

# KOROZIJA U VAZDUHOPLOVNIM KONSTRUKCIJAMA

Zoran C. Petrović

ViPVO, 204. vazduhoplovna brigada, Batajnica

e-mail: pzoran.pele@gmail.com

ORCID iD:  <http://orcid.org/0000-0001-8053-4034>

DOI: 10.5937/vojtehg64-8573

OBLAST: materijali, hemijske tehnologije

VRSTA ČLANKA: pregledni članak

JEZIK ČLANKA: srpski

## Rezime:

*Uzimajući u obzir da su, zbog odsustva jedinstvene klasifikacije i nomenklature korozivnih procesa, postojeće klasifikacije nepotpune i neprecizne, kategorizacija korozivnih procesa u ovom radu izvršena je na osnovu strukturno-elektrohemijske teorije, prema kojoj na elektrohemijski proces korozije utiče prisustvo heterogenosti na površini materijala. U zavisnosti od prirode i dimenzije ove neuniformnosti, definisane su tri različite kategorije korozije: uniformna, selektivna i lokalizovana i prikazani njihovi oblici.*

*Razmotreni su i uslovi koji dovode do pojave određenih vidova korozije u različitim korozivnim sredinama. Navedeni su primeri odvijanja korozivnih procesa i ukratko opisani njihovi mehanizmi.*

*Ključne reči: korozija, vazduhoplovna konstrukcija, uniformna, selektivna, lokalizovana, naponska korozija, korozivni zamor.*

## Uvod

Pod korozijom se podrazumeva neželjeno razaranje materijala koje nastaje pri fizičko-hemijskom ili elektrohemijomskom dejstvu sa okolnom sredinom. Reč korozija potiče od latinske reči „*corrodere*“, što znači nagrizzati. Problemu korozivnog oštećenja i razaranja metalnih materijala već godinama se posvećuje ogromna pažnja. Iskustvo pokazuje da su otkazi usled problema sa korozijom veoma značajni, a statistika na svetskom nivou pokazuje da je šteta koja nastaje usled delovanja različitih oblika korozije ogromna i da, na primer, u industrijski razvijenim zemljama dostiže 4-5% nacionalnog dohotka (Korozija, nd).

Po verovatno najboljoj i najširoj definiciji korozije ona predstavlja degradaciju mehaničkih svojstava materijala u interakciji sa okolinom. U vazduhoplovnim konstrukcijama korozija se mora posmatrati kao veliki problem, jer direktno utiče, kako na bezbednost, tako i na ekonomiju i logistiku.

S obzirom na različite materijale, okruženja i mehanička naprezanja, vazduhoplovstvo predstavlja jednu od oblasti u kojoj se posmatra najveći spektar tipova korozije (Halsne, 2004).

Cilj ovog rada jeste da se predstave najčešći oblici korozije, a na osnovu iskustava iz prošlosti, kako bi se sagledao širok spektar problema od neznatnih do katastrofalnih oštećenja. Posebna pažnja biće posvećena aspektima korozije u vezi sa pitanjima starenja vazduhoplova.

Iako je korozija vazduhoplovnih konstrukcija stari problem i mnogi pomaci su već urađeni u njenoj prevenciji i selekciji materijala (nerđajući čelici, aluminijumske legure, titanijum, itd.), ipak se čini da je rešenje daleko. Na primer, pitanje korozije, koja predstavlja ozbiljan problem za svaki visokoprojektovani sistem, u slučaju vazduhoplovnih konstrukcija postalo je još važnije u poslednjoj deceniji XX veka, kada je do starenja vazduhoplova dolazilo zbog različitih faktora (<http://www.udruzenjepilota.org/arhiva/08/07/080726qantas.htm>, nd).



Slika 1 – Oštećenja nastala pod dejstvom korozije: a) oštećenje oplata aviona Boeing 747-400 kompanije "Qantas", 25. jula 2008.godine; b) oštećenje noge stajnog trapa aviona; c) oštećenje aviona Aloha Airlines Flight 243, 28. april 1988.godine

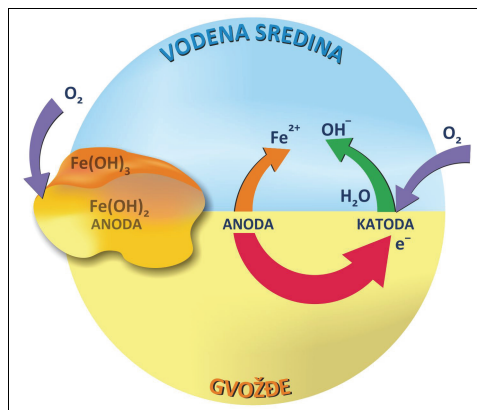
Рис. 1 – Повреждения под воздействием коррозии: в) повреждения обшивки самолета Boeing 747-400 авиакомпании "Qantas", 25 июля 2008 года; б) повреждение шасси самолета; в) повреждение самолета Aloha Airlines Flight 243, от 28 апреля 1988 года.

Figure 1 – Damage caused under the influence of corrosion: a) damage to the skin of the aircraft Qantas Boeing 747-400, July 25, 2008; b) damage to the landing gear; c) damage to the aircraft Aloha Airlines Flight 243, April 28, 1988.

Nedavno je procenjeno da proces korozije u troškovima starenja vazduhoplova učestvuje do 80%. Sa druge strane, korozija ima veliki uticaj i na bezbednost, tako da se oko 45% oštećenja vazduhoplovnih konstrukcija može pripisati koroziji (<http://www.tailstrike.com/280488.htm>, nd).

Korozija može da bude izazvana različitim uzročnicima i može imati više pojava oblika, zbog čega se u literaturi sreće veliki broj različitih klasifikacija korozije, najčešće po mehanizmu i uslovima odvijanja.

Kod vazduhoplovnih konstrukcija korozija uglavnom predstavlja destrukciju metala i legura usled elektrohemijske reakcije sa okolnom sredinom (slika 2).



Slika 2 – Mehanizam korozije čelika u vodi  
 Рус. 2 – Механизм коррозии стали в воде  
 Figure 2 – The mechanism of corrosion of steel in water

Elektrohemijska korozija je posledica odigravanja elektrohemijskih reakcija i podleže zakonitostima elektrohemijske kinetike. Bitan uslov nje-  
 ne pojave je dodir metala sa drugom fazom koja ima osobine elektrolita, pri čemu na metalu dolazi do stvaranja tankog sloja sa osobinama elektrohemijskog dvosloja. Elektrohemijska korozija nastaje u vodi (prirodnoj i tehničkoj), u vodenim rastvorima kiselina, baza i soli, u zemljištu i atmosferi. Atmosfera nije elektrolit, ali se u atmosferskim uslovima korozija od-  
 vija u vodenom kondenzatu koji, zbog vlažnosti vazduha, nastaje na metalnoj površini i ima osobine elektrolita. Ovde spadaju svi slučajevi korozije u vlažnoj atmosferi (Rajaković–Ognjanović, 2011).



