

UNIVERZITET U BEOGRADU

MAŠINSKI FAKULTET

Zoran C. Petrović

**PROCENA VEKA I INTEGRITET VAZDUHOPLOVNIH
KONSTRUKCIJA OD ALUMINIJUMSKIH LEGURA
AA2024 I AA7075 U KOROZIONOM OKRUŽENJU**

doktorska disertacija

Beograd, 2022

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Zoran C. Petrović

**ASSESSMENT OF THE LIFE AND INTEGRITY OF
AIRCRAFT STRUCTURES MADE OF ALUMINUM
ALLOYS AA2024 AND AA7075 IN A CORROSION
ENVIRONMENT**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2022

Mentor doktorske disertacije

Dr Aleksandar Sedmak, profesor emeritus
Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu

Članovi komisije za odbranu doktorske disertacije

Dr Zoran Radaković, redovni profesor,
Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu

Dr Miloš Đukić, vanredni profesor,
Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu

Dr Aleksandar Grbović, redovni profesor,
Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu

Dr Zijah Burzić, naučni savetnik,
Vojnotehnički institut u Beogradu

Datum odbrane

PROCENA VEKA I INTEGRITET VAZDUHOPLOVNIH KONSTRUKCIJA OD ALUMINIJUMSKIH LEGURA 2024 I 7075 U KOROZIONOM OKRUŽENJU

Sažetak:

Opšte je poznato da su elementi strukture vazduhoplova, izrađeni od aluminijumskih legura povišene i visoke čvrstoće, u eksploataciji dominantno izloženi delovanju promenljivog opterećenja, u uslovima delovanja koroziono aktivne radne sredine, a problem se dodatno usložnjava mogućim i realno verovatnim prisustvom grešaka tipa prslina.

Na osnovu rezultata ispitivanja, analiziran je uticaj eksploatacionih uslova na stanje osnovnog materijala vazduhoplovne konstrukcije predviđene za rad u uslovima delovanja promenljivog opterećenja, a radi procene integriteta i preostalog veka konstrukcije.

Za potrebe istraživanja primenjene su numeričke i eksperimentalne metode, pri čemu je istražen uticaj delovanja promenljivog opterećenja na strukturne elemente vazduhoplova, izrađene od aluminijumskih legura povišene i visoke čvrstoće, 2024-T351 i 7075-T651, sa prisustvom grešaka tipa prslina, a u uslovima delovanja koroziono aktivne radne sredine.

Istraživanje uticaja korozije na rast prslina i lom struktura izrađenih od legura aluminijuma 2024-T351 i 7075-T651 provedeno je kroz četiri faze: (1) Ispitivanje uticaja korozije na mehanička svojstva legura aluminijuma 2024-T351 i 7075-T651 – Statička zatezna ispitivanja; (2) Ispitivanje uticaja korozije na parametre mehanike loma legura aluminijuma 2024-T351 i 7075-T651 – Dinamička zatezna ispitivanja; (3) Simulacija rasta zamorne prslina u leguri aluminijuma 2024-T351 – Procena broja ciklusa opterećenja do loma i poređenje sa rezultatima dobijenim eksperimentalnom analizom; (4) Procena broja ciklusa opterećenja do loma okvira trupa aviona, u zavisnosti od dužine inicijalne prslina, opsega napona i vremena izloženosti predmetne strukture dejstvu korozione sredine.

Ključne reči:

prslina, aluminijumska legura, korozija, mehanika, lom, opterećenje

Naučna oblast:

Mašinstvo

Uža naučna oblast:

Tehnologija materijala, Vazduhoplovstvo

UDK broj:

629.7.023:669.71.018]:620.194(043.3)

669.71.018:620.194]:539.42(043.3)

669.71.018:620.194]:004.942(043.3)

ASSESSMENT OF THE LIFE AND INTEGRITY OF AIRCRAFT STRUCTURES MADE OF ALUMINUM ALLOYS AA2024 AND AA7075 IN A CORROSION ENVIRONMENT

Abstract:

It is generally known that the elements of the aircraft structure, made of aluminum alloys of increased-strength and high-strength, are dominantly exposed to the action of variable load during operation, under the conditions of action of a corrosively active working environment, and the problem is further complicated by the possible and realistically probable presence of cracks.

Based on the test results, the impact of operational conditions on the state of the basic material of the aircraft structure intended for operation under variable load conditions was analyzed, in order to assess the integrity and remaining life of the structure.

Numerical and experimental methods were applied for the purposes of the research, where the influence of the action of variable load on the structural elements of the aircraft, made of aluminum alloys of elevated and high strength, 2024-T351 and 7075-T651, with the presence of cracks under the conditions of the corrosively active working environment was investigated.

The investigation of the effect of corrosion on crack growth and fracture of structures made of aluminum alloys 2024-T351 and 7075-T651 was carried out through four phases: (1) Testing the influence of corrosion on the mechanical properties of aluminum alloys 2024-T351 and 7075-T651 – Static tensile tests: (2) Testing the influence of corrosion on fracture mechanics parameters of aluminum alloys 2024-T351 and 7075-T651 – Dynamic tensile tests: (3) Simulation of fatigue crack growth in aluminium alloy 2024-T351 – Estimation of the number of load cycles to fracture and comparison with the results obtained by experimental analysis: (4) Assessment of the number of load cycles until the breakdown of the aircraft fuselage frame, depending on the length of the initial crack, the stress range and the time of exposure of the structure in question to the effect of the corrosive environment.

Keywords:

crack, aluminum alloy, corrosion, mechanics, fracture, load

Scientific field:

Mechanical Engineering

Narrow scientific field:

Materials Technology, Aviation

UDC number:

629.7.023:669.71.018]:620.194(043.3)

669.71.018:620.194]:539.42(043.3)

669.71.018:620.194]:004.942(043.3)

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. PREDMET ISTRAŽIVANJA	3
2.1. CILJEVI ISTRAŽIVANJA	3
2.2. FORMULISANJE POLAZNIH HIPOTEZA.....	3
2.3. METODE ISTRAŽIVANJA	4
3. MATERIJALI ZA IZRADU VISOKOODGOVORNIH ELEMENATA STRUKTURE VAZDUHOPLOVA, NAMENJENIH ZA RAD U USLOVIMA DELOVANJA PROMENJIVOG OPTEREĆENJA	6
3.1. PROIZVODNJA ALUMINIJUMA.....	8
3.2. LEGURE ALUMINIJUMA VISOKE ČVRSTOĆE.....	9
3.2.1. Mikrostruktura	10
3.2.2. Klasifikacija legura	13
3.2.3. Primena legura aluminijuma u vazduhoplovstvu.....	15
3.2.4. Obrada legura aluminijuma.....	17
3.2.5. Površinske mikrostrukture	18
3.2.6. Legure aluminijuma visoke čvrstoće serije AA2XXX i AA7XXX.....	20
4. UTICAJ KOROZIJNE SREDINE NA STRUKTURNE I MEHANIČKE OSOBINE ALUMINIJUMSKIH LEGURA	26
4.1. OPŠTE O KOROZIJI ALUMINIJUMA	26
4.2. VRSTE KOROZIJE ALUMINIJUMA I LEGURA ALUMINIJUMA	28
4.2.1. Ravnomerna (uniformna) korozija	28
4.2.2. Piting korozija.....	29
4.2.3. Interkristalna (međukristalna) korozija	30
4.2.4. Naponska korozija.....	30
4.3. METODE ISPITIVANJA I OCENE OTPORNOSTI PREMA KOROZIJI.....	32
4.3.1. Prirodna ispitivanja	32
4.3.2. Laboratorijska ispitivanja	32

4.3.3. Ispitivanja naponske korozije.....	34
4.4. REZULTATI RANIJIH ISPITIVANJA KOROZIONOG PONAŠANJA LEGURA ALUMINIJUMA U RAZLIČITIM KOROZIONIM SREDINAMA	35
5. PRIMENA MEHANIKE LOMA NA PROCENU INTEGRITETA VAZDUHOPLOVNE KONSTRUKCIJE	40
5.1. OPŠTE O MEHANICI LOMA.....	40
5.2. PRIMENA MEHANIKE LOMA NA VAZDUHOPLOVNIM KONSTRUKCIJAMA	42
5.2.1. Posledice loma kod vazduhoplovnih konstrukcija	42
5.3. TEORIJSKE OSNOVE LINEARNO ELASTIČNE MEHANIKE LOMA (LEML)	45
5.4. TEORIJSKE OSNOVE ELASTO-PLASTIČNE MEHANIKE LOMA.....	48
5.5. PRIMENA MEHANIKE LOMA NA PROCENU INTEGRITETA.....	50
5.5.1. Primena linearno elastične mehanike loma.....	50
5.5.2. Primena elasto-plastične mehanike loma.....	52
6. PRIMENA METODE KONAČNIH ELEMENATA (MKE) U MEHANICI LOMA ZA ANALIZU PRSLINE.....	54
6.1. UVOD.....	54
6.2. 3D PRORAČUNI PLASTIČNIH ZONA ISPRED VRHA PRSLINE METODOM KONAČNIH ELEMENATA	55
6.2.1. Numerički proračuni	55
6.2.2. Diskusija rezultata.....	58
6.2.3. Zaključak.....	60
7. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE UTICAJA KOROZIJE NA MEHANIČKA SVOJSTVA I PARAMETRE MEHANIKE LOMA LEGURA ALUMINIJUMA 2024-T351 I 7075-T651	61
7.1. UTICAJ KOROZIJE NA MEHANIČKA SVOJSTVA LEGURA ALUMINIJUMA 2024-T351 I 7075-T651	61
7.1.1. Stanica za ispitivanje.....	61
7.1.2. Uslovi i rezultati ispitivanja.....	62
7.1.3. Analiza rezultata ispitivanja.....	64
7.1.4. Zaključak.....	68
7.2. UTICAJ KOROZIJE NA PARAMETRE MEHANIKE LOMA LEGURA ALUMINIJUMA 2024-T351 I 7075-T651.....	68
7.2.1. Ispitni uzorci i stanica za ispitivanje.....	69
7.2.2. Rezultati ispitivanja.....	71
7.2.3. Određivanje koeficijena Parisove jednačine	78
8. PRORAČUN VEKA NOSEĆE KONSTRUKCIJE VAZDUHOPLOVA	81
8.1. NUMERIČKA SIMULACIJA RASTA ZAMORNE PRSLINE U UZORKU OD LEGURE ALUMINIJUMA 2024-T351.....	81
8.2. PROCENA VEKA STRUKTURNIH ELEMENATA VAZDUHOPLOVA.....	84
8.2.1. Procena veka okvira trupa lakog akrobatsko-trenažnog aviona	89

9. ZAKLJUČAK	93
9.1. Rezultati istraživanja.....	93
9.2. Naučni doprinos	94
LITERATURA.....	96
BIOGRAFIJA AUTORA.....	102
PRILOZI.....	103

SPISAK SLIKA I TABELA

SLIKE:

MATERIJALI ZA IZRADU VISOKOODGOVORNIH ELEMENATA STRUKTURE VAZDUHOPLOVA, NAMENJENIH ZA RAD U USLOVIMA DELOVANJA PROMENJIVOG OPTEREĆENJA

Slika 1. Osnovne karakteristike aluminijuma	6
Slika 2. Periodni sistem elemenata	7
Slika 3. Kristalna rešetka aluminijuma	7
Slika 4. Primena legura aluminijuma u strukturi vazduhoplova	8
Slika 5. Proizvodnja boksita (proizvodna linija u fabrici boksita Star Trace Pvt.Ltd u Indiji)	8
Slika 6. Proces proizvodnje aluminijuma	9
Slika 7. Prikaz opšteg postupka precipitacijskog očvršćivanja.....	11
Slika 8. Vrste precipitata	12
Slika 9. Precipitacija u prezasićenom čvrstom rastvoru AlCu uključuje nekoliko koraka uslovljenih porastom temperature	12
Slika 10. Transmisijska elektronska mikroskopija tamnog polja grubih čestica precipitate Al ₂ CuMg u AA2XXX (Al-Cu-Mg) leguri.....	12
Slika 11. Vazdušni brod Graf Zeppelin	15
Slika 12. Avon braće Rajt, Letač-1 (Flyer-1).....	15
Slika 13. Avion Junkers J4.....	16
Slika 14. Procentualni udeo Al i legura aluminijuma u strukturi aviona F/A-18	16
Slika 15. Primeri strukturnih elemenata vazduhoplova izrađeni od legura aluminijuma.....	17
Slika 16. Transmisijska elektronska mikrografija ultra-tanko sečene kriške uzorka.....	19
Slika 17. Transmisijska elektronska mikrografija ultra-tanko sečene kriške legure aluminijuma 6111	20
Slika 18. Analiza mas% za Cu, Mg, Mn, Si i Fe u deset različitih serija 2024-T3	21
Slika 19. Oslikavanje (a) povratno raspršenih i (b) sekundarnih elektrona IM čestice sa različitim kompozicionim domenima	22
Slika 20. Slika IM čestica u 2024-T3, sa kompozicionim domenima	24
Slika 21. Pozicija legura aluminijuma u odnosu na ostale materijale	25

UTICAJ KOROZIJNE SREDINE

NA STRUKTURNE I MEHANIČKE OSOBINE ALUMINIJUMSKIH LEGURA

Slika 22. Ostaci aviona Curtiss P-40 Kittyhawk pronađeni u Sahari	26
--	----

Slika 23. Formiranje zaštitnog filma na površini aluminijuma.....	27
Slika 24. Brzina korozije u odnosu na tvrdoću Al i legura aluminijuma	28
Slika 25. Mikrografska slika piting korozije čistog aluminijuma	29
Slika 26. Distribucija pitova u čistom aluminijumu u zavisnosti od vremena izlaganja	29
Slika 27. Interkristalna korozija žice od Al legure	30
Slika 28. Lom prouzrokovan interkristalnom korozijom	30
Slika 29. Interkristalna korozija Al legure 2024-T3.....	30
Slika 30. Prslina složenog oblika karakteristična za naponsku koroziju	31
Slika 31. Trodimenzionalna vizuelizacija simulacije prsline	31
Slika 32. Izgled i princip rada slane komore	33
Slika 33. Princip rada vlažne komore	33
Slika 34. Krive naprezanje/deformacija dobijene prilikom ispitivanja naponske korozije legure (režim A) metodom male brzine zatezanja, na vazduhu (a) i u rastvoru (b).....	37

PRIMENA MEHANIKE LOMA NA PROCENU INTEGRITETA VAZDUHOPLOVNE KONSTRUKCIJE

Slika 35. Trougao mehanike loma	41
Slika 36. Avion De Havilland Comet G-ALYP	43
Slika 37. Rekonstrukcija olupine aviona De Havilland Comet G-ALYP	43
Slika 38. Comet G-ALYU u ispitnom bazenu	43
Slika 39. Oštećenje trupa na ispitivanom modelu Comet G-ALYU.....	43
Slika 40. Deo trupa aviona De Havilland Comet G-ALYP	44
Slika 41. Simulacija havarije aviona Boeing 737 Aloha Airlines Flight 243.....	44
Slika 42. Grifitov problem.....	45
Slika 43. Oblici razvoja prsline i formiranja površina loma	45
Slika 44. Koordinatne ose oko vrha prsline.....	45
Slika 45. Ivična prslina u beskonačnoj zateznoj ploči	46
Slika 46. Žilavosti loma i udeo ravnog preloma u odnosu na debljinu uzorka	46
Slika 47. Izgled površine preloma pri prelaznom obliku loma	47
Slika 48. Plastične zone ispred vrha prsline.....	47
Slika 49. Naponsko stanje oko vrha prsline, elasto-plastično ponašanje materijala.....	47
Slika 50. Modeli otvaranja prsline.....	48
Slika 51. Definicije CTOD	48
Slika 52. Određivanje otvaranja vrha prsline $\delta_5=CTOD$	48
Slika 53. Geometrijske zavisnosti za određivanje CTOD pri ispitivanju uzorka na savijanje ...	48
Slika 54. Putanja integracije za J integral	49
Slika 55. Ramberg-Ozgodova relacija	49
Slika 56. Uticaj J integrala na procesnu zonu loma.....	49
Slika 57. Telo sa ivičnom prslinom	49
Slika 58. Tipične delimično prolazne prsline.....	51
Slika 59. Delimično prolazne prsline	51
Slika 60. Raspodela napona	52
Slika 61. Projektna CTOD kriva	52
Slika 62. Dijagram analize loma	52

Slika 63. Poređenje krivih sile rasta prsline i J-R krive.....	53
PRIMENA METODE KONAČNIH ELEMENATA (MKE) U MEHANICI LOMA ZA ANALIZU PRSLINE	
Slika 64. Kriterijumi i model „pseća kost” sa izvedenom minimalnom veličinom uzorka potrebnom za određivanje lomne žilavosti K_{Ic}	55
Slika 65. CT uzorak sa mrežom konačnih elemenata	56
Slika 66. Faktor intenziteta napona, K_I , duž fronta prsline kroz debljinu uzorka	56
Slika 67. Plastična zona ispred vrha prsline.....	57
Slika 68. Poređenje plastičnih zona ispred vrha prsline određenih linearno elastičnim i elasto plastičnim modelom	58
Slika 69. Šematski izgled izračunate plastične zone ispred vrha prsline duž fronta prsline čitavom debljinom uzorka	59
Slika 70. Uprošćeni prikaz plastične zone ispred vrha prsline duž fronta prsline za uzorke male i velike debljine	60
EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE UTICAJA KOROZIJE NA MEHANIČKA SVOJSTVA I PARAMETRE MEHANIKE LOMA LEGURA ALUMINIJUMA 2024-T351 I 7075-T651	
Slika 71. Ispitni uzorak fiksiran između steznih glava kidalice SCHENCK TREBEL Prüfmaschinen 4030 Ratingen RM100, sa ekstenzometrom.....	61
Slika 72. Izgled uzorka za ispitivanje zatezanjem.....	62
Slika 73. Dijagrami zatezanja uzoraka izrađenih iz ploče od legure aluminijuma 2024-T351 sečenih (a) poprečno na pravac valjanja ploče i (b) uzdužno sa pravcem valjanja ploče, za različite vremenske periode izlaganja kontrolisanoj vlagi	63
Slika 74. Dijagrami zatezanja uzoraka izrađenih iz ploče od legure aluminijuma 7075-T651 sečenih (a) poprečno na pravac valjanja ploče i (b) uzdužno sa pravcem valjanja ploče, za različite vremenske periode izlaganja kontrolisanoj vlagi	64
Slika 75. Promene čvrstoće i izduženja utvrđene na osnovu statičkih zateznih ispitivanja uzoraka izrađenih iz ploča od aluminijskih legura 7075-T651 (a) i 2024-T351 (b) isečenih uzdužno i poprečno u odnosu na pravac valjanja ploča, u zavisnosti od vremena izlaganja dejstvu vlage	65
Slika 76. Srednje vrednosti čvrstoće i izduženja utvrđene na osnovu statičkih zateznih ispitivanja uzoraka izrađenih od aluminijskih legura 7075-T651 (a) i 2024-T351 (b) isečenih poprečno na pravac valjanja ploča, u zavisnosti od vremena izlaganja dejstvu vlage	66
Slika 77. Srednje vrednosti čvrstoće i izduženja utvrđene na osnovu statičkih zateznih ispitivanja uzoraka izrađenih od aluminijskih legura 7075-T651 (a) i 2024-T351 (b) isečenih uzdužno sa pravcem valjanja ploča, u zavisnosti od vremena izlaganja dejstvu vlage	67
Slika 78. Izgled kompaktnog (CT) uzorka sa pravolinijskim zarezom.....	69
Slika 79. Servo-hidraulička kidalica SHIMADZU ServoPulser E-tipe.....	70
Slika 80. Ispitni uzorak fiksiran između steznih glava servo-hidrauličke kidalice	70
Slika 81. Instalacija ekstenzometra	70
Slika 82. Kriva rasta zamorne prsline, u funkciji broja ciklusa zamora, za uzorak od 2024-T351...	71
Slika 83. Krive rasta zamorne prsline, u funkciji broja ciklusa zamora, za uzorke od 2024-T351, sa vremenom izloženosti koroziji od 0, 7 i 30 dana.....	72
Slika 84. Krive rasta zamorne prsline, u funkciji broja ciklusa zamora, za uzorke od 7075-T651, sa vremenom izloženosti koroziji od 0, 7 i 30 dana.....	72

Slika 85. Radni vek zamorne prsline, u funkciji vremena prethodne izloženosti koroziji, za uzorke od 2024-T351 i 7075-T651, sa vremenom izloženosti koroziji od 0, 7 i 30 dana	73
Slika 86. Brzina rasta zamorne prsline u funkciji faktora intenziteta opterećenja [103]	73
Slika 87. Uticaj faktora intenziteta naprezanja na brzinu rasta prsline, $da/dN=f(\Delta K)$, za uzorke od (a) 2024-T351 i (b) 7075-T651, bez prethodne korozije	74
Slika 88. Krive brzine rasta prsline, $da/dN=f(\Delta K)$, za uzorke od 2024-T351, sa vremenom izloženosti koroziji od 0, 7 i 30 dana	75
Slika 89. Krive brzine rasta prsline, $da/dN=f(\Delta K)$, za uzorke od 7075-T651, sa vremenom izloženosti koroziji od 0, 7 i 30 dana	76
Slika 90. Krive brzine rasta prsline, $da/dN=f(\Delta K)$, za uzorke od 2024-T351 i 7075-T651, bez prethodne korozije	77
Slika 91. Krive brzine rasta prsline, $da/dN=f(\Delta K)$, za uzorke od 2024-T351 i 7075-T651, sa vremenom izloženosti koroziji od 7 dana	77
Slika 92. Krive brzine rasta prsline, $da/dN=f(\Delta K)$, za uzorke od 2024-T351 i 7075-T651, sa vremenom izloženosti koroziji od 30 dana.....	78

PRORAČUN VEKA NOSEĆE KONSTRUKCIJE VAZDUHOPLOVA

Slika 93. Granični uslovi.....	81
Slika 94. Naponsko stanje u uzorku na početku simulacije	82
Slika 95. Naponsko stanje u uzorku na kraju simulacije	82
Slika 96. Usporedni pregled rezultata dobijenih eksperimentalno i numeričkom simulacijom ..	83
Slika 97. Numerički model uzorka na kraju simulacije i eksperimentalni uzorak od legure aluminijuma 2024-T351 na kraju eksperimenta – nakon loma	84
Slika 98. Laki akrobatsko-trenažni avion.....	84
Slika 99. Blokovi opterećenja donje uške veze krilo–trup.....	85
Slika 100. Trup lakog akrobatsko-trenažnog aviona.....	86
Slika 101. Konstrukcija trupa lakog akrobatsko-trenažnog aviona.....	87
Slika 102. Ojačani okviri br. 2, 3 i 5 sa uškama za ugradnju krila.....	87
Slika 103. Veza krilo-trup, sa centroplovanom gredom okvira br. 3	88
Slika 104. Izgled centroplovanke grede okvira br. 3, sa uškama za vezu krilo–trup	88
Slika 105. Centroplovanaka greda okvira br. 3, pogled sa strane i odozgo.....	88
Slika 106. Dijagram zavisnosti broja ciklusa od dužine inicijalne prsline(a_0) i primenjenog opterećenja (σ), za strukturu bez prethodne korozije	89
Slika 107. Dijagram zavisnosti broja ciklusa od dužine inicijalne prsline (a_0) i primenjenog opterećenja (σ), za strukturu izloženu dejstvu korozije u trajanju od 7 dana	90
Slika 108. Dijagram zavisnosti broja ciklusa od dužine inicijalne prsline (a_0) i primenjenog opterećenja (σ), za strukturu izloženu dejstvu korozije u trajanju od 30 dana.....	90
Slika 109. Dijagram zavisnosti broja ciklusa od vremena izlaganja dejstvu korozione sredine ($T_{korozije}$) i primenjenog opterećenja (σ), za strukturu sa inicijalnom prslineom dužine 5 mm	91
Slika 110. Dijagram zavisnosti broja ciklusa od vremena izlaganja dejstvu korozione sredine ($T_{korozije}$) i primenjenog opterećenja (σ), za strukturu sa inicijalnom prslineom dužine 10 mm.....	92
Slika 111. Dijagram zavisnosti broja ciklusa od vremena izlaganja dejstvu korozione sredine ($T_{korozije}$) i primenjenog opterećenja (σ), za strukturu sa inicijalnom prslineom dužine 15 mm	92

TABELE:

Tabela 1. Označavanje legura aluminijuma.....	13
Tabela 2. Označavanje termičke obrade.....	14
Tabela 3. Karakteristike IM čestica u limu od Al legure 2024-T3.....	18
Tabela 4. Čestice u legurama aluminijuma 2024-T3 i 7075-T6	22
Tabela 5. Kompozicija IM čestica u 2024-T3 (Gao et al.)	23
Tabela 6. Kompozicija IM čestica u 2024-T3 (Buchheit et al.).....	23
Tabela 7. Kompozicija IM čestica u 2024-T3 (Boag et al.).....	23
Tabela 8. Hemijski sastav legure (maseni %).....	36
Tabela 9. Zatezna svojstva legure u različitim termičkim stanjima.....	36
Tabela 10. Rezultati ispitivanja naponske korozije metodom male brzine zatezanja na vazduhu standardnom brzinom zatezanja i u korozionoj sredini (rastvor 2%NaCl + 0,5%Na ₂ CrO ₄ , pH=3) zateznom brzinom $v=0,0125$ mm/min.....	37
Tabela 11. Rezultati ispitivanja naponske korozije metodom male brzine zatezanja, pri različitim brzinama zatezanja	38
Tabela 12. Rezultati ispitivanja naponske korozije metodom mehanike loma u rastvoru 3,5% NaCl, pH=7	38
Tabela 13. Hemijski sastav legura aluminijuma 2024-T351 i 7075-T651.....	62
Tabela 14. Prosečne vrednosti mehaničkih svojstava legure aluminijuma 2024-T351 utvrđenih na osnovu statičkih zateznih ispitivanja uzoraka	65
Tabela 15. Prosečne vrednosti mehaničkih svojstava legure aluminijuma 7075-T651 utvrđenih na osnovu statičkih zateznih ispitivanja uzoraka	65
Tabela 16. Hemijski sastav legura aluminijuma 2024-T351 i 7075-T651.....	69
Tabela 17. Vrednosti Parisovih koeficijenata za uzorke od legure aluminijuma 2024-T351. (A) uzorci bez prethodne korozije, (B) uzorci izloženi dejstvu korozije 7 dana i (C) uzorci izloženi dejstvu korozije 30 dana	79
Tabela 18. Vrednosti Parisovih koeficijenata za uzorke od legure aluminijuma 7075-T651. (A) uzorci bez prethodne korozije, (B) uzorci izloženi dejstvu korozije 7 dana i (C) uzorci izloženi dejstvu korozije 30 dana	80
Tabela 19. Vrednosti pritiska korišćeni u simulaciji	83
Tabela 20. Vrednosti opterećenja donje uške veze krilo–trup.....	86
Tabela 21. Broj ciklusa (N) u zavisnosti od dužine inicijalne prsline (a_0) i opsega napona ($\Delta\sigma$), za strukturu bez prethodne korozije	89
Tabela 22. Broj ciklusa (N) u zavisnosti od dužine inicijalne prsline (a_0) i opsega napona ($\Delta\sigma$), za strukturu izloženu uticaju korozione sredine u trajanju od 7 dana.....	89
Tabela 23. Broj ciklusa (N) u zavisnosti od dužine inicijalne prsline (a_0) i opsega napona ($\Delta\sigma$), za strukturu izloženu uticaju korozione sredine u trajanju od 7 dana.....	90
Tabela 24. Broj ciklusa (N) u zavisnosti od vremena izlaganja dejstvu korozione sredine ($T_{korozije}$) i primenjenog opterećenja (σ), za strukturu sa inicijalnom prslinom dužine 5 mm.....	91
Tabela 25. Broj ciklusa (N) u zavisnosti od vremena izlaganja dejstvu korozione sredine ($T_{korozije}$) i primenjenog opterećenja (σ), za strukturu sa inicijalnom prslinom dužine 10 mm ...	91
Tabela 26. Broj ciklusa (N) u zavisnosti od vremena izlaganja dejstvu korozione sredine ($T_{korozije}$) i primenjenog opterećenja (σ), za strukturu sa inicijalnom prslinom dužine 15 mm ...	92

1. UVOD

Opšte je poznato da su elementi strukture vazduhoplova, izrađeni od aluminijumskih legura povišene i visoke čvrstoće, u eksploataciji dominantno izloženi delovanju promenljivog opterećenja, u uslovima delovanja koroziono aktivne radne sredine, a problem se dodatno usložnjava mogućim i realno verovatnim prisustvom grešaka tipa prslina. U slučaju nastanka oštećenja neophodno je proceniti integritet konstrukcije i odlučiti o njenoj daljoj upotrebi. U skladu sa navedenim, proceni integriteta i produženju radnog veka, kao i revitalizaciji pojedinih elemenata strukture, a sve u cilju zadržavanja istih u eksploataciji, umnogome je porastao značaj. U ovom slučaju, revitalizacija podrazumeva obezbeđenje celokupnog iskorišćenja radnog veka, sanacijom ili parcijalnom zamenom komponenata sa drugim modernije projektovanim.

Kao polazni podatak o uticaju radne sredine na primenljivost konstrukcijskih materijala služe karakteristike, koje se dobijaju zateznim ispitivanjem (napon tečenja, zatezna čvrstoća, izduženje pri lomu), a one su i osnova za konstrukciju delova. Ove karakteristike opisuju globalno mehaničko ponašanje materijala, koje se dobija ispitivanjem glatkih uzoraka. Dopunski podaci o ponašanju materijala se dobijaju udarnim ispitivanjem. Ona predstavljaju lokalno ponašanje materijala, uslovljeno postojanjem koncentracije napona u vidu zareza. Kod udarnih ispitivanja mogućnost razdvajanja ukupne energije udara na energiju stvaranja i energiju širenja prslina (loma) uvela je novi pristup u proceni ponašanja materijala.

Za eksploatacijsku sigurnost konstrukcije, zbog pojave plastične deformacije na lokalnom nivou, najznačajnije su mikromehaničke osobine, koje objašnjavaju nastanak i rast prslina pod dejstvom promenljivog opterećenja u uslovima delovanja koroziono aktivne radne sredine. Naime, delovanje koroziono aktivne radne sredine dovodi do strukturnih oštećenja osnovnog materijala strukture, što dodatno dovodi do pojave koncentracije napona, i do inicijacije greške tipa prslina. Zamor je rezultat postupne destrukcije materijala mašinskog dela pod dejstvom promenljivog opterećenja. Formiranje i rast mikropora je prva faza razaranja, čiji se vrhunac ogleda u spajanju mikropora i obrazovanju prslina. Ovaj proces, poznat kao period inicijacije greške tipa prslina, gde se prslina obrazuju pri broju ciklusa $N < 10^4$ (10^5) rezultat je niskocikličnog zamora.

Pojavu prslina usled zamora pod dejstvom koncentracije napona na konstruktivnim prelazima i promenama poprečnih preseka, kao i oštećenjima izazvanim korozionim dejstvom, trenutno je nemoguće objasniti nekakvim uprošćenim interakcijama opterećenja, osobina materijala, efekta radne sredine i poprečnog preseka, te se primenjuju empirijski izvedene zavisnosti, diktirane eksperimentalnim i laboratorijskim testiranjima.

Danas postoje dve opšte prihvaćene metode za određivanje zamornog veka elemenata strukture vazduhoplova. Tradicionalni, S-N pristup, korišćen već dugi niz godina, zasnovan na eksperimentalnom određivanju zavisnosti amplitude napona od broja ciklusa do loma. Opšte prihvaćena karakteristika u tom slučaju je zamorna čvrstoća, koja određuje nivo napona pri kome ne dolazi do pojave prslina. U skladu sa navedenim, dizajniranje konstrukcijskih sklopova na bazi

potencijalnog zamora materijala utemeljeno je na zamornoj čvrstoći i empirijskim preporukama, izvedenim iz analize otkaza delova u eksploataciji i obimnih ispitivanja. Pojava zamorne prsline uslovljava da se dalje ponašanje materijala u zoni vrha prsline razmatra na temelju mikromehaničkog stanovišta, umesto globalnog, koje je primenljivo na glatke i homogene konstrukcijske oblike delova.

Drugi, noviji i složeniji metod je upotreba parametara mehanike loma, zasnovana na različitim modelima zamornog rasta prsline i delovanja impulsnog opterećenja na materijal koji u sebi sadrži grešku tipa prsline. Glavne prednosti ovog pristupa su: (1) korišćenje vrlo malih uzoraka i (2) mogućnost određivanja preostalog veka delimično polomljenih komada ili oštećene konstrukcije.

Prvi model, zasnovan na linearno elastičnoj mehanici loma (LEML), potiče od Parisovog rada iz 1962. godine, i još uvek je u širokoj primeni. Zakon Parisa, koji definiše ovisnost opsega primenjenog opterećenja i odgovarajućeg opsega faktora intenziteta napona, i rasta prsline, suštinski objašnjava mikromehaničko stanje rastuće prsline, i kao takav je opšte usvojen. Međutim, veliki broj uticajnih faktora mikromehaničkog aspekta čini zakon Parisa nedovoljno detaljnim, što je dovelo do razvoja velikog broja zavisnosti, uglavnom iskustvenim proširenjem Pariseve jednačine. Ovo ukazuje na to da mikromehaničko stanovište ponašanja materijala, odnosno inicijacija i rast prsline, još uvek nisu potpuno proučeni. Tome u prilog govori i mikromehanička karakteristika materijala, nazvana „prag zamora“, čijom se veličinom opisuje nivo opsega faktora intenziteta napona, pri kome nema širenja postojeće prsline. Ova karakteristika ukazuje na područje u kome zakon Parisa ne važi, već se tada moraju tražiti drugačije zavisnosti u okviru mikromehaničkog aspekta, s obzirom da singularitet na vrhu prsline već postoji.

Odavde proizilazi da postoje dve karakteristike koje opisuju stanje pri kome nema rasta prsline: jedna je zamorna čvrstoća, u slučaju glatkih konstrukcijskih oblika, a druga je prag zamora, za konstrukcijske oblike sa prslinom.

Drugi model spada u kategoriju elastoplastične mehanike loma (EPML) gde se suština ispitivanja materijala zasniva na određivanju energije udara. Ta metoda je u današnjoj primeni dobila nove prilaze, poglede i razmišljanja. Pri određivanju energije udara, kao novi prilaz se pojavljuje instrumentiranje, a novi pogledi i razmišljanja pripadaju mehanici loma, odnosno delovanju impulsnog (udarnog) opterećenja na materijal koji u sebi sadrži grešku tipa prsline.

Zadatak mehanike loma, u oba slučaja, je obezbeđivanje zadovoljavajućih podataka o opterećenosti elemenata strukture vazduhoplova, a s tim u vezi i sigurnost prema eventualnim mehaničkim otkazima. To se sve posmatra uzimajući u obzir lokalno prisustvo prsline, koja značajno smanjuje opterećenost konstrukcije.

2. PREDMET ISTRAŽIVANJA

Sakupljena znanja o rastu zamorne prsline doprinela su da se, sa zadovoljavajućom sigurnošću, odredi preostali vek elementa strukture vazduhoplova sa prslinom i tako proceni funkcionalnost komponente do naredne kontrole. Shodno navedenom, čak i najodgovornije komponente se ne menjaju dok se rokovskim kontrolama ne otkriju prsline ili slični nedostaci.

S obzirom na trenutne trendove revitalizacije elemenata konstrukcije vazduhoplova, ova istraživanja naročito postaju značajna, o čemu danas piše više eminentnih naučnih radnika iz Evrope i sveta. Zbog toga se, u novije vreme, velika pažnja poklanja ispitivanjima materijala namenjenih za rad u uslovima delovanja promenljivog opterećenja i ispitivanju samih elemenata strukture, a sve u cilju procene integriteta i preostalog veka.

Predmet doktorske disertacije je analiza uticaja greške tipa prsline na otpornost na koroziju i lom legura aluminijuma iz serije AA2000 (dural) i AA7000 (konstruktal) za vazduhoplovstvo. Ove vrste materijala su prevashodno namenjene za statički i dinamički opterećene elemente strukture vazduhoplova. Na bazi rezultata ispitivanja, analiziraće se uticaj eksploatacionih uslova na stanje osnovnog materijala vazduhoplovne konstrukcije predviđene za rad u uslovima delovanja promenljivog opterećenja, a radi procene integriteta i preostalog veka konstrukcije, odnosno revitalizacije i produženja radnog veka.

2.1. CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Opšti naučni cilj istraživanja disertacije je da se na temelju mehaničko eksploatacionih ispitivanja u uslovima delovanja korozione sredine izvrši izbor kriterijuma prihvatljivosti grešaka u osnovnom materijalu elemenata strukture vazduhoplova, što predstavlja osnovni uslov za pouzdanu procenu integriteta i preostalog veka elemenata strukture vazduhoplova izrađenih od legura aluminijuma povišene i visoke čvrstoće u toku eksploatacije.

Društveni cilj istraživanja je da se na osnovu prikupljenih rezultata ispitivanja analizira efekat eksploatacionih uslova na stanje osnovnog materijala pri delovanju promenljivog opterećenja, i da praktičan doprinos poboljšanju kvaliteta izrade i površinske zaštite elemenata strukture vazduhoplova, a u smislu rekonstrukcije i produženja veka ključnih komponenti vazduhoplova proizvedenih od legura aluminijuma povišene i visoke čvrstoće.

2.2. FORMULISANJE POLAZNIH HIPOTEZA

Za savremene vazduhoplovne konstrukcije postavljaju se sve strožiji zahtevi u pogledu nivoa sigurnosti u eksploataciji i otpornosti prema lomu, naročito kod legura aluminijuma iz serije AA2000 i AA7000. Promene opterećenja u toku eksploatacije strukturnih elemenata vazduhoplova, koje mogu da prouzrokuju havariju, uslovile su intenzivan rad na definisanju sigurnih kriterijuma za procenu ponašanja osnovnog materijala. Za razvoj novih, ali i za

bezbednu eksploataciju postojećih legura aluminijuma povišene i visoke čvrstoće, neophodno je znati njihovo ponašanje u zoni koncentracije napona, čiji nastanak je rezultat delovanja korozivne sredine, kao i u prisustvu greške tipa prsline.

Osnovna polazna hipoteza je da kod strukturnih elemenata vazduhoplova izloženih promenljivom opterećenju, eksploatacioni problemi, uglavnom, nastaju u zonama koncentracije napona, a prevashodno na mestima gde je usled delovanja korozivne sredine došlo do strukturne destrukcije osnovnog materijala. Analizu problema otežava heterogenost strukturnih i mehaničkih osobina zona pod uticajem korozivne sredine i zona osnovnog materijala gde nije došlo do delovanja korozije.

Dugogodišnji eksploatacioni period komponenti, nameće pronalaženje odgovora na dva suštinska pitanja:

1. Kakvo je stanje osnovnog materijala, i strukture vazduhoplova posle dugogodišnje upotrebe?
2. Da li je moguće na temelju obimnih eksperimentalnih proučavanja definisati postupak za ocenu integriteta i preostalog veka upotrebe strukturnih elemenata vazduhoplova u uslovima delovanja promenljivog opterećenja?

Da bi se do došlo rešenja postavljaju se sledeće hipoteze:

- Moguće je postaviti metodološke osnove za izradu i ocenu integriteta osnovnog materijala strukturnih elemenata vazduhoplova. Dobijeni rezultati istraživanja u okviru ovog rada, prvenstveno eksperimentalni, mogu se praktično primeniti i postati osnova za izradu i eksploataciju legura aluminijuma od kojih se prevashodno izrađuju visokoodgovorni elementi strukture vazduhoplova namenjeni za eksploataciju u uslovima delovanja promenljivog opterećenja.
- Da bi se obezbedila sigurnost materijala namenjenih za izradu visokoodgovornih elemenata strukture vazduhoplova, neophodno je razjasniti njihovo ponašanje pri delovanju niskocikličnog zamora i u prisustvu greške tipa prsline (da/dN – brzina rasta zamorne prsline i prag zamora), kao i ponašanje pri delovanju udarnog (impulsnog) opterećenja na delove koji u sebi sadrže koncentraciju napona tipa zarez.
- Problem delovanja promenljivog i impulsnog opterećenja u prisustvu greške tipa prsline razmatrati sa teorijskog i eksperimentalnog stanovišta, imajući u vidu veliki broj istovremeno delujućih faktora. Poznavanje ovih karakteristika materijala treba da, kao konačno rešenje, da veću sigurnost od pojave loma, kao i manju masu ugrađenog materijala u konstrukciju.
- Parametri mehanike loma, poput kritičnog faktora intenziteta napona i rasta zamorne prsline, mogu da se primene na analizu ponašanja legura aluminijuma od kojih se izrađuju visokoodgovorni strukturni elementi vazduhoplova izloženi eksploatacionim uslovima.
- Poznavanje statičkih i dinamičkih parametara mehanike loma, odnosno mogućnosti primene parametara prsline u oceni integriteta konstrukcije, u konačnoj varijanti treba da omogući definisanje optimalnih parametara kao što je npr. izbor odgovarajućeg materijala za izradu novih elemenata konstrukcija.

2.3. METODE ISTRAŽIVANJA

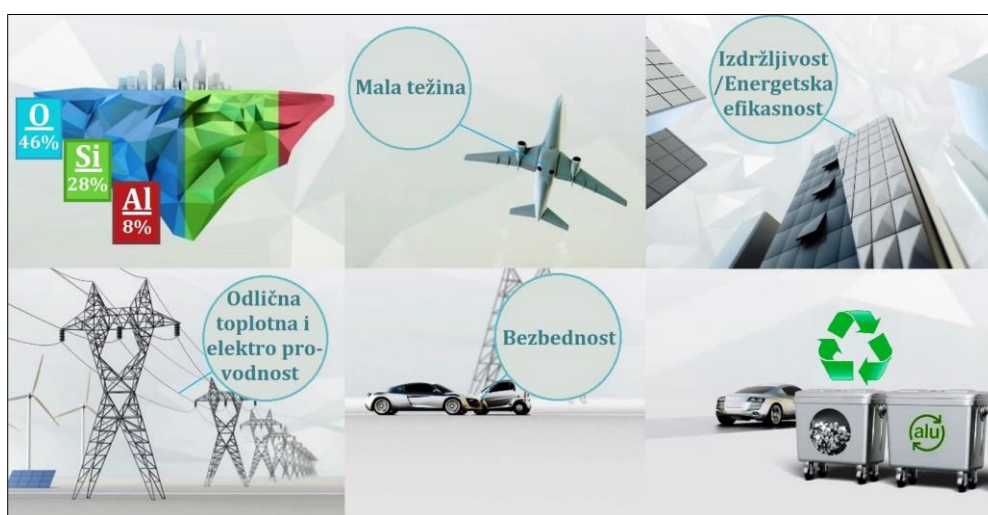
Osnovne metode koje će u toku istraživanja biti primenjene su teorijske, numeričke i eksperimentalne, pri čemu je predviđeno da se istraži uticaj delovanja promenljivog opterećenja na strukturne elemente vazduhoplova, izrađene od aluminijumskih legura povišene i visoke čvrstoće, sa verovatnim prisustvom grešaka tipa prsline, a u uslovima delovanja korozivno aktivne radne sredine. Definisanjem kritičnih mesta na strukturi vazduhoplova u eksploataciji

primenom numeričkih metoda, i urađenim ispitivanjima na istim, a koristeći rezultate mehaničko eksploatacijskih i strukturnih ispitivanja, definisaće se metodologija procene.

Polazna osnova za ove metode istraživanja će biti već postojeći postupci za procenu integriteta i preostalog veka konstrukcije, koji će biti dopunjeni eksploatacionim ispitivanjima, a za potrebe revitalizacije i produženja radnog veka ključnih komponenti vazduhoplovnih konstrukcija proizvedenih od legura aluminijuma.

3. MATERIJALI ZA IZRADU VISOKOODGOVORNIH ELEMENATA STRUKTURE VAZDUHOPLOVA, NAMENJENIH ZA RAD U USLOVIMA DELOVANJA PROMENJIVOG OPTEREĆENJA

Aluminijum (Al) je drugi najčešće korišćeni metal u savremenoj tehnici. Koristi se u elektrotehnici, prehrambenoj, hemijskoj i metaloprerađivačkoj industriji kao čist metal, ali mu je neuporedivo kompleksnija upotreba u obliku raznovrsnih višekomponentnih legura koje se svestrano koriste u mašinskoj i vazduhoplovnoj industriji.

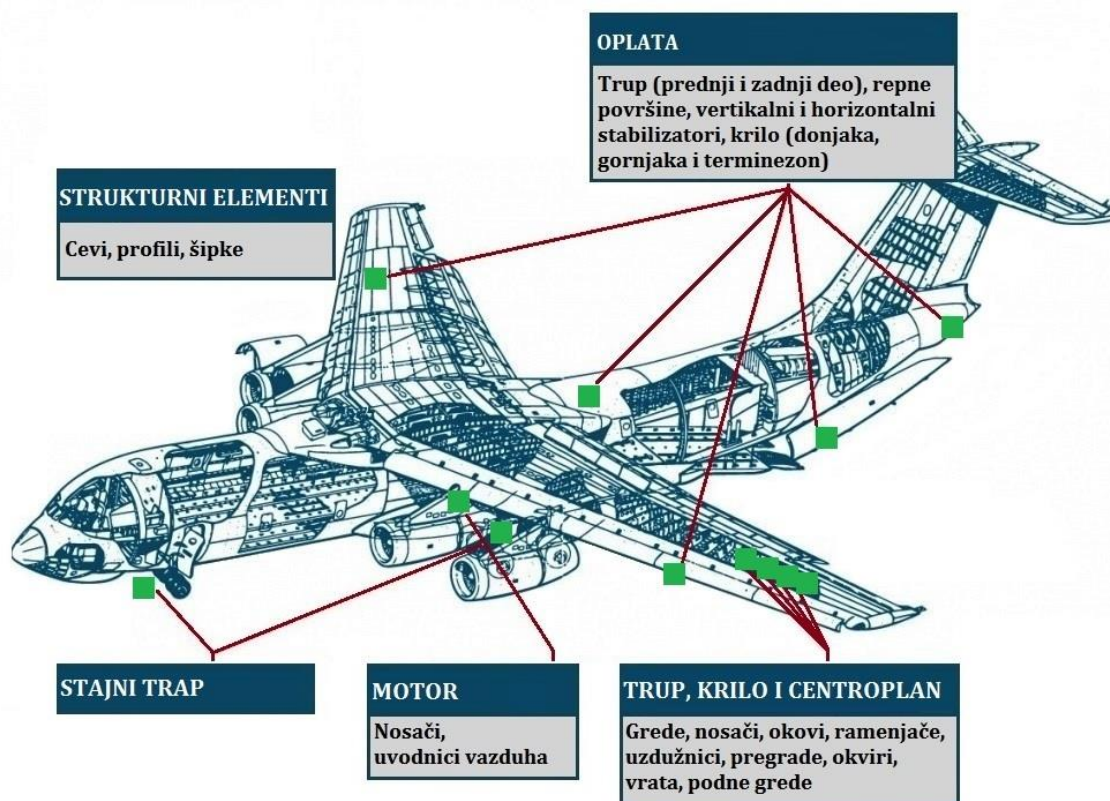


Slika 1. Osnovne karakteristike aluminijuma [1]

Aluminijum je hemijski element IIIA grupe Periodnog sistema elemenata (slika 2), atomskog broja 13 i atomske mase 27. Čist aluminijum je gustine $2,7 \text{ g/cm}^3$ i, prema tome, za istu zapreminu, skoro tri puta je lakši od gvožđa. Kristališe po površinski centriranoj kubnoj rešetki (slika 3). Karakteriše ga velika električna provodljivost od 57% električne provodljivosti bakra (Cu), čija se provodljivost u tehnici koristi kao etalonska. Čist aluminijum se topi na temperaturi od 660°C . Mehaničke karakteristike aluminijuma su relativno niske: zavisno od stanja prerade, R_m se kreće u opsegu $90\div 180 \text{ MPa}$, tvrdoća je $20\div 40 \text{ HB}$, dok je plastičnost značajno visoka, što pruža mogućnost valjanja aluminijuma do veoma malih debljina (npr. folija). Rezanjem se veoma teško obrađuje. Uzimajući u obzir da se tokom vremena, u atmosferskim uslovima, na površini obrazuje sloj oksida aluminijuma Al_2O_3 , aluminijum poseduje dobru korozionu otpornost.

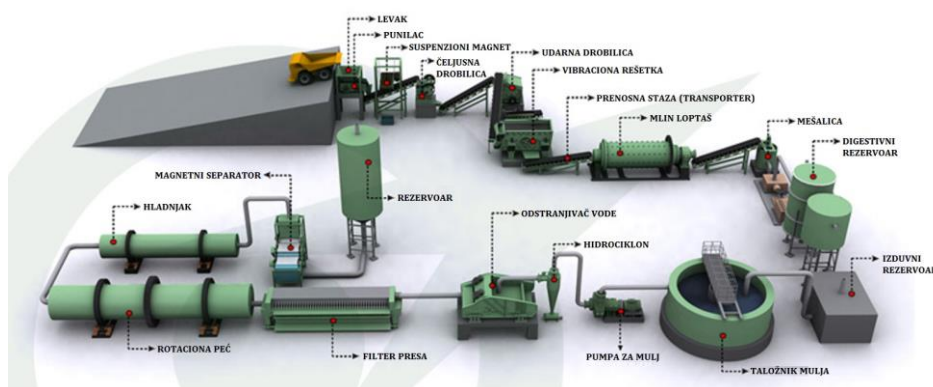
Aluminijumske legure su našle svestranu primenu u vazduhoplovnoj industriji, posebno u proizvodnji transportnih i putničkih aviona. Za potrebe unapređenja karakteristika, koriste se legure koje se dobijaju legiranjem čistog aluminijuma sa sledećim elementima: bakrom (Cu), cinkom (Zn), magnezijumom (Mg), silicijumom (Si), manganom (Mn) i litijumom (Li).

