uzeti iz SPREMNIKA S2

(1) UZORAK br.3- iz posude 3 neposredno nakon punjenja kotla uljem (2,5 sata)

(2) UZORAK br.4- iz posude 4 neposredno nakon punjenja kotla uljem (2,5 sata)

Vrsta ulja: Shell Diala GX

Datum uzimanja uzoraka: 20.01.2010.

Datum dostavljanja uzoraka: 26.01.2010.

Datum ispitivanja: 27.01.2010.

Ispitna metoda:

U skladu s HRN EN 60567 tč.5-10. i HRN EN 61181

Instrument:

Transformer oil analyzer Varian CP 3800; TK 1070m - automatska vakuumska ekstrakcija

PLIN	KONCENTRACIJA, µl/l (ppm)	
	( 1 )	( 2 )
Vodik, H <sub>2</sub>	<2	<2
Metan, CH <sub>4</sub>	0,4	0,5
Acetilen, C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	ND	ND
Etilen, C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	ND	ND
Etan, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	ND	ND
Uglični monoksid, CO	<1	<1
Uglični dioksid, CO <sub>2</sub>	75	70
Kisik, O <sub>2</sub>	393	732
Dušik, N <sub>2</sub>	1454	2740
Ukupni sadržaj plina u ulju, ml/l	1,8	3,5

**ZAKLJUČAK:** Izmjeren je nizak ukupni sadržaj plina u ulju kod oba uzorka (posuda 3 i 4), što odgovara dobro otplinjenom ulju. Kod oba uzorka su izmjerene identično niske koncentracije vodika i ugljikovodika.

Rezultati se odnose na dostavljene uzorke. Ovaj se izvještaj ne smije umnožavati osim u cijelosti i to uz pisanu suglasnost KONČAR-IET, LFK.

Adresa: KONČAR – Institut za elektrotehniku d.d.

Laboratorij za fizikalno-kemijska ispitivanja  
10002, Zagreb, Falterovo šetaliste 22

Telefon: 385 1 36 56 294

Fax: 385 1 36 67 319

<http://www.koncar-institut.hr>

fiet 52K13/H -2

PRILOG 6: Koncentracije plinova u uzorcima transformatorskog ulja 3 i 4 nakon 5 tjedana

<b>KONČAR</b> <b>INSTITUT</b> za elektrotehniku Laboratorij za fizikalno-kemijska ispitivanja	<b>IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU</b>		17025-HAA  1174/09
	<b>Br. 50-K-073-10</b>	Str. / Uk. 2 / 2	

Laboratorij za fizikalno-kemijska ispitivanja osposobljen je prema zahtjevima norme HRN EN ISO/IEC 17025:2007 za ispitivanja fizikalno-kemijskih značajki transformatorskog ulja-ovlasnica br. 1174 od HAA, Hrvatska  
 Lab.br.: PK-236/PK-237, RN 053/10

KROMATOGRAFSKA ANALIZA PLINOVA OTOPLJENIH U ULJU

Vrsta ispitivanja: Kromatografska analiza plinova otopljenih u ulju  
 Metode ispitivanja: Prema IEC 60567 i IEC 61181  
 Instrument: Varian CP 3800 Sustav za automatsku vakuum ekstrakciju: TK1030m

PODACI O UZORKU

- (1) UZORAK br.3 - iz posude 3 nakon 5 tjedana stajanja (zavar Al-odljevka i Al-vučne cijevi)  
 (2) UZORAK br.4 - iz posude 4 nakon 5 tjedana stajanja (međusobni zavar istovrsnih Al-vučnih cijevi)

Ulje iz spremnika S2  
 Vrsta ulja: Shell Diala GX

Datum dostavljanja uzorka: 03.03.2010.

Datum ispitivanja: 03.03.2010.

PLIN	KONCENTRACIJA, $\mu\text{l/l}$ (ppm)	
	(1)	(2)
Vodik, $\text{H}_2$	<2	2
Metan, $\text{CH}_4$	0,6	0,9
Acetilen, $\text{C}_2\text{H}_2$	<0,1	<0,1
Etilen, $\text{C}_2\text{H}_4$	<0,1	<0,1
Etan, $\text{C}_2\text{H}_6$	<0,1	<0,1
Uglični monoksid, CO	5	4
Uglični dioksid, $\text{CO}_2$	65	70
Kisik, $\text{O}_2$	2434	3163
Dušik, $\text{N}_2$	11381	17674
Ukupno plina, mL/L	13,9	21,8

ZAKLJUČAK: U oba uzorka dobivene su ujednačeno niske koncentracije vodika i ugljikovodika.

Rezultati se odnose na dostavljene uzorke. Ovaj se izvještaj ne smije umnožavati osim u cijelosti i to uz pisanu suglasnost KONČAR-IET, LFK.