Slika 3 – Olupina aviona Curtiss P-40 Kittyhawk nađena u Sahari 70 godina nakon pada  
 Рус. 3 – Останки самолета Curtiss P-40 Kittyhawk, найденного в Сахаре спустя 70 лет после крушения  
 Figure 3 – The wreck of the aircraft Curtiss P-40 Kittyhawk found in the Sahara desert 70 years after the fall

Kakvu ulogu ima prisustvo vlage, odnosno njeno odsustvo, na pojavu i širenje korozije pokazuje slučaj odlično očuvane olupine lovca "Curtiss P-40 Kittyhawk" britanskog Kraljevskog vazduhoplovstva, otkrivene 2012. godine, 70 godina posle pada u Sahari (Harris). Avetinjski, ali savršeno očuvani ostaci aviona pronađeni su u zapadnom delu pustinje u Egiptu (slika 3).

Postojeće klasifikacije, u zavisnosti od uzroka pojave korozije i oblika oštećenja, nepotpune su i nedovoljno precizne, što se objašnjava odsustvom jedinstvene klasifikacije i nomenklature korozivnih procesa.

Uprkos ovim ograničenjima, jedna od najkorisnijih teorija koja se može koristiti za kategorizaciju korozije je strukturno-elektrohemijska. U skladu sa ovom teorijom, pokretačku snagu elektrohemijskog procesa korozije čini prisustvo heterogenosti na površini metala. U zavisnosti od prirode i dimenzije ove neuniformnosti razlikujemo tri različite kategorije korozije. To su:

– **uniformna (opšta) korozija**, koju karakterišu podmikrostrukturne heterogenosti, što je uporedivo sa dimenzijama kristalne grafičke rešetke (tj. razlika u položaju atoma, termičke fluktuacije metalnih jona u rastvoru, itd),

– **selektivna korozija**, koju karakteriše prisustvo mikroskopske nehomogenosti od 0,1 mm do 1 mm, što je uporedivo sa veličinom kristalne grafičke strukture metala (tj. granicama zrna, druge faze u legurama, itd.),

– **lokalna korozija**, koju karakteriše prisustvo makroskopskih nehomogenosti većih od 1 mm (The Research and Technology Organisation of NATO, 2011).

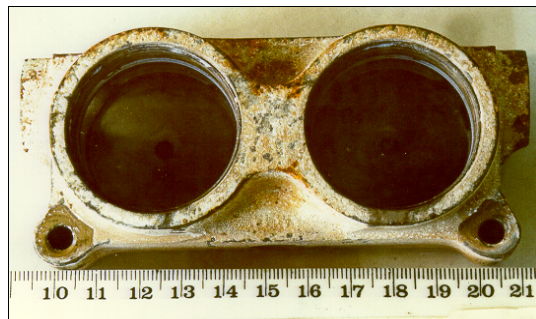
## Uniformna (opšta) korozija

Nehomogenosti na površini metala, u interakciji sa agresivnim okruženjem, toliko su male po dimenziji i potencijalu da će ista površina stalno menjati uloge – ulogu anode i ulogu katode (The Research and Technology Organisation of NATO, 2011).

Iako je to vrlo čest mehanizam u mnogim korodiranim sistemima, on se na vazduhoplovnim konstrukcijama ne posmatra tako često, jer izabrani vazduhoplovni materijali uvek su manje podložni tome.

Uniformna korozija je uobičajena za rđajući čelik i gvožđe, gde se može lako prepoznati po crvenoj rđi. S obzirom na lako prognoziranje i otkrivanje, uniformna korozija ne može se smatrati njenim opasnim oblikom.

Opšti napad obično se javlja na delovima gde je originalni zaštitni sloj propao iz bilo kog razloga. Kao jedan od karakterističnih slučajeva je pojava korozije na čeliku obloženom kadmijumom nakon što je anodna prevlaka potpuno uništena (slika 4).



*Slika 4 – Uniformna korozija na kadmijumom obloženoj komori za sagorevanje aviona AM-X*  
*Рис. 4 – Равномерная коррозия кадмиевого покрытия на камере сгорания самолета AM-X*  
*Figure 4 – Uniform corrosion on a cadmium plated AM-X Air combustion chamber*

Erozija izazvana delovanjem tečnosti koja se brzo kreće takođe može dovesti do uniformnog ili kvaziuniformnog napada. Ovaj specifičan mehanizam, nazvan erozija–korozija, postaje ozbiljniji na avionima koji lete u uslovima visoke temperature, gde je visok sadržaj vlage, posebno u noćnim časovima i gde ima peska (čvrsta čestica, obogaćena solju, deluje kao izuzetno abrazivan medij koji uklanja boju i proizvode korozije, nudeći agresivnom okruženju novu metalnu površinu).

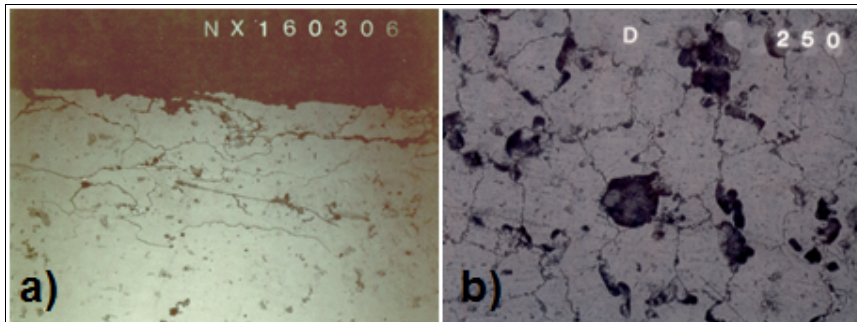
Starenje aviona pogoršava probleme uniformne korozije na električnoj i elektronskoj opremi gde su, radi dobijanja zahtevanih performansi, materijali kao što su aluminijum, čelik ili mesing, često inferiorni u pogledu otpornosti na koroziju.

## Selektivna korozija

U selektivnu koroziju uključeni su svi fenomeni koji zavise od heterogenosti hemijskog sastava. U tom smislu, možemo govoriti o elektrohemijском napadu izazvanom unutrašnjom heterogenošću materijala. Selektivna korozija različitom brzinom napada pojedine komponente, odnosno faze višekomponentnih ili višefaznih metala (mesing, sivi liv, aluminijumska bronza).