15%. U grupu novije patentiranih legura aluminijuma svrstavaju se tzv. „powder metallurgy“ legure 7090 i 7091, koje se odlikuju vrlo brzim očvršćivanjem. Prilikom dizajniranja sa stanovišta „fail safe“, odabir materijala, pored zatezne čvrstoće, zavisi i od kompetencije materijala da se suprotstavi sitnijim oštećenjima, kao što je korozija, a koja mogu narušiti sigurnost letelice.



Slika 4. Primena legura aluminijuma u strukturi vazduhoplova [3]

3.1. PROIZVODNJA ALUMINIJUMA



Slika 5. Proizvodnja boksita (proizvodna linija u fabrici boksita Star Trace Pvt.Ltd u Indiji) [4]

U protekloj deceniji proizvodnja boksita porasla je za 50% i, sa preko 200 miliona tona, jedna je od najboljih proizvodnih decenija svih vremena, na čelu sa Australijom kao najvećim proizvođačem, zatim Kinom i Brazilom. Dobijanje aluminijuma iz boksita, u kome je aluminijum u obliku hidroksida, energetski je veoma zahtevno. Četiri tone boksita potrebne su za proizvodnju dve tone glinice, iz koje se dalje proizvede jedna tona aluminijuma [5].

Recikliranje aluminijuma je lako, bez škodljivog uticaja na životnu sredinu, sa zanemarljivim utroškom energije, oko 5%, u odnosu na ukupnu energiju potrošenu pri proizvodnji aluminijuma. Za razliku od većine drugih materijala, aluminijum se može reciklirati bez negativnih uticaja na osobine materijala, odnosno reciklirani aluminijum se ne razlikuje od prvobitnog. Činjenica da se reciklažom ne menjaju osobine aluminijuma ukazuje na to da novi proizvodi mogu biti napravljeni od 100% recikliranog aluminijuma, što omogućava formiranje praktično izolovanog proizvodnog procesa u kojem se iskorišćeni proizvodi neprekidno recikliraju u nove.



Slika 6. Proces proizvodnje aluminijuma [1]

3.2. LEGURE ALUMINIJUMA VISOKE ČVRSTOĆE

Legure aluminijuma imaju veoma heterogene mikrostrukture u poređenju sa mnogim drugim legurama metala. Ova heterogenost potiče od legirajućih dodataka i nečistoća, čijom kombinacijom se postiže željena mikrostruktura, i velikih čestica, takozvanih konstitutivnih čestica (čestice zaostalih nečistoća) koje imaju čitav niz sastava. U nauci o koroziji, ove poslednje čestice se obično nazivaju intermetalnim (IM) česticama. Heterogena priroda legura aluminijuma je najočiglednija kod legura visoke čvrstoće iz serija AA2XXX, AA6XXX, AA7XXX i AA8XXX, a naročito kod legura serije AA2XXX gde je prisustvo legirajućih dodataka neophodno radi dobijanja visoke čvrstoće [5].

Već duži niz godina, proučavanje korozije u ovim legurama je bilo, a u mnogim slučajevima je još uvek, fenomenološko. Dakle, literatura o ovoj temi uglavnom obuhvata studije o malom broju IM čestica pod različitim uslovima, koje su kontradiktorne kada je u pitanju formiranje opšteg modela korozije u visoko heterogenim legurama aluminijuma. Ovo je posebno tačno za legure serije AA2XXX, kod kojih nedostatak sistema za jednoznačnu kategorizaciju sastavnih (kompozicijskih) varijacija IM čestica otežava povezivanje ovih čestica sa dobro poznatim kompozicijama, kristalografijom i elektrohemijom. Teškoće u osmišljavanju takvog sistema ne treba potcenjivati, budući da se intermetalne čestice formiraju u raznim fazama proizvodnje, dok pojedinačne čestice imaju kompozicijski različite faze domena i njihova raspodela, uključujući međusobni prostorni odnos jedne prema drugoj, često diktira način obrade. Ipak, u poslednjih nekoliko godina došlo je do značajnijeg napretka u razumevanju mikrostrukture nekih legura aluminijuma visoke čvrstoće i njenog uticaja na koroziju. Ovi iskoraci utemeljeni su na široj dostupnosti niza novijih elektrohemijskih i fizičko-hemijskih tehnika karakterizacije. Upotreba naprednih elektrohemijskih tehnika dovela je do

većeg razumevanja svojstava samih intermetalnih čestica i njihove uloge u koroziji legura. Fizičko-hemijske studije dovele su do bolje karakterizacije kompozicija intermetalnih čestica i, što je još važnije, njihove prostorne raspodele. Konvergencija elektrohemijjskih i fizičko-hemijskih pristupa, u kombinaciji sa modeliranjem, vodi do statičke osnove za razumevanje uticaja IM čestica na koroziju legura aluminijuma [5]. Ovo poglavlje, prema tome, ima za cilj sumiranje trenutnih razumevanja mikrostrukture legura aluminijuma visoke čvrstoće, naročito mikrostrukturno kompleksnih legura kao što su legure serija AA2XXX i AA7XXX. Zatim, biće razmotreno kako različite komponente mikrostrukture doprinose procesu korozije.

3.2.1. Mikrostruktura

Opšte o legurama aluminijuma

Dok je mikrostruktura nekih specifičnih legura relativno dobro poznata, mikrostruktura legura aluminijuma visoke čvrstoće, posebno starijih legura AA2XXX, nije dobro shvaćena i opisana u naučnoj literaturi, posebno u literaturi o koroziji. To je delimično zbog uslova proizvodnje koji ne sagledavaju ulogu mikrostrukture, i delimično zbog kvazi ili neravnotežne mikrostrukture koja postoji u realnim legurama zbog poteškoća u dobijanju pune termičke ravnoteže. Na primer, uobičajene legure aluminijuma visoke čvrstoće koje se koriste u vazduhoplovnoj industriji su 2024-T3, 7075-T6, itd.

Ovaj deo, dakle, daje opšti pregled međusobnog odnosa između obrade i mikrostrukture. Obrada može značajno izmeniti mikrostrukturu, rezultirajući s mikrostrukturnim gradijentima i zonama sa različitim karakteristikama. Dobar primer ovih promena može se naći kod proizvoda od kovanog lima. Kao prvo, postoje gradijent veličine zrna i konstitutivna veličina čestice. Kao drugo, smicajna deformacija, kao rezultat valjanja, stvara površinski sloj poznat kao „bliži deformisani površinski sloj“ (eng. *Near Surface Deformed Layer – NSDL*) sa veoma finom mikrostrukturom [5].

Fizička metalurgija legura aluminijuma

Funkcionalna svojstva legura aluminijuma (mehanička, fizička i hemijska) zavise od sastava i mikrostrukture legure, odnosno od uslova livenja i vrste termo-mehaničke obrade. Samo mali broj metala se odlikuje dovoljnom rastvorljivošću koja im omogućava da služe kao glavni legirajući element [6]. Magnezijum (Mg), cink (Zn), bakar (Cu) i silicijum (Si) su elementi koji se odlikuju značajnom rastvorljivošću, dok se pojedini elementi, sa <1% rastvorljivosti, poput mangana (Mn), hroma (Cr), cirkonijuma (Zr), titanijuma (Ti) i, ređe, zbog cene, skandijuma (Sc), takođe koriste za poboljšanje osobina legure [7,8].

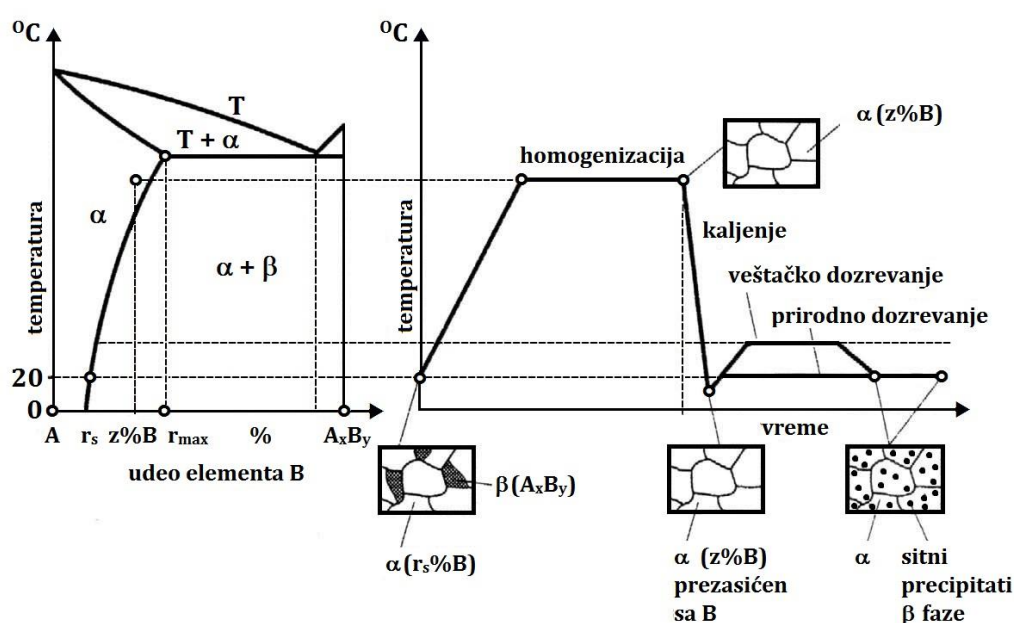
Niska čvrstoća čistog aluminijuma nalaže legiranje. Najjednostavnija tehnika očvršćivanja je kaljenje, pri čemu legirajući dodaci imaju prilično solidnu rastvorljivost u širokom rasponu temperatura i ostaju u rastvoru posle više termičkih ciklusa.

Najznačajnije povećanje čvrstoće legure aluminijuma izvodi se postupkom očvršćivanja starenjem (poznato kao „precipitacijsko očvršćivanje“), koje može da rezultira čvrstoćom od čak 800 MPa. Precipitacijsko očvršćivanje (starenje materijala, dozrevanje) je termička obrada metala u kojoj se u osnovnoj strukturi metala izdvajaju disperzione faze. Legiranje povećava čvrstoću materijala. Najveće povećanje proizilazi iz prezasićene krute faze osnovne strukture. Ova pojava je zabeležena prvi put 1906. godine, a uočio ju je nemački naučnik Alfred Vilm (A. Wilm). Primetio je da, prilikom kaljenja u vodi s temperature od oko 500°C, legura Al-Cu (nazvana „dural“) očvrstne stajanjem na okolnoj temperaturi, s tim da najviša čvrstoća biva dostignuta za šest-sedam dana. Karakteristično je da sa temperaturom opada rastvorljivost legirajućih elementa.

Očvršćivanje starenjem (precipitacijsko očvršćivanje) može se sažeti kroz sledeće faze (slika 7):

- 1) zagrevanje legure do temperature rastopnog žarenja i držanje do potpunog otapanja legirajućih elemenata
- 2) kaljenje legure radi dobijanja prezasićenog čvrstog rastvora
- 3) razlaganje prezasićenog čvrstog rastvora na sobnoj ili blago povišenoj temperaturi da bi se formirao fini disperzivni precipitat.

Prirodno starenje je postupak povećanja čvrstoće posle kaljenja, izlaganjem legure na temperaturi okoline. U cilju ostvarenja veće čvrstoće, postupak se može ubrzati, pod uslovom da se kaljena legura zagreje do temperature od 180°C (veštačko „dozrevanje“). Formiranjem koherentnih precipitata u rešetki osnovnog kristala legure postiže se povećanje čvrstoće i tvrdoće. Ovaj proces se pretežno primenjuje kod legura aluminijuma sa bakrom (Cu) [5].



Slika 7. Prikaz opšteg postupka precipitacijskog očvršćivanja [9]

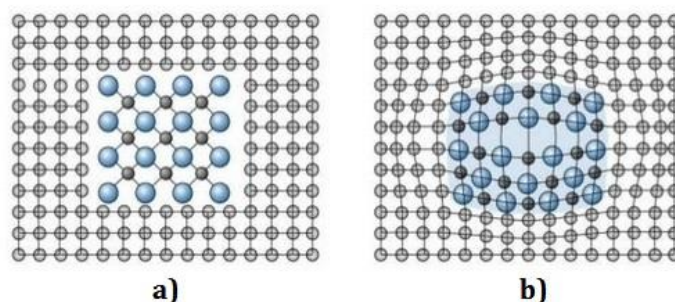
Kod gnječanih legura aluminijuma sa bakrom (Cu), zagrevanje preko 160°C moglo bi prouzrokovati rast čestica precipitiranog nekoherentnog Al_2Cu do veličina uočljivih svetlosnim mikroskopom, što dovodi do narušavanja tvrdoće i čvrstoće, pa se takva termička obrada naziva „starenje“ ili „nadozrevanje“ [5].

Zagrevanjem legure skraćuje se vreme potrebno za precipitacijsko očvršćivanje, dok se pothlađivanjem to vreme povećava. U cilju očvršćivanja nekih legura aluminijuma neophodno je zadovoljiti sledeće uslove:

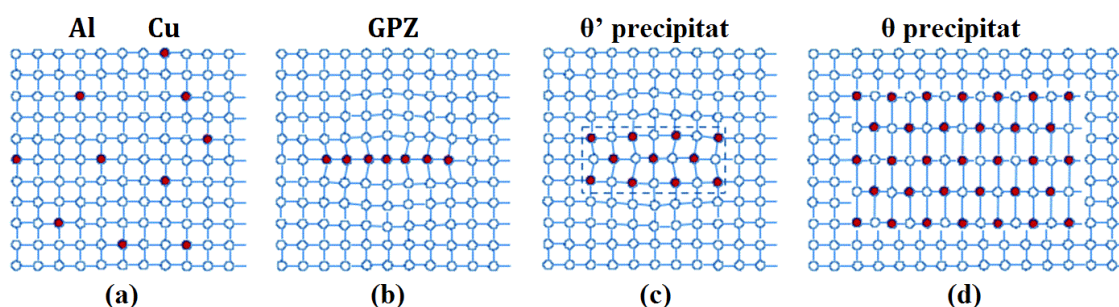
- izabrati leguru odgovarajućeg sastava, tako da ista bude u heterogenom području dijagrama stanja,
- u cilju postizanja potpune apsorpcije stranih atoma rastopljenih žarenjem, maseni udeo legirajućih hemijskih elemenata trebao bi biti znatno viši, s tim da se ne bi smela premašiti granica maksimalne topljivosti u α leguri, i
- u polaznom stanju druga faza mora biti intermetalni spoj, kako bi ponovo došlo do izlučivanja intermetalnog spoja koherentnog oblika.

Osnovni aspekti razlaganja prezasićenog čvrstog rastvora su složeni. Guinier Prestonove zone (GPZ) i međufaze su formirane kao prethodnice ravnoteže precipitativne faze [11]. Slika 10 prikazuje tipičnu mikrografsku sliku čestica precipitata.

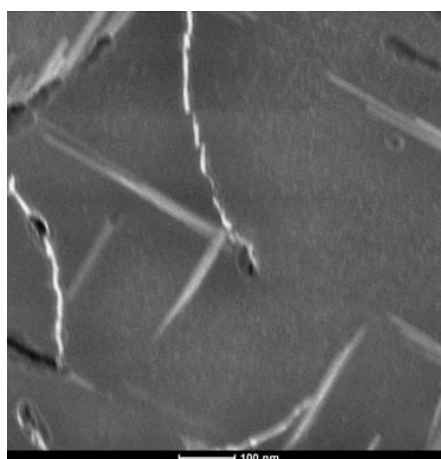
GP zone se formiraju kada se atomi rastopljene materije (npr. Cu, Zn i Mg) akumuliraju duž pogodnih kristalnih pravaca u Al rešetki i formiraju fazu očvršćivanja. Osobine se mogu dodatno poboljšati pažljivom termo-mehaničkom obradom, koja može uključiti termičke tretmane kao što su dvostruko starenje i ponovno starenje.



Slika 8. Vrste precipitata: (a) Nekoherentni precipitat nema nikakve veze sa kristalnom strukturom okolne matrice; (b) Kod koherentnog precipitata postoji određena veza kristalne strukture precipitata i kristalne strukture matrice [10]



Slika 9. Precipitacija u prezasićenom čvrstom rastvoru AlCu uključuje nekoliko koraka uslovljenih porastom temperature: (a) kristalna struktura čvrstog rastvora, (b) GP zona, (c) θ' faza i (d) θ faza [12]



Slika 10. Transmisijska elektronska mikroskopija tamnog polja grubih čestica precipitate Al_2CuMg u AA2XXX (Al-Cu-Mg) leguri [5]

Maksimalno otvrdnjavanje komercijalnih legura često se postiže hladnom obradom – istežanjem nakon kaljenja, a pre starenja, povećavajući gustinu dislokacije i obezbeđujući više lokacija heterogenih nukleacija za precipitaciju. Finoća zrna u legurama aluminijuma postiže se dodavanjem malih količina elemenata niske rastvorljivosti, kao što su Ti i B, i kontrolnom rekristalizacijom korišćenjem precipitata, tzv. disperzoida (najčešće 40x200 nm), koji nastaju iz aluminijuma i legirajućih dodataka kao što su Cu, Cr, Zr ili Mn i potpomažu nerastvorene čestice koje kasnije mogu da ograničavaju rast zrna. Razvijene mikrostrukture u legurama aluminijuma su složene i uključuju kombinacije ravnotežnih i neravnotežnih faza. Neravnotežne faze postoje u svim legurama visoke čvrstoće i, kao takve, njihove osobine su veoma zavisne od temperature. Tipične komercijalne legure su hemijskog sastava koji uključuje i do deset legirajućih dodataka. Sa velikim brojem ovih elemenata neizbežno je prisustvo nečistoća.

Obzirom na navedeno, a sa stanovišta korozije, neophodno je razumeti ulogu elemenata nečistoća na mikrostrukturu. Iako nije od velikog značaja za dizajnere legure, elementi nečistoća kao što su Fe, Mn i Si mogu formirati nerastvorljiva jedinjenja koja se nazivaju konstitutivnim česticama. Relativno su velike i nepravilnog oblika, sa dimenzijama u dijapazonu 1÷~50 µm. Ove čestice se formiraju u toku očvršćivanja legure i nisu značajno rastvorljive tokom nastupajuće termo-mehaničke obrade. U većini legura piting korozija je povezana sa specifičnim konstitutivnim česticama prisutnim u leguri [5,11].

3.2.2. Klasifikacija legura

Međunarodni sistem označavanja legura (eng. *The International Alloy Designation System – IADS*) dodeljuje svakoj leguri četvorocifreni broj, kod kojeg prva cifra definiše seriju, prema preovlađujućim legirajućim elementima [13,14]. Ostale cifre u oznaci (XXX) detaljnije opisuju određene osobine konkretne legure (tabela 1).

Glavni legirajući element za legure serije AA2XXX je Cu, a za AA7XXX je Zn, dok Mg igra značajnu ulogu u obe serije. Livene legure imaju sličan sistem obeležavanja i, u skladu sa Sistemom asocijacije za aluminijum (eng. *The Aluminium Association System – ASS*), koriste četvorocifreni sistem, koji uključuje tri cifre praćene decimalom [7].

Tabela 1. Označavanje legura aluminijuma

Sastav legure	Oznaka
Legure Al sa najmanje 99% čistog Al	1XXX
Legure Al sa bakrom (Al-Cu)	2XXX
Legure Al sa manganom (Al-Mn)	3XXX
Legure Al sa silicijumom (Al-Si)	4XXX
Legure Al sa magnezijumom (Al-Mg)	5XXX
Legure Al sa magnezijumom i silicijumom (Al-Mg-Si)	6XXX
Legure Al sa cinkom (Al-Zn)	7XXX
Legure Al sa ostalim legirajućim elementima	8XXX
Legure Al sa nepoznatim legirajućim elementima	9XXX

Osim osnovne oznake, legure aluminijuma mogu imati i dopunske oznake koje preciznije opisuju stanje, tj. vrstu termičke obrade (tabela 2). Sistem označavanja termičke obrade, usvojen od strane Sistema asocijacije za aluminijum (eng. *ASS*), sličan je i za legure za gnječenje (kovane) i za legure za livenje.

Tabela 2. Označavanje termičke obrade

F	Kovani delovi, kasnije termički obrađeni, obuhvatajući odlivke	
O	Otpuštanje	
H	Očvršćavanje deformacijom, na primer hladna obrada	
W	Rastvor toplotno tretiran, nestabilno stanje nastaje posle kaljenja	
T	Termička obrada:	
	T1	Prirodno starenje
	T2	Hladna obrada i prirodno starenje
	T3	Rastvor toplotno tretiran (na 540°C), hladna obrada, prirodno starenje
	T4	Rastvor toplotno tretiran (na 450-550°C), prirodno starenje
	T5	Hlađenje, veštačko starenje
	T6	Rastvor toplotno tretiran, veštačko starenje
	T7	Rastvor toplotno tretiran, dvostruko starenje
	T8	Rastvor toplotno tretiran, hladna obrada, veštačko starenje
	T9	Rastvor toplotno tretiran, veštačko starenje, hladna obrada
	T10	Hladna obrada, veštačko starenje

U skladu sa nekadašnjim jugoslovenskim standardom, označavanje legura aluminijuma se vrši slovnim i broječanim simbolima u osnovnoj oznaci i broječanim simbolima, koji prate osnovnu oznaku a odvajaju se tačkom. U osnovnoj oznaci, prva slovnica oznaka odgovara hemijskom simbolu Al, kao osnovnom metalu, nakon koje se u sledu, po zastupljenosti, nabrajaju hemijski simboli elemenata kojima se vrši legiranje, i procentualni udeo istih. Dvocifreni brojevi koji se nalaze iza osnovne oznake opisuju stanje Al legura. Primera radi, AlMg2Mn1.60 opisuje leguru Al, sa približno 2% Mg i približno 1% Mn, pri čemu dopunska oznaka 60 ukazuje na to da je legura termički obrađena.

Legura aluminijuma AA2XXX

Bakar (Cu) je jedan od najčešćih legirajućih elemenata, budući da ima znatnu rastvorljivost i značajan efekat očvršćivanja. Ove legure, nazvane "dural", su temelj moderne vazduhoplovne industrije i, kao na primer AA2024 (Al-4.4Cu-1.5Mg-0.8Mn), mogu da postignu čvrstoću od 520 MPa, u zavisnosti od termičke obrade. Mikrostruktura ove serije biće razmatrana u nastavku rada. Bakar je, međutim, jedan od plemenitijih legirajućih elemenata i samim tim podržava visoku stopu redukcije kiseonika koji pokreće polovinu galvanske reakcije. Čelija je kompletirana otapanjem bilo kojeg drugog manje plemenitog elementa, posebno aluminijuma, čime se olakšava početak i širenje korozije.

Legura aluminijuma AA7XXX

Cink (Zn) i magnezijum (Mg) glavni su legirajući elementi serije AA7XXX, koji kada im se doda i bakar (Cu) imaju najveću čvrstoću u odnosu na sve ostale Al legure. Ove legure se nazivaju „konstruktali“, i dele se na dve grupe, u zavisnosti od toga da li u svom sastavu imaju ili nemaju bakar. Legure koje sadže bakar, Al-Zn-Mg-Cu, imaju najveću čvrstoću. Mogu se zavarivati samo u specijalnim uslovima. Antikorozijska svojstva su im loša. Upotrebljavaju se uglavnom u vazduhoplovnoj i svemirskoj tehnici, naoružanju, i sl. U zavisnosti od izbora termičke obrade, za legure aluminijuma Al-Zn-Mg-Cu, čije očvršćivanje se postiže termičkim taloženjem, otpornost prema naponskoj koroziji moguće je menjati u širokom dijapazonu. Legure koje ne sadže bakar, Al-Zn-Mg, imaju lošije mehaničke osobine u odnosu na prethodnu grupu, a otpornije su na koroziju od legura koje sadže bakar. Koriste se za nosive elemente, naoružanje i sl. Specifični zahtevi, kako vojnog tako i komercijalnog vazduhoplovstva, doveli su do upotrebe niza legura

visoke čvrstoće u vazduhoplovnoj industriji, od kojih je AA7075 možda najpoznatija, a koja je sada u potpunosti zamenjena sa AA7150 (ili familijom AA7X50). Legure aluminijuma visoke čvrstoće serije AA7XXX „crpe“ čvrstoću iz precipitacije η -faze ($MgZn_2$). Termička obrada legura serije AA7XXX je složena, i uključuje niz termičkih tretmana koji su razvijeni u cilju uspostavljanja ravnoteže između čvrstoće i naponske korozije, a sastoji se od sekundarnih termičkih tretmana koji mogu da uključe ponovno starenje [15].

3.2.3. Primena legura aluminijuma u vazduhoplovstvu

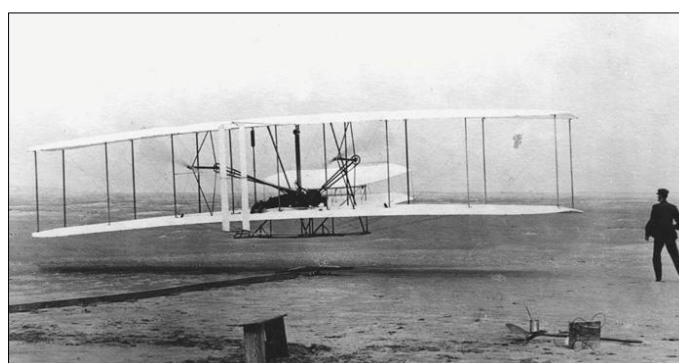
Aluminijum će se uvek posmatrati kao metal koji je ljudima omogućio da lete. Lagan, čvrst i fleksibilan, pokazao se kao idealan materijal za izgradnju letelica težih od vazduha. Prema tome, opravdano postoji razlog što je u nekim krugovima aluminijum poznat kao „krilati metal“.

Aluminijum je u vazduhoplovstvu prvi put upotrebljen u vreme kada avioni još uvek nisu postojali. Naime, grof Ferdinand fon Cepen (eng. *count Ferdinand von Zeppelin*) je okvire svojih poznatih vazdušnih brodova pravio od aluminijuma (slika 11).



Slika 11. Vazdušni brod Graf Zeppelin [16]

Temelji modernog vazduhoplovstva postavljeni su 1903. godine, kada su braća Rajt prvi put u istoriji čovečanstva izvela kontrolisani let letelicom težom od vazduha, Letač-1, pogonjenom na motorni pogon. Tadašnji automobilski motori su bili previše teški i nisu bili dovoljno snažni da letelicu podignu u vazduh, pa je za avion Letač-1 napravljen poseban motor sa blokom motora izlivenim od aluminijuma [16].

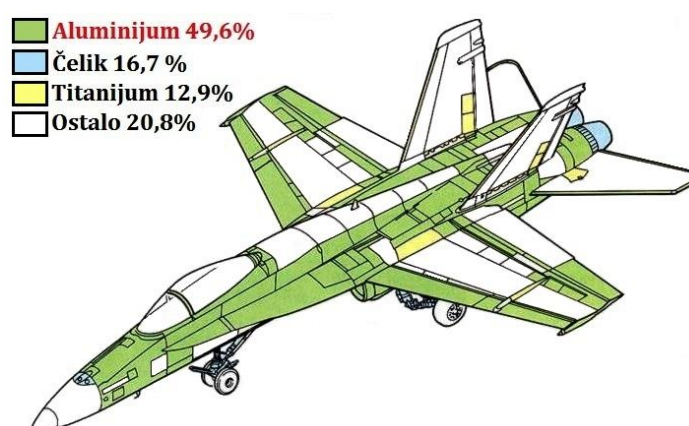


Slika 12. Avon braće Rajt, Letač-1 (Flyer-1) [16]

Kasnije je aluminijum postepeno zamenio drvo, čelik i druge materijale korišćene za izradu prvog aviona, i 1917. godine poznati nemački konstruktor aviona Hugo Junkers je proizveo prvi avion izrađen od metala u celosti, Junkers J4 (slika 13), čiji je trup bio od duraluminijuma, legure aluminijuma koja sadrži bakar, magnezijum i mangan.



Slika 13. Avion Junkers J4 [9]



Slika 14. Procentualni udeo Al i legura aluminijuma u strukturi aviona F/A-18 [17]

U vazduhoplovstvu su pretežno u upotrebi precipitacijski očvršle legure aluminijuma iz grupe durala (serija 2XXX), odnosno konstruktala (serija 7XXX). U nastavku su predstavljene neke od najkorišćenijih legura [9].

AA2014 (Al-Cu-Si-Mn-Mg) koristi se za izradu točkova, elemenata strukture i ostalih visokoodgovornih delova vazduhoplova.

AA2024 (Al-Cu-Mg-Mn) upotrebljava se za proizvodnju konstrukcijskih elemenata trupa, okvira i delova vazduhoplova koji zahtevaju čvrstoću i dinamičku izdržljivost, kao i visokoodgovornih elemenata krila, itd.

AA2048 (Al-Cu-Mg-Mn) primenjuje se kod visokoopterećenih elemenata strukture vazduhoplova i svemirskih letilica.

AA2049 (Al-Cu-Li-Ag-Mg-Zr) zbog posebnih svojstava pri niskim temperaturama, primenjuje se za izradu spremnika tečnog goriva i kiseonika kod Spaceshuttle-a.

AA2090 (Al-Cu-Li- Zr) legura 2090 pripada grupi legura aluminijuma s litijumom (Li). Upotrebljava se tamo gde je visoka čvrstoća od presudnog značaja. Uzimajući u obzir da je 8÷10% manje gustine i 10% većeg modula elastičnosti od sličnih legura aluminijuma, koristi se za ukrućenje podnih pregrada vazduhoplova kako bi se ostvarila ušteda na masi. Primjenjuje se i za okvire trupa vazduhoplova, te za zahtevnije strukturne elemente kao što je oplata krila.

AA2091 (Al-Cu-Mg-Li- Zr) razvijena je s namerom da zameni leguru 2024. Sa 8% manjom gustinom i 7% većim modulom elastičnosti u odnosu na pomenutu, odlikuje se dobrom

otpornošću na oštećenja. Prvenstveno je namenjena je za izradu vazduhoplovnih konstrukcija male mase i visoke otpornosti na oštećenja.

AA2124 (Al-Cu-Mg-Mn) se koristi za izradu ploča debljine 40÷150 mm, i namenjena je primarno za okvire trupa i oplatu vazduhoplova sa visokim performansama.

AA7050 (Al-Zn-Mg-Cu-Zr) je primarni izbor za primenu u vazduhoplovstvu kada se traži najbolja kombinacija žilavosti, čvrstoće i otpornosti na nastajanje i širenje prsline. Upotrebljava se za okvire trupa i oplatu krila vazduhoplova.

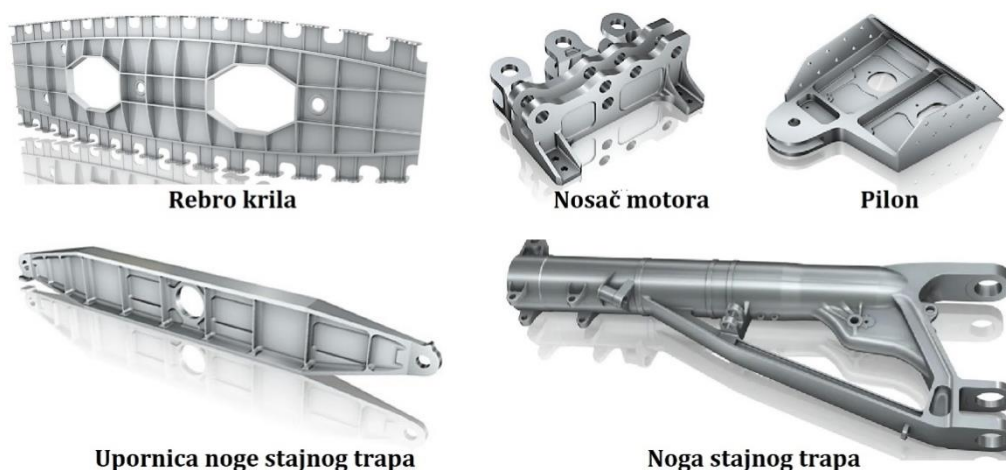
AA7075 (Al-Zn-Mg-Cu-Cr) se dobro mašinski obrađuje i visoke je čvrstoće i otpornosti na koroziju.

AA7150 (Al-Zn-Mg-Cu-Zr) jedna od najčvršćih, upotrebljava se za ukružene gornje panele krila i donje panele horizontalnog stabilizatora. Takođe služi i za oplatu gornjake krila.

AA7175 (Al-Zn-Mg-Cu-Cr) se koristi za elemente strukture vazduhoplova koji zahtevaju visoku čvrstoću, lomnu žilavost i dinamičku izdržljivost, te moraju biti otporni prema naponskoj koroziji.

AA7178 (Al-Zn-Mg-Cu-Cr) upotrebljava se za izradu vazduhoplovnih delova visoke mehaničke otpornosti u uslovima zateznog opterećenja.

AA7475 (Al-Zn-Mg-Cu-Cr) se koristi za kritične komponente vazduhoplova visokih performansi, koji zahtevaju visoku lomnu žilavost, kao npr. oplata trupa i krila, ramenjača i okvira trupa vazduhoplova.



Slika 15. Primeri strukturnih elemenata vazduhoplova izrađeni od legura aluminijuma serije AA7XXX [18]

3.2.4. Obrada legura aluminijuma

Površinski slojevi legura aluminijuma mogu se menjati za vreme obrade i u zavisnosti od uslova skladištenja, što doprinosi kompleksnosti završne površine i otpornosti na koroziju [16]. Ovi efekti uključuju formiranje bližeg deformisanog površinskog sloja (eng. *Near Surface Deformed Layer – NSDL*) tokom mehaničke obrade, istezanje kristalne strukture tokom valjanja i istiskivanja, raspad krutih intermetalnih čestica, razlike u hrapavosti površina i poroznosti, i segregaciju pojedinih legirajućih elemenata na površini.

Prvi korak obrade legure aluminijuma je livenje. Tri najčešće korišćena postupka su livenje u peščanim kalupima, livenje u stalnim (permanentnim) metalnim kalupima i livenje u školjkama. Peščani kalupi se pune tečnim metalom gravitaciono, dok se u metalne kalupe tečni

metal uvodi ili gravitaciono ili pod pritiskom, korišćenjem vazduha ili nekog drugog gasa, pri čemu se metal sve do stvrdnjavanja nalazi pod visokim pritiskom.

Za velike proizvodne linije, direktno hladno (eng. *Direct Chill – DC*) livenje je polukontinualni postupak koji se koristi za proizvodnju pravougaonih šipki ili ploča za valjanje u panele, oplata, folije i cilindrične šipke ili klade za ekstrudirane šipke, prečke, šuplje profile, cevi i žice. Direktno hladno (DC) livenje je prvi korak u proizvodnji Al legura, pre termomehaničke obrade i, iako može izgledati kao tema koju nije potrebno posebno razmatrati u ovom poglavlju, neophodno je shvatiti da svaki korak, počev od očvršćivanja otopljene legure za vreme hladnog livenja, diktira korozione performanse legure.

DC livenje počinje sipanjem rastopljenog metala u vodom hlađen aluminijumski ili bakarni kalup. Do akumuliranja legirajućih elemenata na površini može doći usled procesa segregacije, pri čemu se pokretni elementi šire iz granica zrna. Generalno, površina je obogaćena elementima koji imaju visoku negativnu energiju za formiranje oksida i visok koeficijent difuzije kroz aluminijum. Takvi elementi su litijum, magnezijum i silicijum [19]. Do segregacije dolazi za vreme formiranja i termičke obrade i dokazano je da utiče na koroziju i habanje legura [20].

3.2.5. Površinske mikrostrukture

Proizvodnim postupcima, kao što su valjanje, mašinska obrada i mehaničko brušenje (poliranje), proizvode se aluminijumski proizvodi odgovarajućih debljina i oblika za različite primene. Valjanje je postupak oblikovanja metala deformacijom, pri kojem se izlivenoj ploči prolaskom između rotirajućih valjaka smanjuje poprečni presek i stvara željeni oblik, sa poboljšanjem mehaničkih osobina. Valjanje materijala većeg preseka, koji mogu težiti i po nekoliko tona, uglavnom se vrši u toplom stanju, zagrejani do temperature od 500°C. Materijali sa manjim presekom, kod kojih je neophodno postići finiju površinu, manju tolerancija i veću tvrdoću, uglavnom se valjaju u hladnom stanju. Površina ploče trpi intenzivne smicajne deformacije tokom ovog procesa i stvaranje bližeg deformisanog površinskog sloja (eng. *Near Surface Deformed Layer – NSDL*). Proces smicanja takođe utiče i na IM čestice ispod površine, rezultujući većim brojem IM čestica u blizini površine nego u telu materijala. Ovo nije rezultat procesa precipitacije, ali se dešava usled fragmentacije krtih čestica tokom kotrljanja. Karakteristike površine lima 2024-T3 (dobijene poliranjem) i tela materijala upoređene su u tabeli 3 [21]. Toplo valjanje deformiše originalnu strukturu odlivka tako da zrna bivaju izdužena u pravcu valjanja.

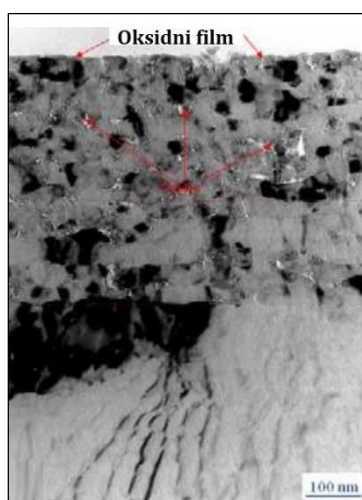
Tabela 3. Karakteristike IM čestica u limu od Al legure 2024-T3

Karakteristike IM čestice	Telo	Površina
Brojnost (gustina)	$5,3 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$	$11,7 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$
Prosečna veličina čestice	$6,66 \mu\text{m}^2$	$1,98 \mu\text{m}^2$
Srednja veličina čestice	$1,6 \mu\text{m}^2$	$1,2 \mu\text{m}^2$
% površine	2,89%	2,82%
Ukupno čestica po 1 mm^2	5.300	11.690
Minimalna veličina čestice	$0,40 \mu\text{m}^2$	$0,34 \mu\text{m}^2$
Maksimalna veličina čestice	$327 \mu\text{m}^2$	$114 \mu\text{m}^2$

Izdužena mikrostruktura razvijena tokom toplog valjanja može imati značajan uticaj na svojstva korozije, kao što su naponska korozija (eng. *Stress Corrosion Cracking - SCC*) i laminarna (slojevita) korozija. Na primer, dokazano je da je laminarna korozija legura serije

AA7XXX posledica segregacije mangana (granice zrna i spoljašna površina) za vreme DC livenja [22].

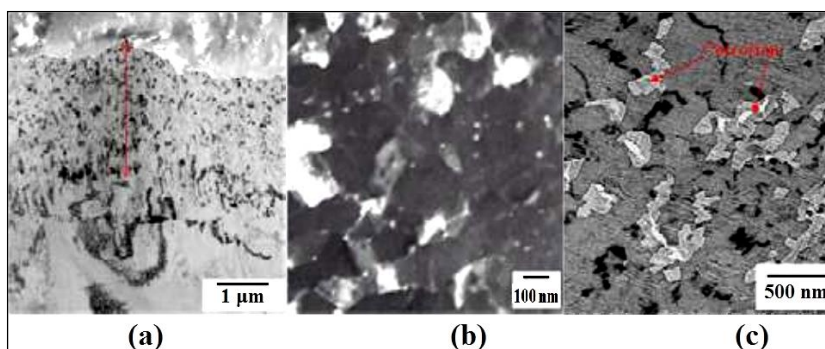
Tipično, bliži deformisani površinski sloj (NSDL) karakterišu ultra fina, ujednačena zrna, sa granicama ukrašenim česticama oksida nano veličine [23,24,25]. To je povezano sa osetljivošću pojedinih legura aluminijuma na površinsku (filiform) koroziju [23,26]. Dubina modifikovanog površinskog regiona kreće se od nekoliko nanometara (posle poliranja) do 8 μm (tokom valjanja). U ovom drugom slučaju debljina se menja sa svakim prolazom valjanja [27]. Dalje, region tranzicije, koji se odlikuje mikrotrakama koje se sastoje od izduženih zrna postavljenih paralelno sa radnom površinom, može se naći u sendviču između površinskih regiona i tela legure. Deformisani slojevi su stabilni na sobnoj temperaturi, što je povezano sa lokalnim prisustvom velikih frakcija granica zrna velikog ugla. Struktura je, takođe, stabilizovana kačenjem čestica oksida i precipitata za granice zrna (slika 16). Granice zrna bliže deformisanog površinskog sloja ukrašene oksidom mogu da prežive klasično kaljenje i proces termičke obrade rastvora [5].



Slika 16. Transmisijaska elektronska mikrografija ultra-tanko sečene kriške uzorka prikazuje površinu/bliže površinske oblasti legure aluminijuma [5]

Završna obrada metala i površinski tretmani imaju zadatak da uklone ove elektrohemijski aktivne slojeve. Međutim, prisustvo sitnih zrna u deformisanom sloju, sa granicama oslobođenim od čestica oksida, nije dovoljno da spreči okrupnjavanje zrna za vreme tipičnih tretmana kaljenja [25].

Važno je napomenuti da bliži deformisani površinski sloj (NSDL) ima značajan uticaj na osobine kao što su elektrohemijsko i koroziono ponašanje, kao i na mehaničke osobine materijala, spajanje materijala i optička svojstva. Visoka populacija granica zrna i teške deformacije u deformisanom sloju promovišu taloženje intermetalnih čestica tokom sledeće termičke obrade [28]. Na primer, bliži deformisani površinski sloj automobilske pregradne lima od legure aluminijuma AA6111 može biti generisan mehaničkim brušenjem (slika 17a). Naknadno pečenje boje, odnosno termičko izlaganje, u trajanju od 30 minuta, na temperaturi od 180°C, inicira precipitaciju čestica Q faze (sa različitim sastavima: $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ [29], $\text{Al}_4\text{CuMgSi}_4$ [30]), prečnika ~ 20 nm, na pogodnim granicama zrna unutar deformisanog sloja (slika 17b) ali bez taloga formiranog u osnovi tela legure. Prisustvo Q faze precipitacije u bližem površinskom deformisanom sloju dramatično povećava podložnost legure koroziji koja propagira intergranularno, sa mikrogalvanskom spregom između Q faze precipitacije i susedne matrice aluminijuma obezbeđujući pokretačku snagu (slika 17c) [5].



Slika 17. Transmisijska elektronska mikrofografija ultra-tanko sečene kriške legure aluminijuma 6111 posle SHT, mehaničkog brušenja i 30-minutnog izlaganja na temperaturi od 180°C: (a) slika svetlog polja, otkrivanje bližeg deformisanog površinskog sloja; (b) slika tamnog polja, otkrivanje precipitata na granicama zrna; (c) transmisijska elektronska mikrofografija pokazuje intergranularnu koroziju [5].

3.2.6. Legure aluminijuma visoke čvrstoće serije AA2XXX i AA7XXX

AA2XXX (durali)

Legure aluminijuma serije AA2XXX su među komplikovanijim za analiziranje. Iako je bilo nekoliko izveštaja o kompozicijama različitih faza u okviru ove grupe, fokus je stavljen na leguru 2024-T3, koja je, nažalost, jedna od najkompleksijih legura serije 2XXX. Verovatno jedan od poznatijih radova iz ove oblasti objavio je G. Phragmen 1950. godine [31]. On je ispitao sve binarne, trostruke, četvorostruke, petostruke i šestostruke kompozicije u cilju razumevanja intermetalnih (IM) čestica u 2024. Nažalost, klasifikacija ovih čestica u mnogome se zasnivala na metalografskim tehnikama i optičkom mikroskopu, što znači da su IM čestice, u većini slučajeva, opisane po izgledu, a ne po sastavu. Ove vrste studija, međutim, predstavljaju osnovu za moderno definisanje IM čestica. Iz perspektive dobijanja željenih mehaničkih osobina na nanometarskom nivou, karakterizacija je fokusirana na mikrostrukturu legure. Iniciranje korozije, međutim, mnogo više je povezano sa velikim konstitutivnim česticama čije kompozicije su zasnovane na glavnim legirajućim elementima [5].

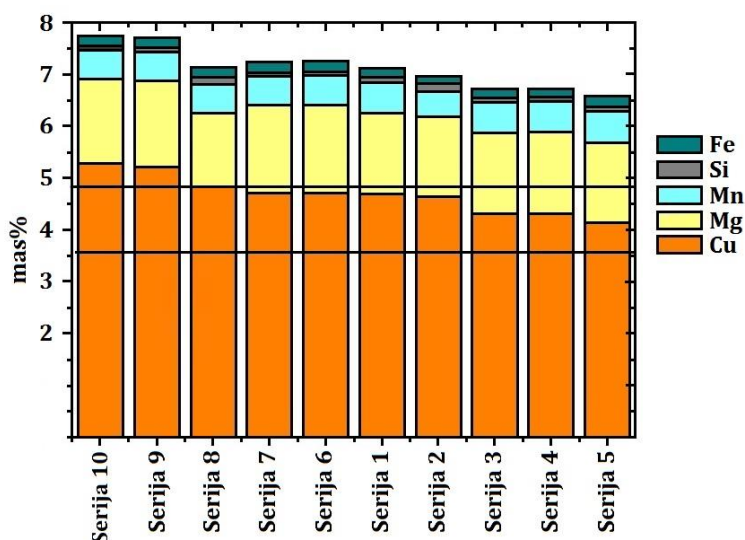
Bakar i magnezijum su dva glavna legirajuća elementa u kovanoj leguri 2024 i, zbog bakra, ova serija je manje otporna na koroziju od legura ostalih serija. Većina tankih limova napravljenih od ovih legura proizvedena je kao Al-pokrivni kompozit, sa relativno čistom legurom aluminijuma kao spoljašnjim slojem, dok deblji limovi i drugi proizvodi u mnogim aplikacijama nemaju zaštitnu oblogu. Elektrohemijski efekti na koroziju mogu biti jači u ovim legurama nego u mnogim drugim vrstama legura zbog sledeća dva faktora: veće razlike u elektrohemijskoj aktivnosti sa varijacijama količine bakra u čvrstom rastvoru i, pod određenim uslovima, prisustva neuniformnosti u koncentraciji čvrstog rastvora. Smanjenje otpornosti prema koroziji sa povećanjem sadržaja bakra se pogoršava samim procesom korozije formiranjem čestica bakra ili filmova deponovanih na površini legure, kao rezultat korozije [5].

U cilju razumevanja mikrostrukture i njenog uticaja na koroziju, veoma je važno znati kompozicije druge faze IM čestica. Međutim, karakterizacija ovih IM čestica u literaturi o koroziji je slaba, praktično bez istraživanja koja se odnose na kompoziciju kristalne strukture. Dakle, postoji potreba za detaljnim identifikacionim sistemom koji povezuje kompozicionu varijaciju unutar IM čestica, sa kristalografijom i elektrohemijskim karakterom. Cilj istraživanja je pomeranje čisto fenomenološkog opisa korozije na nivo razumevanja u kojem se proces korozije može modelirati. Ovaj nivo razumevanja prvenstveno je usmeren na razvoj strukturnih algoritama menadžmenta za upravljanje održavanjem i nekoliko novih pristupa ovom koji je već opisan u literaturi [32,33,34].

IM čestice u leguri aluminijuma 2024-T3 trenutno su identifikovane i kategorisane pomoću jedne, ili mešavinom sledećih kategorija [5]:

- I. Kompozicija (sastav)
- II. Elektrohemija
- III. Kristalografija
- IV. Oblik

Kompozicija i elektrohemija su najkorisnije kategorije za proučavanje korozije i konvergencija ova dva sistema je poželjna, a već je i postignuta za neke jednostavnije mikrostrukture. To znači da u mnogim legurama neka posebna kompozicija može biti povezana sa specifičnim elektrohemijskim ponašanjem. To nije slučaj, na primer, u 2024-T3 gde postoji veoma velika kompoziciona varijacija. Kristalografija IM faza nije tako korisna u studijama o koroziji budući da je verovatno da konkretne kristalne strukture nisu u vezi sa kompozicijom ili elektrohemijom u 2024-T3. Ono što se generalno dešava u literaturi o koroziji je to da kada se jednom utvrdi kompozicija IM čestice, tada joj se dodeljuje standardna stehiometrija koja potiče iz kristalografske analize. Dakle, postoji pretpostavka da određena kompozicija ima specifičnu kristalografsku strukturu koja ne može biti validna. Na primer, Robert P. Wei i saradnici [36] koristili su TEM za proučavanje čestica u 2024-T3 i 7075-T6 i otkrili da kompozicije koje sadrže Al, Cu, Fe, Mn i Si imaju rombohedralnu strukturu koja ne odgovara heksagonalnoj strukturi koja je prethodno opisana za čestice ove vrste za Al_8Fe_2Si ili $Al_{10}Mn_3Si$. Klasifikacija IM čestica po obliku se koristi u metalurgiji i koroziji. Najčešće se koristi za pravljenje razlike između faza koje sadrže Al-Cu-Fe-Mn-Si koji imaju tendenciju da budu ugaoni i θ (Al_2CuMg) i θ ($AlCu$) faze koje imaju tendenciju da budu zaobljene. Ova svojstvenost je naglašena u tekstovima koji opisuju mikrostrukturu 2024-T3 [7]. Ovo je najmanje pouzdana metoda identifikacije budući da je nedavno pokazano da Al_7Cu_2Fe takođe ima zaobljenu strukturu i sličnu veličinu θ faze konstitutivnih čestica, sugerirajući da dodeljivanje po osnovu oblika lako može dovesti do pogrešne identifikacije [5].

