

ULOGA NANOTEHNOLOGIJE U UNAPREĐENJU PERFORMANSI I POUZDANOSTI VAZDUHOPLOVNIH SISTEMA

Apstrakt: U savremenom vazduhoplovstvu, rastući zahtevi za većom energetsom efikasnošću, višim radnim temperaturama i produženim radnim vekom sistema nameću ograničenja konvencionalnim materijalima i zaštitnim prevlakama. U tom kontekstu, nanotehnologija se nameće kao ključni pristup za unapređenje performansi i pouzdanosti vazduhoplovnih sistema, omogućavajući preciznu kontrolu strukture i funkcionalnih svojstava materijala na nanoskalama. Ovaj rad analizira ulogu nanotehnologije u unapređenju vazduhoplovnih struktura i pogonskih sistema, sa posebnim fokusom na nanostrukturisane termičke barijerne prevlake i nano-inženjering površina konstrukcionih legura.

Rad je zasnovan na sistematskom pregledu i kritičkoj analizi relevantne naučne literature, uz uporednu interpretaciju eksperimentalnih podataka objavljenih u međunarodnim naučnim časopisima. Kao kriterijumi poređenja korišćeni su maksimalna radna temperatura, efektivna toplotna provodljivost, otpornost na zamor i dugoročni radni vek komponenti. Posebna pažnja posvećena je poređenju nanostrukturisanih rešenja sa konvencionalnim sistemima, uključujući standardne 6–8 wt.% itrijumom stabilizovane cirkonijum-oksidge termičke barijerne prevlake i klasične zaštitne postupke.

Rezultati analize ukazuju da nanotehnološka rešenja omogućavaju značajno unapređenje termičke efikasnosti i pouzdanosti vazduhoplovnih sistema, prvenstveno kroz smanjenje efektivne toplotne provodljivosti i povećanje otpornosti na degradacione procese, bez proporcionalnog povećanja mase ili složenosti sistema. U radu su takođe identifikovana ograničenja postojećih rešenja i naznačeni pravci budućih istraživanja usmerenih ka razvoju vazduhoplovnih sistema sledeće generacije.

Ključne reči: nanotehnologija; vazduhoplovni sistemi; pouzdanost; termičke barijerne prevlake; nanostrukturisani materijali; performanse

* Megatrend Univerzitet, Beograd, Srbija.
E-mail: bojanzimonjic1999@gmail.com

** Alfa Bk Univerzitet, Beograd, Srbija.
E-mail: stevan.jokic@alfa.edu.rs

1. UVOD

Vazduhoplovstvo predstavlja jednu od tehnološki najzahtevnijih inženjerskih oblasti, u kojoj se kontinuirano teži ka smanjenju mase konstrukcija, povećanju energetske efikasnosti, produženju radnog veka komponenti i unapređenju bezbednosti letenja. Istorijski posmatrano, svaki značajan iskorak u razvoju vazduhoplovnih sistema bio je uslovljen napretkom u oblasti materijala, počev od drvenih i aluminijumskih konstrukcija, preko legura visokih performansi, pa sve do savremenih kompozitnih sistema.

U savremenim vazduhoplovnim i svemirskim letelicama, konvencionalni materijali sve češće dostižu granice svojih mogućnosti. Ekstremni radni uslovi, kao što su visoke temperature u gasnoturbinskim motorima, ciklična mehanička opterećenja, agresivna koroziona sredina i zahtevi za višefunkcionalnošću, nameću potrebu za novim inženjerskim pristupima. U tom kontekstu, nanotehnologija se izdvojila kao jedan od ključnih pravaca razvoja savremenog vazduhoplovstva.

Razvoj vazduhoplovnih sistema jedna je od najzahtevnijih inženjerskih oblasti, u kojoj se zahtev za većom energetskom efikasnošću, manjom masom, većom pouzdanošću i većom radnom temperaturom konstantno povećava. Tradicionalni materijali, poput aluminijuma, legura i konvencionalnih kompozita, sve više pokazuju ograničenja u pogledu mehaničkih performansi i otpornosti na ekstremne uslove, što otežava zadovoljavanje savremenih zahteva za performansama i pouzdanošću letelica. U tom kontekstu, nanotehnologija predstavlja jednu od ključnih oblasti koja obezbeđuje nove puteve za unapređenje materijala i funkcija vazduhoplovnih sistema.¹