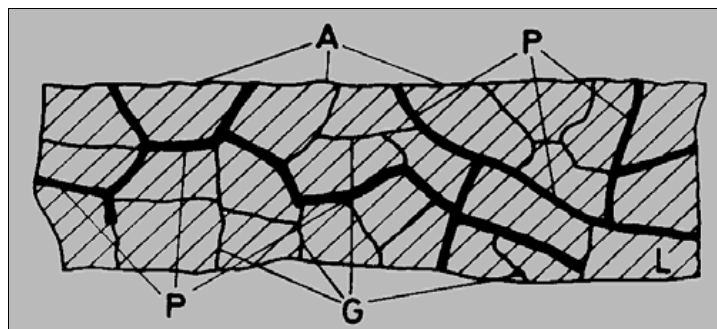
## *Interkristalna korozija*

Na vazduhoplovnim konstrukcijama interkristalna korozija (slika 5) mnogo je češće posmatran mehanizam ove klase korozije s obzirom na to da je karakterističan za legure aluminijuma, i Al-Cu (2xxx) i Al-Zn (7xxx) legure, gde je pokretačka snaga elektrohemijского procesa u razlici potencijala između druge faze (bogatija bakrom – više plemenita ili bogatija cinkom – manje plemenita) i aluminijuma.



Slika 5 – Interkristalna korozija: a) na AA2024 (160x); b) na Mg leguri AZ-91C (250x)  
 Рис. 5 – Межкристаллитная коррозия а) на AA2024 (160x); б) на Mg alloy AZ-91C (250x)  
 Figure 5 – Intergranular corrosion: a) on AA2024 (160x); b) on Mg alloy AZ-91C (250x)

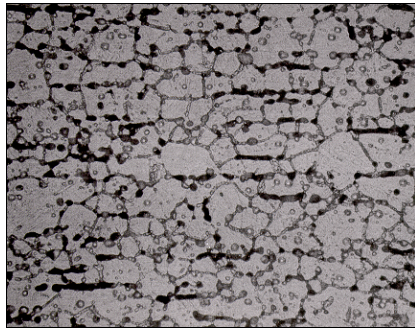
U ovom slučaju korozija napreduje uzduž granica zrna u unutrašnjost metala (slika 6) i mora se smatrati veoma opasnom, jer, uprkos minimalnom gubitku materijala, mehaničke osobine drastično degradiraju. Pri ovoj vrsti korozije nema vidljivih promena spoljašnjeg izgleda metala. Međutim, pri napredovanju interkristalne korozije metal postaje krh, pa relativno lako može da dođe do razaranja i pri neznatnim statičkim, a posebno dinamičkim opterećenjima. Interkristalna korozija se teško otkriva metodama ispitivanja bez razaranja.



Slika 6 – Interkristalna korozija: A – površina legure; L – legura, G – granica zrna, P – produkti korozije po granicama zrna.  
 Рис. 6 – Межкристаллитная коррозия: А - поверхность сплава; L - сплав, G - границы зерен, P - продукты коррозии на границах зерен.  
 Figure 6 – Intergranular corrosion: A - surface of alloy; L – alloy, G – grain boundaries, P - products of corrosion at the grain boundaries.

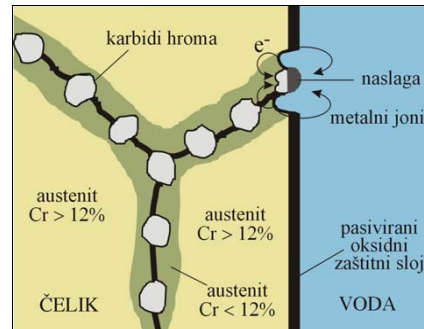
Visokolegirani nerđajući čelici osetljivi su na interkristalnu koroziju, koja je posebno zastupljena kod nerđajućih čelika na bazi hroma, bez obzira na njegovo povoljno dejstvo na povećanje otpornosti na koroziju

(>12%Cr), jer se površina ovih čelika prevlači pasivizirajućim filmom  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Međutim, tokom neodgovarajuće termičke obrade ovih čelika ili njihove eksploatacije u nedozvoljenom temperaturno-vremenskom intervalu, dolazi do migracije atoma hroma iz pograničnih oblasti u granice zrna gde se izdvajaju u vidu karbida  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ . Usled osiromašenja pograničnih oblasti na hromu (<<12%Cr) one više nisu zaštićene pasivnim oksidnim filmom, pa postaju anodne u odnosu na unutrašnjost zrna i sklone interkristalnoj koroziji. Sklonost nerđajućih čelika interkristalnoj koroziji, odnosno njihova osetljivost na lokalnu promenu u sadržaju hroma koja se odvija u određenom temperaturnom intervalu ( $450\pm 480^\circ\text{C}$ ) poznata je kao senzitivizacija. Pojava senzitivizacije česta je posledica zavarivanja (Korozija, nd).



Slika 7 – Niskotemperaturna senzitivizacija PH 17-7 nerđajućeg čelika

Рис. 7 – Сенситивизация PH 17-7 нержавеющей стали при низкой температуре  
Figure 7 – Low temperature sensitization on PH 17-7 stainless steel



Slika 8 – Šematski prikaz procesa senzitivizacije

Рис.8 – Схематическое изображение процесса сенситивизации  
Figure 8 – Schematic representation of the process of sensitization

## Lokalizovana korozija

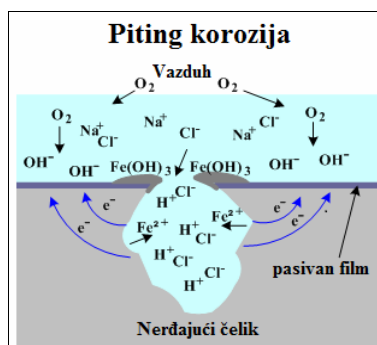
Kod lokalizovane korozije posmatra se najveći broj mehanizama korozije. Zajednički faktor kod svih različitih oblika korozije u slučaju lokalnog napada je prisustvo stabilnih i jasno odvojenih katodnih i anodnih oblasti.

Pri lokalnoj koroziji rastvaranje metala može da se odvija na jednom mestu, redukcija na drugom, a stvaranje korozivnih produkata na trećem mestu. U tom slučaju korozivni produkti neće predstavljati zaštitu metala od dalje korozije.

Lokalna elektrohemijska korozija dovodi do mestimičnog nagrizanja koje se manifestuje pojavom prskotina, jamica, itd.

## Piting (tačkasta) korozija

Piting korozija je izrazito lokalizovan korozivni napad pri kojem dolazi do stvaranja korozivnih jamica (pitova). Tačkastoj (piting) koroziji podložne su veoma male (ograničene) površine metala (ostatak površine je u stabilnom, pasivnom stanju), pri čemu dolazi do stvaranja oštećenja – tačkica, rupica, jamica i kratera (slika 9).