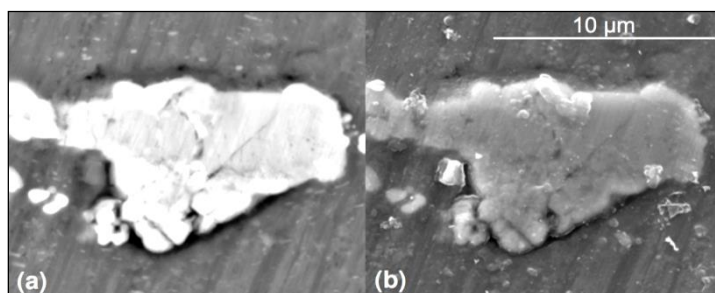


Slika 18. Analiza mas% za Cu, Mg, Mn, Si i Fe u deset različitih serija 2024-T3 (prikupljeno u periodu od 1995. do 2000. godine) [5]

U cilju razumevanja kompleksnosti mikrostrukture legure 2024-T3 počinjemo sa kompozicionim varijacijama između nekoliko serija limenih proizvoda (slika 18). Glavne legirajuće komponente serije 2XXX su Cu i Mg i one generalno imaju slične molarne frakcije. Cu, Mn i Mg imaju specifične serije, i serije za Cu prikazane su na slici 18. Jasno, većina serija je unutar specifikacije, dok dve serije prelaze gornju granicu specifikacije za 0,3 do 0,4 mas%. IM

čestice se formiraju od tih elemenata, i varijacija u kompoziciji od serije do serije izražava se kompozicionim varijacijama IM čestica. Poreklo ovih varijacija opisano je i odnosi se na izvorni materijal [5].

Razlog zbog kojeg kompoziciono odstupanje od serije do serije predstavlja teškoću je to što elementi u tranziciji mogu biti zamenitelji u mnogim intermetalnim spojevima. Na primer, Raghavan Ayer i saradnici [37] pronašli su Zn i Ni u Al_7Cu_2Fe , a Ming Gao i saradnici [35] pronašli su značajne kompozicione varijacije unutar faze imenovane kao $(Fe,Mn)_xSi(Al,Cu)_y$ sa nekim česticama koje sadrže uglavnom Fe i Cu sa malom količinom Mn. Slične rezultate predstavili su i A. Boag i saradnici [38]. Ming Gao i saradnici [35] pronašli su čak i male količine Cr i Zn u Al_2CuMg . Ove varijacije mogu otežati klasifikaciju čestica na osnovu sastava.



Slika 19. Oslikavanje (a) povratno raspršenih i (b) sekundarnih elektrona IM čestice sa različitim kompozicionim domenima. Korodirano u 0,1 M NaCl u trajanju od 30 min na sobnoj temperaturi [5].

Kao dodatak kompozicionoj varijaciji, mnoge IM čestice sadrže kompozicione domene unutar čestice. Slika 19 prikazuje oslikavanje povratno raspršenih i sekundarnih elektrona IM čestice sa različitim kompozicionim domenima. Na slici povratno raspršenih elektrona (slika 19a) svetliji regioni su bogati sa Cu i Fe, kao što je prethodno opisano, dok tamniji delovi IM čestice sadrže više Mn i Si. Nije poznato da li ovi domeni imaju različite kristalne strukture. Tamna oblast pri dnu IM čestice predstavlja početak nekog oblika korozije tzv. „rov“, koji se često posmatra kod katodnih IM čestica. Jasno je da je ova korozija inicirana u matrici koja se graniči sa delom IM čestice bogatim sa Cu i Fe. Standardni tekstovi, poput Hatch [7], prikazuju IM čestice u 2024-T3 i 7075-T6, kao što je predstavljeno u tabeli 4.

Tabela 4. Čestice u legurama aluminijuma 2024-T3 i 7075-T6

Postupak obrade	Faze	
	2024-T3	7075-T6
Livenje Ingot (poluga) formacija	$(Mn,Fe)_3SiAl_{12}$ Mg_2Si Al_2Cu (θ -faza) Al_2CuMg (S-faza) $Al_3(Fe,Mn)$ $Al_6(Fe,Mn)$	$(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$ Mg_2Si $Zn_2Mg((Zn,Cu,Al)_2Mg)$
Kovanje	$Al_{12}CuMg$ Nereagovano $(Mn,Fe)_3SiAl_{12}$ Al_7Cu_2Fe $Al_{20}Mn_3Cu_2$ (Disperzoid)	$(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$ Al_7Cu_2Fe $Al_{18}Mg_3Cr_2$ (Disperzoid)

Ove kompozicije su izvedene iz metalurških istraživanja. Prema ovim standardnim tekstovima, termičkom obradom se rastvara veći deo Al_2Cu i Al_2CuMg dok se sve IM čestice koje sadrže Fe pretvaraju u Al_7Cu_2Fe . Prema tome, kovane kompozicije sadrže IM čestice navedene

u tabeli 4. Analize kompozicija u nekoliko drugih istraživanja imaju neka preklapanja sa kompozicijom faza (na osnovu stehiometrije), što je prikazano u tabeli 4. Analize kompozicija iz tri najobuhvatnija istraživanja navedene su u tabelama 5 do 7 [5].

Tabela 5. Kompozicija IM čestica u 2024-T3 (Gao et al.)

Vrsta čestice	Izmerena stehiometrija	Ostali elementi
Al ₂ CuMg	Al _{51.62} Cu ₂₄ Mg _{23.52}	Fe(0,08), Mn(0,05), Cr(0,09), Zn(0,75)
Al ₂ CuMg (EPMA)	Al _{52.8} Cu _{24.5} Mg _{22.7}	-
Al ₂ Cu	Al _{62.98} Cu _{33.83} Mg _{2.82}	Fe(0,11), Mn(0,04), Cr(0,17), Ni(0,06)
(Al,Cu) _y Si(Fe,Mn) _x	Al _{67.6} Cu _{3.36} Fe _{14.89} Mn _{6.87} Si _{6.27}	Mg(0,43)

Robert P. Wei i saradnici [36] identifikovali su S-fazu, θ-fazu i ostatak koji je kategorisan kao (Fe,Mn)_xSi(Al,Cu)_y ukazujući da nema Al₇CuFe. Elektronskom difrakcijom ovih faza pronađene su neidentifikovane rombohedralne strukture i čestice sa opštom kompozicijom (Fe,Mn)_xSi(Al,Cu)_y koje su prijavljene kao varijante Al₈FeSi ili Al₁₀Mn₃Si. Buchheit i ostali [39] izvršili su elektronsku analizu 652 čestice i identifikovali S-fazu i niz faza koje sadrže Al, Cu, Fe i Mn, kao što je navedeno u tabeli 6. U najnovijem istraživanju, Boag i saradnici [40] ispitali su oko 82.000 kompozicionih domena u 18.000 IM čestica i identifikovali kompozicije prikazane u tabeli 7 [5].

Tabela 6. Kompozicija IM čestica u 2024-T3 (Buchheit et al.)

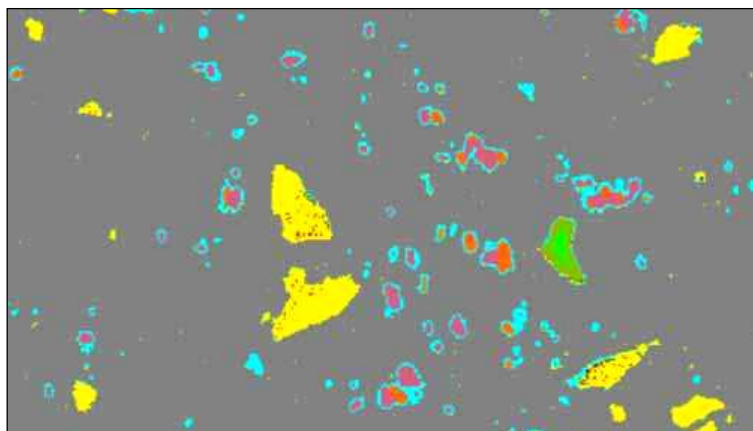
Vrsta čestice	Procenat broja	Procenat površine
Al ₂ CuMg	61,3	2,69
Al ₃ (Cu,Fe,Mn)	12,3	0,85
Al ₇ Cu ₃ Fe	5,2	0,17
(Al,Cu) ₆ Mn	4,3	0,11
Neodređeno	16,9	0,37

Tabela 7. Kompozicija IM čestica u 2024-T3 (Boag et al.)

Oznaka faze	Izmerena stehiometrija	Površina (% od ukupne)	Gustina čestica (broj/cm ²)	Prečnik čestice (μm)
Matrica	Al ₉₆ Cu ₂ Mg ₅	Ostatak	-	-
(Al,Cu) ₂₁ (Mn,Fe) ₄ Si	Al ₇₇ Cu ₅ Mn ₅ Fe ₁₀ Si ₄	0,742	22.052	5,19
Al ₂ CuMg	Al ₆₁ Cu ₂₀ Mg ₁₅	0,381	22.412	4,52
Al ₇ Cu ₃ Fe	Al ₇₀ Cu ₁₈ MnFe ₆	0,089	22.076	1,84
(Al,Cu) ₉₃ (Fe,Mn) ₅ (Mg,Si) ₂	Al ₉₀ Cu ₃ MgMn ₂ Fe ₃ Si	0,252	140.296	1,46
Al ₁₀ (Cu,Mg)	Al ₉₀ Cu ₇ Mg ₂	0,983	81.856	5,38
Al ₃ (Cu,Fe,Mn)	Al ₇₃ Cu ₁₁ Mn ₄ Fe ₁₀ Si	0,062	17.728	1,97
Periferija	Al ₈₁ Cu ₁₂ Mg ₄ MnFe	0,018	3.868	2,26
Al ₂ Cu	Al ₇₀ Cu ₂₇	0,298	17.568	4,60
Ukupno		2,83	320.000	N/A

Primer ovih kompozicionih domena unutar IM čestica prikazan je na slici 20. S-faza i θ-faza pretežno se javljaju kao domeni u okviru individualnih, ali kompozitnih čestica. Al₇Cu₃Fe, u većini slučajeva, su treća grupa čestica i imaju domene, uglavnom u centru Al₁₀(Cu,Mg).

Ono što se nameće kao zaključak ovih istraživanja je da ne postoji definitivna kompozicija za čestice koje sadrže Al, Cu, Mn, Fe i Si (sa malim dodacima drugih elemenata), i iz zapažanja kao što su ona na slici 19 jasno se vidi da ovi regioni kompozicione varijacije imaju različitu elektrohemijsku aktivnost. Pored kompozicione varijacije postoje dokazi značajnih mikrostrukturnih varijacija unutar kompozicione oblasti definisane za 2024-T3 [5].



Slika 20. Slika IM čestica u 2024-T3, sa kompozicionim domenima. ■ = $(Al,Cu)_{21}(Mn,Fe)_4Si$, ■ = Al_2CuMg , ■ = Al_2Cu , ■ = Al_7Cu_3Fe , ■ = $Al_{10}(Cu,Mg)$, ■ = $Al_3(Cu,Fe,Mn)$ [5]

AA7XXX (konstrukтали)

Aluminijumske legure serije 7XXX su termički očvrstljive legure za gnječenje koje sadrže cink (Zn), kao preovladavajući legirajući hemijski element, sa dodatkom magnezijuma (Mg) koji poboljšava čvrstoću. Pored navedenih, od ostalih legirajućih elemenata pretežno je prisutan bakar (Cu) te su to najčešće legure Al-Zn-Mg-Cu, znane kao „konstrukтали”. Dodatni hrom (Cr) potpomaže očvrstnuće precipitacijom. Legure za gnječenje serije 7XXX sklonije su od serije 2XXX precipitacijskom otvrdnjavanju. Radi se o materijalima sa izrazito visokom čvrstoćom u odnosu na ostale legure aluminijuma i koriste se kao strukturni materijali, pre svega u vazduhoplovnim konstrukcijama.

Legure serije 7XXX mogu prirodno dozrevati, ali u tom slučaju gube stabilnost, uzimajući u obzir da im tokom vremena čvrstoća varira, te se podvrgavaju veštačkom dozrevanju, i na taj način postiže stabilno stanje. Srednja čvrstoća predmetnih legura u precipitacijski očvrstnutom stanju je oko 550 MPa, s tim da se, u zavisnosti od hemijskog sastava i mikrostrukture, mogu ostavariti čvrstoće do 680 MPa, kao što je to slučaj kod AA7001-T6 legure. Posebno visoke čvrstoće su pojedine legure iz serije 7XXX koje u svom sastavu imaju oko 2% bakra (Cu) u sprezi sa magnezijumom (Mg) i cinkom (Zn). Radi se o legurama 7049, 7050, 7075, 7175, 7178 i 7475, koje su u grupi najčvršćih, ali i na koroziju najmanje otpornih. Legure koje u svom sastavu nemaju bakar (Cu), kao što su 7005 i 7029, imaju nižu čvrstoću, ali se odlikuju žilavošću i boljom zavarljivošću. Kod najvećeg broja legura iz serije 7XXX ne razmatra se zavarljivost, s obzirom da se strukturni elementi od ovih materijala uglavnom mehanički spajaju [9].

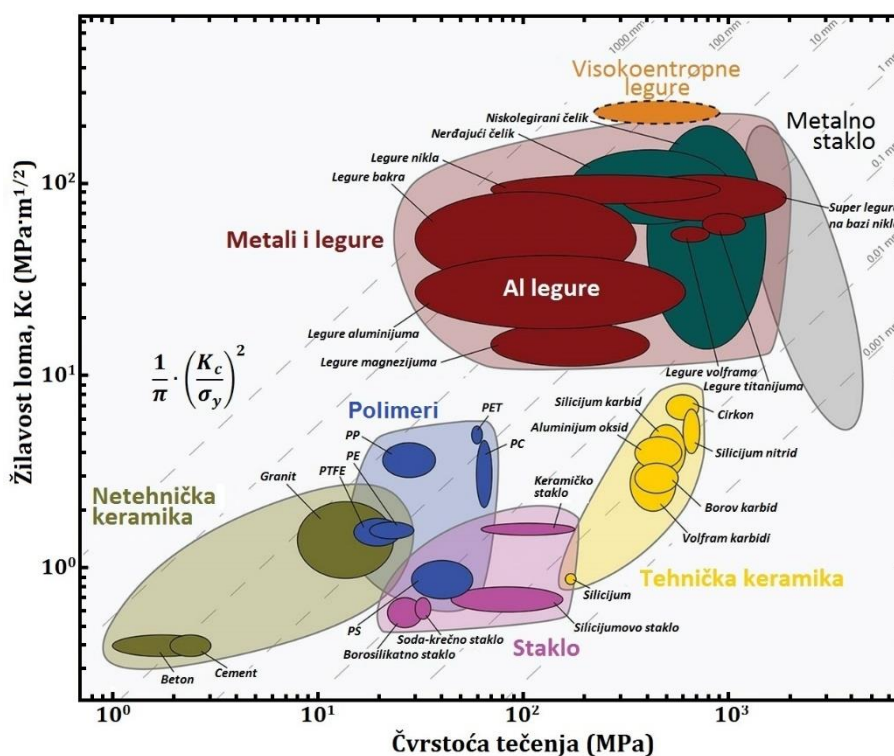
Određeni broj legura serije 7XXX, kao što su 7050, 7150, 7175, 7475 i 7085, pre svega se karakterišu visokom lomnom žilavošću, i kod njih je sadržaj nečistoća, posebno gvožđa i silicijuma, rigidno ograničen kako bi se postigla odgovarajuća kombinacija čvrstoće i lomne žilavosti. Tako na primer, dok u 7075 maseni udeo gvožđa (Fe) i silicijuma (Si) iznosi do 0,90%, kod 7475 sadržaj istih je maksimalno 0,22%, zbog čega 7475 ima mnogo manje intermetalnih spojeva koji utiču na ubrzani rast prsline [9].

U T6 stanju, posle dozrevanja na najveću moguću čvrstoću, deblje ploče i otkivci od legura serije 7XXX podložni su naponskoj koroziji (SCC). Primera radi, ova vrsta korozije

neretko je prisutna kod 7075-T6, zbog čega je razrađeno mnoštvo termičkih i mehaničkih postupaka pomoću kojih se odstranjuju preduslovi za nastanak ovakvog tipa korozije [9].

U cilju sigurne primene u vazduhoplovstvu, ove legure se obično veštački predozrevaju posle rastvornog žarenja, da bi se uspostavila optimalna kombinacija čvrstoće, otpornosti na koroziju i žilavosti na lom. Poznati su raznorazni postupci predozrevanja u T7 stanju, koji najčešće snižavaju čvrstoću, ali znatno povećavaju otpornost prema naponskoj koroziji. Primera radi, kod 7075, predozrevano T73 stanje, prvenstveno namenjeno za smanjenje osetljivosti na naponsku koroziju, granicu razvlačenja snižava za oko 15%, ali istovremeno mnogostruko povećava otpornost prema naponskoj koroziji [9].

Radi poboljšanja otpornosti prema koroziji, gotovi delovi se neretko anodiziraju, pri čemu se oksidnom Al_2O_3 sloju na površini metala povećava debljina, koja može biti od 0,2 mm do 0,5mm.



Slika 21. Pozicija legura aluminijuma u odnosu na ostale materijale [41]

4. UTICAJ KOROZIJNE SREDINE NA STRUKTURNE I MEHANIČKE OSOBINE ALUMINIJUMSKIH LEGURA

Korozija u vazduhoplovnim konstrukcijama mahom podrazumeva degradaciju metala i legura, kao posledicu elektrohemijske reakcije sa okolnom sredinom, i kao takva zasniva se na zakonitostima elektrohemijske kinetike. Dodir metala sa drugom fazom, koja ima svojstva elektrolita, ključan je uslov njene pojave, pri čemu se na metalu stvara tanak sloj sa svojstvima elektrohemijskog dvosloja. Elektrohemijska korozija se javlja u vodi (tehničkoj i prirodnoj), vodenim rastvorima baza, kiselina i soli, u atmosferi i zemljištu. I pored toga što atmosfera nije elektrolit, korozija se u atmosferskim uslovima odvija u kondenzatu koji se, uzimajući u obzir vlažnost vazduha, stvara na metalnoj površini i ima efekat elektrolita. Ovde se svrstavaju svi primeri korozije u vlažnoj atmosferi [42].

Kakva je uloga prisustva, odnosno odsustva vlage na nastanak i širenje korozije, prikazuje slučaj odlično očuvanih ostataka lovačkog aviona „Curtiss P-40 Kittyhawk“ britanskog Kraljevskog vazduhoplovstva, pronađenih 2012. godine, u pustinji u Egiptu, 70 godina posle pada (slika 22) [43].



Slika 22. Ostaci aviona Curtiss P-40 Kittyhawk pronađeni u Sahari [43]

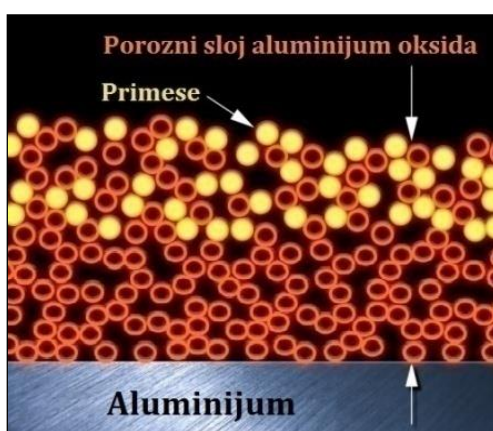
4.1. OPŠTE O KOROZIJI ALUMINIJUMA

Korozija u legurama aluminijuma je generalno lokalne prirode, i odvija se putem anodne i katodne reakcije. Osnovna anodna reakcija je rastvaranje metala (jednačina 1), a katodne reakcije su redukcija kiseonika (jednačina 2) i redukcija vodonika (jednačina 3) u kiselom rastvoru, kao u slučaju piting korozije.



Pojava korozije aluminijuma i legura aluminijuma bila je predmet mnogih istraživanja, u toku kojih se pasivnost aluminijuma prema većini vodenih rastvora i drugim agresivnim sredinama objašnjava nastajanjem zaštitnog filma. U toku anodne reakcije (jednačina 1) metal prelazi u jonsko stanje tako da je moguće, ili rastvaranje metala, ili direktno nastajanje filma. Razumljivo je da prekoračenjem proizvoda rastvorljivosti aluminijum hidroksida dolazi do taloženja, i da takav talog na površini koja korodira može da ima izvesnu zaštitnu ulogu, a u zavisnosti od prirode taloženja.

U vodi, ispod kritične temperature, između 60°C i 70°C, nastaje prvo amorfan film koji postepeno prelazi u bemit (γ - AlOOH ortorombičan), a zatim u bajerit (β - $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ monokliničan). Iznad kritične temperature nastaje samo bemit i to preko inicijalnog amornog filma. Aluminijum hidroksid, bajerit, bemit i pravi oksid, koje ne treba mešati sa produktima nastalim usled prekoračenja proizvoda rastvorljivosti, grade na površini aluminijuma sloj koji se zatim povećava dvostranom difuzijom reagujućih komponenti kroz oformljeni sloj. Dakle, proces formiranja filma i njegova zaštitna moć imaju bitan uticaj na korozione karakteristike aluminijumske površine i, konačno, sam film, iako proizvod korozije, svojim daljim razvijanjem sprečava proces korozije [44]. Sloj korozionih produkata koji se formira na površini aluminijuma nije homogen, nego je sačinjen od dva ili više slojeva pretežno tankog zaštitnog, barijernog filma, koji se formira neposredno uz površinu metala i debljeg poroznog, spoljnog sloja.



Slika 23. Formiranje zaštitnog filma na površini aluminijuma [45]

Zaštitni film dostiže veoma brzo maksimalnu debljinu koja uglavnom zavisi od temperature okoline, u vazduhu i u vodi. Za razliku od korozije na vazduhu, kod koje zaštitnu ulogu ima barijerni film, korozija aluminijuma u vodi zavisi od spoljnog, poroznog sloja. Ovaj zaključak proizilazi iz eksperimenata koji su potvrdili da i pored povećanja debljine barijernog filma ne dolazi do vidljive promene brzine korozije. Isto se može zaključiti na osnovu podataka da se brzina uniformne korozije aluminijuma u vodi smanjuje sa vremenom i da pri tome debljina spoljnog filma raste uz nepromenjenu debljinu barijernog sloja.

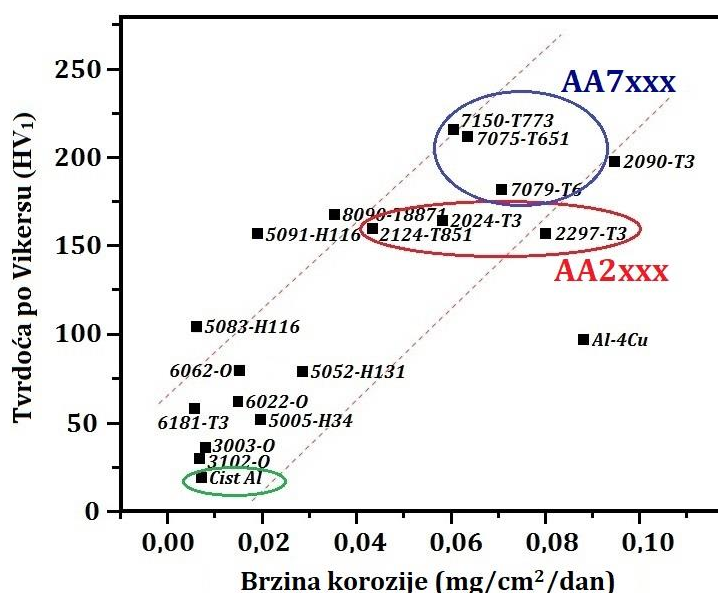
Prema tome, može se smatrati da efektivna debljina spoljnog sloja kontroliše brzinu kojom agens dolazi u dodir sa barijernim filmom, odnosno aluminijumom, pri čemu je moguće da barijerni film prelazi delom u poroznu formu.

U zavisnosti od prirode korozionog agensa, moguć je i slučaj dostizanja stanja kod koga je brzina korozije kao i debljina ukupnog filma, barijernog i spoljnog, konstantna. To stanje se

dostiže kada se uspostavi ravnoteža brzine rastvaranja spoljnog filma, pretvaranja barijernog filma u rastresit film i stvaranja novog barijernog zaštitnog filma na metalu. Opisana ravnoteža uspostavlja se uglavnom u agresivnim agensima. Prema tome, razlike u brzini korozije aluminijuma u vodi mogu poticati od različite rastvorljivosti spoljnog sloja korozionih produkata aluminijuma [44].

Na osnovu napred iznetog zaključuje se sledeće:

- Film korozionih produkata koji se formira na aluminijumu u kontaktu sa vodom sastoji se iz tankog, kompaktnog barijernog filma neposredno uz metalnu površinu i debljeg permeabilnog sloja, koji je na barijernom filmu.
- Barijerni film je amorfan, dok se permeabilni film sastoji od kristalnih hidratizanih oksida aluminijuma.
- Procesi kod uniformne korozije aluminijuma u vodi diktirani su spoljnim, permeabilnim filmom a ne barijernim filmom.
- Sastav vode utiče na brzinu korozije aluminijuma menjajući rastvorljivost i sastav spoljnog, permeabilnog filma.



Slika 24. Brzina korozije u odnosu na tvrdoću Al i legura aluminijuma [46]

4.2. VRSTE KOROZIJE ALUMINIJUMA I LEGURA ALUMINIJUMA

Kod korozije aluminijuma u vodi uglavnom se mogu razlikovati tri tipa korozije, i to: ravnomerna korozija, lokalizovana korozija, uključujući piting i međukristalna korozija [44].

4.2.1. Ravnomerna (uniformna) korozija

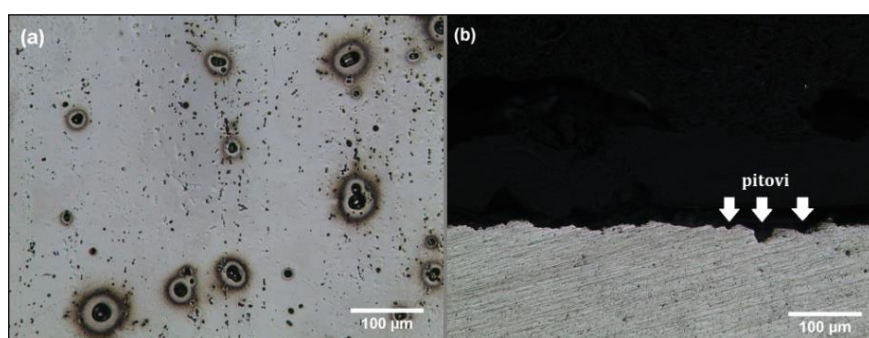
Ravnomerna korozija je najčešći tip korozije do koga dolazi u temperaturnom intervalu od 50°C do 250°C, i odlikuje se podjednako raspoređenim korozionim oštećenjima čitave površine aluminijuma. Međutim, pri mikroskopskom pregledu utvrđeno je da korozija ustvari nije potpuno ravnomerna, nego da se na ispitivanoj površini, koja je pokrivena tankim, skoro prozirnim korozionim produktom, mogu zapaziti na pojedinim izolovanim tačkama pukotine u zaštitnom filmu oko kojih nastaju manje količine korozionog produkta. Posle uklanjanja ukupnog korozionog produkta površina aluminijuma je lokalno napadnuta na velikom broju mesta. Tokom daljeg izlaganja, mesta lokalizovanog napada se ne povećavaju nego se aktiviraju

nove površine, tako da posle dovoljno dugog vremena izlaganja čitava površina podjednako „lokalno“ korodira, tj. mesta lokalizovanog napada su podjednako raspoređena po čitavoj površini.

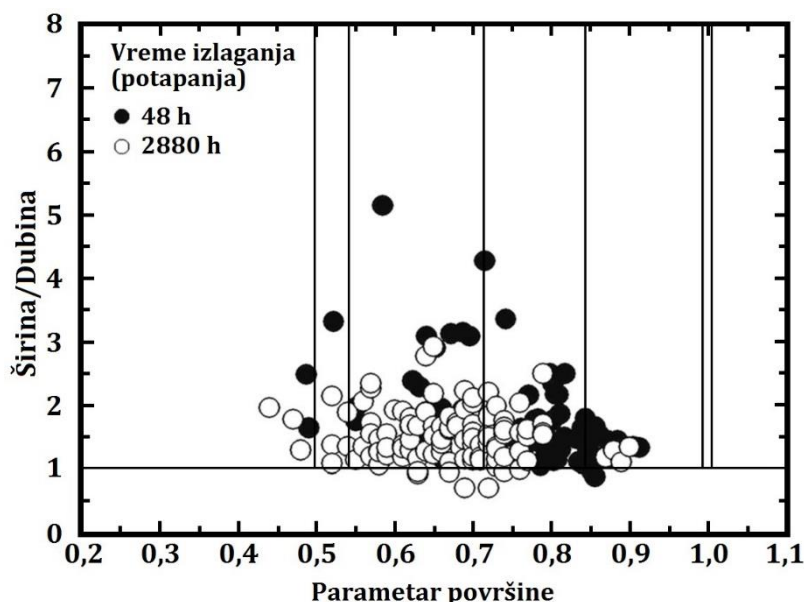
Uopšteno gledano, tokom vremena, kod ravnomernog tipa korozije ne dolazi do favorizovanja pojedinačno nastalih oštećenja, već se proces korozije dešava na čitavoj površini sa povremenim prekidima i ponovnom aktivacijom na pojedinim tačkama, što pri mikroskopskom posmatranju daje utisak ravnomerne korozije.

Kod ovog tipa korozije posmatrana je i pojava odvajanja prvobitno čvrsto prijanjajućeg filma od površine aluminijuma i prelaženje korozionih proizvoda u rastvor u obliku taloga. Ova pojava je zapažena posle perioda izlaganja dužeg od 2,5 godine, mada se posle toga nije utvrdilo povećanje brzine korozije.

4.2.2. Piting korozija



Slika 25. Mikrografska slika piting korozije čistog aluminijuma: (a) slika površine, (b) slika poprečnog preseka [47]

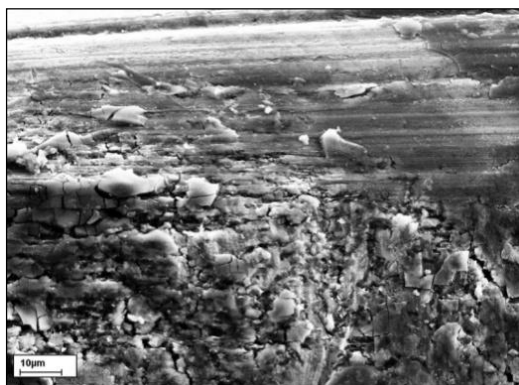


Slika 26. Distribucija pitova u čistom aluminijumu u zavisnosti od vremena izlaganja (potapanja) [47]

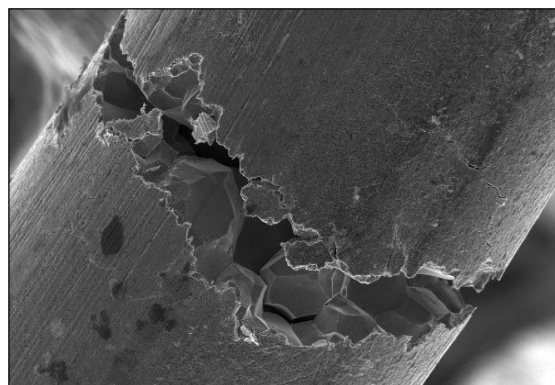
Na temperaturama nižim od 50°C uglavnom dolazi do nastajanja lokalne korozije u obliku pitinga, što je ujedno i najopasniji vid oštećenja koji nastaje na površinama aluminijuma. Piting korozija se formuliše kao ekstremni oblik lokalizovanog korozionog napada, pri kojem se stvaraju korozione jamice (pitovi). Utvrđeno je da do stvaranja pitova dolazi na mestima propadanja površinskog pasivnog filma i imaju tendenciju daljeg prodiranja u osnovni materijal.

4.2.3. Interkristalna (međukristalna) korozija

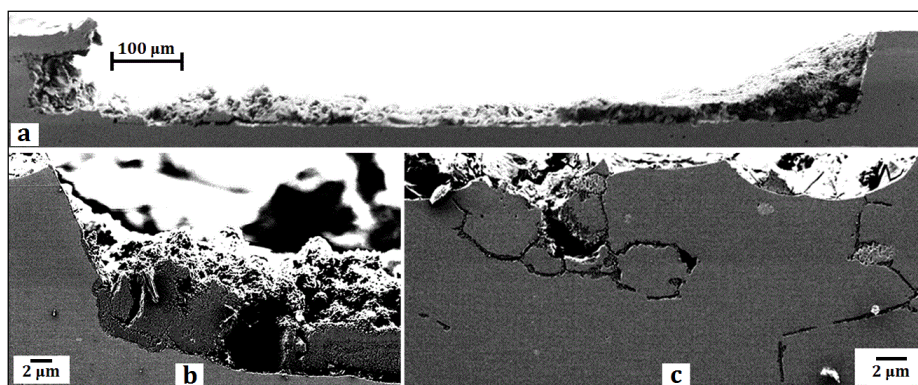
Interkristalna korozija kod aluminijuma zavisi od temperature i nastaje iznad 250°C, u vidu izrazito lokalizovanog napada po granicama kristalnih zrna. Ovo ima za posledicu intenzivno slabljenje mehančkih osobina aluminijuma koji je napadnut predmetnim tipom korozije.



Slika 27. Interkristalna korozija žice od Al legure [48]



Slika 28. Lom prouzrokovan interkristalnom korozijom [49]



Slika 29. Interkristalna korozija Al legure 2024-T3: (a) slika mesta korozionog napada sa produktima korozije; (b) produkti korozije; (c) interkristalna korozija [50]

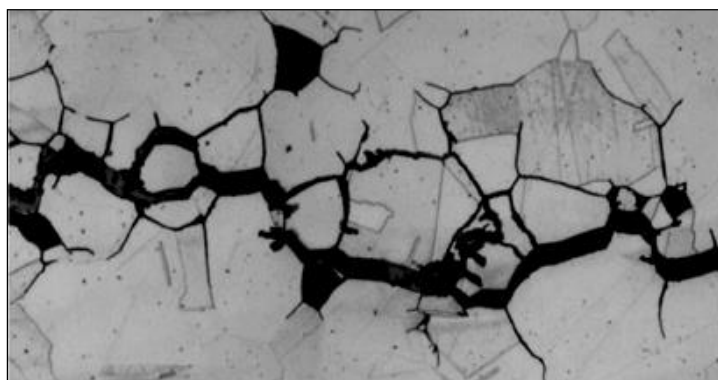
4.2.4. Naponska korozija

Naponska korozija (eng. *Stress-Corrosion Cracking – SCC*) je oblik destrukcije materijala pri kojem, kao posledica udruženog dejstva korozije i deformacija metala prouzrokovanih zaostalim naponima ili pod uticajem primenjenog napona, nastaju prsline, što je definicija zasnovana na ISO.

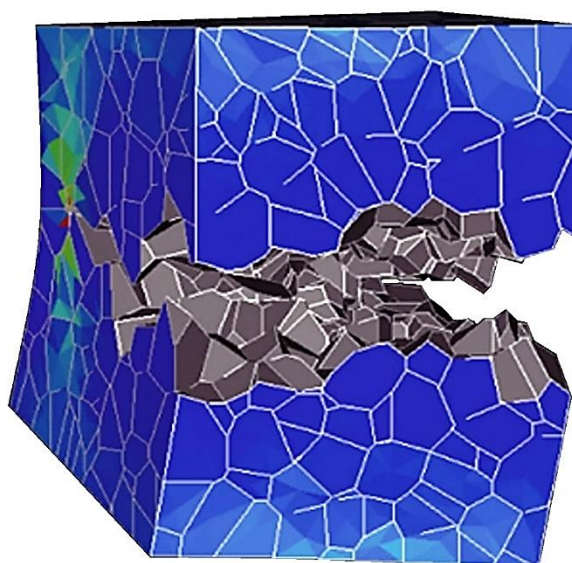
Naponska korozija je mehanizam odvijanja vremenski zavisnog rasta prsline, pri čemu su zadovoljeni potrebni elektrohemijski, mehanički i metalurški uslovi. U slučajevima kada na vrhu prsline dolazi do izdvajanja vodonika, kao proizvoda korozionih reakcija, rast prsline se odvija mehanizmom lokalne vodonične krtosti. Subkritičnim rastom prsline naziva se jedna od karakteristika pomenutih procesa, kada pri određenoj veličini prsline dolazi do brzog, iznenadnog loma. Druga karakteristika je da se prethodno navedeni procesi odigravaju mehanizmima koji su lokalizovani u zoni vrha prsline. Ovi procesi su obično osnovni uzročnik lomova tokom eksploatacije. Okruženja koja izazivaju naponsku koroziju su uglavnom vodena i mogu biti rastvori ili adsorbovani slojevi vlage. Naponska korozija se uglavnom odigrava pod uticajem posebnih jona koji su u korozionoj sredini, kao npr. Cl⁻ joni koji pobuđuju lom legura

aluminijuma. Najčešće otpočinje na mestima grešaka tipa prsline, koje se stvaraju pri zavarivanju, mašinskoj obradi, itd. Između ostalog, može nastati na površinskim oštećenjima nastalim za vreme procesa korozije, kao što je interkristalna korozija, piting, i slično. Formiranje prsline može da se odigrava po jednom mehanizmu, a dalji rast prsline po drugom mehanizmu. Na primer, obično se prsline stvaraju mehanizmom lokalnog anodnog rastvaranja, a njen dalji rast se odvija po mehanizmu lokalne vodonične krtosti [51].

Kod naponske korozije, prsline prate putanju između kristalnih zrna, što dovodi do prsline komplikovanog oblika. Slika 30 prikazuje prsline posmatranu u realnom materijalu, dok je slika 31 rezultat kompjuterske simulacije [52].



Slika 30. Prsline složenog oblika karakteristična za naponsku koroziju [52]



Slika 31. Trodimenzionalna vizuelizacija simulacije prsline.
(Boje predstavljaju jačinu lokalnog napona zatezanja.
Otvoravanje prsline je uveličano 100 puta) [52].

Jedna od tipičnih karakteristika SCC je složen oblik prsline (slika30). Metalni materijal se obično sastoji od kristalnih zrna čija veličina je oko 0,05 mm, a prsline prate prostor između ovih zrna u cik-cak obliku. U eksperimentima se može posmatrati samo dvodimenzionalni presek prsline, tako da se ne zna stvarni trodimenzionalni oblik, što otežava procenu tačnog zateznog napona koji deluje na prsline. Ukoliko se ovako složen oblik prsline može reprodukovati kompjuterskom simulacijom, može se identifikovati mehanizam koji generiše komplikovane oblike, a takođe može se videti trodimenzionalni oblik prsline, što bi mogao biti trag ka identifikaciji mehanizma SCC.

U slučaju prikazanom na slici 31, modeliran je materijal metala koji se sastoji od deset hiljada zrna, i u njemu je simuliran razvoj prslina izazvan distribucijom zateznog napona. U simulaciji je korišćen veoma pojednostavljeni model: prslina se razvija između zrna koja su pod najvećim zateznim naponom. Uprkos jednostavnosti modela, rezultujući oblik prslina vrlo dobro prikazuje bitne karakteristike prslina, posebno često grananje. Pošto je ovo grananje teško objasniti od strane intuitivnog modela distribucije napona, isto se pripisuje koroziji. Ova simulacija uzima u obzir ranije nevidljiv trodimenzionalni oblik prslina i reprodukuje komplikovano ponašanje prslina u svim pravcima, što rezultira integralnom prslinom, uključujući grane [52].

4.3. METODE ISPITIVANJA I OCENE OTPORNOSTI PREMA KOROZIJI

Ispitivanja korozione otpornosti, s obzirom na mesto izvođenja, mogu biti prirodna i laboratorijska, a metode ispitivanja kvantitativne i kvalitativne. U zavisnosti od vrste korozije i namene ispitivanja, bira se odgovarajuća metoda ispitivanja [53].

4.3.1. Prirodna ispitivanja

Prirodna ispitivanja traju dugo i vrše se u određenom korozionom okruženju, kao što su zemlja, voda, atmosfera, tehničke tečnosti i gasovi, prilikom skladištenja i transporta, kao i analizom sakupljenih podataka o stanju materijala tokom eksploatacije. U ovom slučaju, najzastupljenija vrsta korozije je atmosferska, i njena brzina zavisi od vremena i spoljnjih činilaca atmosfere.

Kako produkti korozije značajno utiču na proces atmosferske korozije, veoma je bitno ispitivanje njihovog faznog, kvalitativnog i kvantitativnog sastava. Fazna analiza vrši se metodom rentgenske difraktometrije, dok se kvalitativno-kvantitativna analiza produkata korozije vrši hemijskom analizom, Ože elektron spektroskopijom, skening elektronskom mikroskopijom, elektronskom i fotometrijskom analizom, i sl.

Kod ove vrste ispitivanja od velikog značaja je vizuelni pregled uzoraka pre, za vreme i posle izlaganja uticaju korozione sredine. Konačni vizuelni pregled se vrši po završetku ispitivanja, pre i posle odstranjivanja oformljenih čvrstih produkata korozije sa površine uzorka. Vizuelni pregled, uglavnom, dopunjavaju fotografije uzorka.

Pored vizuelnog pregleda, korodirani uzorak se analizira elektronskim mikroskopom, odnosno, vrši se snimanje morfologije produkata.

Konačno, vizuelni pregled potvrđuje mikroskopsko ispitivanje poprečnog preseka uzorka, u cilju utvrđivanja postojanja i dubine prodora piting, interkristalne i selektivne korozije i prslina usled naponske korozije. Mikroskopska snimanja, takođe, dopunjuju se fotografijama. Pored navedenog, oštećenja uzrokovana korozijom utvrđuju se raznim nerazarajućim metodama, kao što su penetrantske, radiografske, ultrazvučne, magnetske i elektromagnetske [53].

4.3.2. Laboratorijska ispitivanja

Kako prirodna ispitivanja uglavnom traju veoma dugo, neretko postoji potreba za ubrzanim laboratorijskim ispitivanjima, tokom kojih nastaju relativno brza koroziona razaranja. Ubrzanje procesa korozije se ostvaruje primenom agresivnih elemenata, povećavanjem temperature i vlažnosti, itd. U cilju dobijanja odgovarajućih analogija sa stvarnim korozionim ponašanjem, potrebno je rezultate laboratorijskih ispitivanja uporediti sa eksploatacionim podacima [54].

Za laboratorijsko ispitivanje korozivne otpornosti metala, koriste se sledeće metode [53]:

Metoda slane magle

Osnovna ideja ispitivanja metodom slane magle je ubrzanje korozionog procesa povećanjem temperature okoline i uvođenjem neutralnog rastvora natrijum hlorida (NSS), neutralnog rastvora natrijum hlorida sa dodatkom sirćetne kiseline (AASS) ili neutralnog rastvora sa dodatkom sirćetne kiseline i bakar hlorida (CASS). Izgled i princip rada komore za ovu metodu ispitivanja, takozvane slane komore, dat je na slici 32.

Nakon isteka planiranog vremena ispitivanja i obrade uzoraka, a u zavisnosti od masenog gubitka, proračunava se brzina korozije. Pored brzine korozije i istraživanja promene mehaničkih osobina, vrši se vizuelno ispitivanje površine i sprovodi metalografska analiza [53].

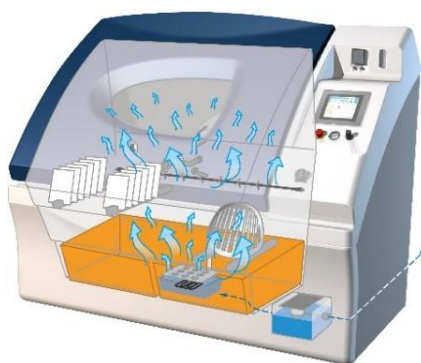


Slika 32. Izgled i princip rada slane komore

Metoda vlažne atmosfere

Koncept ispitivanja metodom vlažne atmosfere je ubrzanje procesa korozije povećanjem temperature i relativne vlažnosti vazduha, sa neprekidnim ili periodičnim kondezovanjem vlage.

Priprema komore i uzoraka, kao i pregled uzoraka pre, u toku i nakon ispitivanja, usaglašeni su sa određenim standardom [55], a postupak ocenjivanja korozivne otpornosti je identičan sa metodom slane magle. Komora za ispitivanje u vlažnoj atmosferi, takozvana vlažna komora, nalik je komori za ispitivanje slanom maglom [53].



Slika 33. Princip rada vlažne komore

Metoda sa SO₂ i CO₂

Ideja predmetne metode ispitivanja je ubrzanje korozionog procesa povećanjem relativne vlažnosti i temperature, pri delovanju određene koncentracije gasovitog SO₂ i CO₂, uz neprekidno ili periodično kondezovanje vlage [53,56].

Priprema komore i uzoraka, i pregled uzoraka pre, u toku i posle ispitivanja su bezmalo identični sa zahtevima za prethodne metode.

Metoda naizmeničnog uranjanja u rastvor NaCl

Metoda se bazira na naizmeničnom delovanju vazduha i rastvora NaCl na uzorak i utvrđivanju broja ciklusa do nastanka prvih žarišta i korozionih produkata.

Postupak ocenjivanja promena uzrokovanih korozijom je identičan sa ostalim metodama za ispitivanje korozije.

Metoda kontinualnog uranjanja u rastvor NaCl

Razlika u odnosu na metod naizmeničnog uranjanja je u tome što su u ovom slučaju uzorci određeno vreme neprekidno u rastvoru, nakon čega se vrši njihovo ocenjivanje po postupku koji je prethodno opisan.

Elektrohemijske metode

Elektrohemijske metode su veoma bitne metode za proučavanje mehanizma i kinetike opšte korozije. Uvezane su sa metodama za identifikaciju prirode i proizvodnju produkata korozije, i koriste se za razna koroziona ispitivanja [53].

Potencijal i struja su dve elementarne veličine koje odlikuju elektrohemijske reakcije. Odgovarajućim načinom se vrši merenje korozionog potencijala i njegove promene sa vremenom, snimanje zavisnosti promene potencijala u funkciji gustine struje i obrnuto, merenje impedanse elektrode, registrovanje krive punjenja, merenje struje galvanske korozione sprege i drugih parametara.

Elektrohemijske metode mogu biti stacionarne (galvanostatska, potenciostatska) i nestacionarne (galvanostatska, potenciostatska, kulonostatska, tehnika periodično i kontinualno promenljivog potencijala i tehnika faradejske impedanse).

4.3.3. Ispitivanja naponske korozije

Ispitivanja statički opterećenih glatkih uzoraka

Ispitivanja statički opterećenih glatkih uzoraka služe za definisanje maksimalno primenjivog naprežanja bez opasnosti od loma usled naponske korozije i za utvrđivanje efekta metalurških promena i promena sastava i koncentracije rastvora koji se koriste prilikom ispitivanja sklonosti prema naponskoj koroziji. Uglavnom se koriste pri različitim fiksnim nivoima naprežanja, pri čemu se vrši merenje vremena do loma uzorka u određenoj korozionoj sredini.

Prilikom ovakvih ispitivanja valja imati na umu da su formiranje i rast prsline, kao i završni lom uzorka nerazdvojni. Vreme do obrazovanja prsline zavisi od mnogo činilaca, kao što su predistorija legure ili stanje površine. Pod uslovom da u leguri postoje greške tipa prsline, vreme do nastanka loma je značajno kraće. Pojedina ispitivanja se sprovode pri konstantnoj deformaciji, i u tom slučaju se vrši merenje vremena do formiranja prve primetne prsline ili do loma [57].

Ispitivanja malom brzinom priraštaja sila zatezanja

Ispitivanja naponske korozije na ovaj način izvode se uz lagani prirast opterećenja ili deformacije na univerzalnoj mašini za ispitivanje zatezne čvrstoće (kidalici), sa glatkim uzorcima ili uzorcima sa zarezom, koji su u koroziono aktivnoj sredini.

U pitanju je metoda za kvalitativno utvrđivanje sklonosti raznolikih metala i legura prema naponskoj koroziji, koja se odlikuje brzim prikupljanjem rezultata. Pogodna je za proučavanje efekata metalurških faktora, kao što su termička obrada, struktura i zaostala naprezanja, ili efekata korozione sredine na podložnost legure naponskoj koroziji. Količnik izduženja do loma u korozionoj sredini i na vazduhu definiše se u odnosu na zateznu brzinu. Uzimajući u obzir da je korišćenjem velikih brzina zatezanja moguće izazvati mehanički lom pre uspostavljanja korozionih procesa, osnovni uslov koji se u ovom slučaju postavlja je mala brzina zatezanja uzorka. Sa druge strane, suviše male brzine zatezanja ne vode do nastanka naponske korozije, uzimajući u obzir da je brzina stvaranja pasivnog sloja na svežoj, koroziono aktivnoj površini na vrhu prsline veća od brzine njenog formiranja [57].

Ispitivanja metodama mehanike loma

Pretpostavka na kojoj se zasniva primena mehanike loma, u cilju ispitivanja naponske korozije, jeste da u materijalu postoji prslina, ili slična greška, te je stoga neophodno odrediti kritične uslove pod kojima predmetna prslina započinje svoj rast (iniciranje), kao i brzinu rasta iste (propagiranje). Osim od veličine primenjenog opterećenja, iniciranje i propagiranje prsline zavise i od dužine prsline i oblika konstrukcije. Ukoliko je faktor intenziteta napona na vrhu prsline K_I veći od kritične vrednosti K_{Isc} , tj. od kritičnog faktora intenziteta napona za rast naponsko korozione prsline, doći će do rasta prsline.

Da bi bilo moguće izračunati vreme do loma, potrebno je znati brzinu rasta prsline $v=da/dt$ u zavisnosti od faktora intenziteta napona K_I , a u dijapazonu intenziteta napona od K_{Isc} do K_{Ic} . Kriva brzine rasta prsline u funkciji od K_I može se posmatrati kroz tri faze. U prvoj fazi brzina rasta prsline je izuzetno zavisna od K_I . Kada je $K_I < K_{Isc}$, prslina ne raste, ili raste zanemarljivo malom brzinom. U drugoj fazi brzina rasta prsline takoreći je nezavisna od K_I , ali je stoga izuzetno naglašeno dejstvo korozione sredine i ispoljava se u pomeranju nivoa druge faze (platoa brzine) ka manjim ili većim vrednostima. U trećoj fazi v brzo raste sa povećanjem K_I , do kritične vrednosti K_{Ic} , pri kojoj nastaje brzi kvazistatički lom.