Adresa: KONČAR – Institut za elektrotehniku d.d.  
 Laboratorij za fizikalno-kemijska ispitivanja  
 10002, Zagreb, Fallerovo šetalište 22

Telefon: 385 1 36 56 294  
 Fax: 385 1 36 67 319  
<http://www.koncar-institut.hr>

fiet 52K13/H -2



PRILOG 7: Koncentracije plinova u uzorcima transformatorskog ulja 3 i 4 nakon 9 tjedana i izlaganja ciklusu sa povišenom temperaturom

<b>KONČAR</b> <b>INSTITUT</b> za elektrotehniku Laboratorij za fizikalno-kemijska ispitivanja	<b>IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU</b>		17025-HAA  1174/11
	Br. 50-K-113-10	Str. 1 Uk. 2 /2	

Laboratorij za fizikalno-kemijska ispitivanja osposobljen je prema zahtjevima norme HRN EN ISO/IEC 17025:2007 za ispitivanja fizikalno-kemijskih značajki transformatorskog ulja-ovlasnica br. 1174 od HAA, Hrvatska  
 Lab.br.: PK-350/PK-351, RN 100/10

KROMATOGRAFSKA ANALIZA PLINOVA OTOPLJENIH U ULJU

Vrsta ispitivanja: Kromatografska analiza plinova otopljenih u ulju  
 Metode ispitivanja: Prema IEC 60567 i IEC 61181  
 Instrument: Varian CP 3800 Sustav za automatsku vakuum ekstrakciju: TK1030m

PODACI O UZORKU

- (1) UZORAK 3-2 - iz posude 3 nakon 9 tjedana stajanja (zavar Al-odljevka i Al-vučene cijevi)  
 (2) UZORAK 4-2 - iz posude 4 nakon 9 tjedana stajanja (međusobni zavar istovrsnih Al-vučenih cijevi)

Ulje iz spremnika S2  
 Vrsta ulja: Shell Diala GX

Datum dostavljanja uzorka: 31.03.2010.

Datum ispitivanja: 01.04.2010.

PLIN	KONCENTRACIJA, µl/l (ppm)	
	(1)	(2)
Vodik, H <sub>2</sub>	7	8
Metan, CH <sub>4</sub>	1,5	1,2
Acetilen, C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	<0,1	<0,1
Etilen, C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	<0,1	<0,1
Etan, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	<0,1	<0,1
Ugljični monoksid, CO	128	19
Ugljični dioksid, CO <sub>2</sub>	327	336
Kisik, O <sub>2</sub>	18389	21444
Dušik, N <sub>2</sub>	60665	64973
Ukupno plina, mL/L	79,2	87,8

ZAKLJUČAK: U uzorku (1) znatno je viša koncentracija CO u odnosu na uzorak (2).

Rezultati se odnose na dostavljene uzorke. Ovaj se izvještaj ne smije umnožavati osim u cijelosti i to uz pisanu suglasnost KONČAR-IET, LFK.

Adresa: KONČAR – Institut za elektrotehniku d.d.  
 Laboratorij za fizikalno-kemijska ispitivanja  
 10002, Zagreb, Fallerovo šetalšte 22

Telefon: 385 1 36 56 294  
 Fax: 385 1 36 67 319  
<http://www.koncar-institut.hr>

fiet 52K13/H -2



## 9

**Literatura**

- 
- [1] Pavlič, D., 2009., *Kriteriji identifikacije zajedničkih komponenata familije proizvoda*, str 1-1
- [2] Ramdas, K., 2002. *Managing Product Variety: An Integrative Review and Research Directions. Production and Operations Management*, 12 (1), 79 – 102., str. 2.
- [3] JP Elektroprivreda, *Pravilnik o mjernom mjestu krajnjega kupca/proizvođača*, Mostar, 2008.
- [4] Wilson, a.c.m.: *insulating liquids: their uses, manufacture and properties*, Peregrinus, London, 1980.
- [5] Čabrajac, Puklek, Poljak, 2003. *Šesto savjetovanje Cavtat , Kompatibilnost materijala u transformatorima punjenim mineralnim uljem*
- [6] *Standard Test Methods ASTM D 3455: Compatibility of Construction Material with electrical Insulating oil of Petroleum Origin*
- [7] *IEC 60422 (1989): Supervision and maintenance guide for insulating mineral insulating oils in electrical equipment*
- [8] Tillar Shugg W.: *Handbook of Electrical and Electronic Insulating Materials*, IEEE Press, 1995.
- [9] V.Bego, *Mjerni transformatori, Školska knjiga, Zagreb, 1977.*
- [10] V.Bego, *Mjerenja u eletrotehnici, Tehnička knjiga, Zagreb, 1968.*
- [11] KONČAR – *Mjerni transformatori, katalog proizvoda str. 31*