Slika 9 – Mehanizam piting korozije  
 Рус. 9 – Механизм точечной коррозии  
 Figure 9 – The mechanism of pitting corrosion

Piting korozija po elektrohemijском mehanizmu se, po pravilu, javlja u rastvorima koji sadrže oksidanse (to može da bude i kiseonik iz vazduha) i aktivne anjone ( $Cl^-$ ,  $Br^-$ ,  $I^-$ , itd.). Osnovni uslov nastajanja pitinga je pomeranje elektrohemijского potencijala u prisustvu oksidansa u rastvoru (anodna polarizacija) i približavanje kritičnoj vrednosti. Površina pitinga je anoda i razara se velikom brzinom na račun kontakta sa ostatkom površine koja se nalazi u pasivnom stanju – nepolarizovana katoda. Pošto je istovremeno postojanje pasivne katode i aktivne anode na površini jednog istog metala, bez ikakvih dopunskih uslova, nemoguće, takav sistem je elektrohemijски nestabilan.



Slika 10 – Piting korozija na HH-3F kompresorskoj lopatici  
 Рус. 10 – Точечная коррозия на компрессорной лопатке HH-3F  
 Figure 10 – Pitting corrosion on a HH-3F compressor blade



Na odvijanje piting korozije, pored već pomenutih uzroka, utiču i hemijski sastav materijala, njegova struktura i termička obrada, temperatura, stanje površine i nemetalni uključci. Pitovi se formiraju na mestima razaranja pasivnog filma na površini metala, u prisustvu jona.

Stepen zaštite koju pruža pasivni film zavisi od njegove debljine, kontinuiteta, koherentnosti i adhezije za metal, itd. Ako se film ošteti mehanički ili hemijski, može doći do njegovog ponovnog formiranja (repasivizacije) ili do daljeg odvijanja korozivnih procesa.

Tačkasta korozija razvija se u tri stadijuma koji obuhvataju:

- inicijalno stvaranje jamice (nukleacija),
- početni rast jamice (u određenim uslovima može da se okonča repasivizacijom) i
- stabilni rast jamice.

Kod tačkaste korozije pojavi vidljivih jamica prethodi dug inicijalni period. Ovaj interval podrazumeva period od nekoliko meseci do godinu dana, u zavisnosti od toga o kojem je materijalu i kakvoj korozionoj sredini reč. Kada jednom započne rast, jamice penetriju u metal stalno rastućom brzinom (ukoliko se ovaj proces ne naruši). Jamice obično rastu u pravcu dejstva gravitacije, pa se zato razvijaju na horizontalnim površinama, rastu nadole. Zabeležen je veoma mali broj slučajeva stvaranja jamica na vertikalnim površinama ili na horizontalnim površinama sa rastom nagore. U slučaju piting korozije gubitak metala (kao jedan od aktuelnih pokazatelja razvoja korozivnih procesa) veoma je mali i ne može da ukaže na dubinu prodiranja jamice.

Piting korozija se vizuelno uočava u drugom stadijumu, i to u vidu oštro definisanih jamica. Međutim, na osnovu površinskog izgleda ne sme da se sudi o stepenu oštećenja, zato što potpovršinsko oštećenje može da bude veće.

Međusobnim spajanjem nekoliko jamica formira se krater. Oblik pitinga menja se od nepravilnog do približno geometrijski pravilnog. Jamice pravilnog geometrijskog oblika koriste se pri analizi mehanizma piting korozije i njenog modeliranja (Korozija, nd).

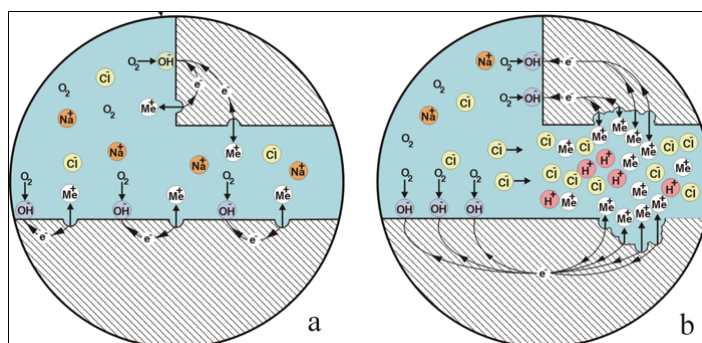
### *Korozija u pukotinama i zazorima*

Tokom eksploatacije metalnih konstrukcija, uključujući i konstrukcije od čelika, može da dođe do pojave lokalizovane korozije koja podrazumeva intenzivno razaranja u zazorima. Zazori su u konstrukcijama neizbežni, nastaju pri spajanju različitih delova koji mogu da budu od istog ili različitog metala. Najveću osetljivost na pojavu korozije u zazorima imaju pasivni metali (korozivno postojane legure, Al-legure), jer u zazorima dolazi do njihove depasivizacije (slika 11).

Karakteristika korozivnih procesa u zazorima je sniženje koncentracije oksidansa (kiseonika i dr.) u poređenju sa njegovom koncentracijom u rastvoru i sporo odstranjivanje produkata korozivne reakcije iz zazora. Lokalna gustina struje rastvorenog metala u zazoru je jako visoka, jer je

preostala površina van zazora znatno veća. Ovakvim mehanizmom objašnjava se lokalno nagrizanje metala u zazorima i odsustvo nagrizanja ili slabo nagrizanje ostale površine metala.

Joni hlora i vodonika ubrzavaju rastvaranje većine metala i legura, odnosno imaju isto dejstvo kao i kod tačkaste korozije metala. Ova vrsta korozije odvija se u gotovo svakoj sredini, ali najintenzivnija je u rastvorima hlorida.