Glavna povoljnost ispitivanja metodama mehanike loma je u direktnom dobijanju kvantitativnih podataka o podložnosti legure naponskoj koroziji, preko K_{Isc} , ili $v=da/dt$, koje je moguće upotrebljavati, na primer, za proračune radnog veka konstrukcija. Ključni preduslov za primenu mehanike loma je da je debljina uzorka za ispitivanje veća od minimalne vrednosti, koja se određuje u skladu sa žilavosti loma na vazduhu K_{Ic} i naponom tečenja $R_{0,2}$ legure koja se ispituje [57].

4.4. REZULTATI RANIJIH ISPITIVANJA KOROZIONOG PONAŠANJA LEGURA ALUMINIJUMA U RAZLIČITIM KOROZIONIM SREDINAMA

Uticaoj strukture (režima termičke obrade) i temperature korozione sredine na naponsku koroziju aluminijumske legure Al-Zn-Mg-Cu metodom male brzine zatezanja i metodom mehanike loma [58]

Primena aluminijumskih legura visoke čvrstoće ograničena je njihovom sklonošću prema naponskoj koroziji. Odgovarajućim odabirom sastava legure i vrste obrade, moguće je u priličnoj meri umanjiti sklonost legure prema naponskoj koroziji, a zadržati mehanička svojstva na visokom nivou. Za legure aluminijuma tipa Al-Zn-Mg-Cu, čije se ojačavanje vrši termičkim taloženjem, otpornost prema naponskoj koroziji moguće je promeniti u širokom rasponu, zavisno od izabrane termičke obrade [58].

U ovom slučaju vršeno je ispitivanje uticaja temperature rastvora na brzinu rasta prsline, na platou kinetičkog dijagrama $\log v - K_I$. Definisana je energija aktiviranja procesa. Uzimajući

u obzir da se najveći broj lomova pod dejstvom naponske korozije odigrava na visokim temperaturama, razumevanje uticaja temperature na kinetiku rasta prsline je veoma značajno.

Za potrebe ispitivanja naponske korozije korišćeni su uzorci od Al-Zn-Mg-Cu legure, koja je hemijskog sastava kao što je prikazano u tabeli 8.

Tabela 8. Hemijski sastav legure (maseni %)

Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Zr	Fe	Si	Al
7,20	2,15	1,46	0,28	0,16	0,12	0,12	0,05	Ostalo

Uzorci za ispitivanje su termički obrađeni prema sledećim režimima:

- Homogenizaciono žarenje na temperaturi od 460°C u trajanju od 1h, zatim kaljenje u vodi sobne temperature, i na kraju termičko taloženje na temperaturi od 120°C u trajanju od 24 h (jednostepeno termičko taloženje, odnosno režim A).
- Homogenizaciono žarenje na temperaturi od 460°C u trajanju od 1h, zatim kaljenje u vodi sobne temperature, i na kraju termičko taloženje, najpre na temperaturi od 100°C u trajanju od 5 h, a potom na temperaturi od 160°C u trajanju od 5 h (dvostepeno termičko taloženje, odnosno režim B).

U tabeli 9 prikazana su mehanička (zatezna) svojstva legure nakon navedenih režima termičke obrade.

Tabela 9. Zatezna svojstva legure u različitim termičkim stanjima

Režim termičke obrade	$R_{0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A_5 (%)
A	560	620	10,50
B	560	600	9,50

Ispitivanja su vršena *Metodom male brzine zatezanja* na uzorcima isečenim iz presovanih šipki, u poprečnom pravcu, cilindričnog oblika $\varnothing 6$ mm, dužine 30 mm, izrađenim u skladu sa standardom ASTM E8. Šipke iz kojih su isecani uzorci dobijene su na sledeći način: kontinualno livenje trupaca, homogenizaciono žarenje na temperaturi od 465°C u trajanju od 18 h, mašinska obrada i presovanje trupaca u šipke dimenzija 80x30 mm.

Ispitivanja su obavljena na kidalici INSTRON, na vazduhu standardnom brzinom zatezanja $v=0,125$ mm/s, i u korozionoj sredini (rastvor 2%NaCl + 0,5% Na₂CrO₄, pH=3) zateznom brzinom $v=0,0125$ mm/min. Identifikovana je kriva naprezanje/deformacija, pomoću koje su utvrđeni podaci ($R_{0,2}$, R_m , A_5) neophodni za određivanje kriterijuma otpornosti prema naponskoj koroziji.

Uticaj temperature na naponsku koroziju ispitan je *Metodom mehanike loma*. Za predmetno ispitivanje korišćeni su dvostruki konzolni uzorci sa zavrtnjem (DCB uzorak) sečeni u S-L orijentaciji (kratki poprečni pravac), s obzirom da su aluminijumske legure najpodložnije naponskoj koroziji u kratkom poprečnom pravcu.

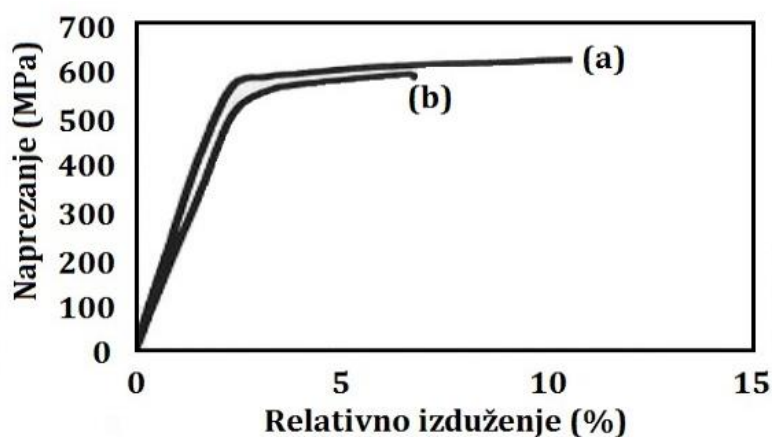
Da bi mehanika loma bila primenjena, neophodno je da je debljina uzorka koji se ispituje veća od određene minimalne debljine, koja omogućava 3-osno stanje naprezanja u vrhu prsline. Predmetna debljina se izračunava na osnovu poznate žilavosti loma (K_{IC}) i granice razvlačenja ($R_{0,2}$) legure, korišćenjem jednačine $B_{min}=2,5(K_{IC}/R_{0,2})^2$. Ostale dimenzije uzorka određene su na osnovu vrednosti debljine uzorka $B=25$ mm.

Na uzorke je, mehaničkim postupkom, uneta inicijalna prslina, a zatim je izmerena dužina predmetne prsline. Ispitivanja su sprovedena na različitim temperaturama, sa potpunim potapanjem uzoraka u 3,5% NaCl. Na osnovu dužina prsline, izmerenih tokom ispitivanja, izvršeno je izračunavanje brzine rasta prsline.

Tabela 10. Rezultati ispitivanja naponske korozije metodom male brzine zatezanja na vazduhu standardnom brzinom zatezanja i u korozionoj sredini (rastvor 2%NaCl + 0,5%Na₂CrO₄, pH=3) zateznom brzinom $v=0,0125$ mm/min

Režim termičke obrade	Koroziona sredina	A ₅ (%)		I _{sc} (%)	
A	vazduh	8,6	9,2	-	-
		9,2		-	
		9,8		-	
	rastvor	7,0	5,6	24,0	39,0
		4,8		48,0	
		5,1		45,0	
B	vazduh	7,2	8,8	-	-
		9,4		-	
		9,9		-	
	rastvor	8,7	8,7	1,0	7,3
		10,3		0,0	
		7,0		21,0	

Rezultati ispitivanja metodom male brzine zatezanja, za uzorke termički obrađene po režimu A (jednostepeno taloženje) i režimu B (dvostepeno taloženje), prikazani su u tabeli 10.



Slika 34. Krive naprezanje/deformacija dobijene prilikom ispitivanja naponske korozije legure (režim A) metodom male brzine zatezanja, na vazduhu (a) i u rastvoru (b)

Na slici 34 predstavljene su krive naprezanje/deformacija, dobijene ispitivanjem metodom male brzine zatezanja, (a) na vazduhu i (b) u rastvoru. Primetno je da je u slučaju kada je vazduh koroziona sredina izduženje pri kojem dolazi do loma uzorka veće nego u rastvoru, što je posledica odvijanja naponske korozije.

Struktura legure nastala dvostepenim termičkim taloženjem značajno je stabilnija pod dejstvom naponske korozije, nego struktura nastala jednostepenim termičkim taloženjem.

Jednostepenim termičkim taloženjem stvara se struktura legure sa GP zonama i η' talogom, što rezultira stvaranjem legure maksimalne čvrstoće. Nakon presecanja GP zona i manjih čestica η' faze (planirano klizanje), uzrokovanog lokalnom plastičnom deformacijom na

vrhu prsline, dolazi do gomilanja dislokacija na granicama zrna na vrhu prsline, što za posledicu ima lokalno povećanje napreznja, te je neophodno manje spoljašnje napreznje za započinjanje procesa naponske korozije.

Kada je u pitanju dvostepeno termičko taloženje, u toku prve faze pri nižoj temperaturi formiraju se GP zone, na kojima se, u toku druge faze, izdvajaju sitnije čestice η' taloga, koje se u izvesnoj meri preobraze u stabilnu η fazu. Uzimajući u obzir homogenost lokalne plastične deformacije na vrhu prsline (turbulentno klizanje), ne dolazi do presecanja čestica stabilne η faze, tako da dislokacije bivaju ravnomerno raspoređene unutar zrna. Na ovaj način sprečava se lokalno povećanje napreznja na granicama zrna, što za posledicu ima visoku naponsko-korozionu otpornost legure.

Tabela 11. Rezultati ispitivanja naponske korozije metodom male brzine zatezanja, pri različitim brzinama zatezanja

Režim termičke obrade	Koroziona sredina	Brzina zatezanja (mm/s)	A_5 (%)	I_{sc} (%)
A	vazduh	0,1250	9,20	-
	rastvor	0,0125	5,60	39,0
		0,250 + 0,0125 + 0,250	5,80	37,0
B	vazduh	0,1250	8,80	-
	rastvor	0,0125	8,70	11,0
		0,250 + 0,0125 + 0,250	7,70	12,5

Pri promenljivoj brzini zatezanja uzorka, u početnoj i završnoj fazi ispitivanja brzine su značajno veće, te je vreme ispitivanja kraće nego kada je u pitanju zatezanje konstantnom brzinom. Indeksi sklonosti prema naponskoj koroziji ($I_{sc}=1-A_{sc}/A$), dobijeni primenom oba postupka, približne su (tabela 11).

Tabela 12. Rezultati ispitivanja naponske korozije metodom mehanike loma u rastvoru 3,5% NaCl, pH=7

Režim termičke obrade	Temperatura (°C)	v_{pl} (mm/dan)
A	3	0,156
	23	1,24
	43	4,12
	63	11,4
	83	30,2

Zaključak

- Kada je u pitanju uticaj režima termičke obrade na otpornost prema naponskoj koroziji, legura Al-Zn-Mg-Cu je nakon dvostepenog taloženja znatno otpornija nego nakon jednostepenog taloženja. Jednostepenim taloženjem postižu se malo bolja mehanička svojstva.
- Metoda male brzine zatezanja karakteriše se selektivnošću i kraćim vremenom ispitivanja. Sa druge strane, predmetna metoda iziskuje korišćenje skupocene specijalne aparature.

-
- Metoda utemeljena na principima mehanike loma je podesna za pribavljanje kvantitativnih podataka, ali, istovremeno, iziskuje upotrebu uzoraka posebnih dimenzija, tako da je primenjiva isključivo na poluproizvodima ili gotovim proizvodima iz kojih je moguće napraviti tako dimenzionisane uzorke.

5. PRIMENA MEHANIKE LOMA NA PROCENU INTEGRITETA VAZDUHOPLOVNE KONSTRUKCIJE

5.1. OPŠTE O MEHANICI LOMA

Postojanje prslina u inženjerskim konstrukcijama nemoguće je sprečiti. Sve ozbiljniji zahtevi za što manjim utroškom materijala i energije uslovljavaju projektovanje konstrukcija sa skromnim rezervama sigurnosti. S obzirom na pomenuto, tačnije kvantitativne procene sklonosti konstrukcije prema svim mogućim nedostacima u sve većoj meri bivaju deo postupka sprečavanja nastanka loma kod najrazličitijih tipova nosećih elemenata i konstrukcija. Praktične regulative projektovanja pomoću kojih se izbegavaju ozbiljna koncentrisanja napona, kao i opravke ili zamene elemenata i sklopova sa prslinom, u dosadašnjoj praksi pokazale su se kao delotvorne u sprečavanju razornih defekata. Sa druge strane, došlo je do pojave dva nova činioca koji u sadašnje vreme onemogućavaju primenu ovog konzervativnog koncepta.

Kao prvo, unapređene procedure ispitivanja bez razaranja omogućavaju pronalaženje i prepoznavanje nedostataka koji bi ranije ostali neprimećeni.

Kao drugo, postojanje prslina ne mora obavezno da implicira da je konstrukcijski element već na isteku ili pri isteku životnog veka, te je, shodno tome, moguće balansirati između opravke ili zamene konstrukcijskog elementa sa greškom i verovatnoće da će dalja upotreba predmetnog elementa prouzrokovati oštećenje. U skladu sa navedenim, a u cilju omogućavanja kvantitativnog vodstva u praktičnom smislu, osmišljen je koncept „dopušteno oštećenje“, koji je značajno utemeljen na principima mehanike loma.

Mehanika loma je grana mehanike čija je oblast interesovanja istraživanje problema prslina i uticaja istih na stanje materijala i konstrukcija. Izvorno definisana kao mehanika prslina, nastala je na početku XX veka na osnovu radova C.E. Inglis-a o koncentraciji napona i A.A. Griffith-a o brzini oslobađanja energije, a 50-tih godina XX veka, uspostavljanjem faktora intenziteta napona i njegove kritične vrednosti, G.R. Irwin utemeljio je linearno elastičnu mehaniku loma (LEML). Zahvaljujući prvim značajnijim objašnjenjima lomova nastalih na brodovima klase „Liberty“ i mlaznim avionima „Comet I“, mehanika loma je postigla prve ozbiljne učinke. Daljim razvojem ove naučne discipline, obuhvaćeno je njeno proširenje na elasto-plastičnu oblast analizom plastične zone ispred vrha prslina i uspostavljanjem adekvatnih parametara – *Otvaranja vrha prslina* i *J integrala*. U skladu sa navedenim, razvoj mehanike loma u ostalim značajnim sferama, kao što su zamor, puzanje i korozija [59], bio je zagarantovan i neminovan.

Kao što je napred navedeno, šezdesetih godina prošlog veka mehanika loma je doživela buran razvoj, da bi već deceniju kasnije postalo jasno da izučavanje loma samog po sebi nije

osnovni zadatak ove discipline, nego, naprotiv, sprečavanje loma. Time su postavljeni temelji nove naučne discipline, integriteta konstrukcija.

Primer radikalnog zaokreta u inženjerskoj praksi je prelaz sa konvencionalnog koncepta projektovanja komponenta koje funkcionišu u okolnostima zamora (takozvani „safe-life“ koncept, u sklopu kojeg se definiše ostatak veka komponenta bez prsline) na koncept projektovanja sa sigurnošću od loma (takozvani „fail-safe“). Dakle, sakupljena znanja o rastu zamorne prsline su stvorila uslove da se, sa optimalnom izvesnošću, odredi ostatak veka komponenta sa prslinom i izvrši procena da li su iste pouzdane za rad do sledeće inspekcije. Drugim rečima, komponenta je projektovana tako da, u slučaju prisustva prsline manje od najmanje veličine koju je moguće otkriti metodama ispitivanja bez razaranja, vek komponente (vreme rasta prsline od „fiktivne“ veličine do kritične veličine za krti lom) bude veći od vremenskog intervala do sledeće kontrole [60].

Primeru radi, analizom primene prethodno opisanog koncepta na diskove mlaznih motora [79], zaključeno je da bi prilikom održavanja 23 mlazna motora, u vremenskom periodu od 20 godina, bila ušteđena 1 milijarda USD u poređenju sa prvobitnim konceptom koji podrazumeva zamenu diskova nakon isteka unapred određenog radnog veka. Osnovni preduslov za ovakvu analizu bilo je činjenično stanje da je od hiljadu zamenjenih diskova, samo na jednom potvrđeno postojanje prsline dužine 0,75 mm [60].

Drugim rečima, prihvaćanje neizbežnosti prisustva prsline i sličnih nedostataka i potrebe analize dejstva istih na integritet konstrukcije, primarna je promena koju je mehanika loma unela u inženjersku praksu. Interpretacija navedenog data je na slici 35, na kojoj je predstavljen takozvani trougao mehanike loma, sačinjen od tri promenljive veličine: napona, veličine greške i žilavosti loma. Primeru radi, kritična veličina prsline može biti određena ukoliko je, na osnovu opterećenja i geometrije konstrukcije izračunat napon, a ispitivanjem utvrđena žilavost loma materijala od kojeg je konstrukcija napravljena.



Slika 35. Trougao mehanike loma

Primena mehanike loma ograničena je dostupnošću informacija, stanjem materijala, delovanjem okoline i opterećenjima konstrukcije. Kada je u pitanju statičko opterećenje treba razgraničiti stanje materijala koje se tumači kao linearno-elastično od stanja kada se ne može ignorisati njegova plastičnost.

Prvi slučaj podrazumeva primenu linearno-elastične mehanike loma (LEML), dok se u drugom, zavisno od oblika plastičnog tečenja koriste razne verzije elasto-plastične mehanike loma (EPML). Kada je u pitanju dinamičko opterećenje, neophodno je napraviti razliku između

linearno-elastičnog i elasto-plastičnog stanja materijala, pri čemu je zamor, kao specifični instrument rasta prsline, od naročitog značaja [60].

5.2. PRIMENA MEHANIKE LOMA NA VAZDUHOPLOVNIM KONSTRUKCIJAMA

U skladu sa problematikom ugrožavanja integriteta strukture vazduhoplovnih konstrukcija koje su u eksploataciji u dužem vremenskom periodu, a posebno onih koje su odradile značajan broj radnih ciklusa poletanje–sletanje, poslednjih godina temeljno se prilazi problemu zamora vazduhoplovnih konstrukcija. Kako je radni vek rebrastih panela prepoznat kao specifičan problem, navedeni paneli su postali predmet velikog broja eksperimentalnih i numeričkih studija [61].

U vazduhoplovnim konstrukcijama rebrasti paneli su integralni delovi noseće oplata trupa i krila. Predmetni paneli najčešće se spajaju zakovičastim spojem, odrađenim u više linija zakovica. Do danas je sproveden veliki broj najrazličitijih eksperimentalnih i numeričkih proučavanja integriteta strukture zakovičastih spojeva, što je za posledicu imalo povećanje radnog veka rebrastih panela u vazduhoplovnim konstrukcijama [62]. Na ukupan radni vek rebrastih panela izloženih cikličnim opterećenjima utiče čitav spektar raznoraznih činilaca, od kojih je jedan nesumljivo i naprezanje pod uticajem komponente savijanja. Istraživanjem je ustanovljeno da je relativan napredak prsline (engl. *Crack Growth Rate*) kod rebrastih panela sa izraženom komponentom savijanja značajno veći u odnosu na rebraste panele kod kojih je sekundarno savijanje slabije. Radni vek rebrastih panela krila aviona izrađenih u integralnom obliku, iz jednog dela ili zavarivanjem, proučen je u [63], pri čemu je inicijalna prslina locirana u središtu panela ili na mestu vara.

Radni vek rebrastog panela sa prslinama, u slučaju kada je na mestu prsline čitavo rebro u prekidu, do sada je proučavan eksperimentalno i numerički upotrebom metode konačnih elemenata, pri čemu su korišćeni elementi ljuske [64]. Navedenim istraživanjem je dokazano da zatezna komponenta naprezanja pod uticajem savijanja značajno ubrzava rast prsline.

5.2.1. Posledice loma kod vazduhoplovnih konstrukcija

Kao što je već prethodno navedeno, u rebrastim panelima vazduhoplovnih konstrukcija moguće su pojave oštećenja tipa prsline, i ista nastaju pod dejstvom cikličkih eksploatacionih opterećenja. Glavno ciklično opterećenje u vazduhoplovnim konstrukcijama uzrokovano je presurizacijom putničke kabine. Sprovedenjem eksperimenata i simulacija ustanovljeno je da se, pored membranskog naprezanja, u rebrastim panelima pojavljuje i dopunska komponenta naprezanja nastala pod uticajem savijanja. Na strani panela na kojoj ima pozitivan iznos, komponenta savijanja znatno uvećava vrednost faktora inteziteta naprezanja, čiji rast ubrzava relativni napredak prsline i na taj način skraćuje radni vek panela, odnosno čitave vazduhoplovne konstrukcije. Katastrofalni udesi vazduhoplovnih konstrukcija uzrokovani oštećenjima nastalim pod dejstvom zamora značajno su uticali na razvijanje praktičnih znanja o ranom otkrivanju različitih nedostataka i sprečavanju nastanka sličnih nesreća. Tokom XX veka zabeležen je određen broj katastrofalnih udesa vazduhoplovnih konstrukcija, kao posledica zamora rebrastih panela [61].

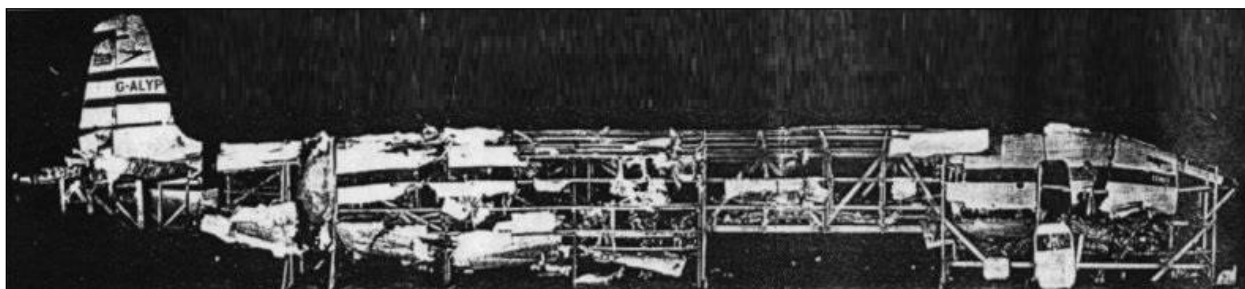
Avion De Havilland Comet, koji je uveden u upotrebu 1952. godine, bio je prvi mlazni putnički avion (slika 36). Sa putničkom kabinom pod pritiskom i smanjenom bukom za vreme leta, avion Comet je vreme putovanja na relaciji New York – London skratio za 4 sata.

U januaru i aprilu 1954. godine, avioni Comet G-ALYP i G-ALYY tokom leta su se raspali, pri čemu je izgubljen veliki broj života.



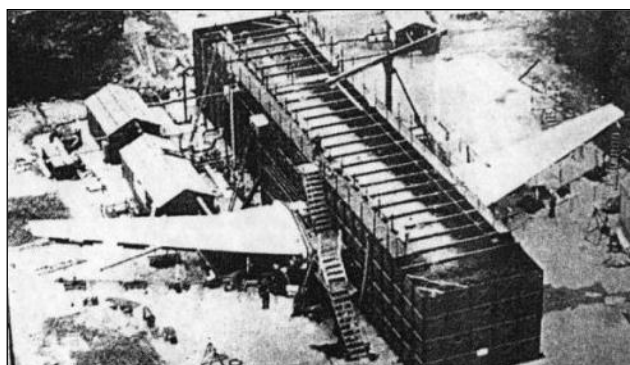
Slika 36. Avion De Havilland Comet G-ALYP [65]

Proučavanja i analize ostataka strukture prvog palog aviona De Havilland Comet G-ALYP (slika 37), pokazali su da je do razvoja prslina pod uticajem zamora metalnog materijala došlo u neposrednoj okolini ADF prozora postavljenog na prednjem delu plafona kabine (slike 39 i 40). Vremenom je došlo do širenja predmetne prslina i razvoja iste u veliku pukotinu, koja je prouzrokovala lokalni lom konstrukcije i havariju [61].



Slika 37. Rekonstrukcija olupine aviona De Havilland Comet G-ALYP [66]

Za potrebe istrage, a u cilju ustanovljavanja uzročnika katastrofa aviona De Havilland Comet G-ALYP i G-ALYY, realizovana su obimna i detaljna istraživanja, uključujući i presurizaciju na avionu Comet G-ALYU koji je bezbedno prizemljen. Kako bi se šteta nastala raspadom konstrukcije svela na minimum, istraživanja su se vršila u bazenu, pod vodom (slika 38).



Slika 38. Comet G-ALYU u ispitnom bazenu [66]



Slika 39. Oštećenje trupa na ispitivanom modelu Comet G-ALYU [66]

Do trenutka istrage, avion je odradio 1.231 ciklus presurizacije. Posle 1.825 ciklusa ispitnog presurizovanja putničke kabine došlo je do havarijskog oštećenja, odnosno loma. Istraživanja su ustanovila da je do formiranja prslina došlo na uglovima prozora i izlaza u slučaju opasnosti, i iste su se širile skoro aksijalno po trupu (slika 39) [61].



Slika 40. Deo trupa aviona De Havilland Comet G-ALYP izložen u Muzeju nauke u Londonu [67]

Oštećenje oplata na avionu Boeing 737, američke avio kompanije Aloha airlines, koje se dogodilo 28. aprila 1988. godine, nedvosmisleno je doprinelo stvaranju svesti o starenju vazduhoplova. Ovaj avion je pretrpeo veoma ozbiljnu štetu prouzrokovanu eksplozivnom dekompresijom tokom leta (slika 41). Naime, jedan veliki segment gornjeg dela trupa aviona, dok je leteo na 8.000 m iznad zemlje, doslovno se otkinuo napravivši veliku rupu u putničkoj kabini [68].



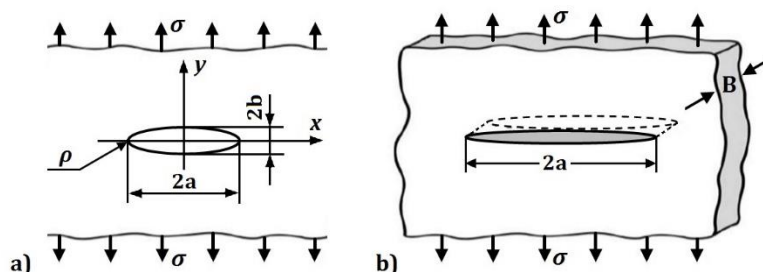
Slika 41. Simulacija havarije aviona Boeing 737 Aloha Airlines Flight 243 [69]

U preostaloj strukturi vazduhoplova, na nekoliko preklopnih spojeva oplata trupa aviona, u rupama gornjeg reda zakovica, otkriveno je više prslina nastalih usled zamora materijala (70).

Izveštaj Nacionalnog odbora za bezbednost saobraćaja, sačinjen nakon završetka istrage 1989. godine, odgovornost za incident je pripisao programu održavanja i otkrivanja oštećenja od korozije. Ranije, 1981. godine, sličan avion je doživeo udes sa više od stotinu poginulih. Istrage su ukazale na postojanje mehanizama oštećenja oplata trupa usled zamora materijala potpomognutog korozijom.

5.3. TEORIJSKE OSNOVE LINEARNO ELASTIČNE MEHANIKE LOMA (LEML)

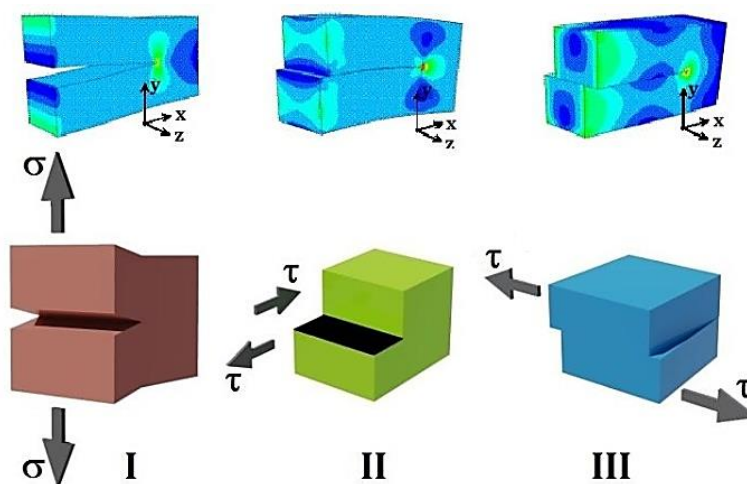
U cilju prvog približavanja, grešku tipa prsline moguće je zameniti otvorom eliptičnog oblika, sa dužom osom $2a$ i kraćom osom $2b$ (slika 42a). U slučaju delovanja opterećenja σ normalno na dužu osu, odnosno duž y ose, i pod pretpostavkom da je debljina ploče jedinična i beskonačna, σ ujedno predstavlja napon u preseku dovoljno udaljenom od otvora.



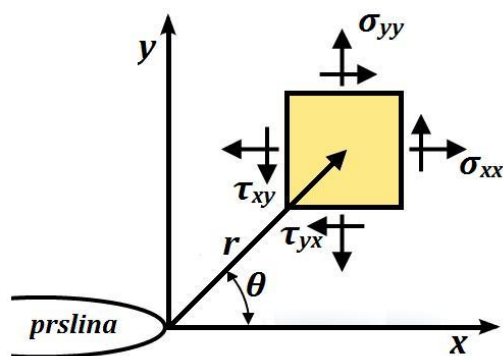
Slika 42. Grifitov problem: a) otvor eliptičnog otvora, b) prslina [56]

Za veoma uzak otvor – prslinu, kao granični slučaj, pretpostavka je da je poluprečnik vrha prsline ρ jednak razmaku između atoma u rešetki b_0 .

$$\sigma_{max} \cong 2 \sqrt{\frac{a}{b_0}} \sigma \quad (5.1)$$



Slika 43. Oblici razvoja prsline i formiranja površina loma (I – cepanje; II – klizanje površina prsline u istoj ravni; III – smicanje površina prsline u različitim ravnima) [72,73]



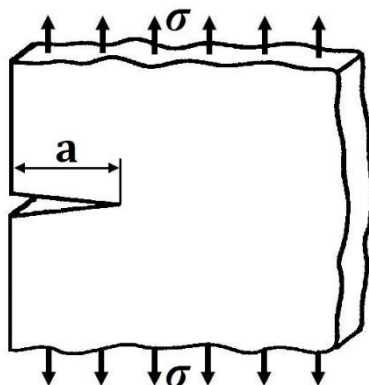
Slika 44. Koordinatne ose oko vrha prsline [59]

Za razliku od tela sa beskonačnim dimenzijama, kod kojeg je koeficijent Y isključivo u funkciji vrste i položaja prsline, kod tela sa konačnim dimenzijama predmetni koeficijent, pored navedenog, zavisi i od odnosa dužine prsline a i dimenzije tela, npr. širine W , a/W .

Tako na primer, za ivičnu prslinu na beskonačnoj ploči (slika 45) važi izraz:

$$K_I = 1,12\sigma\sqrt{\pi a} \quad (5.2)$$

gde 12%-no povećanje K_I uzima u obzir veće otvaranje ivične prsline, s obzirom na manju geometrijsku ograničenost u odnosu na centralnu prslinu,



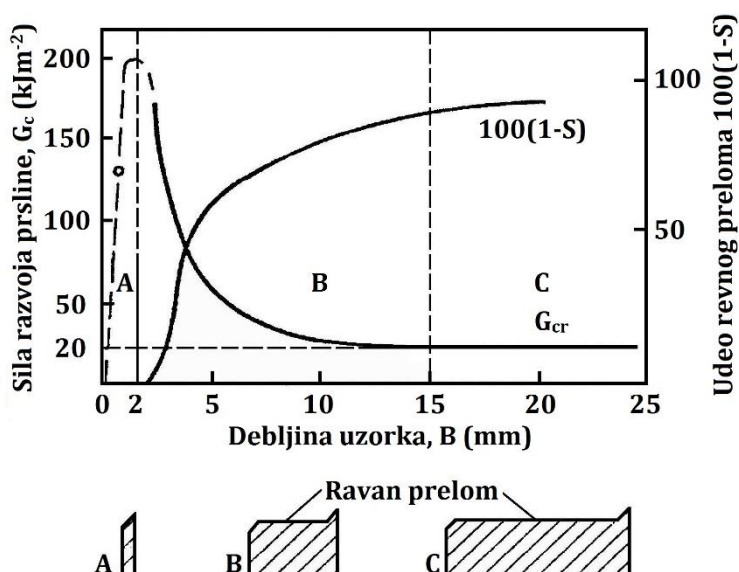
Slika 45. Ivična prslina u beskonačnoj zateznoj ploči [59]

Za ivičnu prslinu na konačnoj ploči važi sledeći izraz:

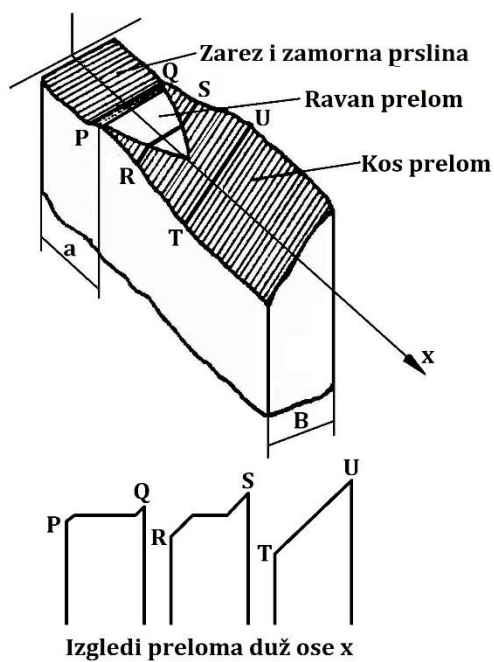
$$K_I = Y(a/W)\sigma\sqrt{\pi a} \quad (5.3)$$

gde a predstavlja dužinu prsline, W širinu ploče, a

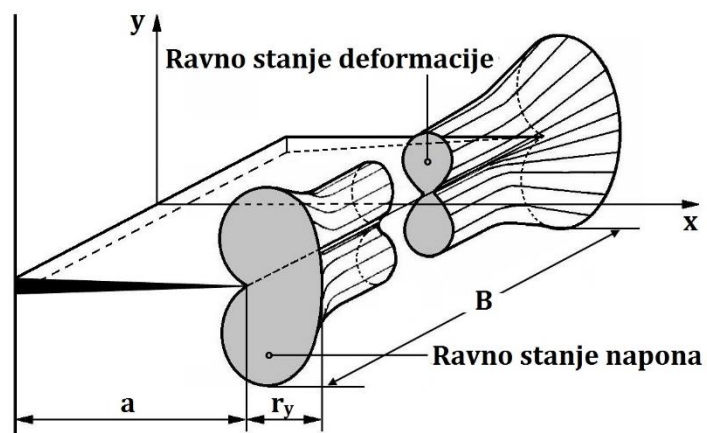
$$Y(a/W) = 1,12 - 0,26(a/W) + 10,52(a/W)^2 - 21,66(a/W)^3 - 30,31(a/W)^4$$



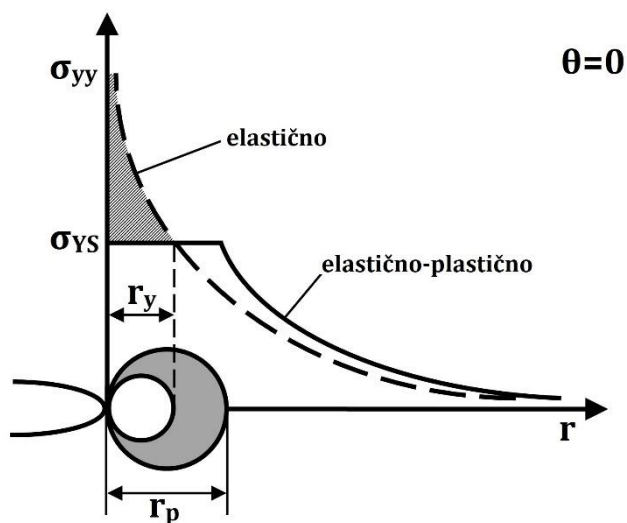
Slika 46. Žilavosti loma i udeo ravnog preloma u odnosu na debljinu uzorka, šematski prikaz [59]



Slika 47. Izgled površine preloma pri prelaznom obliku loma [59]

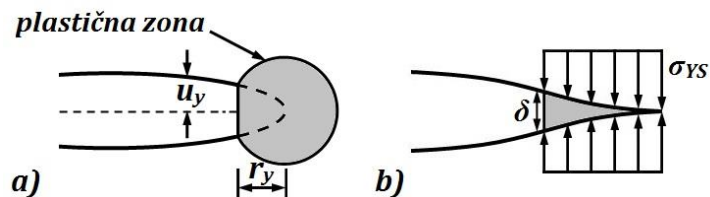


Slika 48. Plastične zone ispred vrha prsline [59]

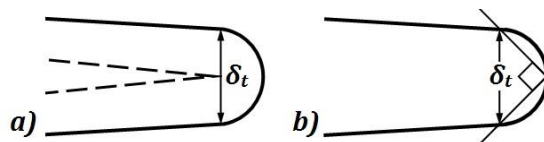


Slika 49. Naponsko stanje oko vrha prsline, elasto-plastično ponašanje materijala [59]

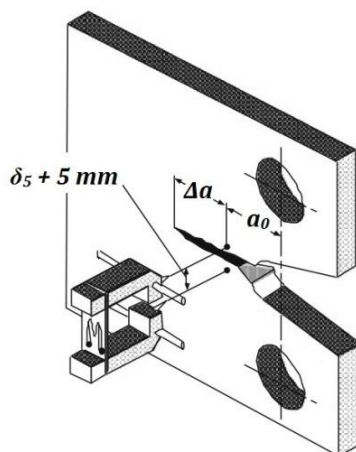
5.4. TEORIJSKE OSNOVE ELASTO-PLASTIČNE MEHANIKE LOMA



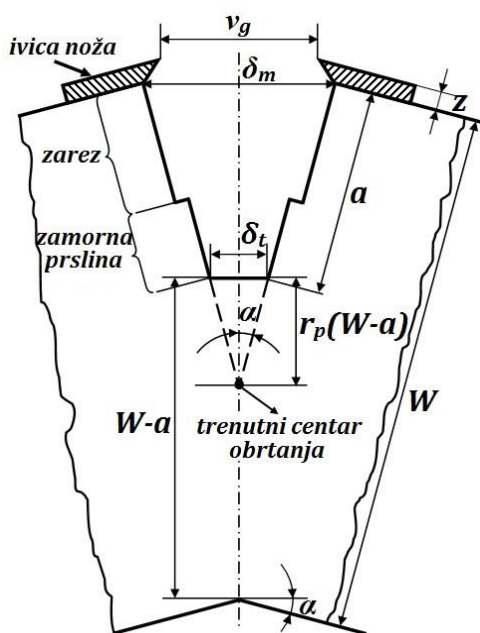
Slika 50. Modeli otvaranja prsline
a) Irvinov model; b) Dagdejlov model trake popuštanja [59]



Slika 51. Definicije CTOD
a) rastojanje lica prsline na mestu vrha prsline; b) presek sa otvorom 90° [59]



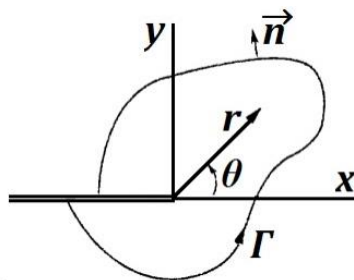
Slika 52. Određivanje otvaranja vrha prsline $\delta_5=CTOD$ [80]



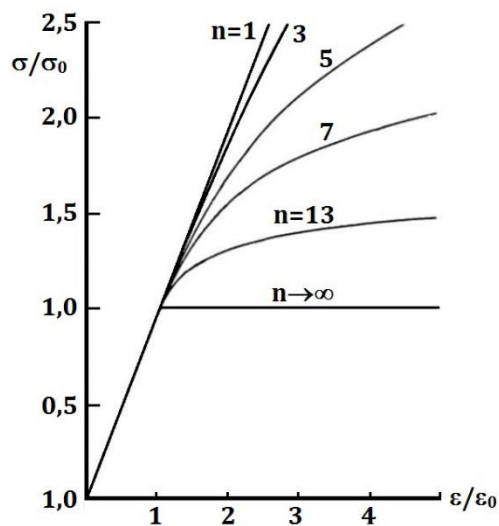
W – širina epruvete
 a – dužina prsline
 α – ugao savijanja
 z – debljina noževa
 r_p – radijus centra obrtanja
 v_g – otvaranje noževa
 δ_m – otvaranje usta prsline – **CMOD** (Crack Mouth Opening Displacement)
 δ_t – otvaranje vrha prsline,

$$\delta_t = \frac{K^2(1 - v^2)}{2\sigma_{YS}E} + \frac{r_p(W - a_0)v_g}{r_p(W - a_0) + a_0 + z}$$
 za debljine uzorka do 50 mm

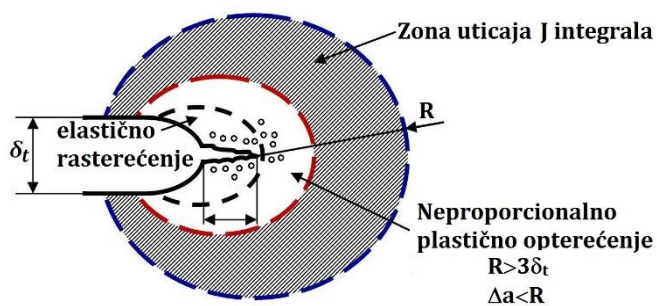
Slika 53. Geometrijske zavisnosti za određivanje CTOD pri ispitivanju uzorka na savijanje [59]



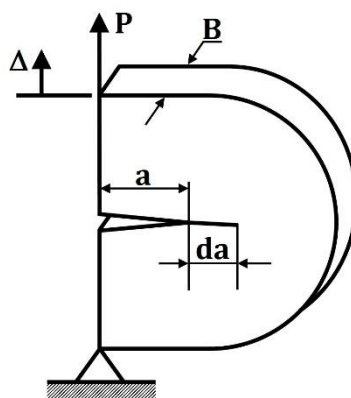
Slika 54. Putanja integracije za J integral [59]



Slika 55. Ramberg-Osgudova relacija [59]



Slika 56. Uticaj J integrala na procesnu zonu loma [59]



Slika 57. Telo sa ivičnom prslinom [59]

5.5. PRIMENA MEHANIKE LOMA NA PROCENU INTEGRITETA

5.5.1. Primena linearno elastične mehanike loma

Kako je već pisano, korišćenje linearno elastične mehanike loma – LEML je zasnovano na faktoru intenziteta napona, K_I , koji, kao prvo, reprezentuje opterećenje i geometrijske karakteristike konstrukcije, uzimajući u obzir oblik i veličinu prsline, a kao drugo, njegova kritična vrednost, takozvana žilavost loma, K_{IC} , reprezentuje stanje materijala. U skladu sa energetskim kriterijumom Grifita, koji se svodi na poređenje brzine rasta prsline i otpornosti materijala na rast prsline, primenjuju se sledeće zavisnosti [81]:

$K_I \leq K_{IC}$ – nema ugrožavanja integriteta konstrukcije, odnosno

$K_I > K_{IC}$ – krti lom pod dejstvom nestabilnog rasta prsline.

U najjednostavnijim slučajevima faktor intenziteta napona izračunava se koristeći jednačinu:

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

Za mnoštvo jednostavnijih geometrija i opterećenja važe približna analitička rešenja za faktor intenziteta napona, tj. za bezdimenzioni geometrijski parametar Y , koja je moguće pronaći u literaturi [81,83]. U slučaju složenijih geometrija, analitička rešenja se neretko mogu dobiti kombinacijama prethodno pomenutih jednostavnijih rešenja [84], dok je u slučajevima kompleksnih geometrija i potrebe za egzaktnim rešenjima, nužna upotreba numeričkih ili eksperimentalnih metoda. U nastavku rada predstavljena su neka od približnih analitičkih rešenja.

Prslina na kružnom otvoru (slika 58a)

Prslina na kružnom otvoru je od posebnog značaja za vazduhoplovne konstrukcije sa velikim brojem zakivaka. Otvor kružnog oblika uzrokuje koncentraciju napona, tako da je napon u tački A tri puta veći u odnosu na nominalni napon σ . Za prsline male dužine ($L \ll R$) predmetni slučaj se svodi na ivičnu prslinu u zategnutoj ploči, i faktor intenziteta napona za udaljeni napon 3σ se izračunava primenom sledeće jednačine [81]:

$$K = 1,12(3\sigma)\sqrt{\pi L} \quad (5.4)$$

Polukružna ivična prslina (slika 58b)

Ovaj tip prsline moguće je posmatrati kao kombinaciju ivične prolazne prsline i kružne delimično prolazne prsline, te je faktor intenziteta napona moguće predstaviti na sledeći način [68]:

$$K = (1,12)^2 \left(\frac{2}{\pi}\right) \sigma\sqrt{\pi a} \quad (5.5)$$

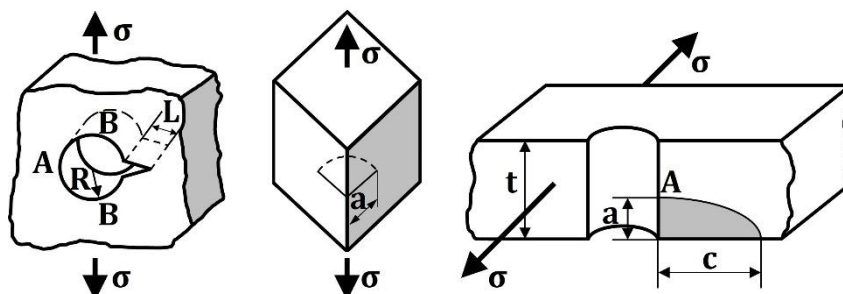
Pri čemu $(1,12)^2$ služi za korekciju dve slobodne površine [81,84].

Polueliptična ivična prslina na kružnom otvoru (slika 58c)

Maksimalna vrednost faktora intenziteta napona:

$$K = 1,12(3\sigma) \frac{\sqrt{\pi a}}{Q} \sqrt{\sec\left(\frac{\pi a}{2t}\right)} \quad (5.6)$$

gde su: 1,12 korekcija za slobodnu površinu, 3σ koncentracija napona, Q korekcija za eliptičnu prslinu (zavisno od $a/2c$), $\sqrt{\sec(\pi a/2t)}$ korekcija za konačnu širinu ploče za relativno velike količnike a/t [81,84].



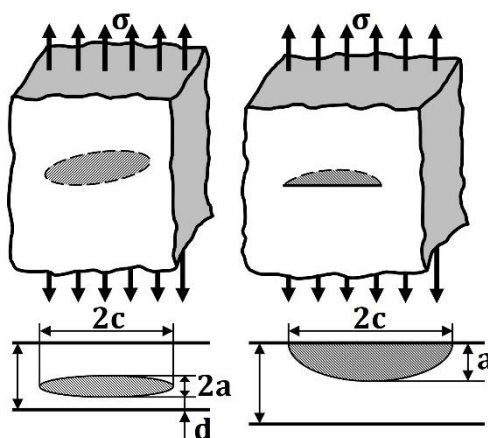
Slika 58. Tipične delimično prolazne prsline [81]

Delimično prolazne prsline (slika 59)

Delimično prolazne prsline dele se na površinske i unutrašnje (slika 59). Pored opisanog modela određivanja faktora intenziteta napona kombinacijom jednostavnijih geometrija, za delimično prolazne prsline mogu se koristiti „analitička” rešenja, koja se dobijaju fitovanjem rezultata proračuna primenom metode konačnih elemenata [81].

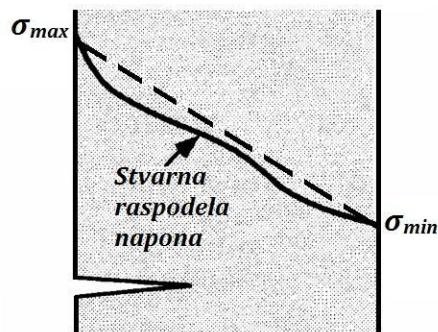
$$K_I = (\sigma_m + H\sigma_b) F \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (5.7)$$

gde su: Q parametar oblika, F i H parametri koji zavise od a/c , a/t i Φ , kao i od širine ploče, σ_m i σ_b zatezna i savojna komponenta napona. Karakteristične primere određivanja F i H moguće je pronaći u literaturi [81].



Slika 59. Delimično prolazne prsline [81]

Ovakva rešenja predviđena su za slučaj linearne raspodele napona, gde se zatezni i savojni napon određuju na sledeći način: $\sigma_m = (\sigma_{min} + \sigma_{max})/2$, $\sigma_b = (\sigma_{min} - \sigma_{max})/2$, pri čemu su: σ_{min} i σ_{max} minimalni i maksimalni napon u preseku (slika 60).