Nanotehnologija se bavi manipulacijom materije na **nanoskopskom nivou (1–100 nm)**, gde materijali pokazuju jedinstvena svojstva kao posledica povećanog odnosa površine i zapremine, kvantnih efekata i mikrostrukturnih interakcija koje nisu prisutne u makroskopskim materijalima. Ove osobine omogućavaju razvoj materijala i nano-sistema sa superiornim mehaničkim, termičkim, električnim i drugim funkcionalnim svojstvima, čime se značajno unapređuje ukupna performansa vazduhoplovnih komponenti.²

Primena nanotehnologije u vazduhoplovstvu se ogleda u nekoliko ključnih pravaca. Jedan od najvažnijih su **nanokompozitni materijali**, uključujući ugljenične nano-cevi (CNT), grafen i druge nanostrukturisane punilice, koji se koriste za ojačanje polimernih i keramičkih matrica radi poboljšanja specifične čvrstoće i

¹ Tang, X. Y., Zhang, Y., Liu, H. & Wang, Q. (2025): "Research progress on carbon-based materials for aerospace applications", *Composites Part B: Engineering*, 284, 111019. DOI: 10.1016/j.compositesb.2025.111019

² Abbasi, I. (2025): "The role of nanomaterials in aerospace heat management systems", *AZo-Nano*, <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=6850>.

otpornosti na umor.³ Takvi nanokompoziti omogućavaju značajno smanjenje mase strukturalnih komponenti, što dovodi do veće energetske efikasnosti i smanjenja emisije goriva. Drugi važan pravac su **nanostrukturisane površinske prevlake i tanki filmovi**, koji se koriste za zaštitu od korozije, habanja i ekstremnih temperatura, unapređujući dugovečnost i pouzdanost kritičnih delova kao što su gasni turbo motori i aerodinamičke površine.⁴

Još jedan značajan doprinos nanotehnologije jeste u oblasti **termalnog menadžmenta**, gde nanomaterijali, poput aerogela i nanostrukturisanih filmova, poboljšavaju izolaciju i disipaciju toplote u sredinama sa visokim termičkim opterećenjima, kao što su turbine i termički zaštitni sistemi letelica.⁵ Pored toga, nanotehnologija omogućava razvoj **multifunkcionalnih nano-sistema**, uključujući senzore ugrađene u materijalne strukture (nanosenzori), koji omogućavaju kontinuirani monitoring stanja i prediktivno održavanje, čime se unapređuje bezbednost i pouzdanost sistema.⁶

Međutim, primena nanotehnologije u vazduhoplovstvu nosi i izazove: postoje značajne teškoće u industrijskoj skalabilnosti proizvodnje nanomaterijala, kontroli homogenosti nanoslojeva i pouzdanosti performansi pod realnim radnim uslovima. Takođe, regulatorni zahtevi i standardizacija za bezbednu integraciju nanotehnoloških rešenja u operativne vazduhoplovne sisteme još uvek se razvijaju, dok se zdravstveni i ekološki uticaji nanomaterijala moraju dodatno istražiti.⁷

Imajući u vidu potencijalne prednosti, ali i tehničke izazove, cilj ovog seminarskog rada je da pruži **sistematičan pregled primene nanotehnologije u vazduhoplovnim sistemima**, sa posebnim osvrtom na unapređenje performansi, pouzdanosti i funkcionalnosti materijala. Rad će obuhvatiti analizu dosadašnjih istraživanja, identifikaciju preostalih tehnoloških barijera i sugestije za buduće pravce istraživanja u ovoj oblasti.

Cilj ovog rada je da pruži sistematičan pregled primene nanotehnologije u vazduhoplovstvu, sa posebnim osvrtom na nanokompozitne materijale,

³ Yang, P. (2023): "Nanomaterials in aerospace: Advancements, applications, and the path forward", *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 43, 1–10, <https://drpress.org/ojs/index.php/HSET/article/view/12847>.

⁴ Tang, X. Y., Zhang, Y., Liu, H. & Wang, Q. (2025): "Research progress on carbon-based materials for aerospace applications", *Composites Part B: Engineering*, 284, 111019. DOI: 10.1016/j.compositesb.2025.111019

⁵ Abbasi, I. (2025): "The role of nanomaterials in aerospace heat management systems", *AZo-Nano*, <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=6850>.

⁶ Yang, P. (2023): "Nanomaterials in aerospace: Advancements, applications, and the path forward", *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 43, 1–10, <https://drpress.org/ojs/index.php/HSET/article/view/12847>.