Slika 11 – Mehanizam korozije u zazoru  
 Рис.11 – Механизм щелевой коррозии  
 Figure 11 – The mechanism of corrosion in the crevice

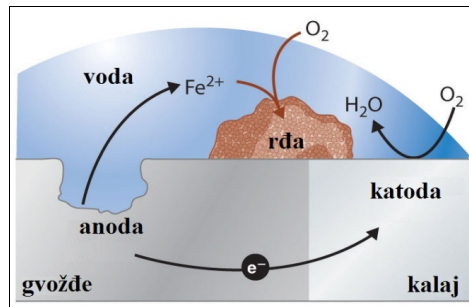
Za razvoj korozije u zazorima, koja je u najvećem stepenu određena difuzionim procesima, važan činilac predstavlja širina zazora. Najveći stepen korozije metala nije utvrđen pri najmanjoj širini zazora (<0,05 mm), kada je dolazak oksidacionih sredstava jako otežan, već pri zazorima srednje širine (0,05÷0,5 mm). Ukoliko je širina zazora manja, narušavanje pasivnog sloja odvija se na većoj površini i narušava pasivnost, pa korozija postaje ravnomerna. U zazorima srednje veličine koncentracija oksidacionog sredstva se u manjoj meri snižava, pasivnost se lokalno narušava, a korozija postaje mestimična, šireći se u dubinu. Tako se npr. pri ispitivanju nerđajućeg čelika sa 13% Cr u morskoj vodi, u prisustvu zazora veličine 0,05 i 0,1 mm, korozija u zazorima pojavila već posle tri, odnosno šest meseci. Kada je veličina zazora povećana na 0,5, odnosno 1 mm, korozija u zazorima nije otkrivena (Korozija, nd).



Slika 12 – Korozija u zazoru na avionu Tornado  
 Рис.12 – Щелевая коррозия на самолете Tornado  
 Figure 12 – Crevice corrosion on Tornado

## Galvanska korozija

Galvanska korozija je najočigledniji oblik lokalizovane korozije, gde su vrlo jasno identifikovana anodna i katodna područja (slika 13).



Slika 13 – Mehanizam galvanske korozije  
 Рус. 13 – Механизм гальванической коррозии  
 Figure 13 – The mechanism of galvanic corrosion

Ova vrsta korozije nastaje kada su dva metala različitog elektrohemijaskog potencijala u kontaktu u korozivnom medijumu, a nastala oštećenja manje plemenitog metala su ozbiljnija nego da je sam izložen u istom medijumu.

Širenje korodirane oblasti na anodi, kao i brzina korozije, zavisice od razlike elektrohemijaskog potencijala između metala i provodljivosti agresivnog medijuma. U svakom slučaju, napad korozije je više koncentrisan u delu anodnog metala bliže katodi.

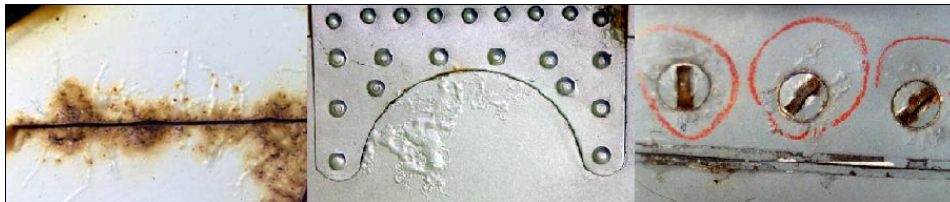


Slika 14 – Galvanska korozija na MB-339 između nosača od Mg legure i zavrtnja od aluminijuma  
 Рус. 14 – Гальваническая коррозия на MB-339 между опорой из Mg сплава и алюминиевыми заклепками  
 Figure 14 – Galvanic corrosion on the MB-339 between an Mg alloy trim and aluminum rivets

U vazduhoplovnim konstrukcijama često je potrebno koristiti različite metale, tako da se galvanska korozija ne može u potpunosti izbeći. Tipičan primer pojave galvanske korozije je slučaj kada se za zatvaranje otvora u oplati od aluminijumske legure koriste čelični zavrtnji ili nitne (The Research and Technology Organisation of NATO, 2011).

### *Površinska (filiform) korozija*

Filiform korozije (slika 15) mogu se naći pod organskim premazima, kao što su boje, usled prodiranja vlage kroz oblogu pod specifičnim temperaturama ( $T \geq 30^{\circ}\text{C}$ ) i uslovima vlažnosti ( $\text{Hr} \geq 85\%$ ).



Slika 15 – Filiform korozija  
Рис. 15 – Нитевидная коррозия  
Figure 15 – Filiform corrosion

### *Naponska korzija i korozivni zamor*

#### *Naponska korozija*

Naponska korozija je vid razaranja materijala u kojem se javljaju prskotine usled zajedničkog delovanja korozije i deformacije metala zbog zaostalih napona ili pod dejstvom primenjenog napona, što predstavlja definiciju zasnovanu na ISO.

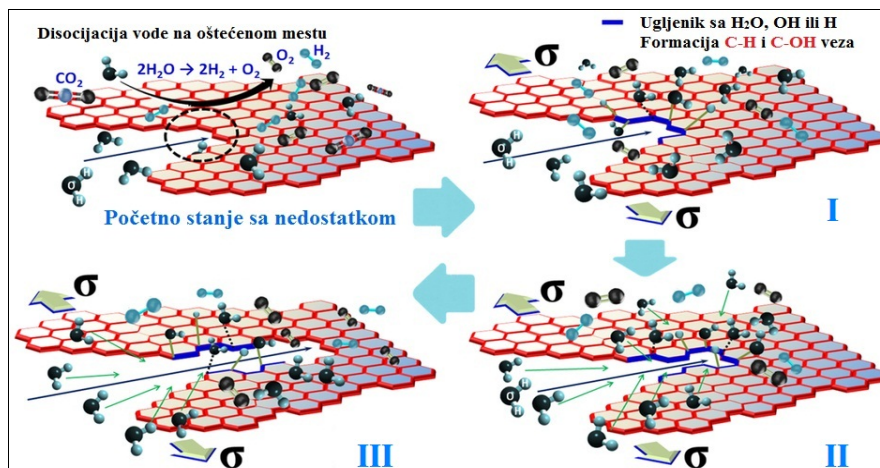
Naponska korozija ne izaziva uvek krti lom (lom praćen malom duktilnošću) i, kao korozivni proces koji nije vidljiv, prouzrokuje značajan pad mehaničkih karakteristika metala uz njegov vrlo mali maseni gubitak. Iako korozivno naponska prskotina, kao oštećenje, ne može da se uoči pri kontroli stanja površine metala, ona može da bude „okidač” brzog mehaničkog loma ili razaranja komponenti i konstrukcija (Korozija, nd).

Prsline i razaranja usled naponske korozije metala mogu da se jave samo ako su istovremeno ostvarena sledeća tri uslova:

- sredina koja ima takve karakteristike da kod konkretnog materijala pogoduje pojavi naponske korozije,
- materijal koji je „osetljiv” na pojavu naponske korozije,
- dovoljan zatezni napon.

Svaki od ovih uslova mora se razmatrati individualno, sa svim detaljima. Na primer, ako se razmatra materijal, on ne može da se posmatra samo sa gledišta hemijskog sastava već i sa gledišta mikrostrukture koja je ostvarena konkretnom termičkom obradom.