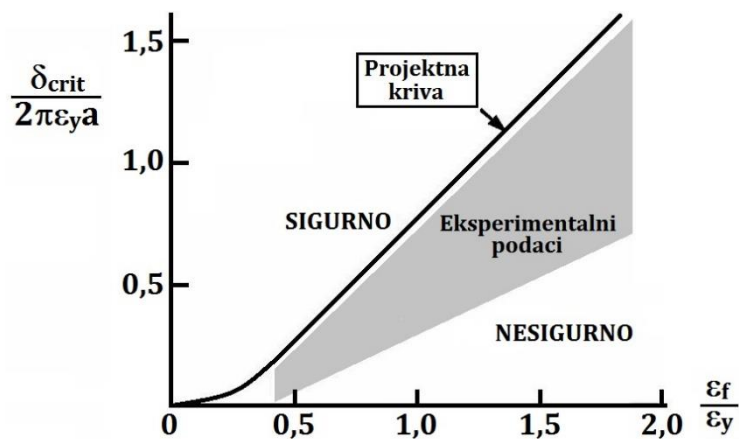


Slika 60. Raspodela napona [81]

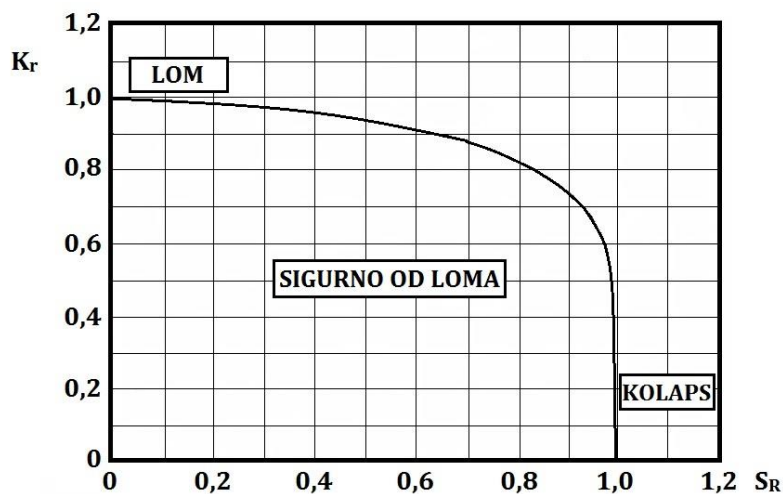
Kod linearne analize, primarni naponi (kao rezultat spoljnjih opterećenja i momenata) i sekundarni naponi (kao posledica uticaja neravnomernog zagrevanja i hlađenja, na primer naponi zaostali od zavarivanja) tretiraju se na identičan način, te je ukupni faktor intenziteta napona prost zbir primarnih i sekundarnih [81]:

$$K_I^{ukupno} = K_I^p + K_I^s \quad (5.8)$$

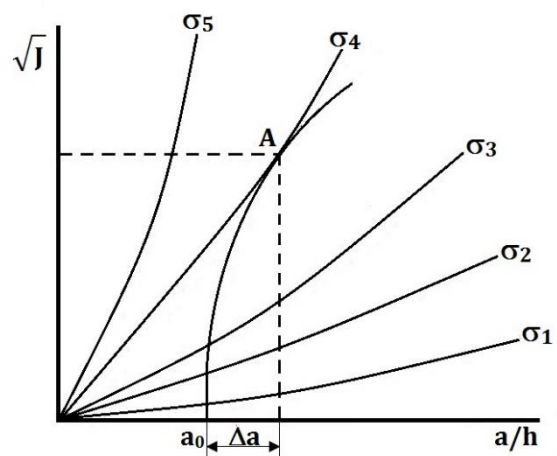
5.5.2. Primena elasto-plastične mehanike loma



Slika 61. Projektana CTOD kriva [81]



Slika 62. Dijagram analize loma [81]



Slika 63. Poređenje krivih sile rasta prsline i J-R krive [81]

6. PRIMENA METODE KONAČNIH ELEMENATA (MKE) U MEHANICI LOMA ZA ANALIZU PRSLINE

6.1. UVOD

Primena metode konačnih elemenata – MKE (eng. *Finite Element Method – FEM*) je od posebnog značaja u mehanici loma, kao naučnoj disciplini. Predmetna metoda je dala ogroman doprinos kod dizajniranja nosećih elemenata kompleksnih geometrijskih oblika. Osnovna pogodnost ove metode je da se na temelju unapred određene geometrije, mehaničkih osobina materijala, zatim pozicije, oblika i dimenzija inicijalne prsline može definisati radni vek konstrukcije. Modelovanje prsline primenom klasične MKE je egzaktno, ali izuzetno komplikovano sa stanovišta modelovanja prsline koja se razvija unutar strukture. Svaki novonastali front prsline zahteva generisanje nove mreže konačnih elemenata, što prilično usložnjava već izuzetno složenu postojeću strukturu mreže. Prema tome, neophodno je iznova generisati mrežu u okolini vrha prsline, kao i usitniti istu u cilju dobijanja što preciznijih rezultata. Ponovno generisanje mreže vrši korisnik programskog paketa, što u priličnoj meri zahteva veoma visok stepen stručnosti projektanta u procesu formiranja predmetne mreže.

Sa druge strane, pojavljivanje tzv. proširene metode konačnih elemenata – PMKE (eng. *Extended Finite Element Method – XFEM*), dalo je inovativne rezultate u rešavanju pomenutih problema. Uprošćavanjem mreže konačnih elemenata u zoni prsline, omogućavajući neovisnost mreže od ostatka geometrije, ovaj metod olakšava prikaz prsline. Korisnik generiše mrežu na ispitnom 3D modelu, i u strukturu unosi inicijalne prsline. Pri svakom pojedinačnom formiranju novog fronta prsline, vrši se automatsko generisanje nove mreže konačnih elemenata.

Prema tome, prvenstveno je neophodno definisati naponsko stanje strukture pod spoljašnjim opterećenjem (sa odgovarajuće određenim graničnim uslovima), a zatim odrediti lokaciju, oblik i geometriju prsline. Na osnovu navedenog moguće je definisati faktore intenziteta napona K_I , K_{II} i K_{III} , odnosno *J-integrale*, tj. parametre mehanike loma.

Simuliranje rasta prsline u strukturi je zasnovano na takozvanom „postepenom” postupku, što znači da je sačinjen od niza koraka. U svakom koraku se izračunavaju trenutni parametri za trenutnu dužinu prsline. U svakom sledećem koraku, upotrebom podataka iz prethodnog, izračunavaju se novi parametri mehanike loma.

Na primer, proširena metoda konačnih elemenata (*XFEM*) je implementirana u softverski paket *ABAQUS* i pruža mogućnost analiziranja razvoja 3D prsline unutar strukture. Istovremeno, u ponudi je čitav spektar parametara, među kojima su raznorazne tehnike generisanja mreže, uprošćavanje modela simetričnih struktura, rad sa sklopovima, rad sa 2D modelima itd., što rezultira dobijanjem raspodele faktora intenziteta napona (ili *J-integrala*) duž fronta prsline, za svaki pojedinačno generisani front.

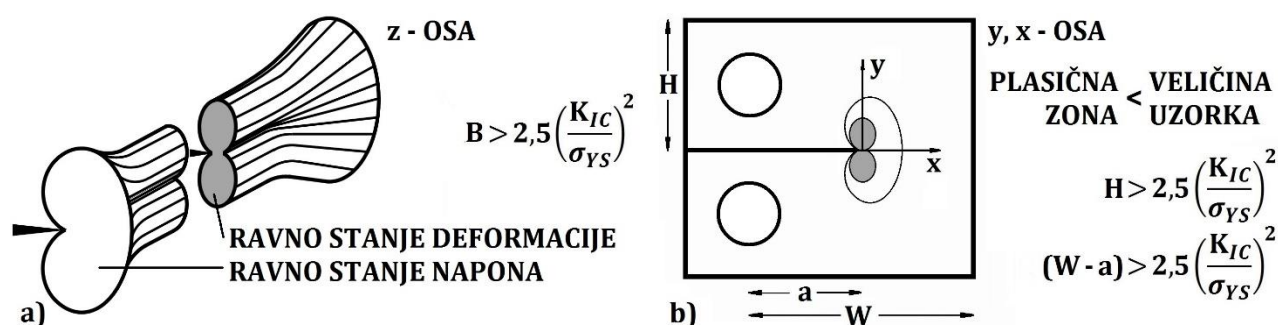
6.2. 3D PRORAČUNI PLASTIČNIH ZONA ISPRED VRHA PRSLINE METODOM KONAČNIH ELEMENATA

Za merenje lomne žilavosti materijala, K_{IC} , potrebno je zadovoljiti određene kriterijume koji garantuju da su ispunjene pretpostavke LEML i da u vrhu prsline dominira ravanska deformacija. Prema konvencijalnom konceptu, ispred vrha prsline razvija se plastična zona koja se prostire duž fronta prsline čitavom debljinom uzorka u tzv. obliku „pseća kost“, koja podrazumeva ravno stanje deformacije (RSD) unutar uzorka i ravno stanje napona (RSN) na površini uzorka. Razmatranjem plastičnih zona ispred vrha prsline u odnosu na dimenzije uzorka za testiranje, napred pomenuti kriterijumi rezultiraju dobro poznatim zahtevom minimalne veličine test uzoraka. Naročito, kriterijum dominantnog RSD zahteva debljinu uzorka dovoljno veliku da se delovi prsline koji su direktno ispred i u blizini površine uzorka mogu zanemariti u odnosu na delove prsline duž sredine uzorka (dimenzija uzorka u z pravcu, slika 64). Prema standardima ASTM E 399 [86] i ESIS P2 [87], ovo je slučaj kada je $B > 2,5(K_{IC}/\sigma_{YS})^2$. Prema tome, osnovni kriterijum za stvaranje uslova RSD je da je plastična zona ispred vrha prsline dovoljno mala u poređenju sa dimenzijama uzorka, odnosno u poređenju sa visinom H i dužinom uzorka $(W-a)$ (slika 64). Prema standardima, ovo je slučaj kada je $H > 2,5(K_{IC}/\sigma_{YS})^2$ i $(W-a) > 2,5(K_{IC}/\sigma_{YS})^2$.

Ovo poglavlje predstavlja proračun stvarnog oblika plastične zone ispred vrha prsline duž fronta prsline čitavom debljinom uzorka [88]. Dobijeni rezultati ukazuju na određene razlike između numerički proračunate plastične zone i konvencijalnog oblika plastične zone, tzv. „pseća kost“.

6.2.1. Numerički proračuni

Proračuni su izvedeni na CT uzorku izrađenom od legure aluminijuma 7075. Za ovu leguru izmerene su sledeće karakteristike: $K_{IC}^{LT} = 30 \text{ MPam}^{1/2}$ i napon tečenja $\sigma_{GY} = 533 \text{ MPa}$. U skladu sa kriterijumom minimalne debljine uzorka, $B_{min} = 7,9 \text{ mm}$, proračuni su izvršeni na CT uzorcima širine $W = 50 \text{ mm}$ sa dovoljno velikom debljinom [88].

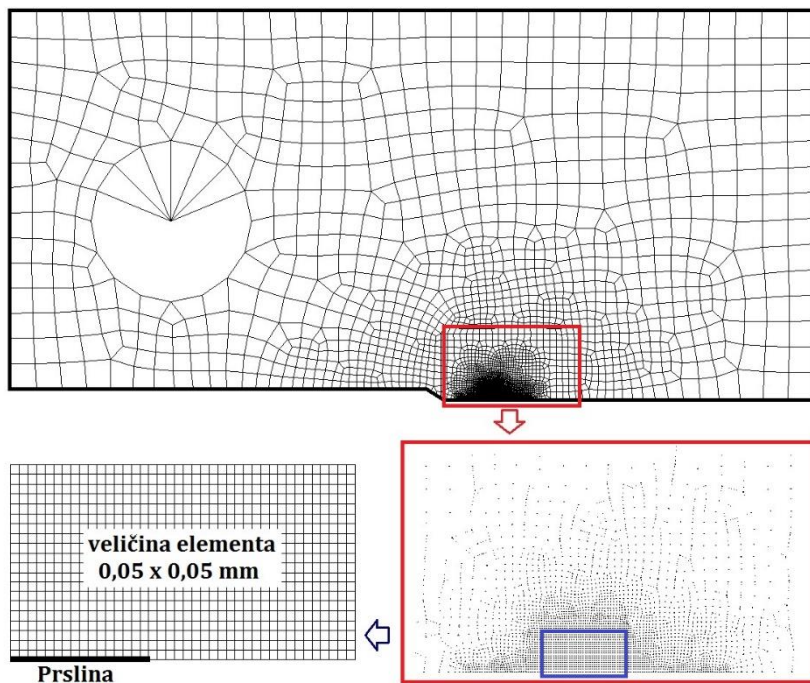


Slika 64. Kriterijumi i model „pseća kost“ sa izvedenom minimalnom veličinom uzorka potrebnom za određivanje lomne žilavosti K_{IC} [88]

Za uzorke sa ovakvim dimenzijama stvarna debljina uzorka, B , varira u osam koraka, u veoma velikom rasponu, od daleko ispod ($B = 0,1 \text{ mm}$) do daleko iznad ($B = 50 \text{ mm}$) minimalne debljine uzorka. Proračuni se izvode za uzorke pod opterećenjem opisanim faktorom inteziteta napona $K_I = K_{IC}$.

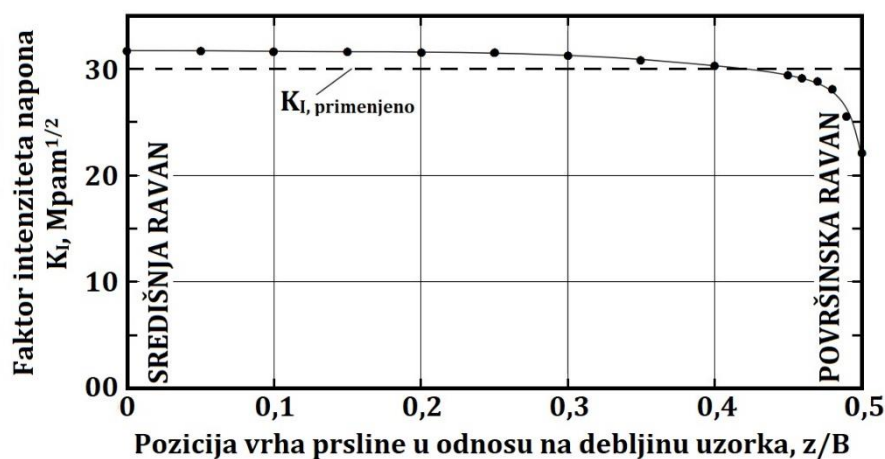
Za pojednostavljenje linearno elastičnog pristupa primenom metode konačnih elemenata korišćen je programski paket *ABAQUS*. Izabrani su trodimenzionalni nesingularni 8-čvorni elementi (u blizini frontalne oblasti prsline). Diskretizacija uzorka izvršena je automatski

pomoću I-DEAS generatora mreže. U blizini vrha prsline korišćeni su kvadratni elementi veličine 0,05 mm, dok je u područjima udaljenim od vrha prsline veličina elemenata mreže povećana do 5 mm (slika 65). U pravcu z-ose (debljina uzorka) sukcesivno su dodavani listovi elemenata u cilju modeliranja povećanja debljine uzorka. Za uzorke srednje debljine, prema tome, dobijaju se sistemi sa 100.000 stepeni slobode [88].



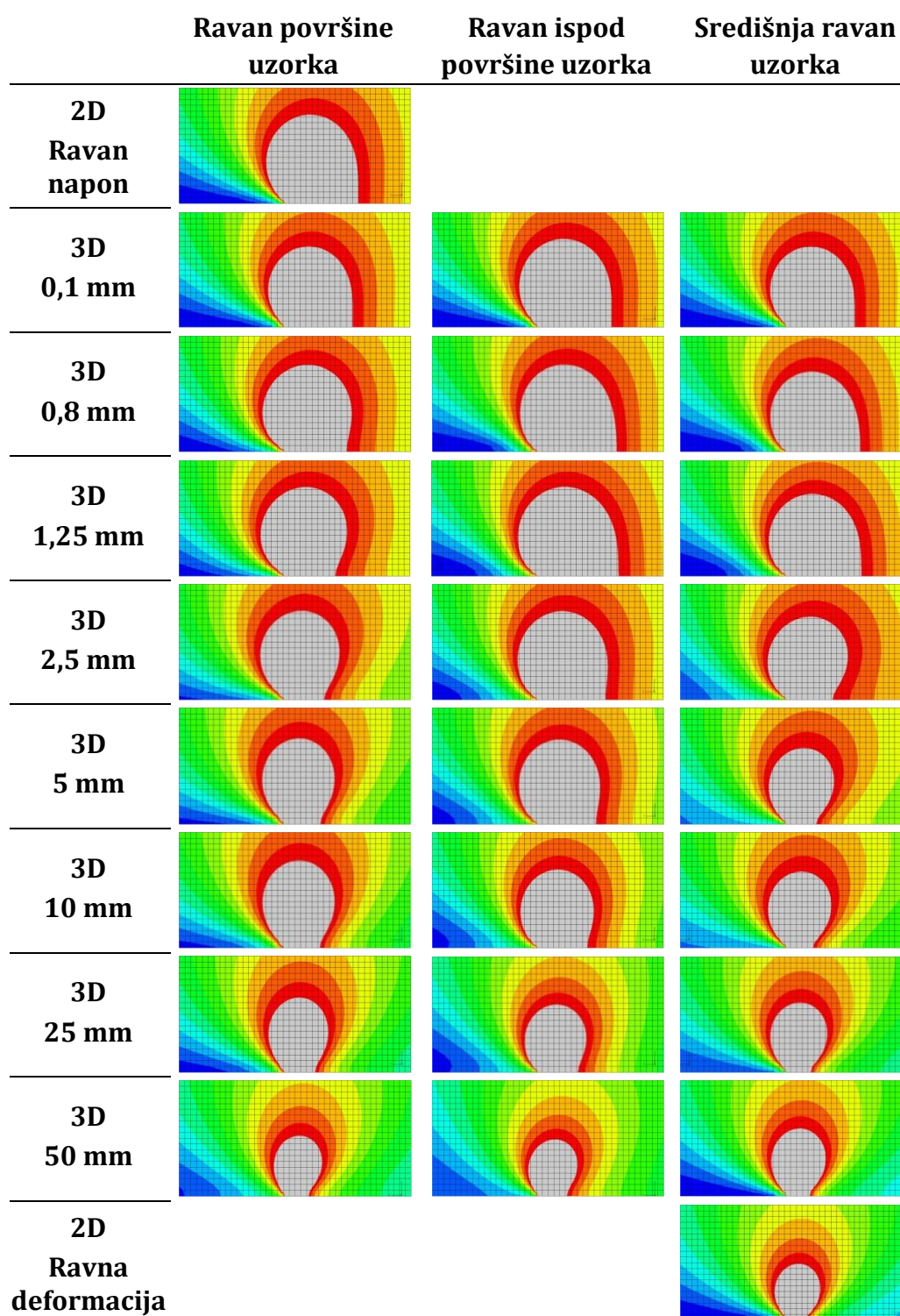
Slika 65. CT uzorak sa mrežom konačnih elemenata [88]

Slika 66 prikazuje faktor intenziteta napona, K_I , duž fronta prsline, dobijen tehnikom ekstrapolacije σ_y napona duž uzorka debljine $B=25$ mm.



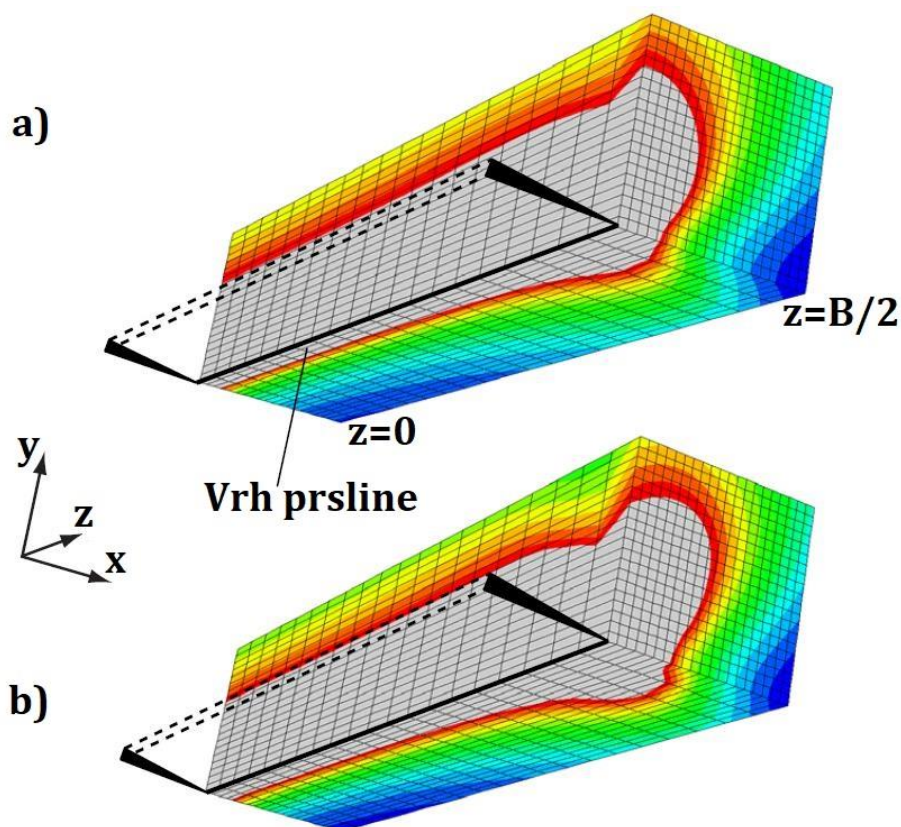
Slika 66. Faktor intenziteta napona, K_I , duž fronta prsline kroz debljinu uzorka [88]

Slika 67 predstavlja izračunate plastične zone ispred vrha prsline, za različite debljine uzorka, na površini i u središnjoj ravni uzorka i, dodatno, u prelaznoj ravni ispod površne uzorka. Takođe, prikazani su rezultati odgovarajućih 2D proračuna stanja ravanskog napona i ravanske deformacije.



Slika 67. Plastična zona ispred vrha prsline na površini, u ravni ispod površine i u središnjoj ravni uzorka [88]

Rezultati do kojih se došlo linearno-elastičnim pristupom potvrđeni su proračunima koristeći elastično-plastični model i stvarno izmerene vrednosti krive napon-deformacija. Trodimenzionalna slika plastične zone ispred vrha prsline (slika 68), kao rezultat linearno-elastičnog i elastično-plastičnog proračuna (za uzorak debljine 10 mm), pokazuje veoma slično ponašanje.



Slika 68. Poređenje plastičnih zona ispred vrha prsline određenih (a) linearno elastičnim i (b) elasto plastičnim modelom ($B=10$ mm) [88]

6.2.2. Diskusija rezultata

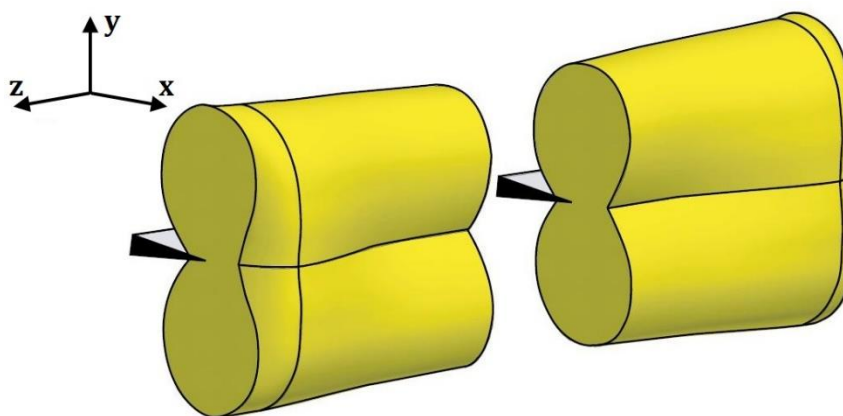
Poređenje numerički izračunatih plastičnih zona ispred vrha prsline (slika 67) sa tzv. „pseća kost” modelom (slika 64) otkriva sledeće karakteristične razlike. Kao prvo, očigledno je da se 2D rezultati za posmatrani CT uzorak, koji je napravljen od legure aluminijuma 7075, za stanje ravnog napona i ravne deformacije dobro slažu sa graničnim stanjima modela „pseća kost”. Međutim, razmatranje dobijenih 3D rezultata plastičnih zona za uzorke različitih debljina pokazuje sledeće nepodudarnosti ova dva granična stanja.

Na površini vrlo tankih uzoraka (videti npr. podatke za uzorak debljine 0,01 mm, slika 67) plastične zone ispred vrha prsline su praktično identične onima za ravno stanje napona. Za veoma tanke uzorke, plastične zone ispred vrha prsline u sredini uzorka slažu se sa onima na površini uzorka za ravno stanje napona, kao što je i očekivano.

Za uzorke većih debljina, plastične zone ispred vrha prsline na površini ne ostaju iste u poređenju sa zonom za veoma tanke uzorke, kako po veličini tako i po obliku. Naime, plastične zone ispred vrha prsline postaju manje i oblik postaje sličan onom za ravno stanje deformacije. Obzirom na navedeno, moguće je doći u iskušenje da se zaključi da je manja plastična zona ispred vrha prsline posledica manjeg faktora intenziteta napona na površini uzorka, kako je predstavljeno na slici 66. Ovo, međutim, ne bi bio usaglašen stav obzirom da veličina zone ne postaje samo manja, nego plastična zona menja i oblik. Prema tome, ova dva zapažanja očigledno nameću zaključak da se stvarno stanje napona na slobodnoj površini uzorka menja i nije više predstavljeno stanjem ravnog napona. Prve nagoveštaje u skladu sa ovim zaključkom objavio je 1971. godine G.C. Sih. Naime, u [89] je navedeno da ravno stanje napona ne predstavlja granični slučaj trodimenzionalnog rešenja i da ravno stanje napona krši trodimenzionalne uslove kompatibilnosti.

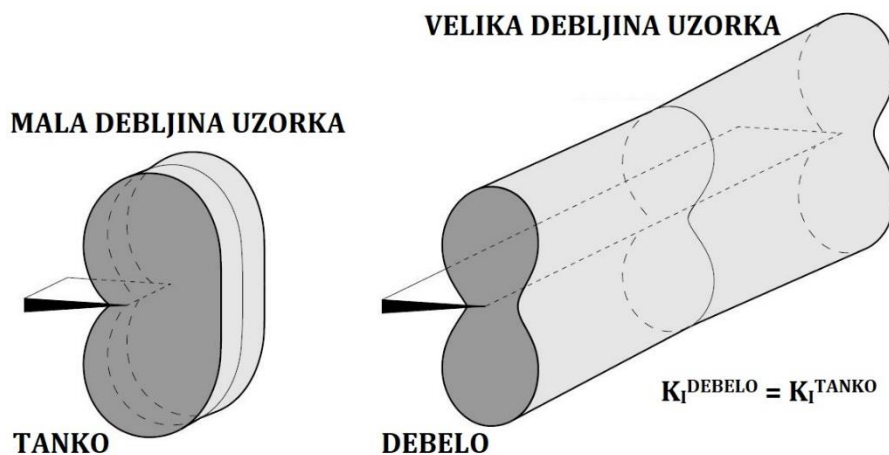
Plastične zone ispred vrha prsline u sredini uzorka, prilikom povećanja debljine uzorka, pokazuju da se oblik i veličina plastične zone menjaju na takav način da i oblik i veličina postaju sve više slični onima za ravno stanje deformacije. Međutim, kada se plastične zone ispred vrha prsline za veoma velike debljine ($B=25$ mm, $B=50$ mm, odnosno debljine daleko iznad minimalne debljine uzorka od $B=7,9$ mm) porede sa plastičnim zonama za granični slučaj ravne deformacije, postaje jasno da plastične zone ispred vrha prsline, uprkos velikim debljinama uzorka, još uvek nisu te veličine da bi se primenile za stanje ravne deformacije. Na osnovu ove tvrdnje, dakle, nameće se pitanje da li se lomna žilavost može meriti sa uzorcima za koje su minimalne veličine fiksne i određene u skladu sa važećim standardima. Obzirom na navedeno, neophodno je istražiti u kojoj meri podaci o lomnoj žilavosti zavise od ovih efekata i koliko bi, eventualno, trebalo minimalnu debljinu uzorka povećati da bi mogla biti određena konzervativna vrednost lomne žilavosti.

Trodimenzionalni prikaz plastične zone ispred vrha prsline duž fronta prsline kroz debljinu uzorka (slika 69) pokazuje kompleksno ponašanje u regiji ispod površine uzorka. Kada se iz unutrašnjosti približava površini uzorka, plastična zona (posmatrano u x - z ravni), kao prvo, pokazuje postepeno povećanje veličine, a zatim, uz formiranje „grbe“ nastavlja s naglim smanjenjem veličine, što je veoma različito od ponašanja predviđenog modelom „pseća kost“. Ovakvo ponašanje pokazuje da su naponi, u blizini površine uzorka, organizovani tako da pokušavaju da izgrade ravno stanje napona, ali, obzirom da takvo stanje očigledno ne postoji na površini, tendencija rezultata je da krenu u suprotnom smeru. „Grba“ u plastičnoj zoni ispred vrha prsline u x - z ravni odgovara „vratu“ u y - z ravni. Plastične zone ispred vrha prsline direktno ispod površine uzorka, posebno u tački u kojoj je „grba“ maksimalne vrednosti, dodatno su prikazane na slici 67 (u koloni: ravan ispod površine uzorka). Šematski trodimenzionalni prikaz distribucije plastične zone ispred vrha prsline duž fronta prsline čitavom debljinom uzorka predstavljen je na slici 69. Razlike u odnosu na konvencionalni model „pseća kost“ (slika 64) su jasno vidljive [88].



Slika 69. Šematski izgled izračunate plastične zone ispred vrha prsline duž fronta prsline čitavom debljinom uzorka [88]

Uzimajući u obzir nešto pojednostavljen pristup i, namerno, ne uzimajući u obzir prethodno objašnjeno formiranje „grbe“ i „vrata“, uočava se da se plastične zone ispred vrha prsline za određenu debljinu uzorka ne razlikuju mnogo u obliku i veličini duž fronta prsline, i ostaju praktično nepromenjene, time pretpostavljajući skoro cilindričan oblik, pri čemu za uzorke manje debljine oblik i veličina cilindričnog poprečnog preseka plastične zone liče na onaj za stanje ravnog napona, dok za uzorke veće debljine oblik i veličina cilindričnog poprečnog preseka plastične zone podseća na onaj za ravno stanje deformacije. Ilustracija tako pojednostavljenog pogleda na plastične zone ispred vrha prsline data je na slici 70 [88].



Slika 70. Uprošćeni prikaz plastične zone ispred vrha prsline duž fronta prsline za uzorke male i velike debljine [88]

Nekoliko autora [90,91,92] je istražujući zavisnost od različitih parametara mehanike loma, kao što je faktor intenziteta napona, brzina oslobađanja energije, oblici razvoja prsline, ili eksponent singulariteta napona duž fronta prsline, posebno u blizini ili direktno na slobodnoj površini uzorka, izveštavalo o karakterističnim specifičnostima i razlikama u odnosu na uobičajeno ponašanje.

6.2.3. Zaključak

Za CT uzorke napravljene od legure aluminijuma 7075, plastične zone ispred vrha prsline izračunate su metodom konačnih elemenata primenom programskog paketa *ABAQUS* u linearno-elastičnom pristupu koristeći Von Mises komparativne napone. Merenja uzoraka u ravanskim pravcima izabrana su u skladu sa kriterijumom za merenje važeće lomne žilavosti K_{IC} . Međutim, stvarna debljina uzorka je varirala od vrednosti daleko ispod do znatno iznad minimalne debljine uzorka B_{min} . Pronađene su sledeće razlike u odnosu na ponašanje modela „pseća kost“:

- Za uzorke većih debljina plastične zone ispred vrha prsline na površini uzorka ne slažu se sa onima za ravno stanje napona. U ravni direktno ispod površine uzorka primećeno je kompleksno ponašanje plastičnih zona ispred vrha prsline sa suprotnim tendencijama.
- Primenom donekle pojednostavljenog pristupa, plastična zona ispred vrha prsline podrazumeva cilindrični oblik duž vrha prsline sa poprečnim presekom koji za uzorke malih debljina liči na plastične zone ispred vrha prsline za ravno stanje napona, dok za uzorke većih debljina poprečni presek liči na one za ravno stanje deformacije.
- Za uzorke daleko iznad minimalne debljine, B_{min} , plastična zona ispred vrha prsline u sredini uzorka još uvek nije spala na onu veličinu koja je određena za ravno stanje deformacije.

7. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE UTICAJA KOROZIJE NA MEHANIČKA SVOJSTVA I PARAMETRE MEHANIKE LOMA LEGURA ALUMINIJUMA 2024-T351 I 7075-T651

7.1. UTICAJ KOROZIJE NA MEHANIČKA SVOJSTVA LEGURA ALUMINIJUMA 2024-T351 I 7075-T651

Cilj ovog eksperimenta je utvrđivanje uticaja korozije na osnovna svojstva čvrstoće legura aluminijuma 2024-T351 i 7075-T651. Prikazani su rezultati statičkih zateznih ispitivanja uzoraka kružnog poprečnog preseka, izrađenih iz ploča od legura aluminijuma 2024-T351 i 7075-T651. Predmetna ispitivanja jednoosnim zatezanjem izvršena su na uzorcima iz tri grupe materijala (osnovni materijal bez prethodne korozije, materijal izložen dejstvu vlage 7 dana i materijal izložen dejstvu vlage 30 dana).

7.1.1. Stanica za ispitivanje

Ispitivanja su izvedena u Laboratoriji za eksperimentalnu čvrstoću Vojnotehničkog instituta Ministarstva odbrane RS, koristeći kidalicu SCHENCK TREBEL Prüfmaschinen 4030 Ratingen, RM100.



Slika 71. Ispitni uzorak fiksiran između steznih glava kidalice SCHENCK TREBEL Prüfmaschinen 4030 Ratingen RM100, sa ekstenzometrom

Pomoću analogne jedinice, preko davača promene pritiska na indikatoru, vrši se registrovanje postepenog trenutnog priraštaja sile i trenutne vrednosti izduženja uzorka na ekstenzometru (slika 71). Proces se odvija do krtog loma uzorka. U cilju izrade odgovarajućih

dijagrama zatezanja materijala bez prethodne korozije i materijala izloženog uticaju korozione sredine, rezultati porasta inteziteta zatezne sile i vrednosti izduženja uzoraka smeštaju se u Microsoft Office Excell datoteku. Te vrednosti odnosa σ - ε prikupljene su iz inženjerskog, a ne realnog dijagrama. Glavna disproporcija se ogleda u tome što se kod inženjerskih dijagrama vrednost izduženja uzoraka određuje u odnosu na trenutno pomeranje i početni poprečni presek uzorka, a kod realnog dijagrama taj odnos se računa u odnosu na trenutno pomeranje i trenutni poprečni presek uzorka.

7.1.2. Uslovi i rezultati ispitivanja

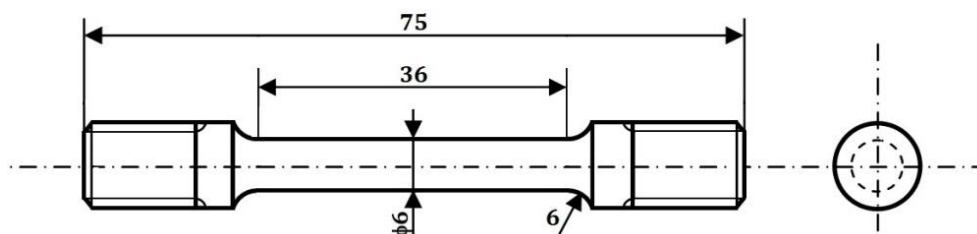
U cilju ispitivanja uticaja korozije na mehanička svojstva legura aluminijuma AA2024-T351 i 7075-T651, po dve grupe uzoraka izrađenih od navedenih legura izložene su u komori sa kontrolisanom vlagom. Uslovi unutar komore su bili sledeći: relativna vlažnost vazduha $R_w=100\%$ i temperatura $t=28\div 30^\circ\text{C}$. Ovi uslovi su izabrani na način da ubrzaju koroziju u relativno blagom korozionom okruženju. Jedna grupa uzoraka izložena je dejstvu vlage 7 dana, dok je druga grupa bila u komori 30 dana.

Tabela 13. Hemijski sastav legura aluminijuma 2024-T351 i 7075-T651
(Udeo legirajućih elemenata, %) [93]

Al legura	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ostalo	Al
2024-T351	0,50	0,50	3,8÷4,9	0,3÷0,9	1,2÷1,8	0,10	0,25	0,15	0,15	preostalo
7075-T651	0,40	0,50	1,2÷2,0	0,30	2,1÷2,9	0,18÷0,28	5,1÷6,1	0,20	0,15	preostalo

Nakon izlaganja uzoraka u opisanoj korozionoj sredini, iste su podvrgnute ispitivanju zatezanjem. Zatezni test je izveden na sobnoj temperaturi ($t=25^\circ\text{C}$), u laboratorijskom okruženju (relativna vlažnost vazduha $R_w=55\%$), koristeći automatizovanu elektromehaničku kidalicu SCHENCK TREBEL RM100, u kontroli deformacije (izduženja). Uvođenje opterećenja je izvršeno brzinom od 5 mm/min.

Uzorci za potrebe mehaničkog ispitivanja zatezanjem su precizno obrađeni u skladu sa specifikacijama Standarda ASTM B 557M-02a. Izgled uzorka za ispitivanje zatezanjem prikazan je na slici 72. Uzorci su isečeni iz ploča u dva različita pravca, uzdužno (paralelno) i poprečno (okomito) u odnosu na pravac valjanja ploča, i podvrgnuti su završnoj obradi kako bi se dobila zahtevana hrapavost površine.

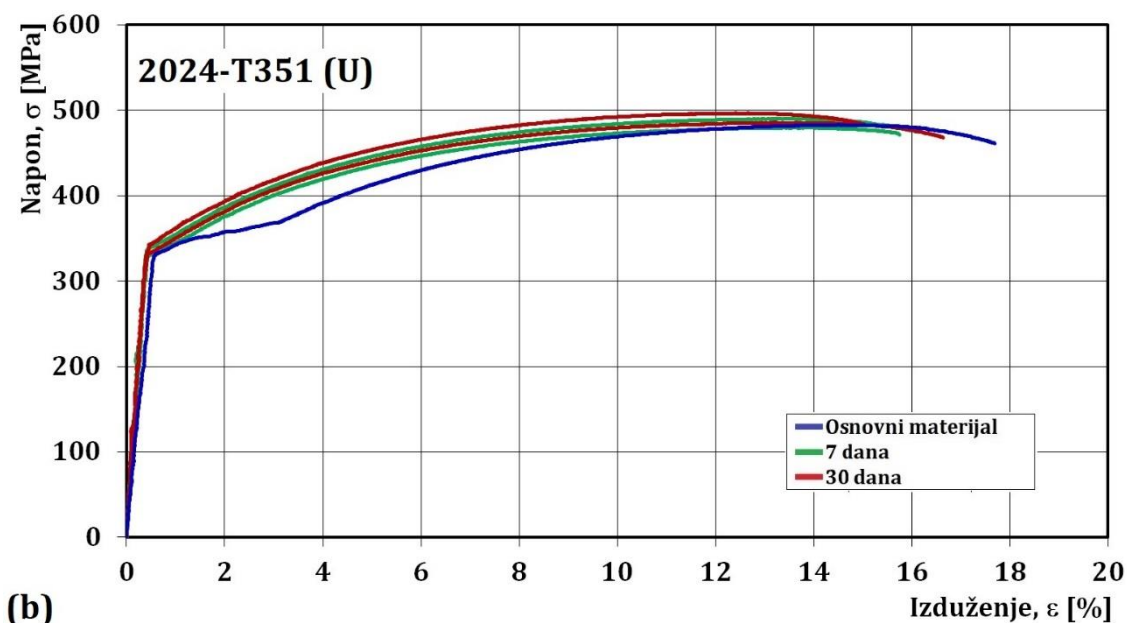
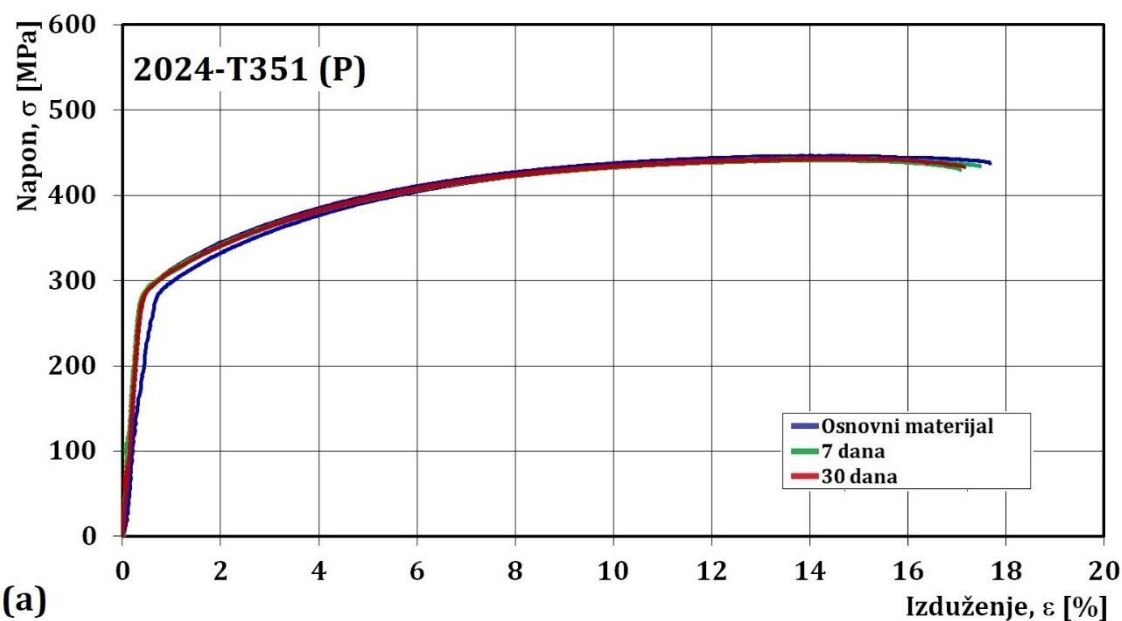


Slika 72. Izgled uzorka za ispitivanje zatezanjem
(Uzorak male veličine, ASTM B 557M-02a) [94]

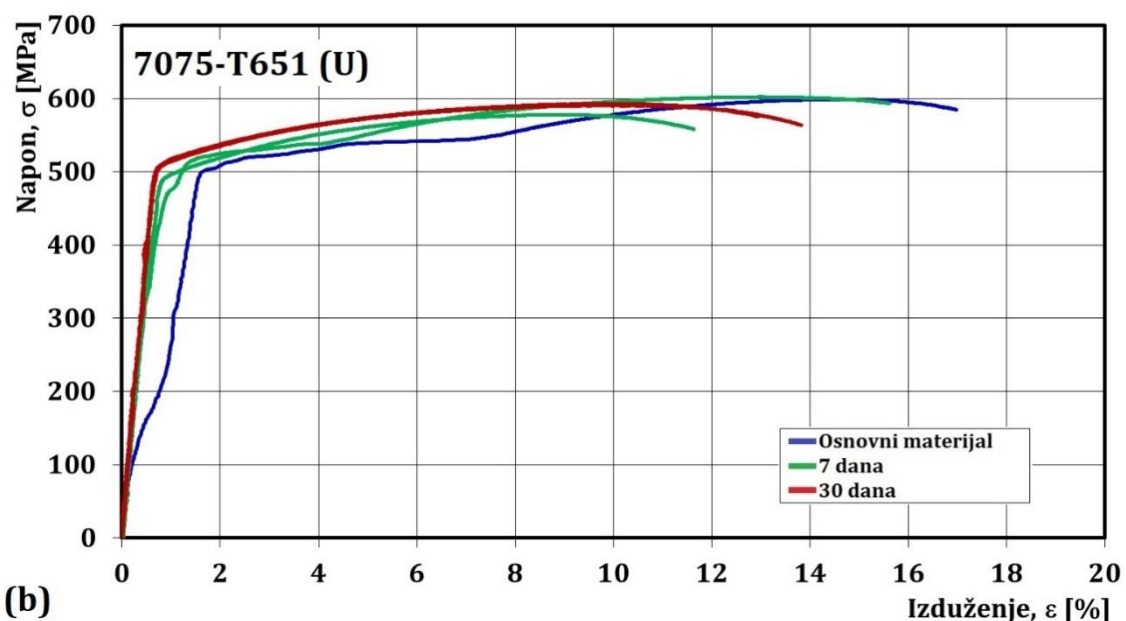
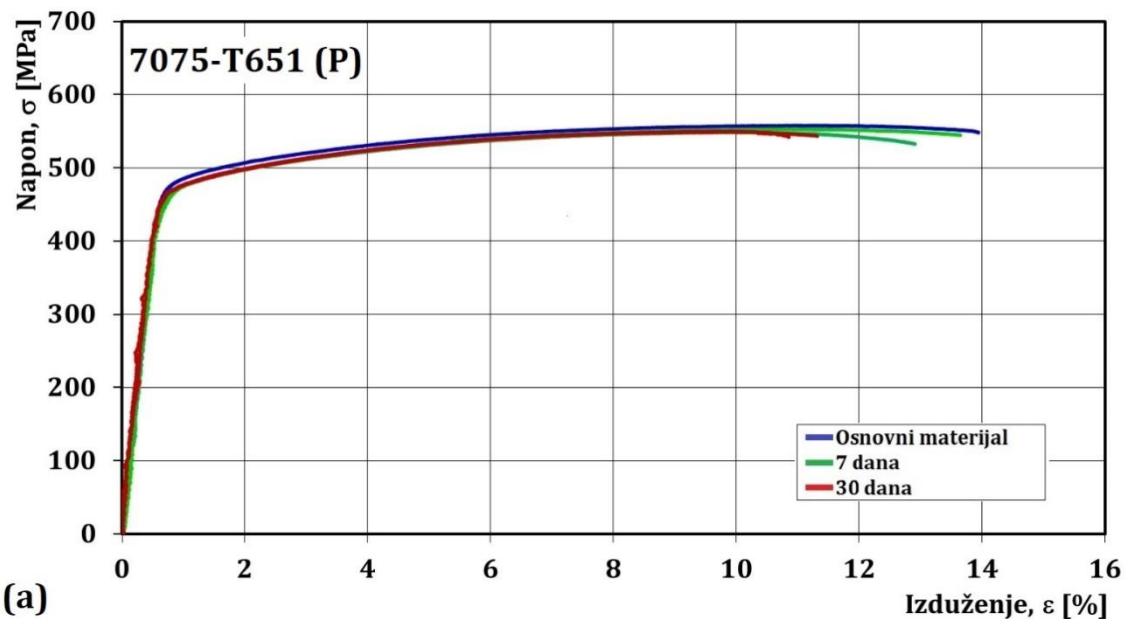
Tokom ispitivanja, uzorci su podvrgnuti jednoosnom statičkom povećavanju napona do kidanja. Sila opterećenja i izduženje uzorka, zabeleženi su korišćenjem ekstenzometra.

Statička ispitivanja jednoosnim zatezanjem izvedena su na 22 uzorka, iz 3 grupe materijala (osnovni materijal, materijal izložen u vlažnoj komori 7 dana i materijal izložen u vlažnoj komori 30 dana). Na slikama 73 i 74 prikazani su dijagrami zatezanja ispitanih uzoraka.

Ponašanje predmetnih materijala pri ispitivanju zatezanjem predstavljeno je dijagramima na kojima je na y -osi naneta sila kojom se deluje na uzorak, a na x -osi izduženje. Na početku, kriva ima pravolinijski tok, uzimajući u obzir postojanje linearne zavisnosti između sile i trenutnog izduženja. Nakon prestanka linearne zavisnosti, priraštaji dužine za odgovarajuće priraštaje sile su sve veći, i kriva se savija prema x -osi. U trenutku kada se daljim zatezanjem iscrpi mogućnost deformisanja, dolazi do prekida uzorka. Kao što se vidi na dijagramima, zatezna sila raste do maksimalne vrednosti, posle koje blago opada, i u jednom trenutku nastaje prekid [97-99].



Slika 73. Dijagrami zatezanja uzoraka izrađenih iz ploče od legure aluminijuma 2024-T351 sečenih (a) poprečno na pravac valjanja ploče i (b) uzdužno sa pravcem valjanja ploče, za različite vremenske periode izlaganja kontrolisanoj vlazi



Slika 74. Dijagrami zatezanja uzoraka izrađenih iz ploče od legure aluminijuma 7075-T651 sečenih (a) poprečno na pravac valjanja ploče i (b) uzdužno sa pravcem valjanja ploče, za različite vremenske periode izlaganja kontrolisanoj vlazi

7.1.3. Analiza rezultata ispitivanja

Dijagrami naprezanja uzoraka izrađenih od legura aluminijuma 7075-T651 i 2024-T351, dobijeni zatezanjem uzdužno (paralelno) i poprečno (okomito) u odnosu na pravac valjanja ploča, dati su na slikama 73 i 74. Na osnovu vrednosti očitanih sa navedenih dijagrama zatezanja, određene su prosečne vrednosti parametara čvrstoće: maksimalna zatezna čvrstoća, σ_{\max} , i izduženje do loma, ϵ_{\max} . Prosečne vrednosti parametara čvrstoće prikazani su u tabelama 14 i 15.