- 
- [12] *International Electrotechnical Commission, Current transformers - Publication 185/1966*
- [13] *B.Bojanić:International Colloquium Transformer Research and Asset Management, Cavtat, 2009.*
- [14] *JUS N.H9.121, 1987.*
- [15] *Leschanz, A. Oberdorfer, G.: Isolationsüberwachung und Regeneration an Strom- und Spannungswandlern, EuM 1965; Heft 6, str. 270-274.,*
- [16] *Widmann, W.: Beitrag zur Vakuumbehandlung von Messwandlern und Transformatoren für hohe Spannungen, AEG-Mitteilungen 55, 1965, Nr. 1, str. 17-21.*
- [17] *Šomođi, P.: Ispitivanje i analiza stanja izolacije mjernih transformatora Si-123 na terenu, Jug. nac. komitet CIGRE, XII stručno savjetovanje, Budva, 1975, Referat br. 12.01.*
- [18] *Technol mineralöl, 03/1999. 1 str.*
- [19] *IEC 60296 (2003), FLUIDS FOR ELECTROTECHNICAL APPLICATIONS –UNUSED MINERAL INSULATING OILS FOR TRANSFORMERS AND SWITCHGEAR*
- [20] *V. Pejović, K. Drakić, J. Lukić: Monografija elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla“ - PREVENTIVNA KONTROLA TRANSFORMATORA ISPITIVANJEM ULJA, str 139-153, Beograd, 2006.*
- [21] *Čabrajac, Hadži-Skerlev, Končar-Institut za elektrotehniku, CIGRE, Cavtat 1999., str 46.*
- [22] *IEC 61198 (1993): Mineral insulating oil - Method for determination of 2-furfural and related compounds*
- [23] *IEC 60567 (1992): Guide for sampling of gases and oil from oil-filled electrical equipment and for the analysis of free and dissolved gases*
- [24] *DRAFT, Revision of IEC 60599 (1998): Mineral oil-impregnated electrical equipment in service - Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis*
- [25] *KONČAR - Institut za elektrotehniku, Zavod za materijale i tehnologije, Laboratorij za fizikalno-kemijska ispitivanja, Uzimanje uzoraka za kromatografsku analizu plinova – radna uputa RU 52-K-012, Zagreb, 2007.*
- [26] *T.Filetin, F.Kovačićek, J.Indof : Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.*
- [27] <http://www.skole.hr/UserFiles/File/PSE.jpg>
- [28] *Selected Scientific Works of Hans Christian Ørsted. Translated and edited by Karen Jelved, Andrew D. Jackson and Ole Knudsen, Princeton: Princeton University Press 1998.*
-

- 
- [29] J.E.Hatch (ed.), *Aluminum: Properties and Physical Metalurgy*, 1984.
- [30] G.E.Totten i D.S.MacKenzie (eds.), *Handbook of Aluminum, vol.1.:Physical Melalurgy and Processes*, 2003.
- [31] *Aluminum Corporation of America, Melting and Casting Aluminum*, 1995.
- [32] G.S.Brady, H.R.Clauser i J.A.Vaccari, *Materials Handbook*, 15th ed. 2002.
- [33] *American Society for Metals, Source Book on Selection and Fabrication of Aluminum Alloys*, 1978.
- [34] E King, *Aluminum and Its Alloys*, 1987.
- [35] P. S. Gilinan and J. S. Benjamin, *Mechanical alloying*, *Annu. Rev. Mater. Sci.*, 13: 279-300, 1983.
- [36] Langenbeck, *Elevated temperature aluminum alloy development, Interim Technical Report for Period April-September 1981, U.S. Airforce Rep. LR 29977 October 1981.*
- [37] A. P Divecha, S. G. Fishman, and S.D. Karmarkar, *Silicon carbide reinforced aluminum: A formable composite*, *J. Metals*, 33:12-17, September 1981.
- [38] E. A. Starke, Jr., T. H. Sanders and I. G. Palmer, *New approaches to alloy development in the Al-Li system*, *J. Metals*, 33:24-33, August 1981.
- [39] F. Kovačiček, *Inženjerski priručnik, Proizvodno strojarstvo, Svezak 1:materijali, Zagreb*, 2001.
- [40] L.Vrsalović, *Studija inhibitorskog djelovanja fenolnih kiselina na koroziju Al-Mg legura, Split* 2008.
- [41] E.Stupnišek-Lisac, *Korozija i zaštita konstrukcijskih materijala, Zagreb* 2007.
- [42] I.Esih, Z.Dugi, *Tehnologija zaštite od korozije I-Teorija, ispitivanje korozije i ponašanje materijala, Zagreb*, 1990.
- [43] H. Kaesche, *Die Korrosion der Metalle*, Springer Verlag, N. York 1979.
- [44] Philip A. Schweitzer. *Encyclopedia of Corrosion Technology*, Marcel Dekker, Inc.. N. York 1998.
- [45] Mattsson, *Basic Corrosion Technology for Scientists and Engineers. Institute of Materials, London* 1996.
- [46] Evert D. D. Doring, *Corrosion Atlas*, N. York 1997.
- [47] *Welding Alcoa Aluminium, Aluminium company of America , Chicago* 1972.
- [48] [http://www.wpi.edu/Pubs/ETD/Available/etd-050806-132406/unrestricted/Legait .pdf](http://www.wpi.edu/Pubs/ETD/Available/etd-050806-132406/unrestricted/Legait.pdf)
- [49] *Europske preporuke za konstrukcije iz aluminijskih legura , IIW Colloquium , Porto*, 1981.
- [50] *Zavarene aluminijske konstrukcije, Zbornik referata, Šibenik*, 1990.
-