Prisutne prsline slabe konstrukciju, smanjujući poprečni presek zida komponenti, pa su moguća iznenadna razaranja. Brzina širenja prsline, u zavisnosti od stepena i inteziteta sadejstva, može da bude veoma velika i da se proces razaranja, od pojave prsline, odvija u kratkom periodu (do nekoliko dana). Naponska korozija širi se u velikom opsegu brzina, od  $10^{-3}$  do 10 mm/h, u zavisnosti od kombinacije legure i radne sredine. Geometrija prsline je takva da kada poraste do određene dužine može da postigne kritičnu dužinu i tada dolazi do prelaska od relativno laganog širenja, koje ima odlike naponske korzije, do širenja velikom brzinom svojstvenom za mehaničko razaranje (Hwangbo, 2014).



Slika 16 – Ilustracija rasta potkritične prskotine u grafenu nastale pod dejstvom naponske korozije. I) adsorpcija vodene pare u ugljenične veze u grafenu; II) transport vodene pare u grafen; III) elektrostatička interakcija vodene pare i grafena.

Рис. 16 – Иллюстрация докритической трещины в графене, возникшей под напряжением коррозии. I) Адсорбция паров воды в углеродной связи в графене; II) Транспорт паров воды в графене; III) Электростатическое взаимодействие паров воды и графена

Figure 16 – Illustration of subcritical crack growth in graphene formed under the influence of stress corrosion. I) adsorption of water vapor to carbon bonds in graphene; II) diffusive transport of water vapor to graphene; III) electrostatic interaction between water vapor and graphene.

Naponska korozija najčešće se javlja na:

- zavarenim spojevima (prelazna oblast/osnovni materijal, posebno u ZUT-u,
- cevnim lukovima,
- na mestima naglih razlika u dimenzijama.

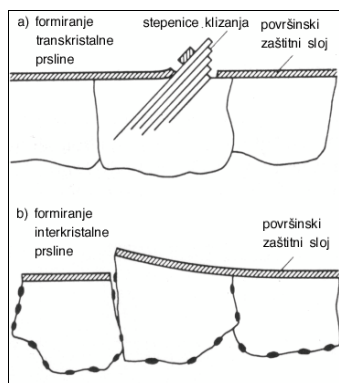
Imajući u vidu da su procesi koji prethode vidljivoj pojavi naponske korozije još uvek nedovoljno istraženi, prema današnjim saznanjima, postoji nekoliko mogućih modela za opisivanje ove vrste korozivnog razaranja.

### Oštećenje zaštitnog sloja – stabilizacija

Ovaj model ima nekoliko varijacija, a karakterističan primer prikazan je na slici 17. Konstantni zatezni naponi uzrokuju razaranje površinskog, zaštitnog, oksidnog sloja. Razaranje zaštitnog sloja mogu izazvati klizne trake koje formiraju klizne stepenice na površini metala, ukoliko je sprečeno višestruko klizanje u strukturi metala zbog deformacionih procesa (slika 17. a). Na taj način iniciraju se prskotine koje se šire transkristalno. U ostalim slučajevima stepenicu klizanja na površini metala prave pojedinačna zrna – granica zrna oslabljena taloženjem karbida i nitrida (slika 17.b). Na ovaj način formiraju se prskotine koje se šire interkristalno (Korozija, nd).

### Hemijsko rastvaranje metala potpomognuto mehaničkim dejstvom

Ovaj mehanizam prikazan je na slici 18. Rastvaranjem metalne površine pod dejstvom korozivne sredine stvaraju se praznine koje, pod dejstvom polja zateznih sila, migriraju i akumuliraju se pri vrhu prskotine i dovode do njenog rasta.



Slika 17 – Mehaniizam razaranja zaštitnog oksidnog sloja

Рис. 17 – Механизм разрушения защитного оксидного слоя

Figure 17 – The mechanism of destruction of the protective oxide layer

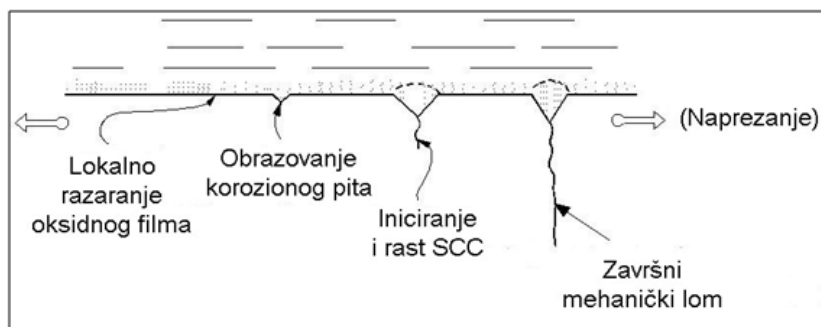


Slika 18 – Šematski prikaz mehanizma rastvaranja metala potpomognutog mehaničkim dejstvom

Рис. 18 – Схематическое изображение механизма растворения металлов под механическим воздействием

Figure 18 – Schematic view of the mechanism of dissolution of metals under mechanical action

Na slici 19 prikazan je način inicijacije korozivno naponskog oštećenja i faze napredovanja naponske korozije.

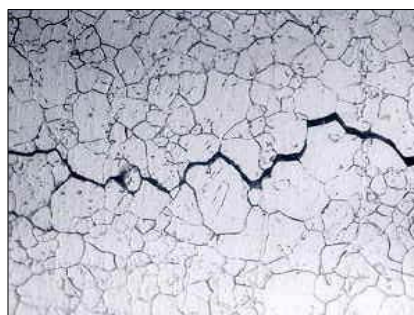


Slika 19 – Faze napredovanja naponske korozije  
 Puc. 19 – Этапы образования коорозии под напряжением  
 Figure 19 – Stages of progression of stress corrosion

Prskotina pri naponskoj koroziji može da se širi transkristalno (kroz same kristale) i interkristalno (duž granica kristala).



Slika 20 – Transkristalna prskotina nastala kao posledica naponske korozije (oštra je i prava)  
 Puc. 20 – Трещина в результате коррозионного напряжения. Острая трещина с ровными краями.  
 Транскристаллитная трещина  
 Figure 20 – Crack as a result of stress corrosion. The crack is sharp and straight – transgranular crack



Slika 21 – Interkristalna prskotina nastala usled naponske korozije (x500 Inconel).  
 Puc. 21 – Межкристаллитное коррозионное растрескивание под напряжением (x500 Inconel)  
 Figure 21 – Intergranular stress corrosion cracking (x500 Inconel).