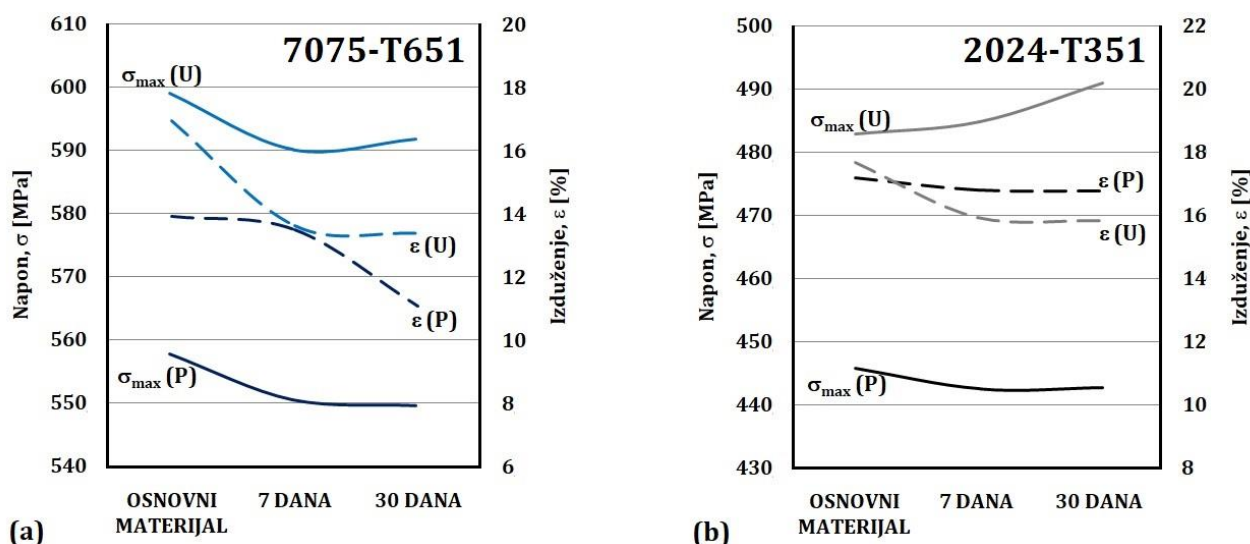
Tabela 14. Prosečne vrednosti mehaničkih svojstava legure aluminijuma 2024-T351 utvrđenih na osnovu statičkih zateznih ispitivanja uzoraka

Legura Al	Pravac sečenja uzorka	Vreme izlaganja u vlažnoj komori	Mehanička svojstva	
			σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [%]
2024-T351	Poprečno (okomito) na pravac valjanja ploče (P)	0 dana	445,81	17,18
		7 dana	442,55	16,81
		30 dana	442,71	16,78
	Uzdužno (paralelno) sa pravcem valjanja ploče (U)	0 dana	482,93	17,69
		7 dana	484,84	15,94
		30 dana	491,05	15,84

Tabela 15. Prosečne vrednosti mehaničkih svojstava legure aluminijuma 7075-T651 utvrđenih na osnovu statičkih zateznih ispitivanja uzoraka

Legura Al	Pravac sečenja uzorka	Vreme izlaganja u vlažnoj komori	Mehanička svojstva	
			σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [%]
7075-T651	Poprečno (okomito) na pravac valjanja ploče (P)	0 dana	557,71	13,94
		7 dana	550,58	13,52
		30 dana	549,63	11,09
	Uzdužno (paralelno) sa pravcem valjanja ploče (U)	0 dana	599,01	16,98
		7 dana	590,17	13,63
		30 dana	591,82	13,39

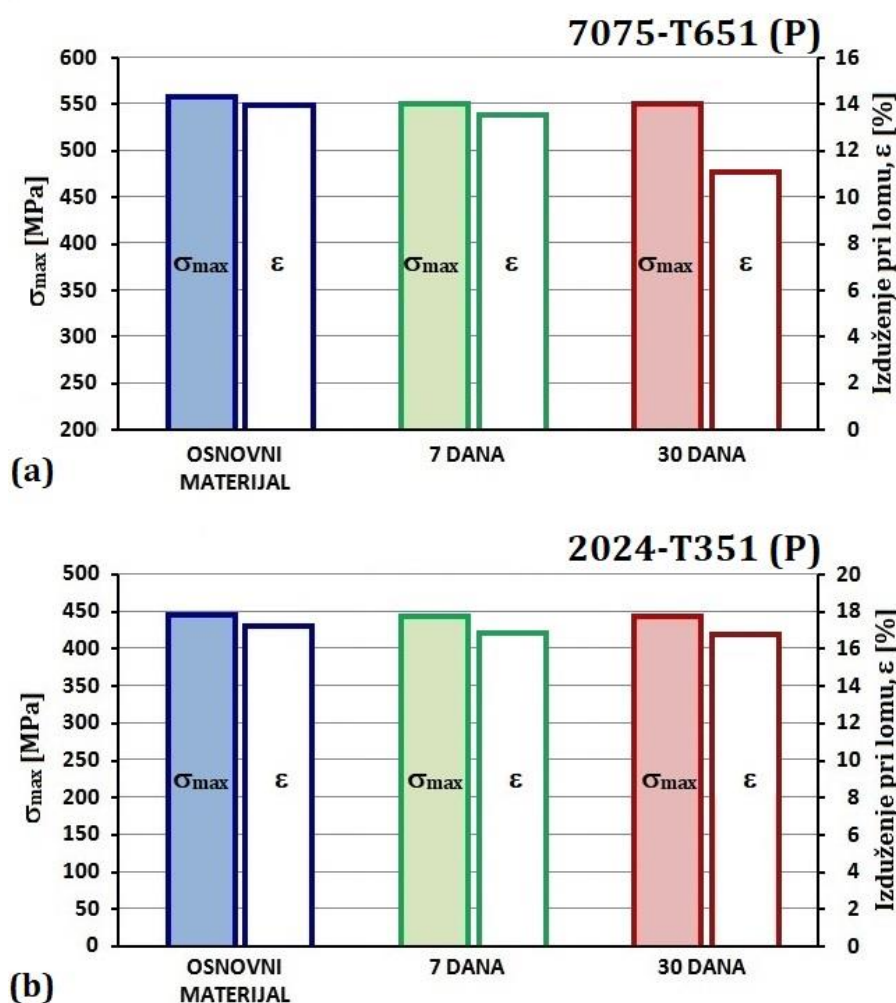
Na osnovu prikupljenih rezultata evidentno je da se ploče od legura aluminijuma 2024-T351 i 7075-T651, iz kojih su obrađeni ispitni uzorci, odlikuju značajnim razlikama čvrstoće, odnosno maksimalnog napona σ_{\max} , u zavisnosti od smera valjanja ploče. Uzorci uzeti uzdužno (paralelno) sa pravcem valjanja ploče, bez obzira na dužinu izloženosti dejstvu vlage, karakterišu se boljom čvrstoćom od uzoraka uzetih poprečno na smjer valjanja (slika 75).



Slika 75. Promene čvrstoće i izduženja utvrđene na osnovu statičkih zateznih ispitivanja uzoraka izrađenih iz ploča od aluminijumskih legura 7075-T651 (a) i 2024-T351 (b) isečenih uzdužno i poprečno u odnosu na pravac valjanja ploča, u zavisnosti od vremena izlaganja dejstvu vlage [95]

Slika 75 predstavlja sumarni prikaz degradacije mehaničkih svojstava ispitanih legura aluminijuma, na osnovu rezultata statičkih ispitivanja zatezanjem uzoraka, u zavisnosti od vremena izlaganja dejstvu kontrolisane vlage.

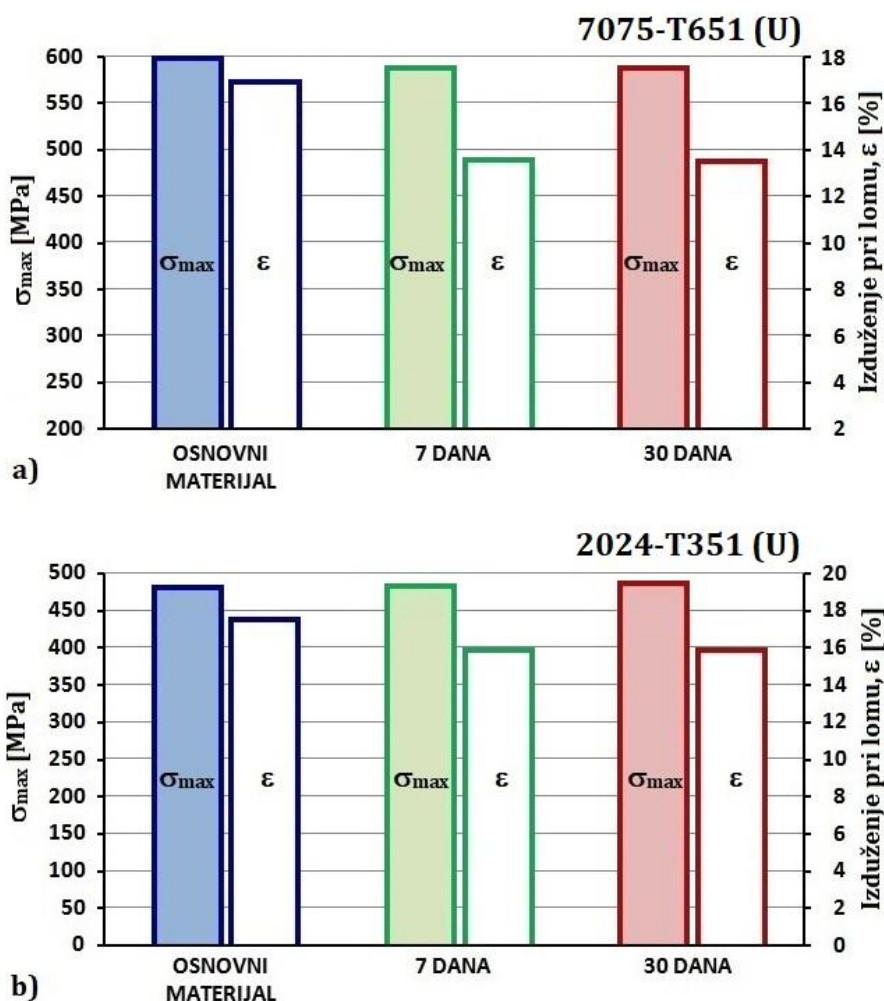
Kako je predstavljeno na slici 75, u zavisnosti od vremena izlaganja dejstvu vlage, menja se čvrstoća, i ta promena je kvalitativno slična za obe legure aluminijuma, 2024-T351 i 7075-T651, za uzorke isečene poprečno (okomito) u odnosu na pravac valjanja ploča (krive σ_{\max} (P)). Nakon 7 dana u korozivnoj sredini, srednja vrednost maksimalne čvrstoće ispitanih uzoraka opala je za 1,28% za 7075-T651, odnosno za 0,73% za 2024-T351, u odnosu na čvrstoću osnovnog materijala. Nakon 30 dana izlaganja uzoraka dejstvu kontrolisane vlage, nije zabeležena bitnija varijacija vrednosti čvrstoće predmetnih uzoraka u odnosu na izmerene vrednosti čvrstoće uzoraka izloženih 7 dana u korozivnoj sredini (slike 75 i 76) [96].



Slika 76. Srednje vrednosti čvrstoće i izduženja utvrđene na osnovu statičkih zateznih ispitivanja uzoraka izrađenih od aluminijumskih legura 7075-T651 (a) i 2024-T351 (b) isečenih poprečno (okomito) na pravac valjanja ploča, u zavisnosti od vremena izlaganja dejstvu vlage

Međutim, kada je u pitanju izduženje uzoraka (slika 76), primetna je značajna razlika u degradacionom uticaju dugotrajnog izlaganja uzoraka u korozivnoj sredini. Za uzorke isečene poprečno u odnosu na pravac valjanja ploča legure, promena izduženja prouzrokovana 7-dnevnim izlaganjem u vlažnoj komori je kvalitativno slična za obe legure aluminijuma, približno 2÷3%. Međutim, dok za uzorke od legure aluminijuma 2024-T351, posle blagog pada nakon 7 dana izlaganja u vlažnoj komori, izduženje pri lomu zadržava približno konstantnu vrednost nakon 30 dana izlaganja, kod uzoraka izrađenih od legure aluminijuma 7075-T651, posle

blagog pada, primetan je nagli pad vrednosti izduženja legura nakon izlaganja uzoraka dejstvu vlage u trajanju od 30 dana, za ukupno oko 20,5% u odnosu na izduženje osnovnog materijala (sa 13,94% na 11,09%).



Slika 77. Srednje vrednosti čvrstoće i izduženja utvrđene na osnovu statičkih zateznih ispitivanja uzoraka izrađenih od aluminijskih legura 7075-T651 (a) i 2024-T351 (b) isečenih uzdužno (paralelno) sa pravcem valjanja ploča, u zavisnosti od vremena izlaganja dejstvu vlage

Za uzorke isečene uzdužno (paralelno) sa pravcem valjanja ploča, promena čvrstoće, u zavisnosti od dužine izlaganja dejstvu vlage, kvalitativno je različita za legure aluminijuma 7075-T651 i 2024-T351 (slika 5, krive $\sigma_{max}(U)$). Za uzorke od legure aluminijuma 7075-T651, nakon izlaganja dejstvu vlage u trajanju od 7 dana, vrednost prosečne maksimalne čvrstoće opada za $\approx 1,5\%$ u odnosu na čvrstoću osnovnog materijala, dok daljim izlaganjem u vlažnoj komori ta vrednost raste za $\approx 0,3\%$. Sa druge strane, za uzorke od legure aluminijuma 2024-T351 prosečna vrednost maksimalne čvrstoće pod dejstvom vlage raste, za 30 dana ukupno $1,7\%$ u odnosu na čvrstoću osnovnog materijala (slike 75 i 77) [96].

Kada je u pitanju izduženje uzoraka, kao što je prikazano na slikama 75 i 77, primetan je značajan degradacioni uticaj kratkotrajnog izlaganja uzoraka u korozivnoj sredini, kao i velika razlika tog uticaja u zavisnosti od vrste legure koja se ispituje. Kod obe legure, nakon izlaganja uzoraka dejstvu vlage u trajanju od 7 dana, dolazi do većeg pada vrednosti izduženja, s tim da je za leguru aluminijuma 7075-T651 taj pad duplo veći ($19,74\%$) u odnosu na leguru aluminijuma 2024-T351 ($9,89\%$). Tokom daljeg izlaganja, u trajanju od 30 dana, dolazi do neznatnog povećanja vrednosti izduženja uzoraka.

7.1.4. Zaključak

Rezultati zateznih ispitivanja predstavljeni u ovom radu ukazuju na ortotropne osobine čvrstoće ploča od legura aluminijuma 7075-T651 i 2024-T351 u zavisnosti od pravca valjanja ploča, kao i na smanjivanje mehaničkih svojstava pod uticajem korozivne sredine.

Na osnovu prikupljenih rezultata može se zaključiti da se ploče od legura aluminijuma 7075-T651 i 2024-T351, iz kojih su obrađeni ispitni uzorci, odlikuju značajnim razlikama čvrstoće u zavisnosti od smera valjanja ploče. Uzorci uzeti uzdužno sa pravcem valjanja ploča, bez obzira na dužinu izloženosti dejstvu vlage, karakterišu se boljom čvrstoćom od uzoraka uzetih poprečno na smjer valjanja.

Izlaganjem dejstvu kontrolisane vlage, priroda čvrstoće se neznatno menja u zavisnosti od dužine izlaganja, i kvalitativno je slična za obe vrste legure, bez obzira na pravac zatezanja u odnosu na pravac valjanja ploča legure.

Sa druge strane, kada je u pitanju izduženje, legura aluminijuma 7075-T651 odlikuje se nižom lomnom žilavosti, kao i većim degradacionim uticajem vlage, u odnosu na leguru aluminijuma 2024-T351. Takođe, može se zaključiti da je propadanje svojstva izduženja, izazvano korozijom, veće kod uzoraka koji su ispitani zatezanjem u pravcu uzdužnom u odnosu na pravac valjanja ploče od legure iz koje su isečene.

7.2. UTICAJ KOROZIJE NA PARAMETRE MEHANIKE LOMA LEGURA ALUMINIJUMA 2024-T351 I 7075-T651

Osnovna pretpostavka od koje se pošlo u ovom radu je da se kod elemenata strukture vazduhoplova izloženih promenljivom opterećenju, eksploatacioni problemi uglavnom javljaju u zonama koncentracije napona, a prevashodno na mestima gde je usled delovanja korozivne sredine došlo do strukturne destrukcije osnovnog materijala.

Struktura legura aluminijuma povišene i visoke čvrstoće, kao što su legure 2024-T351 i 7075-T651, koje se u velikoj meri koriste u vazduhoplovnim konstrukcijama, čini ih podložnim lokalizovanoj koroziji. Kombinovani uticaj lokalizovane korozije i zamornog opterećenja negativno utiče na integritet konstrukcije, što se smatra jednim od najznačajnijih mehanizama oštećenja, zbog čega je neophodno razumeti oštećenja od zamora u kombinaciji sa korozijom i ponašanje prslina u legurama aluminijuma za vazduhoplove. Parametri mehanike loma, kao što je brzina rasta zamorne prsline, mogu da se primene na analizu ponašanja legura aluminijuma od kojih se rade visokoodgovorni elementi strukture vazduhoplova izloženih eksploatacionim uslovima.

Osnovni cilj ovog ispitivanja je da se eksperimentalno, primenom mehanike loma, istraži uticaj delovanja promenljivog opterećenja na elemente strukture vazduhoplova, izrađene od legura aluminijuma visoke čvrstoće, sa prisustvom greške tipa prsline, u korozivnoj sredini.

U nastavku su predstavljeni rezultati dinamičkih zateznih ispitivanja kompaktnih CT uzoraka, izrađenih iz ploča od legura aluminijuma 2024-T351 i 7075-T651. Dinamička ispitivanja jednoosnim zatezanjem izvedena su na tri grupe uzoraka (osnovni materijal bez prethodne korozije, materijal izložen dejstvu vlage 7 dana i materijal izložen dejstvu vlage 30 dana). Ispitano je ukupno 19 uzoraka, 11 uzoraka izrađenih od legure 2024-T351 (5 od osnovnog materijala, 3 od materijala izloženog dejstvu vlage 7 dana i 3 od materijala izloženog dejstvu vlage 30 dana) i 8 uzoraka izrađenih od legure 7075-T651 (3 od osnovnog materijala, 3 od materijala izloženog dejstvu vlage 7 dana i 2 od materijala izloženog dejstvu vlage 30 dana).

7.2.1. Ispitni uzorci i stanica za ispitivanje

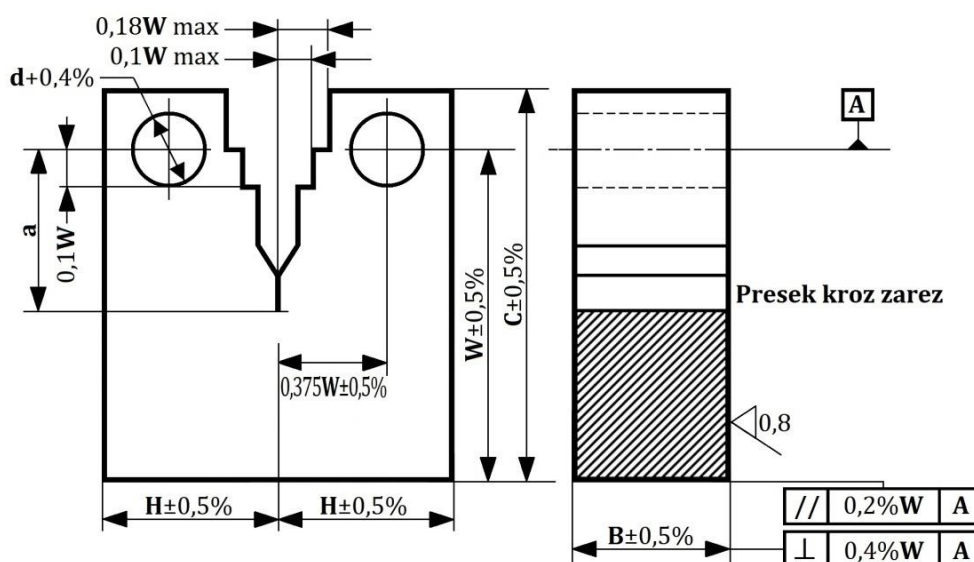
Ispitivanja su izvedena u Laboratoriji za metalne materijale Vojnotehničkog instituta Ministarstva odbrane Republike Srbije, koristeći servo-hidrauličku kidalicu.

Tabela 16. Hemijski sastav legura aluminijuma 2024-T351 i 7075-T651 (Udeo legirajućih elemenata, %) [100]

Al legura	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ostalo	Al
2024-T351	0,50	0,50	3,8÷4,9	0,3÷0,9	1,2÷1,8	0,10	0,25	0,15	0,15	preostalo
7075-T651	0,40	0,50	1,2÷2,0	0,30	2,1÷2,9	0,18÷0,28	5,1÷6,1	0,20	0,15	preostalo

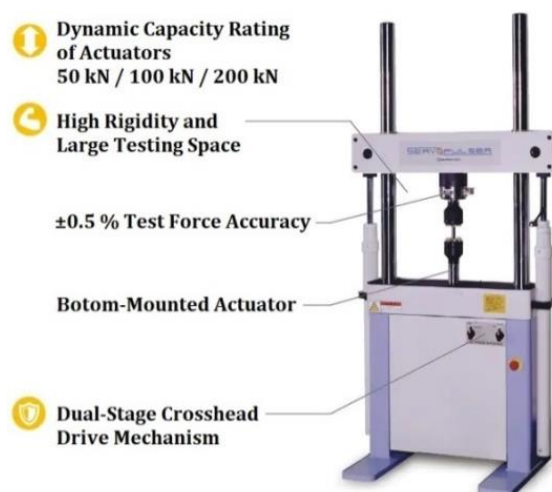
Ispitni uzorci su isečeni iz ploča od aluminijumskih legura 2024-T351 i 7075-T651, čiji je hemijski sastav, odnosno udeo legirajućih elemenata, prikazan u tabeli br. 16 [100]. Za predmetna ispitivanja izabrani su standardni kompaktni (CT) uzorci, kao što je prikazano na slici 78. Pre zamora, dve grupe uzoraka bile su izložene u komori sa kontrolisanom vlagom, tokom 7 i 30 dana, radi stvaranja dva različita nivoa početnog oštećenja od korozije. Uslovi unutar komore su bili sledeći: relativna vlažnost vazduha $R_w=100\%$ i temperatura $t=28\div 30^\circ\text{C}$. Ovi uslovi su izabrani na način da ubrzaju koroziju u relativno blagom korozionom okruženju.

Uzorci za potrebe mehaničkog ispitivanja zatezanjem su precizno obrađeni u skladu sa specifikacijama British Standard BS 7448-1:1991. Za ispitivanje je izabran kompaktni (CT) uzorak sa ravnim zarezom (slika 78), gde je efektivna širina jednaka dvostrukoj vrednosti debljine, $W=2B$ [101]. Efektivna širina uzorka, W , je 50 mm, debljina uzorka, B , je 25 mm, a dužina inicijalne prsline, a , je 15,5 mm. Uzorci su isečeni i podvrgnuti završnoj obradi kako bi se dobila zahtevana površina.



Slika 78. Izgled kompaktnog (CT) uzorka sa pravolinijskim zarezom [101]

Nakon izlaganja uzoraka u opisanoj korozionoj sredini, isti su, zajedno sa grupom uzoraka koji nisu bili izloženi korozionom dejstvu, podvrgnuti dinamičkom ispitivanju jednoosnim zatezanjem. Zatezni test je izveden na uzorcima od predmetnih legura aluminijuma, na sobnoj temperaturi ($t=20^\circ\text{C}$), u laboratorijskom okruženju (relativna vlažnost vazduha $R_w=55\%$), koristeći servo-hidrauličku kidalicu SHIMADZU ServoPulser E-tipe, nominalnog opterećenja do 100 kN (slika 79).



Slika 79. Servo-hidraulička kidalica SHIMADZU ServoPulser E-tipe [102]

Ispitivanje jednoosnog zamora konstantne amplitude sukcesivno je izvedeno na tri grupe uzoraka u laboratorijskom okruženju. Obavljena su tri ponovljena ispitivanja, pod istim uslovima opterećenja, za svaki tip legure i svaki slučaj korozije.

Na slici 80 prikazana je eksperimentalna postavka, na kojoj je uzorak za ispitivanje fiksiran između steznih glava servo-hidrauličke ispitne mašine, sa ekstenzometrom. Maksimalno primenjeno aksijalno zatezno naprezanje bilo je $F=20$ kN, sa odnosom napona $R=0,1$ i frekvencijom od $f=15$ Hz [104].



Slika 80. Ispitni uzorak fiksiran između steznih glava servo-hidrauličke kidalice SHIMADZU

Stege za CT uzorke i ekstenzometar, prikazani na slici 81, dizajnirani su za uzorke za ispitivanje na zatezanje i usaglašeni su sa standardima ASTM E399 i E1820.



Slika 81. Instalacija ekstenzometra

Prikupljeni rezultati automatski se smeštaju u Microsoft Office Excell datoteku, kako bi se mogli nacrtati odgovarajući dijagrami i analizirati parametri mehanike loma.

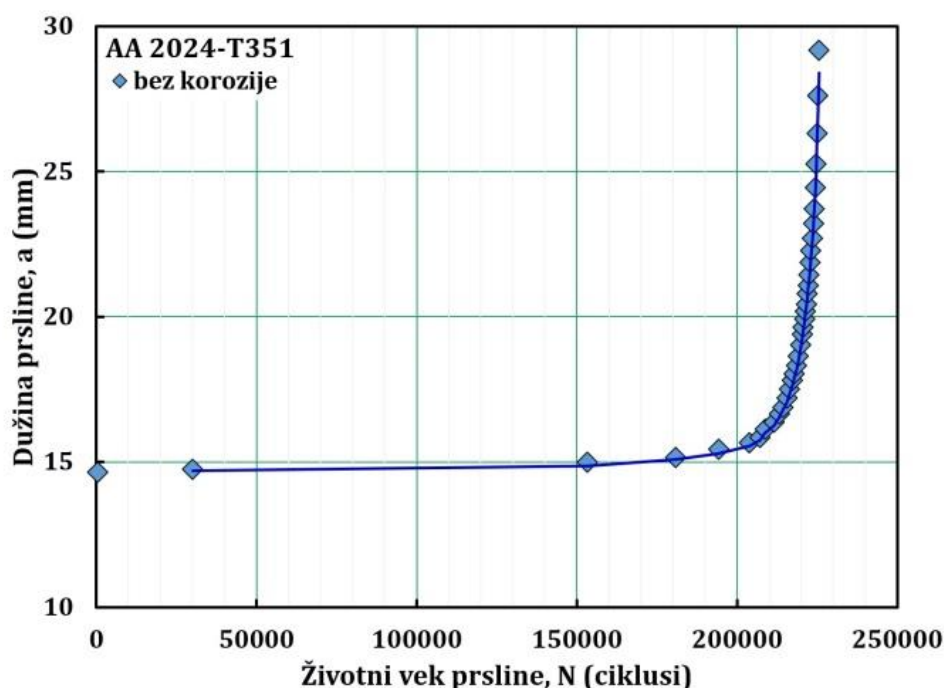
7.2.2. Rezultati ispitivanja

Otpornost materijala na stabilan rast zamorne prsline pod cikličnim opterećenjem izražava se kroz dužinu prsline, a , u odnosu na broj ciklusa, N , ili kao brzina rasta zamorne prsline, da/dN , u zavisnosti od promene faktora inteziteta opterećenja, ΔK . Pomenuti pristupi su posebno značajni za procenu uticaja rasta zamorne prsline na radni vek strukturnih komponenti. Osnovni podaci za predviđanje rasta zamorne prsline uglavnom se utvrđuju na osnovu rezultata cikličnog opterećenja prednaprskih uzoraka (uzorci sa prslinom). Dužina prsline se meri u funkciji proteklih ciklusa, i ovi podaci podležu numeričkoj analizi, kako bi se utvrdile brzine rasta prsline.

Mehanika loma pretpostavlja da rast zamorne prsline u inženjerskoj strukturi nastaje pri istim vrednostima da/dN kao u prednaprslom uzorku, kada su uslovi opterećenja isti za obe konfiguracije. Prema tome, radni vek zamorne prsline može se proceniti numeričkom integracijom brzina rasta prsline utvrđenih u eksperimentalnom uzorku [117].

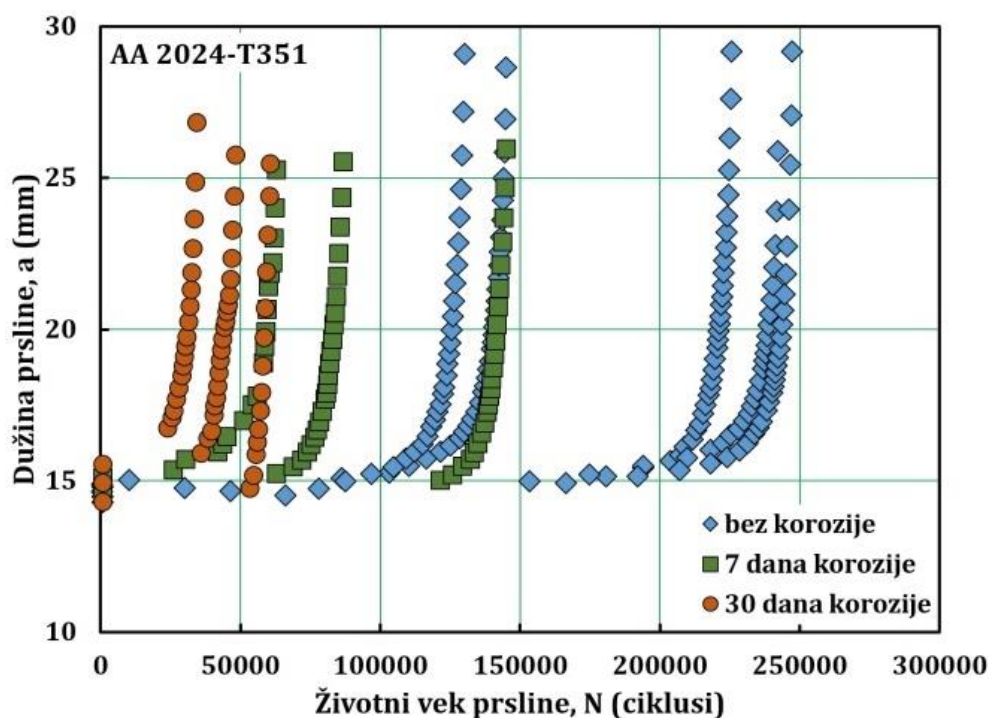
Zamorni vek prsline

Kriva rasta zamorne prsline, u funkciji broja ciklusa zamora, za jedan od ispitanih uzoraka od 2024-T351, bez prethodne korozije prikazana je na slici 82. Tokom rane faze delovanja promenljivog opterećenja može se uočiti mali porast zamorne prsline, dok nakon tačke pregiba, dolazi do bržeg rasta zamorne prsline, i konačno do loma.

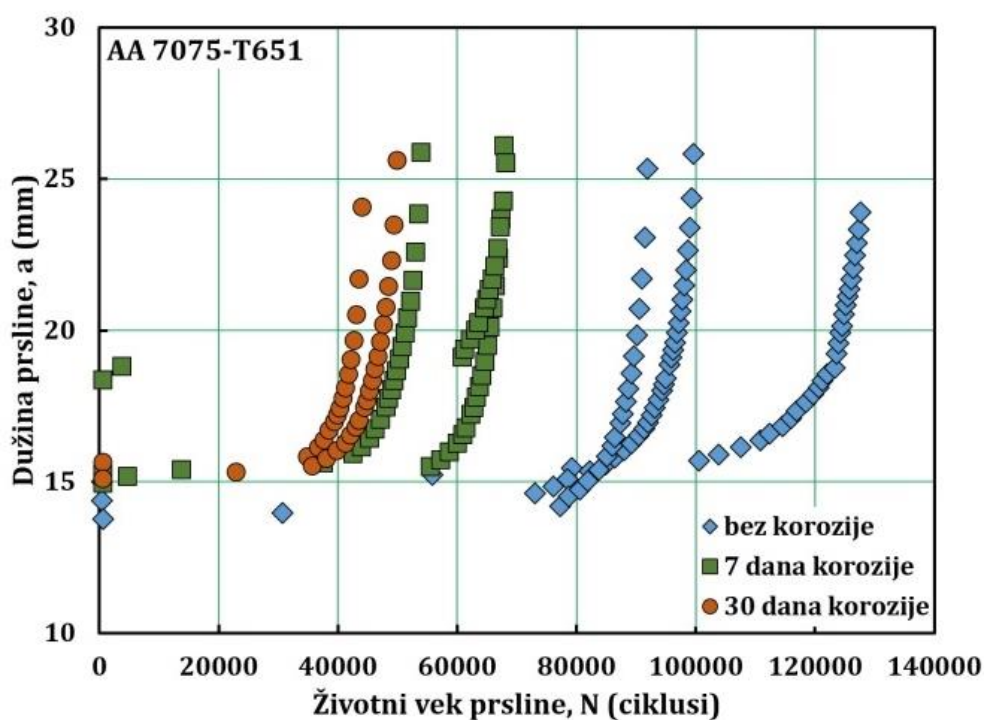


Slika 82. Kriva rasta zamorne prsline, u funkciji broja ciklusa zamora, za uzorak od 2024-T351

Na slikama 83 i 84 prikazane su eksperimentalne krive rasta zamorne prsline, u funkciji broja ciklusa zamora, za uzorke od 2024-T351 i 7075-T651, sa vremenom izloženosti koroziji od 0, 7 i 30 dana, koje odražavaju razvoj prsline izazvane zamorom u uzorcima sa različitim nivoima početnih oštećenja od korozije.

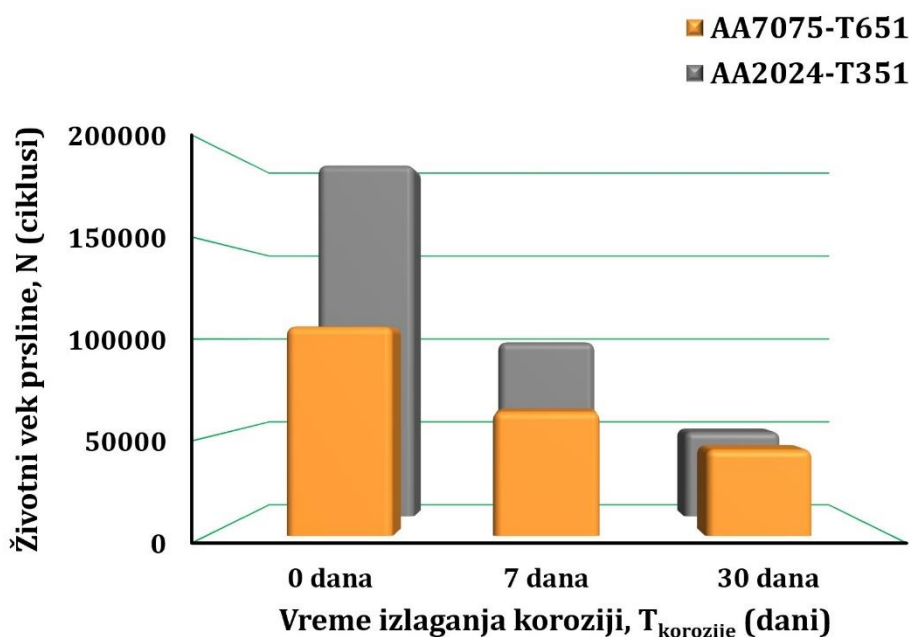


Slika 83. Krive rasta zamorne prsline, u funkciji broja ciklusa zamora, za uzorke od 2024-T351, sa vremenom izloženosti koroziji od 0, 7 i 30 dana



Slika 84. Krive rasta zamorne prsline, u funkciji broja ciklusa zamora, za uzorke od 7075-T651, sa vremenom izloženosti koroziji od 0, 7 i 30 dana

Slika 85 prikazuje radni vek zamorne prsline za uzorke od 2024-T351 i 7075-T651, sa različitim nivoima lokalizovanih oštećenja od korozije.

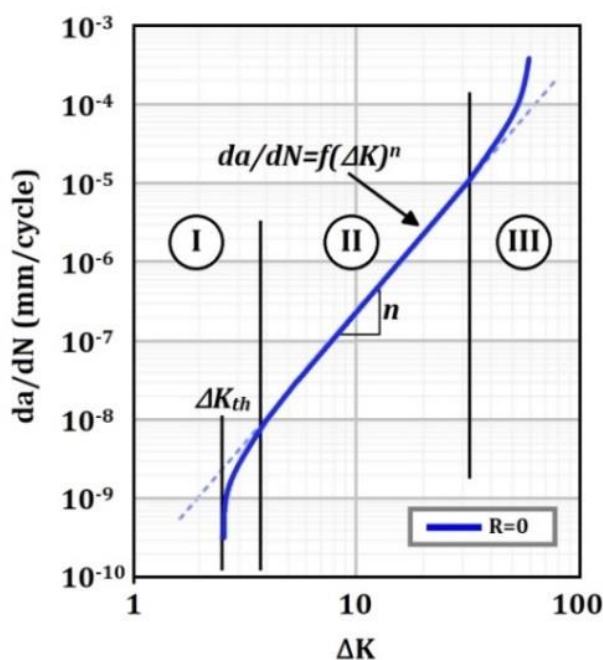


Slika 85. Radni vek zamorne prsline, u funkciji vremena prethodne izloženosti koroziji, za uzorke od 2024-T351 i 7075-T651, sa vremenom izloženosti koroziji od 0, 7 i 30 dana

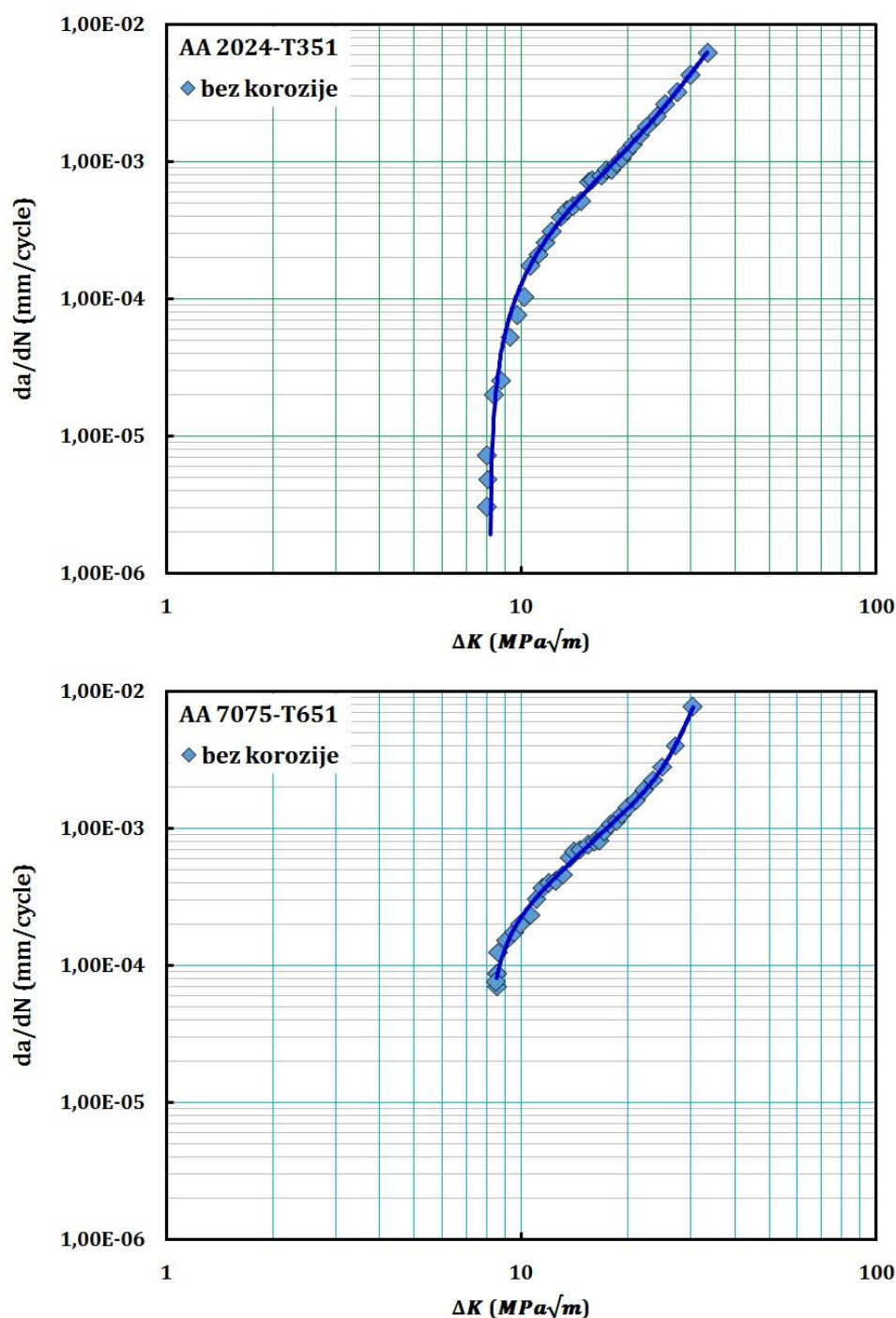
Prosečan broj zamornih ciklusa do loma je $19,80 \times 10^4$, $9,80 \times 10^4$ i $4,77 \times 10^4$ za uzorke od 2024-T351, odnosno $10,64 \times 10^4$, $6,33 \times 10^4$ i $4,41 \times 10^4$ za uzorke od 7075-T651, što odgovara uzorcima sa vremenima prethodne izloženosti koroziji od 0, 7 i 30 dana.

Za 2024-T351 vek zamora se smanjio za 50,50% nakon 7 dana izlaganja u odnosu na slučaj bez korozije, odnosno za 75,90% nakon 30 dana izlaganja u korozionoj sredini. Za 7075-T651 smanjenje veka zamora je 40,44% i 58,56%, nakon 7 i 30 dana izlaganja u korozionoj sredini. Ovi rezultati jasno pokazuju da prisustvo lokalizovane korozije štetno utiče na performanse zamora legura aluminijuma 2024-T351 i 7075-T651 [105].

Brzina rasta zamorne prsline



Slika 86. Brzina rasta zamorne prsline u funkciji faktora intenziteta opterećenja [103]

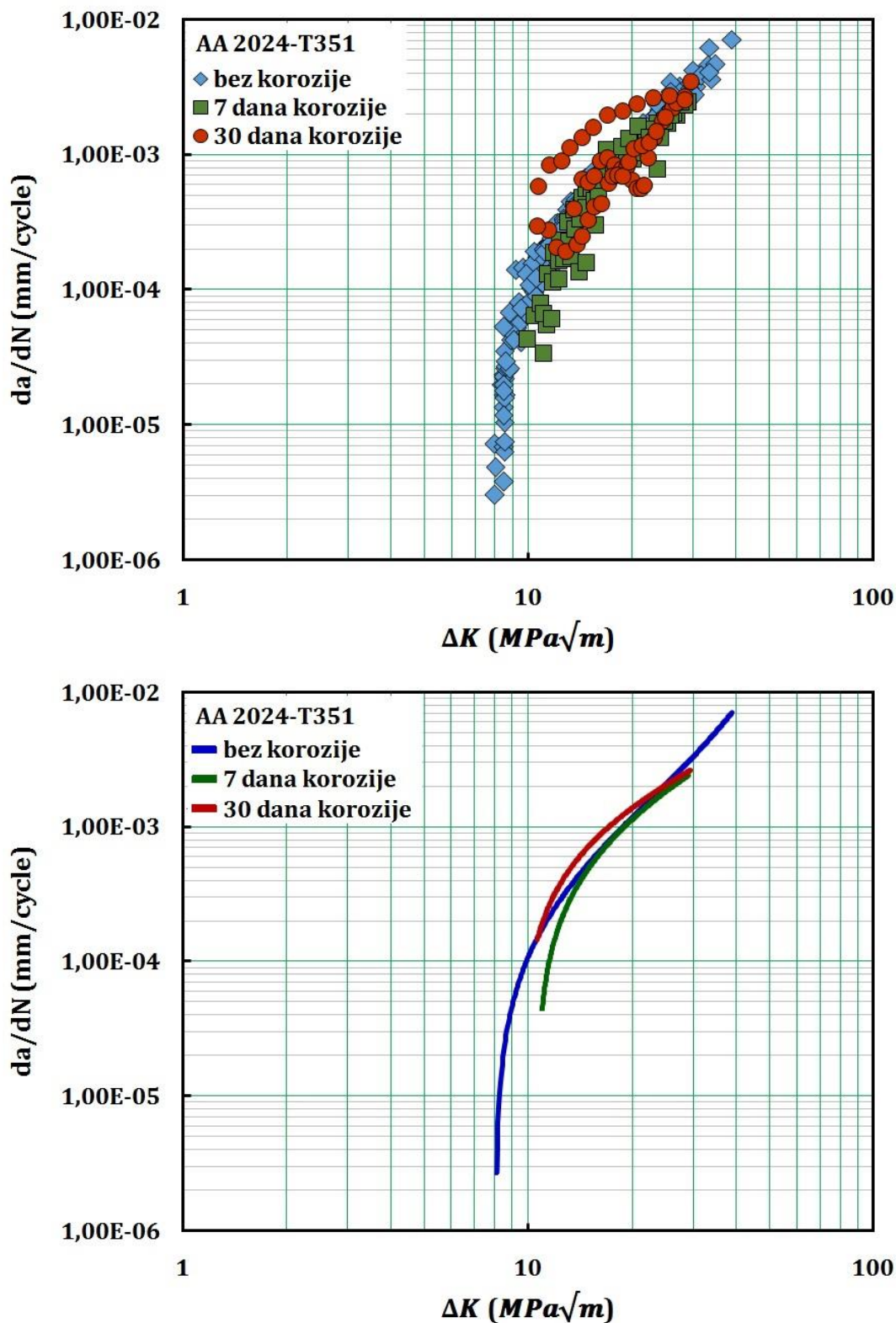


Slika 87. Uticaj faktora intenziteta naprezanja na brzinu rasta prsline, $da/dN=f(\Delta K)$, za uzorke od (a) 2024-T351 i (b) 7075-T651, bez prethodne korozije

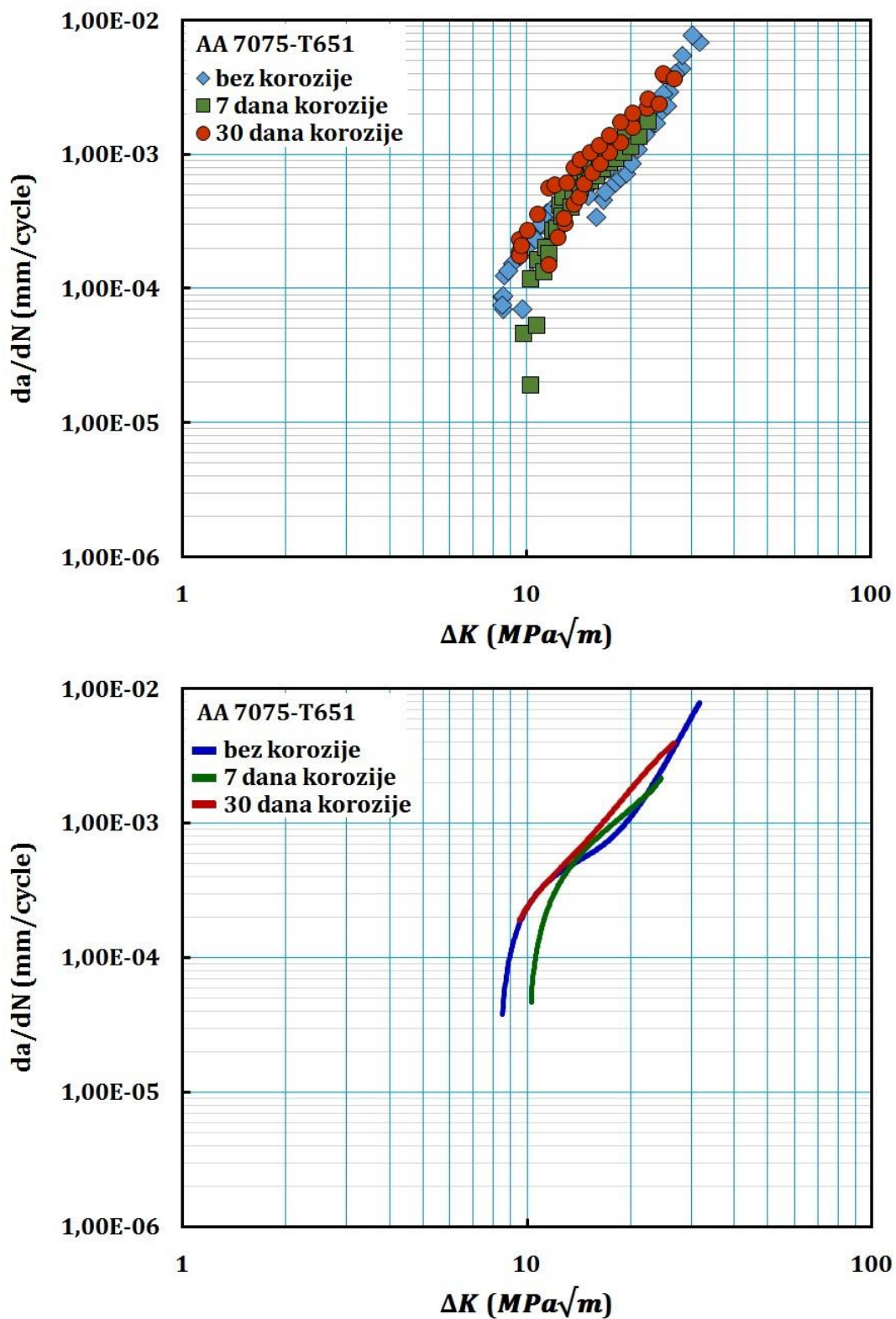
Na slici 87 prikazane su krive brzine rasta zamorne prsline za uzorke od 2024-T351 i 7075-T651, bez prethodne korozije, koje prikazuju zavisnost brzine rasta prsline od faktora intenziteta opterećenja. U oblasti I, koja se odlikuje malim naprežanjima oko vrha prsline, niske su vrednosti faktora intenziteta naprežanja i prsline raste malom brzinom, ali s prelazom u II oblast brzina raste. U oblasti II, pri većim vrednostima faktora intenziteta naprežanja, počinje stabilan rast prsline većom i konstantnom brzinom. Nestabilan rast u oblasti III predstavlja rast prsline velikom brzinom. Približavanjem tački loma brzina rasta prsline postaje veća.

Na slikama 88 i 89 predstavljeni su uporedni pregledi kriva brzine rasta prsline u uzorcima od 2024-T351 i 7075-T651, sa vremenom izloženosti koroziji od 0, 7 i 30 dana. Kao što se može videti, brzina rasta zamorne prsline povećava se sa povećanjem dužine prsline, i ta

promena je kvalitativno slična za obe vrste legura. Generalno, rezultati pokazuju da su, nezavisno od okoline, brzine rasta zamorne prsline prilično slične za obe legure legure aluminijuma. Sa druge strane, primetno je da su brzine rasta prsline u uzorcima od osnovnog materijala (bez prethodne korozije) magnitude 10^{-5} do 10^{-3} mm/ciklusu, dok su u korodiranim uzorcima brzine rasta prsline većim delom magnitude 10^{-4} mm/ciklusu[106].