- [51] I.Juraga, M.Živčić, M.Gracin, *Reparaturno zavarivanje*, Zagreb, 1994.
- [52] *Zavarljivost aluminija i aluminijskih legura i zavarivanje aluminijskih konstrukcija*, Zbornik referata , Budva 1976.
- [53] [http://ftp.solidconcepts.com/content/pdfs/DMLS\\_Aluminum\\_ALSi10Mg\\_Material\\_Specifications.pdf](http://ftp.solidconcepts.com/content/pdfs/DMLS_Aluminum_ALSi10Mg_Material_Specifications.pdf)

## KRATKI ŽIVOTOPIS

---

Željko Tarandek rođen je 1974. godine u Zagrebu, gdje je završio srednju matematičko-informatičku školu. Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu upisao je 1992. godine. Tijekom studija sudjelovao je u istraživačkim projektima iz područja numeričkih analiza i simulacija, te je, akademske godine 1997/98. dobio Rektorovu nagradu za najbolji studentski rad "Numerička analiza i simulacija slobodnog sabijanja prstenastog uzorka". Diplomirao je nakon odsluženja vojnog roka, 2001. godine, na smjeru "Strojarske tehnologije".

Tijekom 2001. godine zapošljava se u Hrvatskom restauratorskom zavodu kao suradnik konzervatora-restauratora na projektu "APOXYOMENOS". Od 2006. godine, u sklopu tvrtke GINIS d.o.o. u Zagrebu, bavi se konzervatorsko - restauratorskom djelatnošću. Ovlašteni je konzervator - restaurator za područje konzervacije i restauracije metala - skulptura odnosno predmeta umjetničkog obrta. U sklopu konzervatorsko - restauratorske djelatnosti bavi se istraživanjem razvoja i primjene tehnologija proizvodnje i konzervacije predmeta od metala, drva i ostalih materijala korištenih prilikom izrade predmeta umjetničkog obrta.

Od 2007. godine zaposlen je u tvrtki KONČAR - Mjerni transformatori d.d. u odjelu tehnologije. Područje rada:

- razvoj primjene polimera prilikom proizvodnje mjernih transformatora;
- proizvodnja nanokristalinskih jezgara;
- analiza kompatibilnosti materijala ;
- inženjerstvo površina;
- antikorozivna zaštita;
- primjena i zaštita obojenih metala.

Govori engleski jezik, a služi se i njemačkim. Oženjen je i otac je dvije kćeri.

## SHORT BIOGRAPHY

---

Zeljko Tarandek was born in 1974 in Zagreb, where he completed his secondary education (a school of mathematics and computer science). He enrolled in the course of mechanical engineering at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb in 1992. During his studies he participated in research projects in the field of numerical analysis and simulations, and in the academic year 1997/98 won the Rector's award for the best student paper entitled "Numerical analysis and simulation of the free compression of ring samples". In 2001, he graduated in the field of "Mechanical Technology" after having done military service.

In 2001 he started working at the Croatian Conservation Institute as a conservator-restorer assistant for the project "APOXYOMENOS". In 2006, as a staff member of Ginis d.o.o. in Zagreb, he was involved in conservation/restoration activities. He is a certified conservator/restorer, specialized in the conservation and restoration of sculptures and artefacts made of metals. In this field of specialization, he explores the development and application of production technologies and the conservation of artefacts made of metal, wood and other materials.

Since 2007 he has been employed in the company KONCAR - Instrument Transformers Inc. in the Department of Technology. His main activities are:

- development and application of polymer technology in the instrument transformer production;
- production of nanocrystalline cores;
- analysis of the compatibility of materials;
- surface engineering;
- corrosion protection;
- use and protection of non-ferrous metals;

He has a fluent command of English, and a basic command of German. He is married and a father of two children.