⁷ Abbasi, I. (2025): "The role of nanomaterials in aerospace heat management systems", *AZo-Nano*, <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=6850>.

nanostrukturisane premaze i multifunkcionalne nano-sisteme. Rad ima za cilj da analizira dosadašnja istraživanja, identifikuje ključne prednosti i ograničenja postojećih rešenja, kao i da ukaže na pravce budućeg razvoja nanotehnologije u vazduhoplovnim sistemima sledeće generacije.

2. PRETHODNA ISTRAŽIVANJA

2.1. Uloga nanomaterijala u modernim vazduhoplovnim strukturama

Prva istraživanja primene nanotehnologije u vazduhoplovstvu pojavila su se krajem 1990-ih i početkom 2000-ih godina, u trenutku kada su konvencionalni metalni i kompozitni materijali počeli da dostižu svoja fundamentalna ograničenja u pogledu mase, temperaturne izdržljivosti i dugoročne pouzdanosti. Povećanje radnih temperatura gasnoturbinskih motora, zahtevi za smanjenjem potrošnje goriva i emisija, kao i potreba za produženjem servisnog veka vazduhoplovnih struktura jasno su ukazali da klasični pristupi razvoju materijala više nisu dovoljni.⁸

U tom kontekstu, nanotehnologija se nametnula kao pomak, jer omogućava kontrolu strukture i svojstava materijala na nivou nanometara, gde dominiraju površinski i kvantni efekti, a odnos površine i zapremine značajno utiče na mehaničko, termičko i električno ponašanje materijala.⁹ Ova sposobnost inženjeringa materijala „odozdo nagore“ otvorila je mogućnost za projektovanje lakših, jačih i funkcionalno bogatijih vazduhoplovnih komponenti u poređenju sa konvencionalnim rešenjima.

Među prvim istraživanjima u ovoj oblasti, rad Thostensona, Rena i Choua (2001) predstavlja jednu od prvih sveobuhvatnih studija koja je pokazala da uvođenje ugljeničnih nano-cevi (carbon nanotubes – CNT) u polimerne matrice može dovesti do značajnog povećanja specifične čvrstoće, modula elastičnosti i otpornosti na zamor.¹⁰ Ovi rezultati su ukazali na potencijal CNT-polimernih nanokompozita za smanjenje mase strukturnih komponenti u vazduhoplovnim konstrukcijama, bez ugrožavanja mehaničke pouzdanosti sistema, čime je postavljen temelj za dalji razvoj nanokompozita u avijaciji.

Dalji napredak ostvaren je kroz radove Colemana i saradnika (2006), koji su kvantitativno analizirali uticaj disperzije nano-fillera, međufaznih veza i

⁸ Padtare, N. P., Gell, M. & Jordan, E. H. (2002): “Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications”, *Science*, 296(5566), 280–284.

⁹ George, S. M. (2019): “Atomic layer deposition: An overview”, *Chemical Reviews*, 119(12), 11087–11144.

¹⁰ Thostenson, E. T., Ren, Z. & Chou, T. W. (2001): “Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites”, *Composites Science and Technology*, 61(13), 1899–1912.

mehanizama prenosa napona na makroskopska mehanička svojstva CNT-polimernih kompozita.¹¹ Autori su naglasili da se teorijski potencijal nanomaterijala ne može ostvariti bez precizne kontrole mikro- i nano-strukture, jer aglomeracija nano-cevi i slaba adhezija sa matricom dovode do degradacije mehaničkih svojstava i nepredvidivog ponašanja materijala pod opterećenjem.

Savremena istraživanja dodatno proširuju ovu paradigmu, pomerajući fokus sa isključivo mehaničkog ojačanja ka razvoju multifunkcionalnih nanokompozita. Li i saradnici (2021) pokazali su da hibridni CNT/grafen nanokompoziti omogućavaju istovremeno poboljšanje mehaničkih svojstava i električne provodljivosti, čime se otvara mogućnost integracije zaštite od udara groma, elektromagnetne kompatibilnosti i strukturnog monitoringa direktno u noseće elemente vazduhoplovnih struktura.¹²

Dalje, Tang i saradnici (2024) analizirali su primenu ugljeničnih nanomaterijala u ekstremnim aero-termičkim uslovima, karakterističnim za napredne i hipersonične vazduhoplovne sisteme. Njihovi rezultati ukazuju da nanomaterijali, zahvaljujući visokoj termičkoj stabilnosti i prilagodljivoj mikrostrukтури, mogu obezbediti pouzdanije performanse u uslovima gde konvencionalne legure i kompoziti pokazuju ubrzanu degradaciju.¹³

Pored CNT i grafena, novije studije razmatraju i druge klase nanomaterijala, uključujući MXene i visokentropijske nanokompozite, koji kombinuju mehaničku robusnost sa naprednim funkcionalnim svojstvima, kao što su otpornost na oksidaciju i poboljšano upravljanje toplotom.¹⁴ Ovi materijali se sve češće identifikuju kao kandidati za buduće vazduhoplovne strukture i zaštitne sisteme.