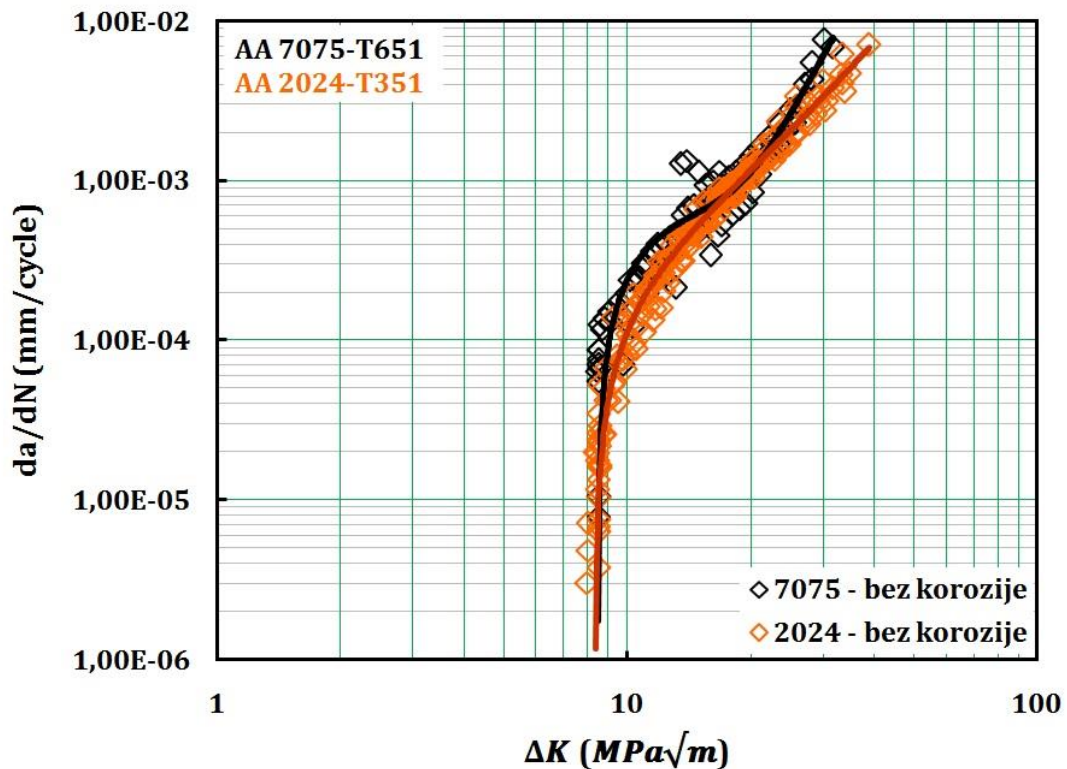
Slika 88. Krive brzine rasta prsline, $da/dN=f(\Delta K)$, za uzorke od 2024-T351, sa vremenom izloženosti koroziji od 0, 7 i 30 dana



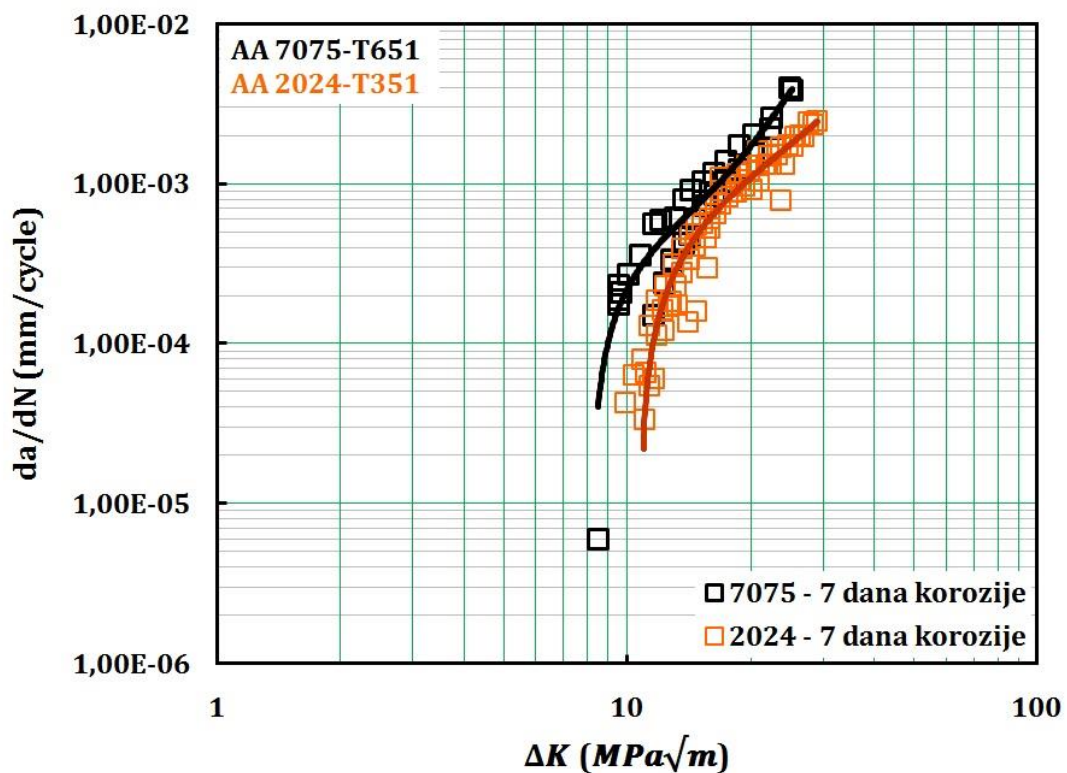
Slika 89. Krive brzine rasta prsline, $da/dN=f(\Delta K)$, za uzorke od 7075-T651, sa vremenom izloženosti koroziji od 0, 7 i 30 dana

U cilju boljeg pregleda i uporedne analize brzina rasta prsline, na slikama 88 i 89, pored dijagrama prikazanih tačkama, koje predstavljaju snimljene brzine rasta prsline, prikazani su dijagrami sa krivama srednjih vrednosti brzina rasta prsline u svim ispitanim uzorcima.

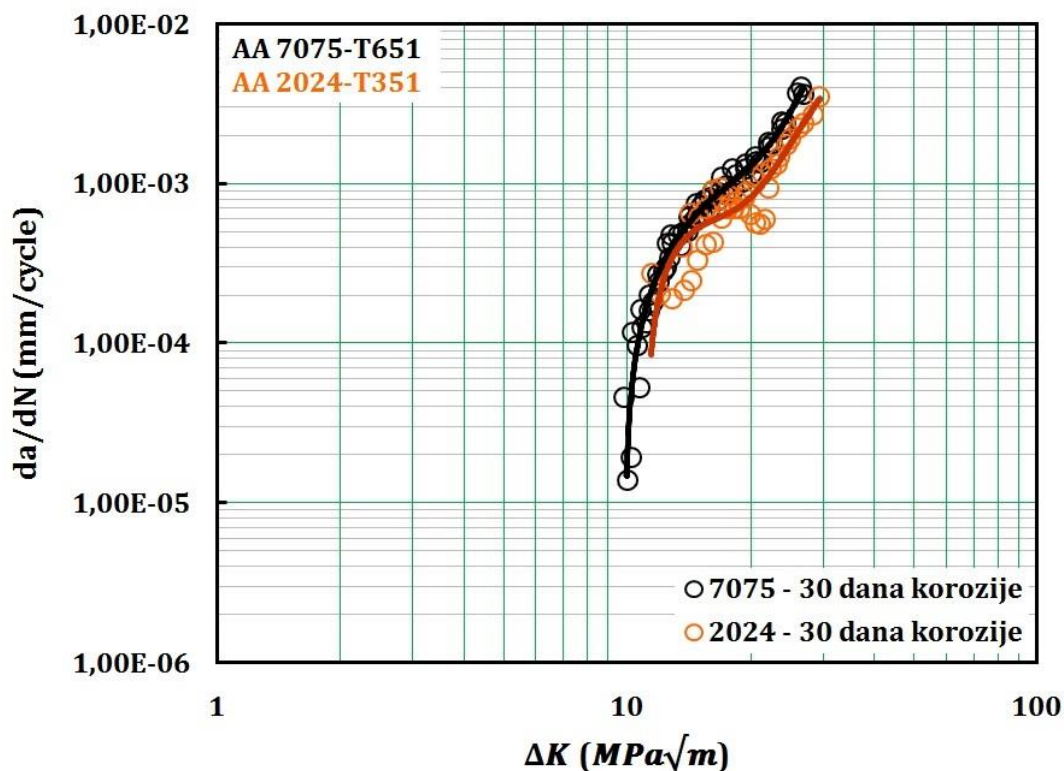
U nastavku, na slikama 90, 91 i 92, predstavljeni su uporedni pregledi kriva brzine rasta zamorne prsline, da/dN , u zavisnosti od varijacije faktora inteziteta naprezanja, ΔK , izmerene u uzorcima od 2024-T351 i 7075-T651, za svako od tri pojedinačna vremena izlaganja koroziji.



Slika 90. Krive brzine rasta prsline, $da/dN=f(\Delta K)$, za uzorke od 2024-T351 i 7075-T651, bez prethodne korozije



Slika 91. Krive brzine rasta prsline, $da/dN=f(\Delta K)$, za uzorke od 2024-T351 i 7075-T651, sa vremenom izloženosti koroziji od 7 dana



Slika 92. Krive brzine rasta prsline, $da/dN=f(\Delta K)$, za uzorke od 2024-T351 i 7075-T651, sa vremenom izloženosti koroziji od 30 dana

Konačno, primetan je značajan degradacioni uticaj korozije u uzorcima kod obe legure alumnijuma, kako u uzorcima od 2024-T351, tako i u uzorcima od 7075-T651. Naime, evidentno je da u korodiranim uzorcima, pri istim uslovima opterećenja ($F=20$ kN, $R=0,1$ i $f=15$ Hz), do nestabilnog rasta i širenja prsline maksimalnom brzinom, a u krajnjem slučaju do loma uzorka, dolazi pri manjim dužinama prsline, nego što je to slučaj kod uzoraka bez prethodne korozije.

7.2.3. Određivanje koeficijenta Parisove jednačine

Prilikom obrade rezultata dinamičkih zateznih ispitivanja kompaktnih CT uzoraka, izrađenih iz ploča od legura aluminijuma za vazduhoplove 2024-T351 i 7075-T651, pored analize brzina rasta zamorne prsline, akcenat je bio na određivanju koeficijenta Parisove jednačine.

Na osnovu prikupljenih rezultata ispitivanja rasta zamorne prsline i dijagrama uticaja faktora inteziteta naprezanja na brzinu rasta prsline, $da/dN=f(\Delta K)$, aproksimacijom središnjeg dela krive, koja prikazuje stabilan rast zamorne prsline, i određivanjem nagiba krive (m), kao i njenog preseka sa z osom (C), određeni su koeficijenti Parisove jednačine za uzorke izrađene od legura aluminijuma 2024-T351 i 7075-T651. Vrednosti koeficijenata dobijene na ovakav način su potom iskorišćene kao ulazni elementi za numeričku simulaciju i procenu veka upotrebe elementa strukture vazduhoplova.

U tabelama 17 i 18 mogu se videti dijagrami sa $da/dN=f(\Delta K)$ krivama brzine rasta prsline, u logaritamskoj razmeri, pomoću kojih su utvrđeni koeficijenti Parisove jednačine. Takođe, prikazani su i koeficijenti m i C za sve tri grupe uzoraka (uzorci bez prethodne korozije, uzorci izloženi dejstvu korozije u trajanju od 7 dana i uzorci izloženi dejstvu korozije u trajanju od 30 dana).

Kao što je prikazano u tabeli 17, srednje vrednosti Parisovih koeficijenata C i m za uzorke od legure aluminijuma 2024-T351 iznose $2,04144 \times 10^{-7}$ mm/ciklusu i 3,1893 za uzorke bez prethodne korozije, odnosno $5,30753 \times 10^{-7}$ mm/ciklusu i 2,7966 za uzorke izložene dejstvu korozije u trajanju od 7 dana, i $1,40180 \times 10^{-6}$ mm/ciklusu i 2,5987 za uzorke izložene dejstvu korozije u trajanju od 30 dana.

Tabela 17. Vrednosti Parisovih koeficijenata za uzorke od legure aluminijuma 2024-T351. (A) uzorci bez prethodne korozije, (B) uzorci izloženi dejstvu korozije 7 dana i (C) uzorci izloženi dejstvu korozije 30 dana

Vreme izlaganja koroziji	Uzorak	Parisovi koeficijenti		Srednje vrednosti Parisovih koeficijenata		
		m	C	m_{sr}	C_{sr}	
A) bez korozije	2-2					
	2-2 _{2024-T351/bk}	3,1257	$8,92335 \times 10^{-8}$	3,1893	$2,04144 \times 10^{-7}$	
	2-3 _{2024-T351/bk}	2,5599	$5,14539 \times 10^{-7}$			
	2-4 _{2024-T351/bk}	2,6719	$3,83496 \times 10^{-7}$			
	2-5 _{2024-T351/bk}	3,8859	$1,08999 \times 10^{-8}$			
2-6 _{2024-T351/bk}	3,7033	$2,25499 \times 10^{-8}$				
B) 7 dana	2-1					
	2-1 _{2024-T351/7d}	2,2621	$1,30827 \times 10^{-6}$	2,7966	$5,30753 \times 10^{-7}$	
	2-2 _{2024-T351/7d}	3,3058	$5,23559 \times 10^{-8}$			
2-3 _{2024-T351/7d}	2,8218	$2,31634 \times 10^{-7}$				
C) 30 dana	2-1					
	2-1 _{2024-T351/30d}	2,1758	$1,30407 \times 10^{-6}$	2,5987	$1,40180 \times 10^{-6}$	
	2-2 _{2024-T351/30d}	3,3026	$4,74210 \times 10^{-8}$			
2-3 _{2024-T351/30d}	2,3178	$2,85392 \times 10^{-6}$				

Na isti način su određene srednje vrednosti koeficijenata C i m za uzorke od legure aluminijuma 7075-T651, i iste iznose $2,52968 \times 10^{-7}$ mm/ciklusu i 3,1519 za uzorke bez prethodne korozije, odnosno $2,17453 \times 10^{-7}$ mm/ciklusu i 3,0608 za uzorke izložene dejstvu korozije u trajanju od 7 dana, i $3,85132 \times 10^{-7}$ mm/ciklusu i 2,7477 za uzorke izložene dejstvu korozije u trajanju od 30 dana.

Tabela 18. Vrednosti Parisovih koeficijenata za uzorke od legure aluminijuma 7075-T651. (A) uzorci bez prethodne korozije, (B) uzorci izloženi dejstvu korozije 7 dana i (C) uzorci izloženi dejstvu korozije 30 dana

Vreme izlaganja koroziji	Uzorak	Parisovi koeficijenti		Srednje vrednosti Parisovih koeficijenata		
		m	C	m_{sr}	C_{sr}	
A) bez korozije						
	1-1 _{7075-T651/bk}	2,7191	$3,57518 \times 10^{-7}$	3,1519	$2,52968 \times 10^{-7}$	
	1-5 _{7075-T651/bk}	2,8144	$3,30529 \times 10^{-7}$			
	1-8 _{7075-T651/bk}	3,9222	$7,08570 \times 10^{-8}$			
B) 7 dana						
	1-1 _{7075-T651/7d}	3,2152	$1,05992 \times 10^{-7}$	3,0608	$2,17453 \times 10^{-7}$	
	1-2 _{7075-T651/7d}	3,0411	$2,07341 \times 10^{-7}$			
	1-3 _{7075-T651/7d}	2,926	$3,39027 \times 10^{-7}$			
C) 30 dana						
	1-1 _{7075-T651/30d}	2,6916	$4,84043 \times 10^{-7}$	2,7477	$3,85132 \times 10^{-7}$	
	1-2 _{7075-T651/30d}	2,8037	$2,86220 \times 10^{-7}$			

8. PRORAČUN VEKA NOSEĆE KONSTRUKCIJE VAZDUHOPLOVA

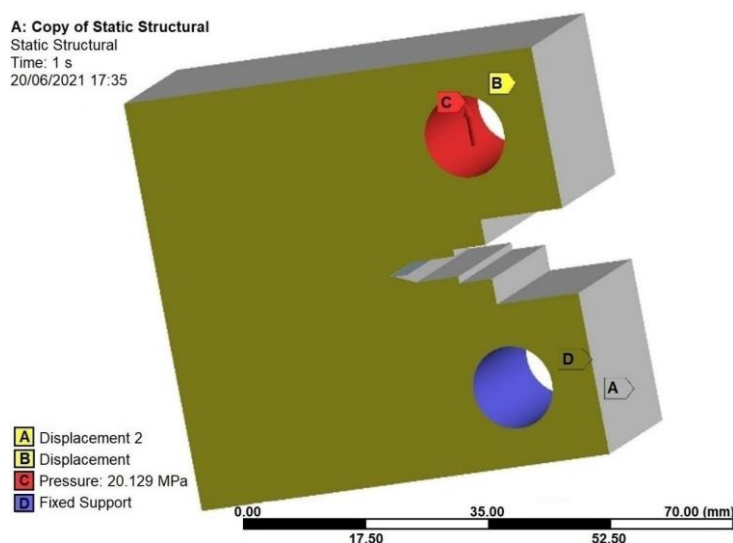
8.1. NUMERIČKA SIMULACIJA RASTA ZAMORNE PRSLINE U UZORKU OD LEGURE ALUMINIJUMA 2024-T351

U ovom poglavlju prikazani su rezultati simulacije rasta prsline, korišćenjem softverskog paketa ANSYS, zasnovanog na metodi konačnih elemenata [108].

Simulacija je urađena korišćenjem SMART (*Separating, Morphing, Adaptive and Remeshing Technology*) alata, koji je najnoviji alat za izračunavanje rasta prsline u ANSYS Mechanical. Pored izračunavanja parametara loma K_1 , SMART podržava proračun radnog ciklusa zamora koristeći Parisov zakon.

U ovom slučaju, predmet analize je procena broja ciklusa opterećenja do loma za uzorak legure aluminijuma 2024-T351, bez prethodnog izlaganja uzorka koroziji, što je prethodno eksperimentalno analizirano.

Izvršena je statička strukturna analiza u kombinaciji sa analizom loma, uz korišćenje Parisovog zakona za procenu broja ciklusa. Primenjene su promenljive vrednosti pritiska, izračunate korišćenjem vrednosti sile izmerene u eksperimentu i površine rupe na koju je sila delovala. Druga rupa na uzorku je fiksirana (slika 93), dok je pomeranje dve paralelne površine (žute boje) uzorka dozvoljeno samo u pravcu spoljašnje sile. Pritisak je primenjen u 36 vremenskih koraka prikazanih u Tabeli 19.



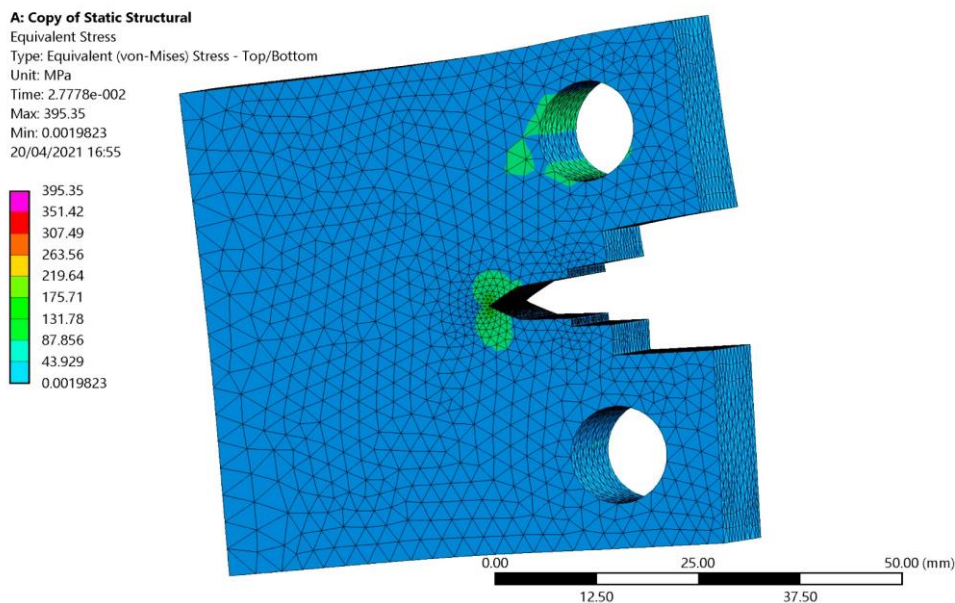
Slika 93. Granični uslovi

Osnovni podaci o FEA (eng. *Finite Element Analysis*) modelu su sledeći:

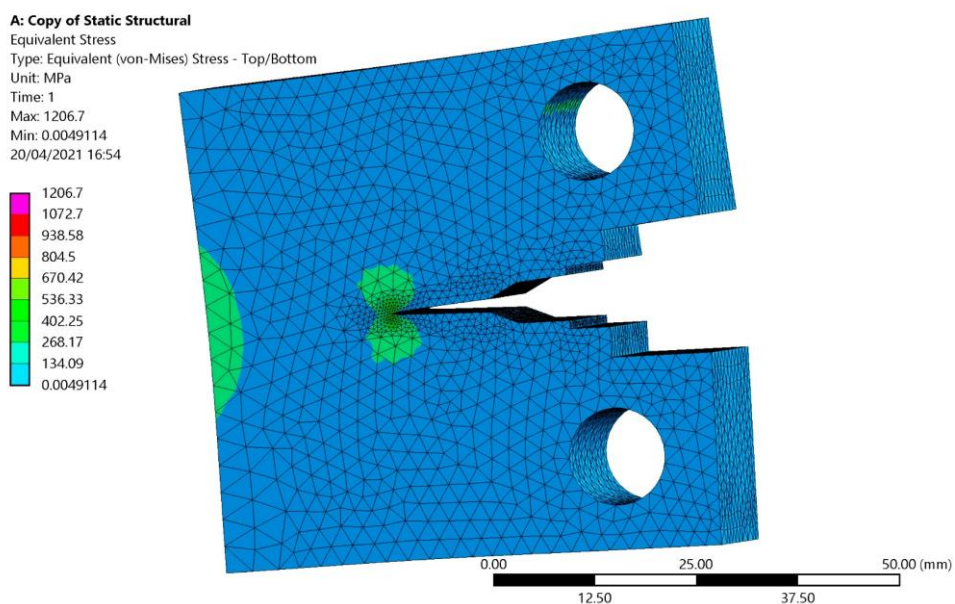
- tip elementa koji se koristi: parabolični tetraedrski elementi SOLID187,

- broj elemenata početnog modela: 88.605,
- broj čvorova početnog modela: 127.116,
- ukupan broj elemenata definisanih nakon prepravljanja: 153.413,
- ukupan broj čvorova definisanih nakon ponovnog mešanja: 216.879.

Na slikama 94 i 95 prikazano je naponsko stanje u uzorku na početku i na kraju simulacije, i njihova svrha je da pokažu da na polje napona oko vrha prsline ne utiču granični uslovi. Vrednosti napona oko vrha prsline rastu kako prslina raste i koriste se za proračun faktora intenziteta naprezanja neophodnih za procenu broja ciklusa. Takođe, ove brojke pokazuju razliku između početnog i konačnog napuklog uzorka, kao i razliku u FEA mrežici između početnog i finalnog FEA modela.



Slika 94. Naponsko stanje u uzorku na početku simulacije (za uzorak od 2024-T351, bez prethodne korozije)

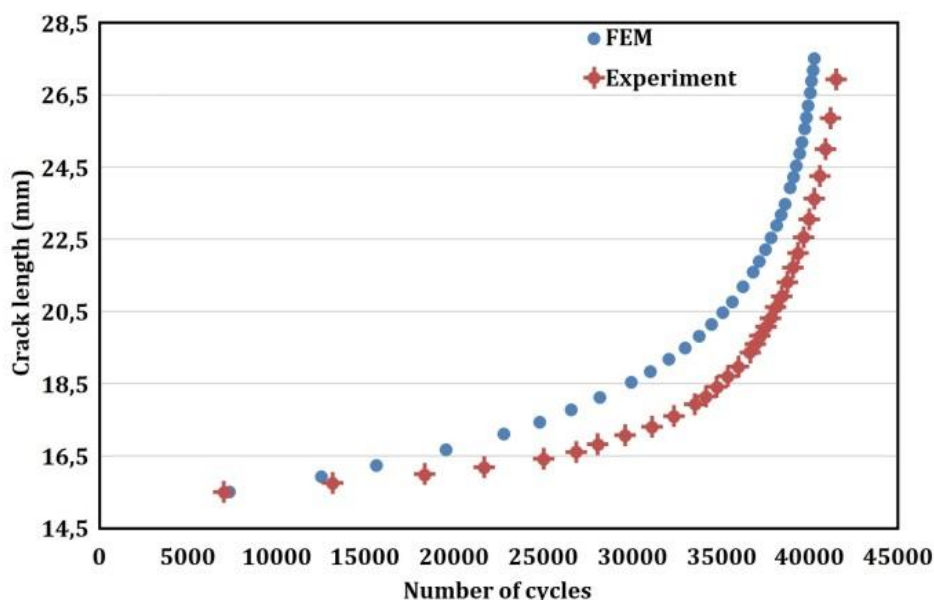


Slika 95. Naponsko stanje u uzorku na kraju simulacije (za uzorak od 2024-T351, bez prethodne korozije)

Tabela 19. Vrednosti pritiska korišćeni u simulaciji

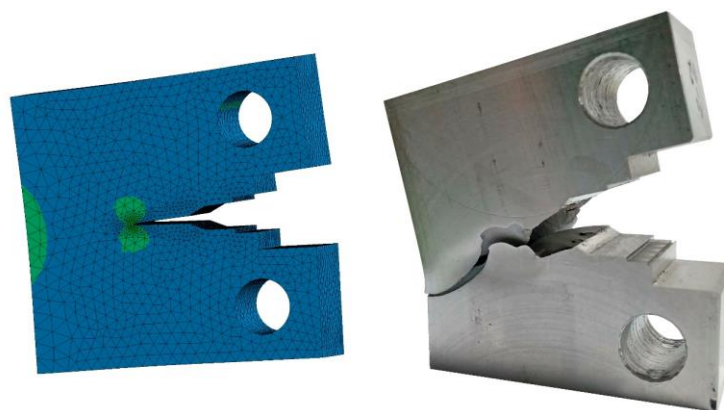
Red. Br.	Vremenski korak (s)	Pritisak (MPa)	Red. Br.	Vremenski korak (s)	Pritisak (MPa)	Red. Br.	Vremenski korak (s)	Pritisak (MPa)
1.	0.0	-9.726	13.	0.34286	-13.187	25.	0.68571	-17.234
2.	2.8E-02	-9.969	14.	0.37143	-13.694	26.	0.71429	-17.509
3.	5.7E-02	-9.852	15.	0.4	-14.025	27.	0.74286	-17.860
4.	8.5E-02	-9.762	16.	0.42857	-14.309	28.	0.77143	-18.164
5.	0.11429	-10.038	17.	0.45714	-14.715	29.	0.8	-18.489
6.	0.14286	-10.430	18.	0.48571	-15.130	30.	0.82857	-18.809
7.	0.17143	-10.981	19.	0.51429	-15.542	31.	0.85714	-19.081
8.	0.2	-11.359	20.	0.54286	-15.820	32.	0.88571	-19.365
9.	0.22857	-11.748	21.	0.57143	-16.076	33.	0.91429	-19.682
10.	0.25714	-12.020	22.	0.6	-16.345	34.	0.94286	-19.901
11.	0.28571	-12.370	23.	0.62857	-16.651	35.	0.97143	-20.083
12.	0.31429	-12.856	24.	0.65714	-16.889	36.	1.0	-20.129

Na slici 96 dat je uporedni pregled rezultata dobijenih eksperimentalno i numerički simulacijom. Upoređivanjem rezultata dobijenih eksperimentalno i numerički simulacijom, može se zaključiti da se relativno dobro poklapaju. Razlike u rezultatima se kreću i do 15%. Mogla bi biti i manja razlika, ali pošto se u različitim eksperimentima sa zamornim prslinama, pod istim uslovima ispitivanja, često dobijaju značajnija odstupanja u rezultatima, ova vrednost broja ciklusa i nije tako loša. Svakako, numerički model se mora dalje usavršavati. Korišćeno je promenljivo opterećenje (a ne konstantno), koje više odgovara izmerenim vrednostima sile u eksperimentu.



Slika 96. Uporedni pregled rezultata dobijenih eksperimentalno i numeričkom simulacijom (za uzorak od 2024-T351, bez prethodne korozije)

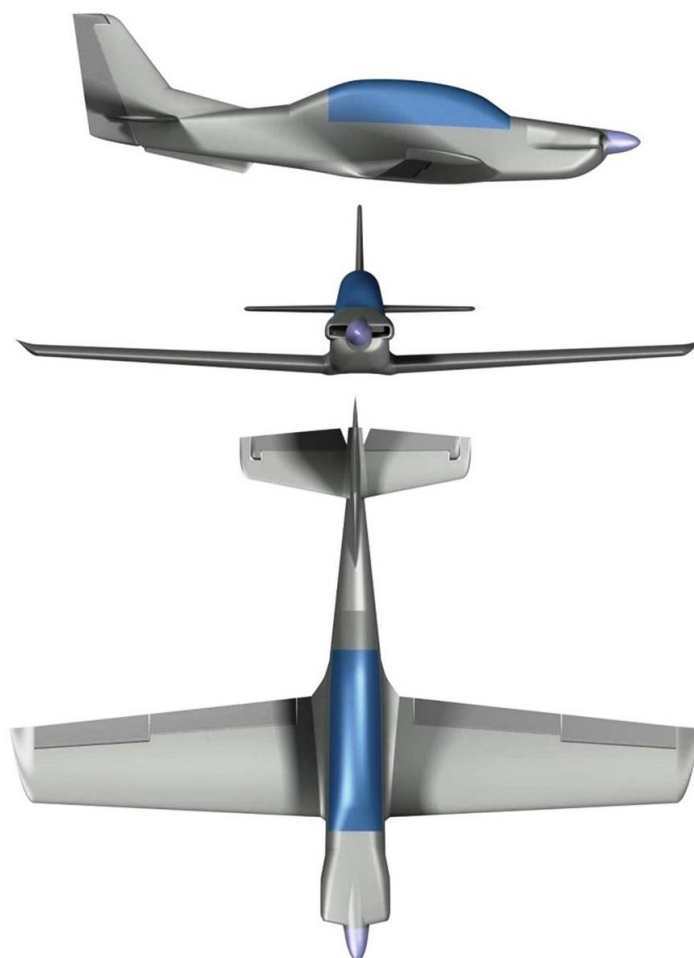
Inače, zamor je statistički fenomen i rezultati mogu značajno da odstupaju. Parisovi koeficijenti za legure aluminijuma 2024, 7075 i druge materijale, na osnovu kojih se računa broj ciklusa, moraju uvek iznova da se mere, jer to nisu standardne vrednosti kao što je modul elastičnosti i slično.



Slika 97. Numerički model uzorka na kraju simulacije i eksperimentalni uzorak od legure aluminijuma 2024-T351 na kraju eksperimenta – nakon loma

8.2. PROCENA VEKA STRUKTURNIH ELEMENATA VAZDUHOPILOVA

Kao što je navedeno u uvodnom delu disertacije, šezdesetih godina prošlog veka mehanika loma je doživela buran razvoj, da bi deset godina kasnije postalo jasno da izučavanje loma samog po sebi nije osnovni zadatak ove discipline, nego, naprotiv, sprečavanje loma. Time su postavljeni temelji nove naučne discipline, integriteta konstrukcija.

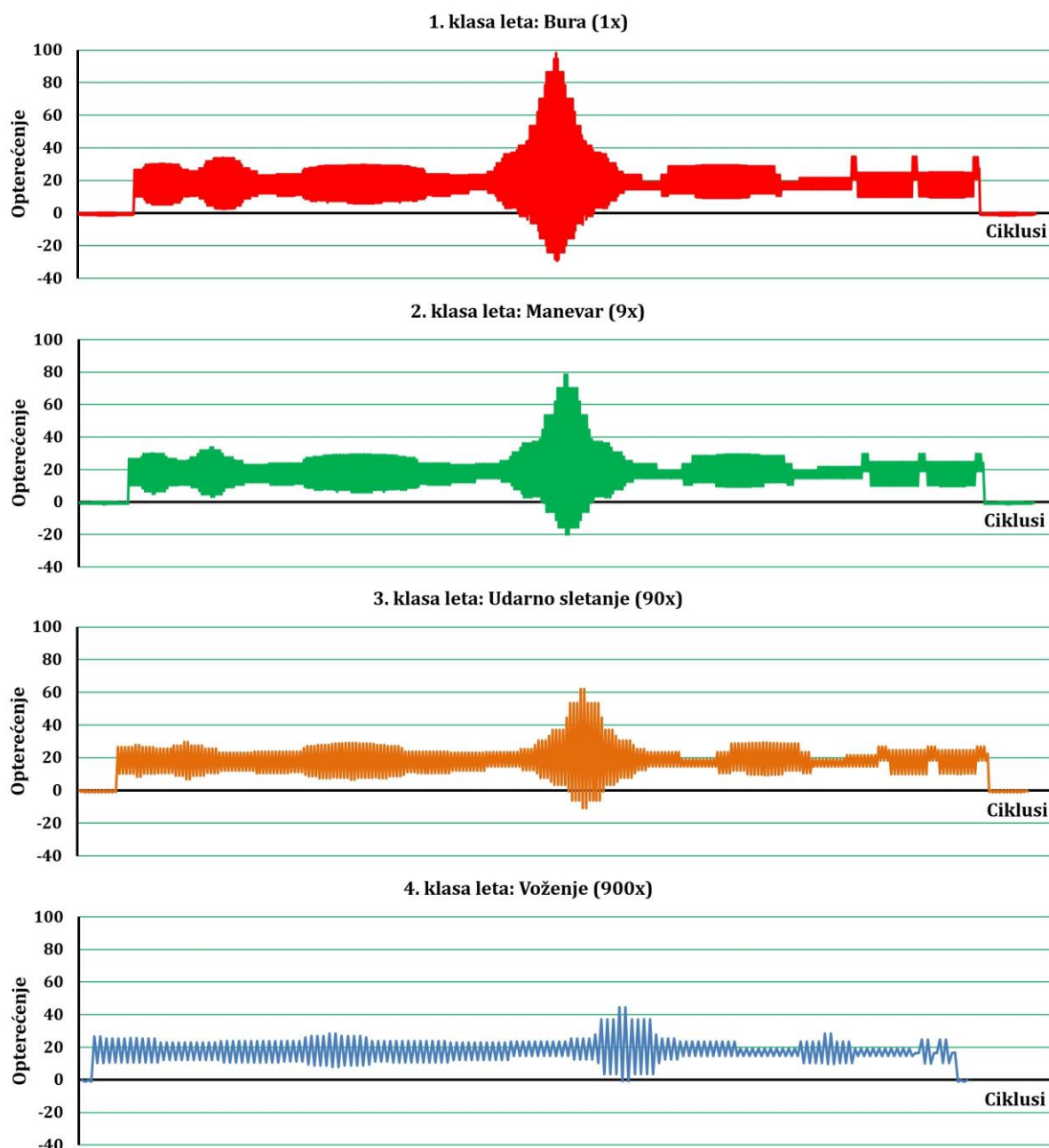


Slika 98. Laki akrobatsko-trenažni avion

U fazi razvoja vazduhoplova, primenom klasičnog principa konstruisanja, radni vek se generalno predviđa na osnovu iskustvenih, tj. pretpostavljenih podataka. Na primer, jedan let aviona sastoji se od više faza, počev od poletanja, raznih manevara i na kraju sletanja. Za vreme svake faze leta, strukturni elementi vazduhoplova su opterećeni sa više različitih nivoa opterećenja, koji čine tzv. blok spektra opterećenja.

Prilikom projektovanja lakog akrobatsko-trenažnog aviona (slika 98), pretpostavljeno je da će isti tokom svog radnog veka biti podvrgnut opterećenjima karakterističnim za četiri klase leta: 1. bura, 2. manevar, 3. udarno sletanje i 4. voženje. Takođe, pretpostavljeno je da će od ukupno 1.000 letova, 1 let biti klase 1, 9 letova klase 2, 90 letova klase 3 i 900 letova klase 4.

Na slici 99 prikazani su blokovi opterećenja donje uške veze krilo–trup aviona, za sve četiri klase leta. Jedan blok spektra opterećenja predstavlja skup cikličnih opterećenja koja se javljaju za određeni broj letova, odnosno za određeni časovni nalet.



Slika 99. Blokovi opterećenja donje uške veze krilo–trup

Ukoliko, u skladu sa prethodnim dijagramima, maksimalnoj vrednosti opterećenja od nominalnih 98,132, zabeleženoj u klasi leta „bura“, dodelimo vrednost 1, dobijamo sledeće vrednosti opterećenja donje uške veze krilo–trup (Tabela 20):

Tabela 20. Vrednosti opterećenja donje uške veze krilo–trup

Klasa leta aviona	Maksimalno opterećenje (S_{max})	Minimalno opterećenje (S_{min})
1. Bura	1,0	-0,2998
2. Udarno sletanje	0,80033	-0,2026
3. Manevar	0,63114	-0,1116
4. Vožnja	0,45444	-0,0071
UKUPNO	1,0	-0,2998

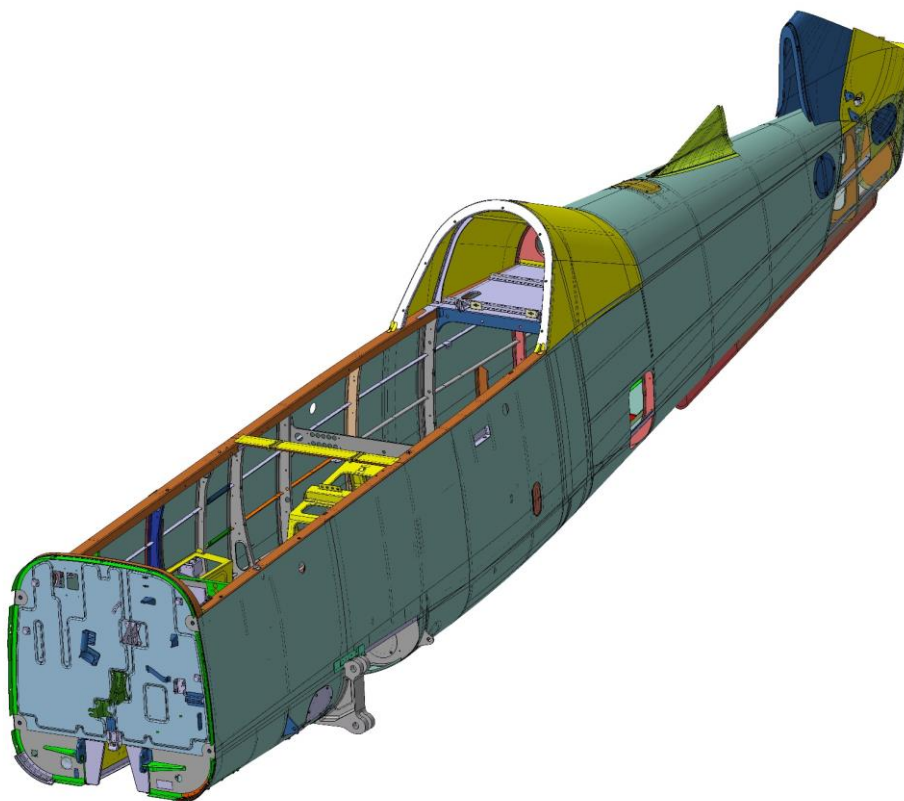
Uzimajući u obzir slučaj maksimalnog opterećenja krila, pri maksimalnom koeficijentu uzgona, sa maksimalnom masom aviona od 1.210 kg, dobijamo sledeće vrednosti opterećenja donje uške veze krilo–trup:

$$F_{du(max)} = 24.215 \text{ daN}$$

$$F_{du(min)} = - 7.260 \text{ daN}$$

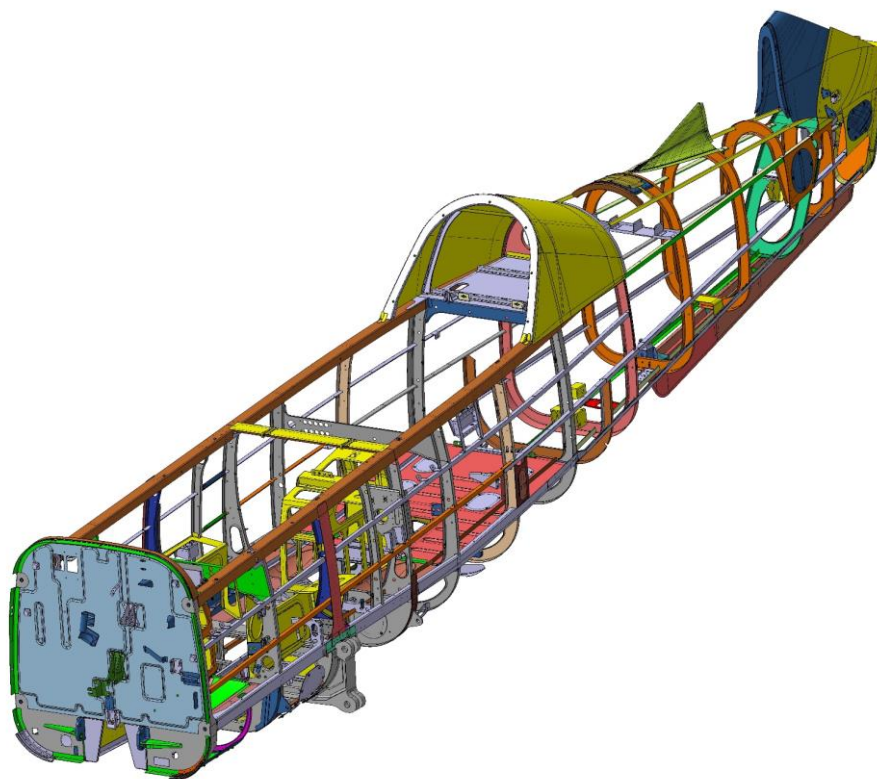
U skladu sa prethodno navedenim, i uzimajući u obzir odgovarajući faktor sigurnosti, budući da ni najobimnije analize i neograničen broj testiranja ne mogu sa sigurnošću da predvide koliko dugo će određeni deo raditi bez otkaza, predmetnom avionu projektovan je vremenski vek upotrebe od 20 godina ili 6.000 časova leta, u zavisnosti šta pre istekne.

Tehnički opis trupa i najodgovornijih elemenata trupa



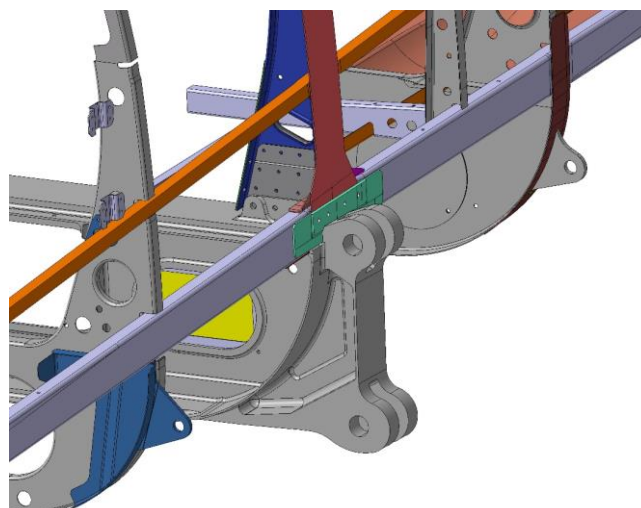
Slika 100. Trup lakog akrobatsko-treznog aviona

Sklop trupa lakog akrobatsko-trenažnog aviona je klasična vazduhoplovna metalna konstrukcija (slika 100). Osnovna noseća konstrukcija je izrađena od duraluminijumskih limenih okvira, uzdužnika i frezovanih okova u zonama prijema koncentrisanih opterećenja. Trup se sastoji od trinaest okvira, tri poluokvira, dvanaest uzdužnika i niza drugih konstrukcionih elemenata (Slika 101).



Slika 101. Konstrukcija trupa lakog akrobatsko-trenažnog aviona

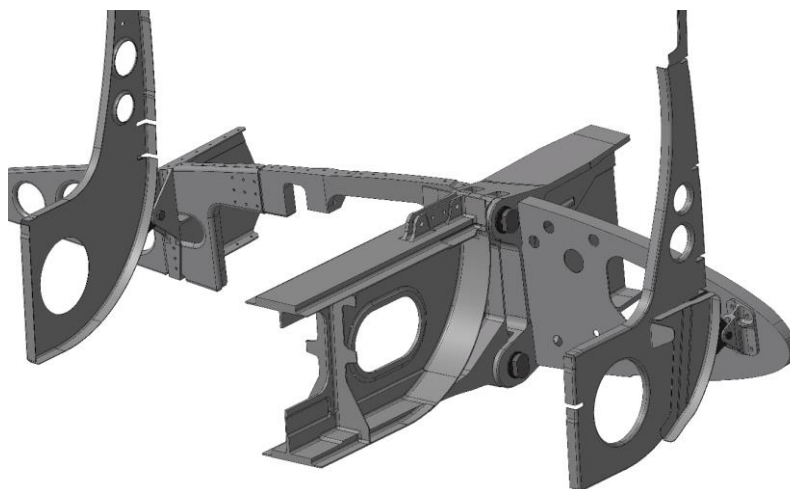
Na ojačane okvire br. 2, 3 i 5 na trup se ugrađuju krila (slika 102), dok na okvirima br. 12, 12A i 13 na trup se ugrađuju horizontalne i vertikalne repne površine.



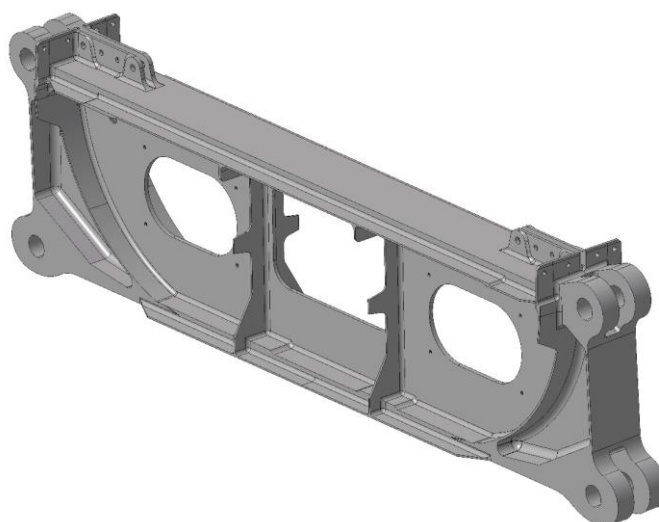
Slika 102. Ojačani okviri br. 2, 3 i 5 sa uškama za ugradnju krila

Okvir br. 2 je limeni okvir sastavljen iz više elemenata. U polubočnoj zoni ispod patosa kabine u sendviču između okvira br.2 i limenog segmenta ugrađen je okov prednje veze krilo-trup. Okvir br. 3 je limeno-frezovano konstrukciono rešenje i predstavlja jedan od glavnih okvira na avionu (Slika 103). Osnovna namena ovoga okvira je prihvat i razvođenje opterećenja

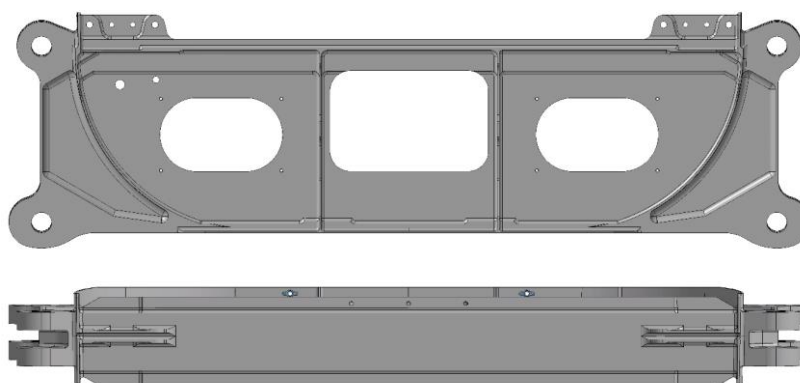
sa glavne veze krilo–trup. U zoni ispod patosa provučena je frezovana greda sa uškama za vezu krilo–trup. Greda na okviru br. 3 je samouravnotežujuća, te se moment savijanja, koji se prima sa levog i desnog krila, uravnotežuje unutar grede. Greda okvira br. 3 (Slika 104) izvedena je u obliku latiničnog slova „I“ sa masivnim pojasevima.