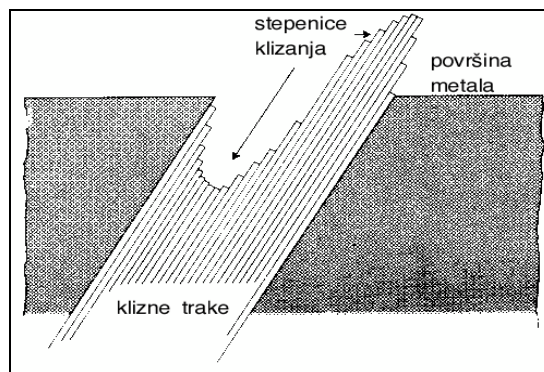
### Korozivni zamor

Korozivni zamor je rezultat kombinovanog delovanja promenljivih napona i korozivnog okruženja. Veruje se da usled delovanja zamora dolazi do prekida zaštitnog pasivnog sloja, pa se korozija intenzivira. Pris-

stvo korozivnog okruženja eliminiše postojeću granicu „zamorne čvrstoće” čelika i kreira konačan radni vek nezavisno od napona. Korozivno okruženje utiče na povećanje brzine rasta prskotine ili rast prskotine pri nižim naponima nego u sredini koju čini suv vazduh. Čak i uslovi veoma slabe atmosferske korozije, npr. kod konstrukcija izrađenih od aluminijuma, dovode do smanjenja dinamičke čvrstoće na 25% od vrednosti na vazduhu. Nijedan metal, ako se nalazi u korozivnom okruženju, nije imun od izvesnog smanjenja svoje otpornosti na delovanje promenljivih napona. Kontrola korozivnog zamora može da se izvede ili smanjenjem broja ciklusa ili kontrolom radne sredine.

Na površini metala formiraju se stepenice klizanja (slika 22). Na taj način oštećuje se zaštitni sloj, čime započinje elektrohemijsko anodno rastvaranje metala koji je došao u dodir sa elektrolitom, što dovodi do pojave mikroprskotina.

Broj ciklusa do loma pri korozivnom zamoru zavisi od učestalosti odvijanja ciklusa. Za odvijanje je potrebno vreme, pa je uticaj efekta korozivne sredine veći kada frekvencija ciklusa postaje niža, što ukazuje na to da korozivni zamor pokazuje svoj maksimalni efekat ako su i frekvencija i prisutno opterećenje niski (Korozija, nd).



Slika 22 – Mehanizam formiranja stepenica klizanja na površini metala  
 Рус. 22 – Механизм возникновения ступени скольжения на поверхности металла  
 Figure 22 – The mechanism of creation of slip steps on the surface of metal

## Zaključak

S obzirom na različite materijale, okruženja i mehanička naprezanja, vazduhoplovstvo predstavlja jednu od oblasti u kojoj se posmatra najveći spektar tipova korozije.

Ovaj rad predstavlja sažet pregled najčešćih pojava oblika korozije na vazduhoplovnim strukturama.



Kako su, zbog odsustva jedinstvene klasifikacije i nomenklature korozivnih procesa, postojeće klasifikacije nepotpune i netačne, kategorizacija korozivnih procesa izvršena je na osnovu opšte prihvaćene strukturno-elektrohemijske teorije, prema kojoj na elektrohemijski proces korozije utiče prisustvo heterogenosti na površini materijala. Obzirom na navedeno, a u zavisnosti od prirode i dimenzije ove neuniformnosti, razlikujemo tri osnovne kategorije korozije: uniformna, selektivna i lokalizovana.

Stalno proširivanje znanja o problemima korozije, zasnovano na prethodnim iskustvima i multidisciplinarnom pristupu projektovanju, kao i razvoj metoda analize bez razaranja, od suštinskog su značaja za uspešno suočavanje sa ekonomskim i bezbednosnim izazovima starenja vazduhoplova.

### *Literatura / References*

Cockpit Voice Recorder Database 28 April 1988 - Aloha 243, [internet], Preuzeto sa <http://www.tailstrike.com/280488.htm>.

Dekompresija prouzrokovana otvaranjem rupe na trupu aviona B747 kompanije "Qantas", [internet], Preuzeto sa <http://www.udruzenjepilota.org/arhiva/08/07/080726qantas.htm>.

Halsne, C., 2004, *Defects in aging passenger jets exposed*, [internet], Preuzeto sa [http://www.iasa.com.au/folders/Safety\\_Issues/RiskManagement/AlohaAgain-2.html](http://www.iasa.com.au/folders/Safety_Issues/RiskManagement/AlohaAgain-2.html).

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*, [internet], Preuzeto sa <http://www.dailymail.co.uk/news/article-2142300/Crashed-plane-Second-World-War-pilot-Dennis-Copping-discovered-Sahara-desert.html>.

Hwangbo, Y., 2014, *Fracture Characteristics of Monolayer CVD-Graphene*, [e-book], Preuzeto sa <http://graphene.yonsei.ac.kr/publications/2014/Fracture%20Characteristics%20of%20Monolayer%20CVD-Graphene.pdf>.

Korozija, [internet], Preuzeto sa <https://www.yumpu.com/hr/document/view/14040635/3-korozija>.

Rajaković–Ognjanović, V., 2011, *Uticaj kvaliteta vode na koroziju čelika*, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, [internet], Preuzeto sa <https://fedorabg.bg.ac.rs/fedora/get/o:6738/bdef:Content/get>.

The Research and Technology Organisation of NATO, 2011, *Corrosion and Maintenance Data Sharing – Final Report of Task Group AVT-137*, [e-book], Preuzeto sa [http://natorto.cbw.pl/uploads/2011/11/\\$TR-AVT-137-ALL.pdf](http://natorto.cbw.pl/uploads/2011/11/$TR-AVT-137-ALL.pdf).

## КОРРОЗИЯ В АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Зоран Ц. Петрович  
ВПВО, 204. авиационная бригада, Батайница

ОБЛАСТЬ: материалы, химические технологии  
ВИД СТАТЬИ: обзорная статья  
ЯЗЫК СТАТЬИ: сербский

### Резюме:

*В вводной главе представлен краткий обзор причин появления коррозии и коррозионных повреждений на авиационных конструкциях.*

*Учитывая отсутствие единой классификации и номенклатуры коррозионных процессов и то, что существующие классификации неполные и недостаточно точные, категоризация коррозионных процессов в этой работе произведена на основании структурно-электрохимической теории, согласно которой движущей силой электрохимического процесса коррозии является присутствие гетерогенности на поверхности материала. В зависимости от характера и размеров данной неоднородности, выделяются три категории коррозии: равномерная, избирательная и локальная коррозия.*

*Далее представлены виды коррозии, которые появляются в трёх ранее описанных категориях коррозии. Рассмотрены и обстоятельства, способствующие появлению определённых видов коррозии в различной коррозионной среде. Приведены примеры того, как протекают коррозионные процессы при кратком описании их механизмов.*

*В последней главе, в качестве заключения, обобщены результаты исследования возможных причин появления коррозии на авиационных конструкциях.*

*Ключевые слова: коррозия, авиационная конструкция, равномерная, избирательная, локальная, коррозия под напряжением, коррозионная усталость.*

---

## CORROSION IN AIRFRAMES

Zoran C. Petrović,  
AF and AD, 204th Aviation Brigade, Batajnica

FIELD: Materials, Chemical Technology  
ARTICLE TYPE: Review Paper  
ARTICLE LANGUAGE: Serbian

### Summary:

*The introductory chapter provides a brief reference to the issue of corrosion and corrosion damage to aircraft structures. Depending on the nature and dimensions of this nonuniformity, three different categories of corrosion are defined: uniform, selective and localized corrosion.*

The following chapters present the forms of corrosion that can occur in three defined categories of corrosion. Conditions that cause certain types of corrosion in various corrosive environments are discussed. Examples of corrosion processes are listed and mechanisms of these processes are briefly described. And, as a conclusion, the last chapter presents the summary of investigations of corrosion and corrosion damage to aircraft structures.

#### *Introduction*

Probably the best and broadest definition of corrosion says that corrosion is the degradation of mechanical properties of materials in the interaction with the environment. Corrosion in aeronautical structures must be considered as a significant problem, because it directly affects both the security and the economy-logistics. In view of the variety of materials, environments and mechanical stresses, aviation is one of the areas where the widest range of types of corrosion can be found.

Depending on the nature and the dimensions of this non-uniformity, three different categories of corrosion can be experienced: Uniform corrosion, Selective corrosion and Localized corrosion.

#### *Uniform corrosion*

Although this is a very common mechanism in many corroded systems, it is not so often observed on airframes because the chosen aeronautical materials are always less prone to it. Uniform corrosion is common for non-stainless steel and iron where it can be easily recognized by red rust. Easily detectable and forecasted uniform corrosion cannot be considered a very dangerous form of corrosion.

#### *Selective corrosion*

This category includes all the phenomena depending on the presence of heterogeneities in a chemical composition. In this sense, we can also talk about this electrochemical attack as caused by an intrinsic heterogeneity of the material.

On airframes, intergranular corrosion is a more often observed mechanism of this class because it is a characteristic of aluminium alloys, both Al-Cu (2xxx) and Al-Zn (7xxx) alloys, where the driving force for the electrochemical process is the difference in potential between the second phase (richer in copper – more noble, or richer in zinc – less noble) and aluminium. In this case, a corrosion profile follows the shape of grain boundaries, and must be considered very dangerous because, in spite of minimum material loss, mechanical properties fall dramatically down.

#### *Localized corrosion*

This is certainly the class where the widest number of corrosion mechanisms is observed. The common factor among the different forms of corrosion in the case of a localized attack is the presence of stable and clearly separate cathodic and anodic areas.

*In the case of local corrosion, dissolution of metals can be done in one place, a reduction in the second place, and the creation of corrosion products in the third; in this case, the corrosion products will not protect the metal from further corrosion.*

*Pitting corrosion: Pitting corrosion is a dangerous attack which occurs on passive materials when the protective oxide layer breaks. It is often observed on stainless steel and aluminium alloys that spontaneously form a protective film.*

*Crevice corrosion: During the exploitation of metal structures, including steel structures, there may be the appearance of localized corrosion, which means the intense destruction in crevices (gaps). Crevices in structures are inevitable; they occur at connections of different parts which may be the same or different metals. Passive metals (corrosion resistant alloys, Al-alloys) have the greatest sensitivity to signs of corrosion in gaps.*

*Galvanic corrosion: Galvanic corrosion is the most evident form of localized attacks, where anodic and cathodic areas are clearly identified.*

*Filiform corrosion: Filiform corrosion can be found under organic coatings such as paints, due to penetration of moisture through the coated surface under specific temperature ( $T \geq 30^\circ\text{C}$ ) and humidity conditions ( $H_r \geq 85\%$ ).*

*Stress Corrosion Cracking and Corrosion-Fatigue: Unfortunately, these two dangerous localized corrosion mechanisms are often observed on airframes. Both produce cracks, different in shape and pattern, whose growth is caused by the synergetic action of a moderate corrosive environment and a mechanical stress: a static load (lower than the material's yield tensile stress) in the case of SCC, or a cyclic load in the case of corrosion-fatigue (lower than the material's fatigue limit).*

#### Conclusion

*In view of the variety of materials, environments and mechanical stresses, aviation is one of the areas where the widest range of types of corrosion is observed.*

*Because of the absence of uniform classification and nomenclature of corrosive processes, existing classifications are incomplete and inaccurate. The categorization of corrosive processes in this paper was done on the basis of the structural-electrochemical theory, according to which the driving force of an electrochemical corrosion process is the presence of heterogeneity on the metal surface. Depending on the nature and dimensions of this nonuniformity, three different categories of corrosion are defined: uniform, selective and localized corrosion.*

*Constantly expanding knowledge about the problems of corrosion, based on previous experiences and multidisciplinary approach to the design, as well as the development of non-destructive methods of analysis are essential for successfully confronting the economic and security challenges of aging aircraft.*

*Key words: corrosion, aircraft structure, uniform, selective, localized, stress corrosion, corrosion fatigue.*

Datum prijema članka / Дата получения работы / Paper received on: 21. 06. 2015.  
Datum dostavljanja ispravki rukopisa / Дата получения исправленной версии работы /  
Manuscript corrections submitted on: 28. 07. 2015.  
Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje / Дата окончательного  
согласования работы / Paper accepted for publishing on: 30. 07. 2015.

© 2016 Autor. Objavio Vojnotehnički glasnik / Military Technical Courier ([www.vtg.mod.gov.rs](http://www.vtg.mod.gov.rs),  
втг.мо.упр.срб). Ovo je članak otvorenog pristupa i distribuira se u skladu sa Creative Commons  
licencom (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/rs/>).

© 2016 Автор. Опубликовано в "Военно-технический вестник / Vojnotehnički glasnik / Military  
Technical Courier" ([www.vtg.mod.gov.rs](http://www.vtg.mod.gov.rs), втг.мо.упр.срб). Данная статья в открытом доступе и  
распространяется в соответствии с лицензией "Creative Commons"  
(<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/rs/>).

© 2016 The Author. Published by Vojnotehnički glasnik / Military Technical Courier  
([www.vtg.mod.gov.rs](http://www.vtg.mod.gov.rs), втг.мо.упр.срб). This article is an open access article distributed under the  
terms and conditions of the Creative Commons Attribution license  
(<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/rs/>).