Slika 103. Veza krilo-trup, sa centroplošnom gredom okvira br. 3



Slika 104. Izgled centroplošne grede okvira br. 3, sa uškama za vezu krilo–trup



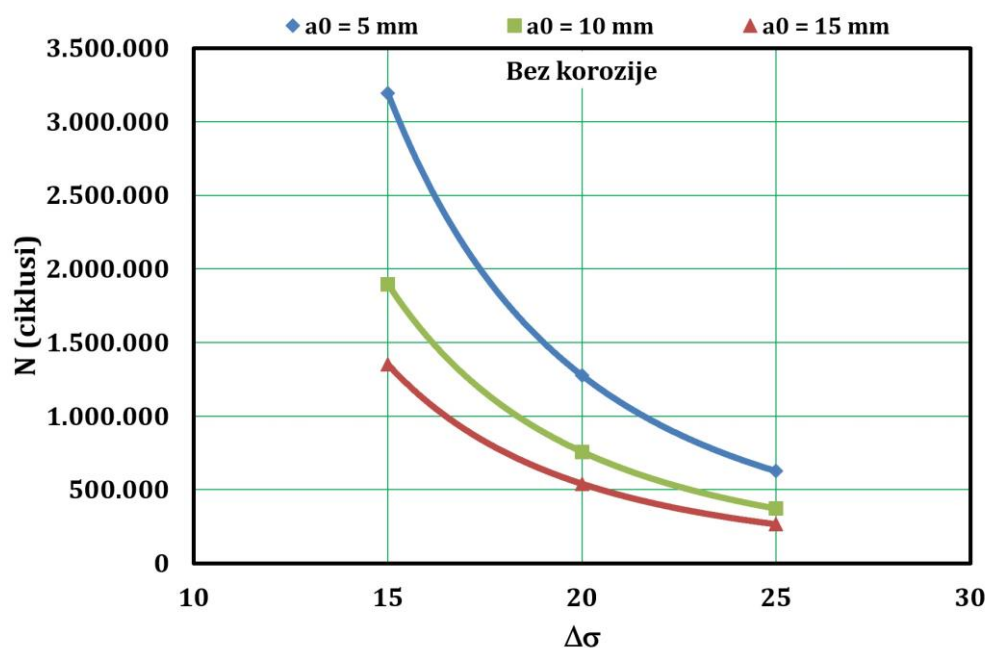
Slika 105. Centroplošna greda okvira br. 3, pogled sa strane i odozgo

8.2.1. Procena veka okvira trupa lakog akrobatsko-trenažnog aviona

U ovom poglavlju predstavljeni su rezultati proračuna ostatka veka centropplanske grede trupa aviona, sa ivičnom prslinom. Naime, na dijagramima (slike 106÷111) izrađenim na osnovu rezultata proračuna predstavljenih u tabelama 21÷26, prikazan je uticaj dužine inicijalne prsline (a_0), opsega napona ($\Delta\sigma$) i vremena izloženosti predmetne strukture dejstvu korozijske sredine ($T_{\text{korozijske}}$) na broj ciklusa do loma (N), tj. do dostizanja kritične dužine prsline (A_{cr}), koja je u ovom slučaju iznosi 70 mm. Za potrebe proračuna razmatrani su slučajevi strukture izložene uticaju korozijske sredine u trajanju od 0, 7 i 30 dana, sa inicijalnom prslinom dužine 5 mm, 10 mm i 15 mm, a pod dejstvom opsega napona od 15 MPa, 20 MPa i 25 MPa, tab. 21-23 i sl. 106-108.

Tabela 21. Broj ciklusa (N) u zavisnosti od dužine inicijalne prsline (a_0) i opsega napona ($\Delta\sigma$), za strukturu bez prethodne korozijske

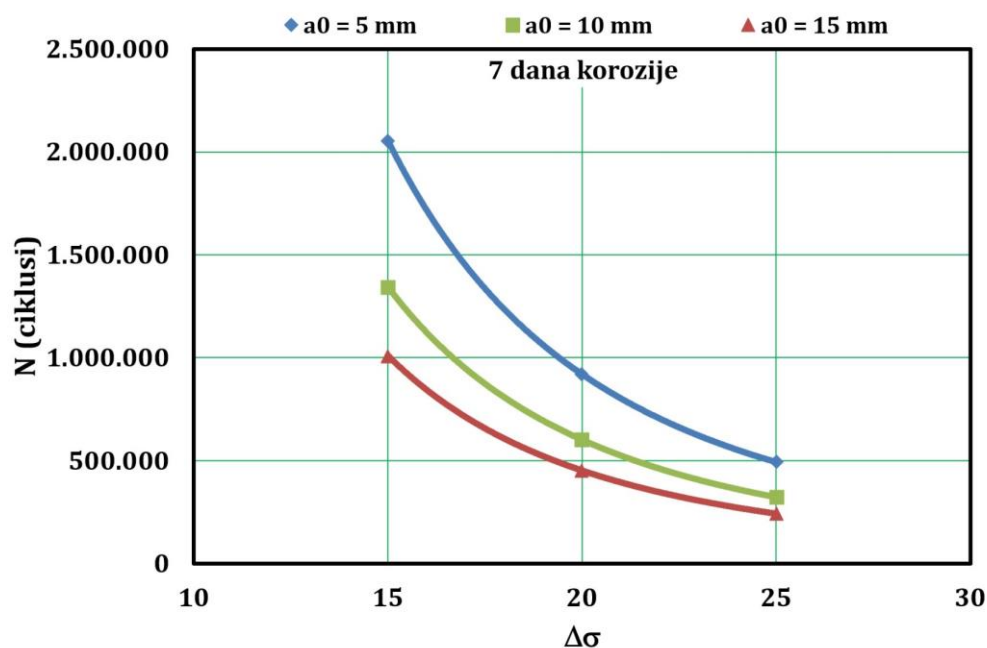
Bez korozijske ($A_{cr} = 70$ mm)			
Napon, $\Delta\sigma$ [MPa]	dužina inicijalne prsline, a_0		
	5 mm	10 mm	15 mm
15	3.191.703	1.895.237	1.350.721
20	1.275.133	757.175	539.633
25	625.865	371.639	264.864



Slika 106. Dijagram zavisnosti broja ciklusa od dužine inicijalne prsline (a_0) i primenjenog opterećenja (σ), za strukturu bez prethodne korozijske

Tabela 22. Broj ciklusa (N) u zavisnosti od dužine inicijalne prsline (a_0) i opsega napona ($\Delta\sigma$), za strukturu izloženu uticaju korozijske sredine u trajanju od 7 dana

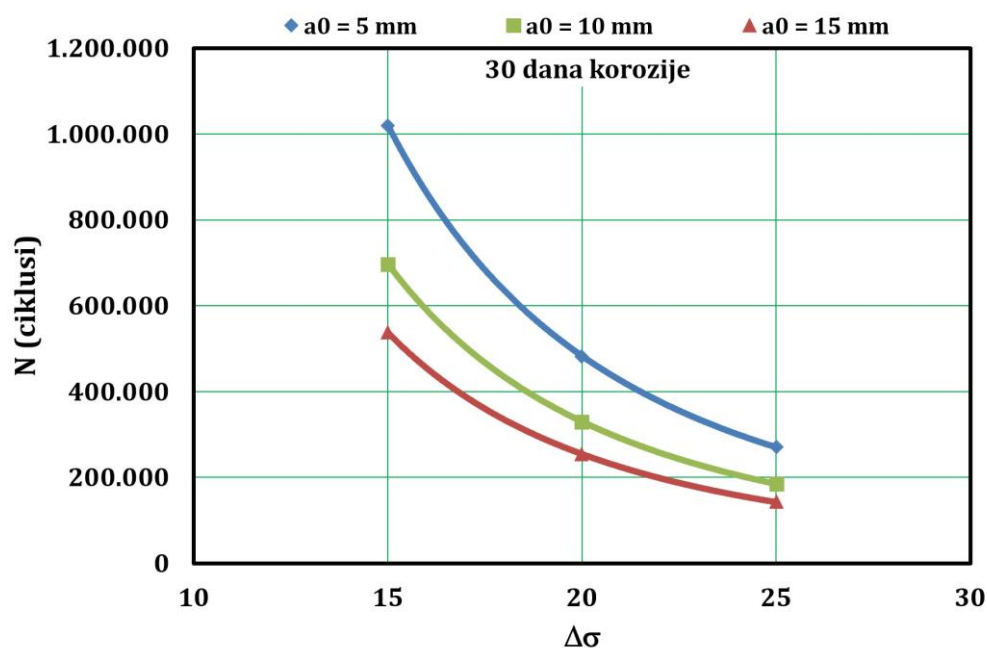
7 dana korozijske ($A_{cr} = 70$ mm)			
Napon, $\Delta\sigma$ [MPa]	dužina inicijalne prsline, a_0		
	5 mm	10 mm	15 mm
15	2.054.548	1.343.166	1.009.505
20	918.994	600.795	451.549
25	492.373	321.890	241.928



Slika 107. Dijagram zavisnosti broja ciklusa od dužine inicijalne prsline (a_0) i primenjenog opterećenja (σ), za strukture izloženu dejstvu korozije u trajanju od 7 dana

Tabela 23. Broj ciklusa (N) u zavisnosti od dužine inicijalne prsline (a_0) i opsega napona ($\Delta\sigma$), za strukturu izloženu uticaju korozione sredine u trajanju od 7 dana

30 dana korozije ($A_{cr} = 70$ mm)			
Napon, $\Delta\sigma$ [MPa]	dužina inicijalne prsline, a_0		
	5 mm	10 mm	15 mm
15	1.019.521	696.882	536.956
20	482.745	329.975	254.250
25	270.320	184.774	142.370

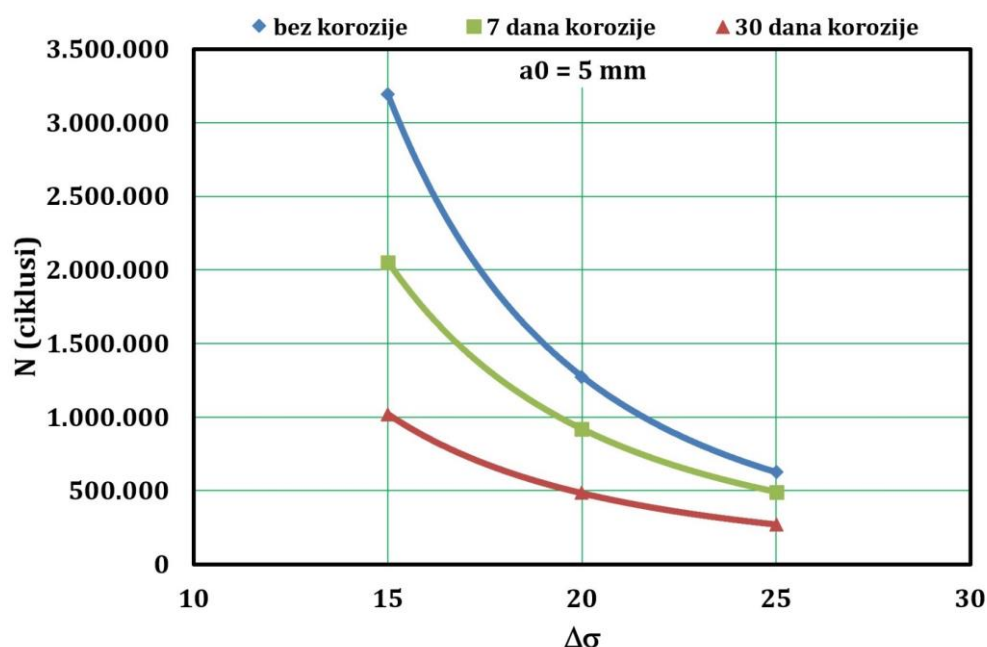


Slika 108. Dijagram zavisnosti broja ciklusa od dužine inicijalne prsline (a_0) i primenjenog opterećenja (σ), za strukture izloženu dejstvu korozije u trajanju od 30 dana

Sa druge strane, u nastavku je izvršen proračun broja ciklusa do loma, u zavisnosti od vremena izlaganja strukture dejstvu korozivne sredine ($T_{\text{korozijske}}$) i opsega napona ($\Delta\sigma$) od 20 ± 5 MPa, a za slučaj strukture sa različitim dužinama inicijalne prsline (5 mm, 10 mm i 15 mm), tab. 24-26, sl. 109-111.

Tabela 24. Broj ciklusa (N) u zavisnosti od vremena izlaganja dejstvu korozivne sredine ($T_{\text{korozijske}}$) i primenjenog opterećenja (σ), za strukturu sa inicijalnom prsline dužine 5 mm

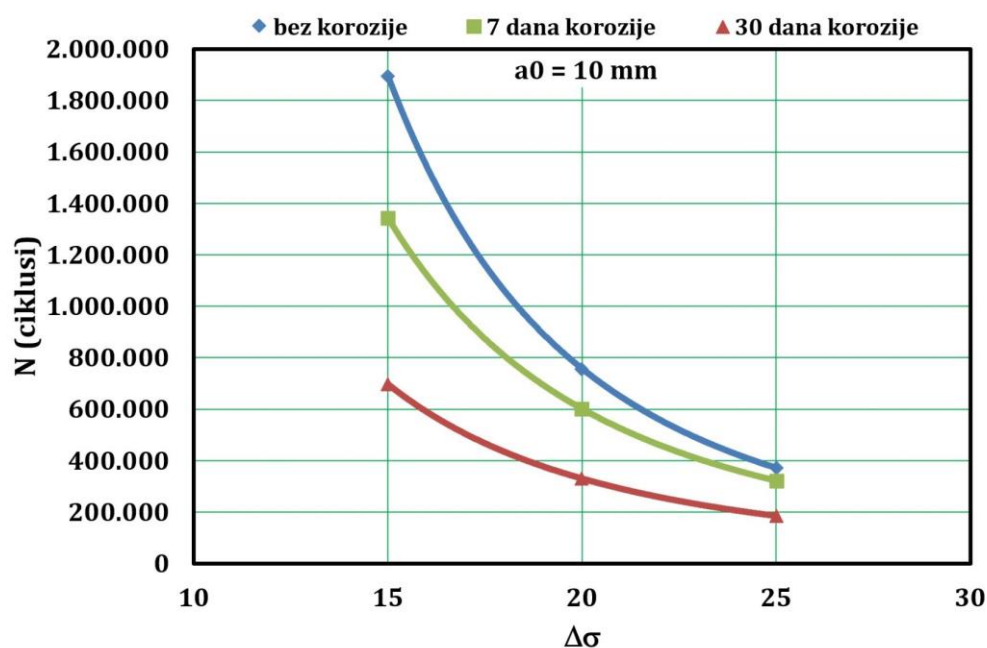
$a_0 = 5 \text{ mm}$ ($A_{cr} = 7 \text{ cm}$)			
Napon, $\Delta\sigma$ [MPa]	vreme izlaganja u korozivnoj sredini, $T_{\text{korozijske}}$		
	0 dana	7 dana	30 dana
15	3.191.703	2.054.548	1.019.521
20	1.275.133	918.994	482.745
25	625.865	492.373	270.320



Slika 109. Dijagram zavisnosti broja ciklusa od vremena izlaganja dejstvu korozivne sredine ($T_{\text{korozijske}}$) i primenjenog opterećenja (σ), za strukturu sa inicijalnom prsline dužine 5 mm

Tabela 25. Broj ciklusa (N) u zavisnosti od vremena izlaganja dejstvu korozivne sredine ($T_{\text{korozijske}}$) i primenjenog opterećenja (σ), za strukturu sa inicijalnom prsline dužine 10 mm

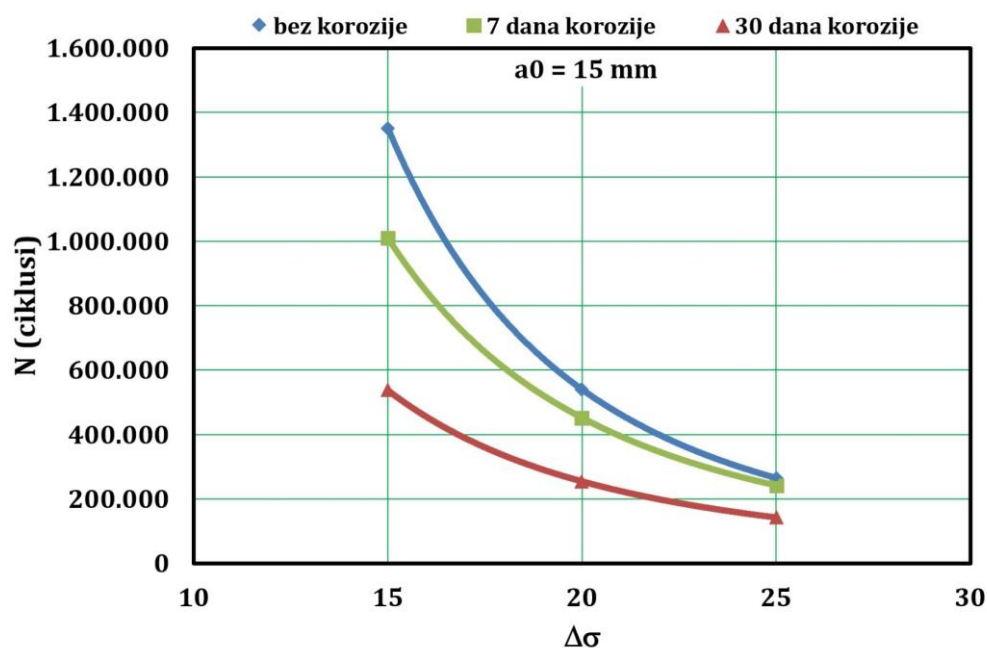
$a_0 = 10 \text{ mm}$ ($A_{cr} = 7 \text{ cm}$)			
Napon, $\Delta\sigma$ [MPa]	vreme izlaganja u korozivnoj sredini, $T_{\text{korozijske}}$		
	0 dana	7 dana	30 dana
15	1.895.237	1.343.166	696.882
20	757.175	600.795	329.975
25	371.639	321.890	184.774



Slika 110. Dijagram zavisnosti broja ciklusa od vremena izlaganja dejstvu korozivne sredine ($T_{korozije}$) i primenjenog opterećenja (σ), za strukture sa inicijalnom prslinom dužine 10 mm

Tabela 26. Broj ciklusa (N) u zavisnosti od vremena izlaganja dejstvu korozivne sredine ($T_{korozije}$) i primenjenog opterećenja (σ), za strukturu sa inicijalnom prslinom dužine 15 mm

$a_0 = 15$ mm (Acr = 7$ cm)$			
Napon, $\Delta\sigma$ [MPa]	vreme izlaganja u korozivnoj sredini, $T_{korozije}$		
	0 dana	7 dana	30 dana
15	1.350.721	1.009.505	536.956
20	539.633	451.549	254.250
25	264.864	241.928	142.370



Slika 111. Dijagram zavisnosti broja ciklusa od vremena izlaganja dejstvu korozivne sredine ($T_{korozije}$) i primenjenog opterećenja (σ), za strukture sa inicijalnom prslinom dužine 15 mm

9. ZAKLJUČAK

Kako je već navedeno, primenom klasičnog koncepta projektovanja komponenata koje funkcionišu u uslovima zamora, takozvanog „*safe-life*“ koncepta, u sklopu kojeg se definiše ostatak veka komponenata bez prsline, a na osnovu iskustvenih, tj. pretpostavljenih podataka, struktura lakog trenajžno-akrobatskog aviona koji je predmet disertacije, kao i većine vojnih i civilnih vazduhoplova, projektovana je za radni vek od 20 godina.

Sa druge strane, prihvaćanje neizbežnosti prisustva prsline i sličnih nedostataka i neophodnosti analize dejstva istih na integritet konstrukcije, rezultiralo je prelaskom sa gore navedenog koncepta na koncept projektovanja sa sigurnošću od loma, takozvani „*fail-safe*“ koncept, koji omogućava da se, sa optimalnom izvesnošću, odredi ostatak veka komponenata sa prslinom i izvrši procena pouzdanosti istih do sledeće inspekcije.

U skladu sa navedenim, a uzimajući u obzir trenutne trendove revitalizacije elemenata konstrukcije vazduhoplova, kao i važnost prikupljanja saznanja o nastanku i rastu prsline i uticaju istih na funkcionalnost konstrukcija, predmet ove disertacije je procena veka i integriteta vazduhoplovnih konstrukcija od legura aluminijuma AA2024 i AA7075 u korozionom okruženju.

9.1. Rezultati istraživanja

U sklopu istraživanja sprovedena su ispitivanja uticaja korozije na mehanička svojstva (statička zatezna ispitivanja) i uticaja korozije na parametre mehanike loma (dinamička zatezna ispitivanja) legura aluminijuma AA2024-T351 i AA7075-T651. Rezultati statičkih zateznih ispitivanja ukazuju na ortotropne osobine čvrstoće ploča od predmetnih legura aluminijuma u zavisnosti od pravca valjanja ploča, kao i na degradaciju mehaničkih svojstava pod uticajem korozivne sredine. Na osnovu rezultata dinamičkih ispitivanja, evidentno je da, nezavisno od vremena izloženosti korozionom dejstvu, postoji razlika u brzinama rasta zamorne prsline u ispitanim epruvetama, u zavisnosti od legure aluminijuma od koje je izrađena epruveta, pri čemu su brzine u epruvetama od AA2024-T351 niže nego u epruvetama od AA7075-T651. Kada je u pitanju životni vek zamorne prsline, kao i dužina zamorne prsline, primetan je značajan degradacioni uticaj korozije u epruvetama od obe vrste legure aluminijuma.

Takođe, primenom softverskog paketa ANSYS, zasnovanog na metodi konačnih elemenata (MKE), izvršena je procena broja ciklusa opterećenja do loma za uzorak od legure aluminijuma 2024-T351, što je prethodno eksperimentalno analizirano. Upoređujući rezultate dobijene eksperimentalno i numerički simulacijom, može se zaključiti da se razlike u rezultatima kreću i do 15%, što nije sasvim prihvatljivo.

Na osnovu rezultata proračuna broja ciklusa do dostizanja kritične dužine prsline, i konačno do loma, u zavisnosti od dužine inicijalne prsline (a_0) i primenjenog opterećenja ($\Delta\sigma$), a za slučaj strukture od legure aluminijuma AA2024-T351, bez i sa prethodnom korozijom, evidentno je sledeće:

- Za strukturu bez prethodne korozije, pod istim uslovima opterećenja, u slučaju povećanja dužine inicijalne prsline za 100%, tj. sa 5 mm na 10 mm, broj ciklusa do loma manji je za 41%, odnosno za 58% u slučaju povećanja dužine inicijalne prsline za 200%, tj. sa 5 mm na 15 mm.

- Ista zakonitost je zabeležena i u slučajevima strukture izložene dejstvu korozione sredine u trajanju od 7 i 30 dana, s tim da je za strukturu izloženu prethodnom dejstvu korozije u trajanju od 7 dana broj ciklusa do loma manji za 35%, odnosno 51%, dok je za dejstvo korozije u trajanju od 30 dana to smanjenje 32%, odnosno 47%, za povećanje dužine inicijalne prsline za 100%, odnosno 200%.

- Konačno, pod istim uslovima opterećenja ($\sigma = \text{const}$), bez obzira na stepen korozije, povećanje dužine inicijalne prsline rezultira smanjenjem broja ciklusa do loma, s tim da je to smanjenje procentualno najveće kod strukture bez prethodne korozije, dok je najmanje kod strukture sa najvećim stepenom korozije.

Sa druge strane, na osnovu analize dobijenih rezultata za broj ciklusa do loma, u zavisnosti od vremena izlaganja strukture dejstvu korozione sredine ($T_{\text{korozijske}}$) i opsega napona ($\Delta\sigma$), došlo se do sledećih zaključaka:

- Za strukturu bez prethodne korozije, sa inicijalnom prsline dužine 5 mm, pod dejstvom napona od 15 MPa (20–5 MPa) broj ciklusa do loma je za 150% veći u odnosu na broj zabeležen pri dejstvu napona od 20 MPa, dok je za napon od 25 MPa (20+5 MPa) broj ciklusa do loma manji za 51% u odnosu na broj zabeležen pri dejstvu napona od 20 MPa.

- Ista zakonitost je zabeležena i kod struktura izloženih dejstvu korozije, bez obzira na dužinu inicijalne prsline, s tim da je, sa povećanjem stepena korozije, gore opisana razlika u broju ciklusa do loma manja, i za 30 dana korozije povećanje broja ciklusa usled manjeg napona je za 111%, dok je smanjenje broja ciklusa usled povećanja opterećenja za 44%.

9.2. Naučni doprinos

Osnovni naučni doprinos ove doktorske disertacije je uspostavljanje nove metodologije procene veka i integriteta vazduhoplovnih konstrukcija od legura aluminijuma, koja, pored uticaja promenljivog opterećenja, u obzir uzima i uticaj korozije na preostali vek komponenti napravljenih od legura aluminijuma. Predmetnom metodologijom je istražen uticaj dužine inicijalne prsline, opsega napona i vremena izloženosti strukturnih elemenata vazduhoplovne konstrukcije dejstvu korozione sredine na eksploatacioni vek iste, odnosno na broj ciklusa do loma.

Pored navedenog, a na osnovu ostvarenih rezultata istraživanja i uporedne analize istih sa rezultatima trenutno raspoloživih istraživanja iz predmetne oblasti, doprinos ove doktorske disertacije moguće je iskazati kroz sledeće celine:

Eksperimentalno su određena mehanička svojstva legura aluminijuma AA2024-T351 (dural) i AA7075-T651 (konstruktal) u uslovima delovanja koroziono aktivne radne sredine.

Eksperimentalno su određeni parametri mehanike loma legura aluminijuma AA2024-T351 (dural) i AA7075-T651 (konstruktal) pod dejstvom promenljivog opterećenja u uslovima delovanja koroziono aktivne radne sredine.

Na osnovu dinamičkih zateznih ispitivanja kompaktnih CT uzoraka, eksperimentalno su određeni koeficijenti Parisove jednačine za uzorke izrađene od legura aluminijuma AA2024-T351 i AA7075-T651, koji su potom iskorišćeni kao ulazni elementi za numeričku simulaciju i procenu veka upotrebe nosećeg elementa strukture vazduhoplova.

9.3. Preporuke za budući rad

Uzimajući u obzir da je zamor statistička pojava i da se u različitim eksperimentima sa zamornim prslinama, pod istim uslovima ispitivanja, često dobijaju značajna odstupanja u rezultatima, kao i činjenicu da Parisovi koeficijenti, koji se određuju eksperimentalno i predstavljaju ulazne podatke za numeričku simulaciju, nisu standardne vrednosti, a u cilju postizanja što manje razlike između rezultata dobijenih ekperimentalno i numerički simulacijom, potrebno je uraditi sledeće:

- Eksperimentalno istraživanje uticaja promenljivog opterećenja, odnosno dinamička ispitivanja, vršiti na što većem broju uzoraka.
- Unapređenje numeričkog modela i njegova primena na realnu konstrukciju sa prslinom u cilju simulacije preostalog veka.

LITERATURA

- [1] *The Aluminium Unique Life Cycle Story* [online]. Dostupno na: <https://www.youtube.com/watch?v=OfC0lUAEXLo>.
- [2] *The Arrangement of Atoms in Crystalline Solids* [online]. Dostupno na: <http://2012books.lardbucket.org/books/principles-of-general-chemistry-v1.0/s16-02-the-arrangement-of-atoms-in-cr.html>
- [3] *Aircraft Industry* [online]. Dostupno na: http://www.cmk-group.ru/en/industry/aircraft_manufacturing/
- [4] Star Trace. *Bauxite Ore Processing Plants* [online]. Dostupno na: http://www.bauxitebeneficiationplant.com/bauxite_ore_processing_plants.php
- [5] Hughes, A. E., Birbilis, N., Mol, J. M., Garcia, S. J., Zhou, X., & Thompson, G. E. (2011). High strength Al-alloys: microstructure, corrosion and principles of protection. *Recent Trends in Processing and Degradation of Aluminium Alloys*, 1, 223-262.
- [6] Das, S. K. (2006). Designing Aluminum Alloys for a Recycle-Friendly World. *Light Metal Age-Chicago*, 64(3), 26.
- [7] Aluminum Association. (1984). *Aluminum: properties and physical metallurgy*. ASM international.
- [8] Polmear, I. J. (2004). A Century of Age Hardening. In *Materials forum* (Vol. 28, No. 1-14, p. 13).
- [9] Pulić, M. (2015). *Precipitacijsko očvršćavanje toplinski obradive aluminijeve legure*. Završni rad. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje.
- [10] *What are Guinier Prestons Zones in Al-Cu Alloys?* [online]. Dostupno na: <https://www.quora.com/What-are-Guinier-Prestons-Zones-in-Al-Cu-Alloys>
- [11] Wei, R. P., Liao, C. M., & Gao, M. (1998). A transmission electron microscopy study of constituent-particle-induced corrosion in 7075-T6 and 2024-T3 aluminum alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 29(4), 1153-1160.
- [12] www.pubs.rsc.org/En/content/articlehtml/2015/cp/c5cp04641f
- [13] Polmear, I.J. (1995). *Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals*. Arnold, London.
- [14] Winkelman, G. B., Raviprasad, K., & Muddle, B. C. (2007). Orientation relationships and lattice matching for the S phase in Al-Cu-Mg alloys. *Acta Materialia*, 55(9), 3213-3228.
- [15] Sprowls, D.O. (1978). High Strength Aluminium Alloys with Improved Resistance to Corrosion and Stress Corrosion Cracking. *Aluminium* 54(6), 214 - 217.
- [16] www.aluminiumleader.com/application/transport
- [17] www.keyword-suggestions.com/YWx1bWluaXVtIGFsbG95IGFpcmZyYW1l
- [18] www.imaiaero.co.jp/english/product/pro-results.html
- [19] Carney, T.J., Tsakirooulos, P., et al. (1990). Oxidation and Surface Segregation in Rapidly Solidified Al-Alloy Powders. *International Journal of Rapid Solidification* 5(2-3), 189-217.

- [20] Nisancioglu, K.S., Yu, Y., Nordlien, Y.K. (2004). *55th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry*, Thessaloniki.
- [21] Hughes, A.E., Boag, A.P., Pedrina, L.M., Juffs, L., McCulloch, D.G., DuPlessis, J., Paterson, P.J.K., Snookand, I.K., O'Malley, B. (2006). Statistical approach to determine spatial and elemental correlations of corrosion sites on al-alloys. In: *Aluminium surface science and technology conference*, Beaune, France, 14-18. May. <http://hdl.handle.net/102.100.100/175255?index=1>
- [22] Evans, U. R. (1971). Inhibition, passivity and resistance: A review of acceptable mechanisms. *Electrochimica Acta*, 16(11), 1825-1840.
- [23] Zhou, X. R., Thompson, G. E., & Scamans, G. M. (2003). The influence of surface treatment on filiform corrosion resistance of painted aluminium alloy sheet. *Corrosion Science*, 45(8), 1767-1777.
- [24] Liu, Y., Frolish, M. F., Rainforth, W. M., Zhou, X., Thompson, G. E., Scamans, G. M., & Hunter, J. A. (2010). Evolution of near-surface deformed layers during hot rolling of AA3104 aluminium alloy. *Surface and Interface Analysis: An International Journal devoted to the development and application of techniques for the analysis of surfaces, interfaces and thin films*, 42(4), 180-184.
- [25] Zhou, X., Liu, Y., Thompson, G. E., Scamans, G. M., Skeldon, P., & Hunter, J. A. (2011). Near-surface deformed layers on rolled aluminum alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 42(5), 1373-1385.
- [26] Liu, Y. and Laurino, A. and Hashimoto, T. and Zhou, X. and Skeldon, P. and Thompson, G.E. and Scamans, G.M. and Blanc, Christine and Rainforth, W.M. and Frolish, M.F. (2010) Corrosion behaviour of mechanically polished AA7075-T6 aluminium alloy. *Surface and Interface Analysis*, vol. 42 (n° 4), pp.185-188.
- [27] Fishkis, M., & Lin, J. C. (1997). Formation and evolution of a subsurface layer in a metalworking process. *Wear*, 206(1-2), 156-170.
- [28] Liu, Y., Zhou, X., Thompson, G. E., Hashimoto, T., Scamans, G. M., & Afseth, A. (2007). Precipitation in an AA6111 aluminium alloy and cosmetic corrosion. *Acta Materialia*, 55(1), 353-360.
- [29] Pan, X., Morral, J. E., & Brody, H. D. (2010). Predicting the Q-Phase in Al-Cu-Mg-Si Alloys. *Journal of phase equilibria and diffusion*, 31(2), 144-148.
- [30] Hahn, G. T., & Rosenfield, A. R. (1975). Metallurgical factors affecting fracture toughness of aluminum alloys. *Metallurgical Transactions A*, 6(4), 653-668.
- [31] Phragmen, G. (1950). On the Phases Occurring in Alloys of Aluminium With Copper, Magnesium, Iron and Silicon. *The Journal of the Institute of Metals*, 77, 489-553
- [32] Hughes, A. E., Hinton, B., Furman, S. A., Cole, I. S., Paterson, D., Stonham, A., ... & Ranson, M. (2007). Airline-Towards a fleet management tool for corrosion damage. *Corrosion Reviews*, 25(3-4), 275-294.
- [33] Cavanaugh, M. K., Buchheit, R. G., & Birbilis, N. (2010). Modeling the environmental dependence of pit growth using neural network approaches. *Corrosion Science*, 52(9), 3070-3077.
- [34] Ralston, K. D., Birbilis, N., Weyland, M., & Hutchinson, C. R. (2010). The effect of precipitate size on the yield strength-pitting corrosion correlation in Al-Cu-Mg alloys. *Acta Materialia*, 58(18), 5941-5948.
- [35] Gao, M., Feng, C. R., & Wei, R. P. (1998). An analytical electron microscopy study of constituent particles in commercial 7075-T6 and 2024-T3 alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 29(4), 1145-1151.

- [36] Wei, R. P., Liao, C. M., & Gao, M. (1998). A transmission electron microscopy study of constituent-particle-induced corrosion in 7075-T6 and 2024-T3 aluminum alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 29(4), 1153-1160.
- [37] Ayer, R., Koo, J. Y., Steeds, J. W., & Park, B. K. (1985). Microanalytical study of the heterogeneous phases in commercial Al-Zn-Mg-Cu alloys. *Metallurgical Transactions A*, 16(11), 1925-1936.
- [38] Boag, A., Taylor, R. J., Muster, T. H., Goodman, N., McCulloch, D., Ryan, C., & Hughes, A. E. (2010). Stable pit formation on AA2024-T3 in a NaCl environment. *Corrosion Science*, 52(1), 90-103.
- [39] Buchheit, R. G., Grant, R. P., Hlava, P. F., Mckenzie, B., & Zender, G. L. (1997). Local dissolution phenomena associated with S phase (Al₂CuMg) particles in aluminum alloy 2024-T3. *Journal of the electrochemical society*, 144(8), 2621.
- [40] Boag, A. & Hughes, A.E. & Wilson, N. & Torpy, A. & MacRae, C. & Glenn, Matthew & Muster, Tim. (2009). How complex is the microstructure of AA2024-T3?. *Corrosion Science*, 51, 1565-1568.
- [41] www.techtimes.com/articles/21966/20141211/new-light-entropy-alloy-is-stronger-than-titanium-but-lighter-than-aluminium.htm
- [42] Rajaković-Ognjanović, V. (2011). *Uticaj kvaliteta vode na koroziju čelika*. Doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet.
- [43] Harris, P. *Frozen in the sands of time: Eerie Second World War RAF fighter plane discovered in the Sahara 70 years after it crashed in the desert* [online]. Dostupno na: <http://www.dailymail.co.uk/news/article-2142300/Crashed-plane-Second-World-War-pilot-Dennis-Copping-discovered-Sahara-desert.html>
- [44] Zarić, M., Mance, A. i Vlajić, M. (1963). Ispitivanje korozije materijala uređaja za ozračivanje na reaktoru RA. *Institut za nuklearne nauke „Boris Kidrič“*, Vinča, Beograd.
- [45] www.hositrad.com/vacuum-products/ATLAS
- [46] www.intechopen.com/books/aluminium-alloys-new-trends-in-fabrication-and-applications/durability-and-corrosion-of-aluminium-and-its-alloys-overview-property-space-techniques-and-developm
- [47] Pereira, M. C., Silva, J. W., Acciari, H. A., Codaro, E. N., & Hein, L. R. (2012). Morphology characterization and kinetics evaluation of pitting corrosion of commercially pure aluminium by digital image analysis. *Materials Sciences and Applications Vol.3 No.5*, Article ID:19199, DOI:10.4236/msa.2012.35042
- [48] <http://materialsandprocess-services.com/procurement.html>
- [49] Oliver, L.T. (2014). Forms of Corrosion: Intergranular Corrosion and Stress Corrosion [online]. Dostupno na: <https://degradationeng.wordpress.com/2014/10/23/forms-of-corrosion/>
- [50] Visser, P., Liu, Y., Zhou, X., Hashimoto, T., Thompson, G. E., Lyon, S. B., ... & Terry, H. A. (2015). The corrosion protection of AA2024-T3 aluminium alloy by leaching of lithium-containing salts from organic coatings. *Faraday Discussions*, 180, 511-526.
- [51] Bobić, B., & Jegdić, B. (2005). Korozija zavarenih spojeva, Deo I - vidovi korozije zavarenih spojeva. *Zavarivanje i zavarene konstrukcije*, 50(1), 33-39.
- [52] JAEA R&D Review. (2007). A Simulation Study of Intricate Crack Shapes – Large Scale Simulation of Stress Corrosion Cracking Shape [online]. Dostupno na: https://rdreview.jaea.go.jp/review_en/2007/e2007_10_1.html
- [53] Stojanović, M. (2007). Metode za ocenu otpornosti prema koroziji metala u različitim uslovima eksploatacije. *Integritet i vek konstrukcija*, Vol. 7, br. 2, str. 71-78.

- [54] Bobić, B., Jegdić, B. (2006). Korozija zavarenih spojeva, Deo V: Metode ispitivanja i postupci sprečavanja korozije. *Zavarivanje i zavarene konstrukcije*, No. 2, 77-85.
- [55] Institut za standardizaciju Srbije. (1977). *Ispitivanje korozije – Ispitivanje postojanosti metalnih predmeta i nemetalnih prevlaka u atmosferi vlažne vodene pare* SRPS C.A5.021:1977. Beograd: Institut za standardizaciju.
- [56] Institut za standardizaciju Srbije. (1996). *Ispitivanje korozije u veštačkoj atmosferi pri vrlo malim koncentracijama gasa (gasova) zagađivača*.
- [57] Dražić, D.M., Jegdić, B.V. (2007). Naponska korozija. *Integritet i vek konstrukcija*, Vol. 7, br. 2, str. 89-95.
- [58] Jegdić, B., Bobić, B. (2007). Uticaj temperature na naponsku koroziju aluminijumskih legura tipa Al-Zn-Mg-Cu. *Zaštita materijala* 48, broj 1, str. 14-18
- [59] Sedmak, A. (2003). *Primena mehanike loma na integritet konstrukcija*. Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu. ISBN: 8670834731, 9788670834736
- [60] Sedmak, A., Anyiam, H.A. (2001). Primena mehanike loma na procenu integriteta konstrukcije. *Integritet i vek konstrukcija*, str. 67-73.
- [61] Božić, Ž. (2010). *Dinamička čvrstoća tankostjenih konstrukcija*. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje.
- [62] Fawaz, S. A., & De Rijck, J. J. M. (1999). A thin-sheet, combined tension and bending specimen. *Experimental mechanics*, 39(3), 171-176.
- [63] Zhang, X., & Li, Y. (2005). Damage tolerance and fail safety of welded aircraft wing panels. *AIAA journal*, 43(7), 1613-1623.
- [64] Sumi, Y., Bozic, Z., Iyama, H., & Kawamura, Y. (1996). Multiple fatigue cracks propagating in a stiffened panel. *Journal of the society of naval architects of Japan*, 1996(179), 407-412.
- [65] www.airliners.net/photo/BOAC/De-Havilland-DH-106-Comet-1/2016688
- [66] www.oocities.org/capecanaverallab/8803/fcogalyp.htm
- [67] <http://blogs.agu.org/landslideblog/2014/02/17/fatigue-in-rockfalls/>
- [68] Miller, D. (1990). Corrosion Control Aging Aircraft: What is being done?. *Materials Performance*
- [69] <https://www.youtube.com/watch?v=8NWW77HnGTc> "Why Planes Crash: Jet Loses Part of Roof
- [70] Wildeey, J.F. (1990). Aging Aircraft. *Materials Performance*.
- [71] Orowan, E. (1955). Energy criteria of fracture. *Welding Journal, Res. Sup.* 34(3), 157s-160s
- [72] http://solidmechanics.org/Text/Chapter9_3/Chapter9_3.php
- [73] <http://www.intechopen.com/books/nanocomposites-with-unique-properties-and-applications-in-medicine-and-industry/fracture-toughness-determinations-by-means-of-indentation-fracture>
- [74] T.L. Anderson. (1994). *Fracture Mechanics – Fundamentals and Applications*. Boca Raton, USA: CRC Press.
- [75] Tada, H., Paris, P. C., & Irwin, G. R. (1973). The stress analysis of cracks. *Handbook, Del Research Corporation*, 34, 635.
- [76] Hertzberg, R.W. (1996). *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*. John Wiley & Sons.
- [77] ASTM E399-87. (1986). *Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials*. Annual Book of ASTM Standards, Vol, 04.01, p.522

- [78] G.R. Irwin. (1960). Plastic zone near a crack and fracture toughness. *Proc. 7th Sagamore Research Conf. on Mechanics & Metals Behavior of Sheet Material*, Vol. 4, 463/478, Racquette Lake, NY.
- [79] J.A. Harris Jr. (1987). *Engine Component retirement for cause. Vol. 1, Executive Summary, AFWAL-TR-87-4609*, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio.
- [80] Brocks, W., & Schwalbe, K. H. (2016). Experimental and numerical fracture mechanics—an individually dyed history. In *Recent Trends in Fracture and Damage Mechanics* (pp. 23-57). Springer, Cham.
- [81] Srđan M. Bulatović. (2014). *Elasto-plastično ponašanje zavarenog spoja od niskolegirano čelika povišene čvrstoće u uslovima niskocikličnog zamora*. Doktorska disertacija. Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- [82] Rice, J.R. (1968). A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. *J. Appl. Mech.* 35, pp. 379-386.
- [83] Tada, H., Paris, P. C., & Irwin, G. R. (1973). The stress analysis of cracks. *Handbook, Del Research Corporation*, 34, 635.
- [84] Hertzberg, R. W. (1996). *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*. John Wiley & Sons.
- [85] Harrison, R.P., Loosemore, K., Milne, I. (1975). Assessment of the Integrity of Structures Containing Cracks. *Int. J. Pressure Vessels and Piping*, Vol. 3, p. 77-137.
- [86] ASTM E 399. *Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials*. Annual Book of ASTM Standards, vol. 03.01. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa.
- [87] ESIS P2. *Recommendations for Determining the Fracture Behavior of Materials*. European Structural Integrity Society, Delft.
- [88] Fernandez-Zuniga, D., Kalthoff, J. F., Fernandez-Canteli, A., Grasa, J., & Doblare, M. (2004). Three dimensional finite element calculations of crack tip plastic zones and KIC specimen size requirements. In *Conference on European Conference on Fracture. Stockholm: Engineering Structural Integrity Society, Sweden*.
- [89] Sih, G. C. (1971). A review of the three-dimensional stress problem for a cracked plate. *International Journal of Fracture Mechanics*, 7(1), 39-61.
- [90] Buchholz, F. G., Chergui, A., & Richard, H. A. (2004). Fracture analyses and experimental results of crack growth under general mixed mode loading conditions. *Engineering Fracture Mechanics*, 71(4-6), 455-468.
- [91] Dimitrov, A., Buchholz, F.G. and Schnack, E. (2002), Free-surface Effects in Crack Propagation: A Theoretical-Numerical-Experimental Correlation. *Institute of Solid Mechanics, University of Karlsruhe, Preprint 2002-1*, 1-38.
- [92] Leguillon, D. (2003). Computation of 3D singular elastic fields for the prediction of failure at corners. In *Key Engineering Materials* (Vol. 251, pp. 147-152). Trans Tech Publications Ltd.
- [93] ASTM B 209-04. *Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate*, ASTM International, United States.
- [94] ASTM B 557M-02a. *Standard Test Methods of Tension Testing Wrought and Cast Aluminum and Magnesium-Alloy Products [Metric]*, ASTM International, United States.
- [95] Lipski, A., & Mroziński, S. (2012). The effects of temperature on the strength properties of aluminium alloy 2024-T3. *Acta mechanica et automatica*, 6(3), 62-66.
- [96] Maclins, P.J. (2014). Tensile Behavior of Aluminium Alloy 6063-T6 In Sea Water. *International Journal of Engineering Research and Development ISSN*, 10, 14.

- [97] Beatriz Almeida Ferreira. (2017). *Corrosion Behavior of 7075-T651 Aluminum Alloy under Different Environments*, Master thesis. Técnico Lisboa.
- [98] Rishikumar Patel. (2018). *Investigating the Mechanical Behavior of Conventionally Processed High Strength Aluminum Alloy 2024*. Master thesis. Faculty of the University of Akron.
- [99] Brian Dale Obert. (2000). *Quantification of Corrosion in 7075-T6 Aluminum Alloy*. Master thesis. Faculty of Texas Tech University.
- [100] ASTM Standard B 209M. (2004). *Standard Specification for Aluminium and Aluminium Alloy Sheet and Plate*
- [101] BS 7448-1:1991. *Fracture mechanics toughness tests - Part 1: Method for determination of K_{Ic} , critical CTOD and critical J values of metallic materials*.
- [102] See <https://www.ssi.shimadzu.com>
- [103] See <https://mechanicalc.com/reference/fatigue-crack-growth>
- [104] Moreto, J. A., Paschoal Júnior, F. A., Maciel, C. I. S., Bonazzi, L. H. C., Leonelli Júnior, J. F., Ruchert, C. O. F. T., & Bose Filho, W. W. (2015). Environmentally-assisted fatigue crack growth in AA7050-T73511 al alloy and AA2050-T84 Al-Cu-Li alloy. *Materials Research*, 18, 1291-1297.
- [105] Yang, H., Wang, Y., Wang, X., Pan, P., & Jia, D. (2016). The effects of corrosive media on fatigue performance of structural aluminum alloys. *Metals*, 6(7), 160.
- [106] Zhang, T., He, Y., Li, C., Zhang, T., & Zhang, S. (2020). Effect of alternate corrosion and fatigue on fatigue crack growth characterization of 2024-T4 aluminum alloy. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020.
- [107] Bucci, R.J., Nordmark, G., and Starke, E.A. Jr. (1996). Selecting Aluminum Alloys to Resist Failure by Fracture Mechanisms. *ASM Handbook, Volume 19: Fatigue and Fracture ASM Handbook Committee*, p 771-812.
- [108] www.ansys.com

BIOGRAFIJA AUTORA

Zoran C. Petrović, magistar tehničkih nauka u oblasti vazduhoplovstva, rođen je 31. avgusta 1971. godine u Zemunu, gde je 1986. godine završio osnovnu školu.

Nakon osnovne škole, upisao je Srednju vojnu školu Ratnog vazduhoplovstva i protivvazdušne odbrane (SVŠ RViPVO) u Rajlovcu, Sarajevo, BiH, koju je završio 1990. godine i stekao stručni naziv vazduhoplovnog mašinskog tehničara, dok je 1995. godine završio studije na Vojnotehničkoj akademiji Vojske Jugoslavije (VTA VJ) na vazduhoplovnotehničkom smeru – vazduhoplovi, i stekao zvanje diplomiranog mašinskog inženjera.

Osnovne studije na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu, na smeru za vazduhoplovstvo, završio je 1995. godine, sa opštim uspehom 8,61 u toku studija i ocenom 10,00 na odbrani diplomskog rada na temu „KONSTRUKCIJA I AERODINAMIČKO OPTEREĆENJE DELTA KRILA“, i stekao stručno zvanje diplomiranog mašinskog inženjera.

Magistarske studije na Mašinskom fakultetu u Beogradu upisao je 1997. godine, a 2007. godine odbranio je magistarsku tezu pod nazivom „ANALIZA SAĆASTIH SENDVIČ STRUKTURA SA ISTORODNIM IZOTROPNIM OPLATAMA“ i stekao akademski naziv magistra tehničkih nauka u oblasti vazduhoplovstva.

Od 1995. godine zaposlen je u Vojsci Srbije, u svojstvu profesionalnog vojnog lica. Od 1995. do 2010. godine obavljao je komandirske dužnosti u jedinicama za vazduhoplovno-tehničko održavanje avijacije RViPVO i dužnost referenta za lovačku i lovačko-bombardersku avijaciju u Komandi ratnog vazduhoplovstva i protivvazduhoplovne odbrane (RViPVO). Od 2010. do 2018. godine bio je načelnik Sektora za remont vazduhoplovne opreme i naoružanja u Vazduhoplovnom zavodu „Moma Stanojlović“, načelnik Odseka za logistiku u 204. vazduhoplovnoj brigadi RViPVO i načelnik Grupe za održavanje vazduhoplova u Komandi RViPVO. Od 2018. godine je načelnik Odseka za održavanje sredstava RViPVO u Upravi za logistiku Generalštaba Vojske Srbije.

Mr Zoran C. Petrović, dipl.inž., je oženjen i otac dvoje dece.

PRILOZI

- **Izjava o autorstvu**
- **Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada**
- **Izjava o korišćenju**

Izjava o autorstvu

Ime i prezime autora: Zoran C. Petrović
Broj indeksa: D65/2016

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

PROCENA VEKA I INTEGRITET VAZDUHOPLOVNIH KONSTRUKCIJA OD ALUMINIJUMSKIH LEGURA 2024 I 7075 U KOROZIONOM OKRUŽENJU

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za sticanje druge diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova;
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio autorska prava i koristio intelektualnu svojimu drugih lica.

U Beogradu: 08.09.2022.

Potpis autora



Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora: Zoran C. Petrović
Broj indeksa: D65/2016
Studijski program: _____
Naslov rada: PROCENA VEKA I INTEGRITET VAZDUHOPLOVNIH
KONSTRUKCIJA OD ALUMINIJUMSKIH LEGURA 2024 I 7075 U
KOROZIONOM OKRUŽENJU
Mentor: Dr Aleksandar Sedmak, professor emeritus

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao radi pohranjivanja u **Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam dase objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog naziva doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i publikacijama Univerziteta u Beogradu.

U Beogradu: 08.09.2022.

Potpis autora



Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku "Svetozar Marković" da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

PROCENA VEKA I INTEGRITET VAZDUHOPLOVNIH KONSTRUKCIJA OD ALUMINIJUMSKIH LEGURA 2024 I 7075 U KOROZIONOM OKRUŽENJU

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim priložima predao sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu i dostupnu u otvorenom pristupu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio:

1. Autorstvo (CC BY)
2. Autorstvo – nekomercijalno (CC BY-NC)
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada (CC BY-NC-ND)
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)
5. Autorstvo – bez prerada (CC BY-ND)
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (CC BY-SA)

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci. Kratak opis licenci je sastavni deo ove izjave).

U Beogradu: 08.09.2022.

Potpis autora

1. **Autorstvo.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. **Autorstvo – nekomercijalno.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
3. **Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikavanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.
4. **Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.
5. **Autorstvo – bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikavanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
6. **Autorstvo – deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama otvorenog koda.