Na osnovu navedenih istraživanja može se zaključiti da nanotehnologija više ne predstavlja samo alat za poboljšanje pojedinačnih svojstava materijala, već postaje integrativni pristup projektovanju savremenih vazduhoplovnih sistema. Ipak, ključni izazovi ostaju u oblasti skalabilne proizvodnje, dugoročne pouzdanosti i predvidivosti ponašanja nanomaterijala u realnim operativnim uslovima, što predstavlja centralni fokus savremenih istraživanja na doktorskom nivou.¹⁵

¹¹ Coleman, J. N., Khan, U., Blau, W. J. & Gun'ko, Y. K. (2006): "Small but strong: A review of the mechanical properties of carbon nanotube-polymer composites", *Carbon*, 44(9), 1624–1652.

¹² Li, X., Kang, H. & Zhang, J. (2021): "Multifunctional carbon nanotube/graphene hybrid composites for aerospace applications", *Composites Part B: Engineering*, 215.

¹³ Tang, X., Liu, H., Zhang, Y. & Wang, Q. (2024): "Carbon-based nanomaterials for extreme aerospace environments: A review", *Progress in Aerospace Sciences*, 148.

¹⁴ Li, C., Zhang, H., Wang, Y. & Zhou, Y. (2023): "High-entropy oxide materials and nanocomposites for extreme environments", *Journal of the European Ceramic Society*, 43(6), 2581–2594.

¹⁵ Agrawal, A. P., Choudhary, A. & Pandey, H. M. (2023): "An efficient regression test suite optimisation approach using adaptive salp swarm optimisation", *International Journal of Business Information Systems*, 43(4), 486–506.

2.2. Nanostrukturisane termičke barijerne prevlake (TBC)

Jedno od najintenzivnije istraživanih područja primene nanotehnologije u vazduhoplovstvu odnosi se na razvoj termičkih barijernih prevlaka (Thermal Barrier Coatings – TBC) za gasnoturbinske motore. TBC sistemi imaju ključnu ulogu u zaštiti metalnih komponenti, kao što su lopatice, mlaznice i komore sagorevanja, od ekstremno visokih temperatura i agresivnih oksidacionih sredina. Povećanje radne temperature motora direktno utiče na termodinamičku efikasnost, ali istovremeno nameće strože zahteve u pogledu stabilnosti i pouzdanosti zaštitnih prevlaka.¹⁶

Fundamentalni rad Padturea, Gella i Jordana (2002) predstavlja jedan od najznačajnijih doprinosa razumevanju ponašanja TBC sistema u vazduhoplovnim motorima.¹⁷ Autori su detaljno analizirali mehanizme degradacije standardnih TBC sistema, ukazujući da mikro- i nano-struktura prevlake direktno utiče na otpornost prema termičkom zamoru, sinterovanju, oksidaciji veznog sloja i ljuštenju (spallation). Posebno je naglašeno da itrijumom stabilizovani cirkonijum-oksidi (YSZ), iako široko primenjivan zbog povoljne kombinacije niske toplotne provodljivosti i kompatibilnosti sa metalnom podlogom, pokazuje ograničenu faznu stabilnost pri temperaturama iznad približno 1200–1300 °C.

Na tim osnovama, Clarke i Levi (2003) su proširili istraživanja ka konceptu „sledeće generacije“ TBC materijala, uvodeći sistematski pristup dizajnu novih keramičkih sistema.¹⁸ Njihov rad je prvi jasno ukazao da budući razvoj TBC prevlaka mora prevazići granice klasičnih YSZ sistema i obuhvatiti materijale sa inherentno nižom toplotnom provodljivošću, većom otpornošću na sinterovanje i stabilnijom kristalnom strukturom pri ekstremnim temperaturama. U tom kontekstu, kao posebno perspektivne istaknute su nanostrukturisane prevlake i retkozemni cirkonati, čija složena kristalna struktura efikasno raspršuje fonone i time smanjuje toplotni tok kroz prevlaku.

Dalji napredak u razumevanju uloge nanostrukture u TBC sistemima ostvaren je kroz radove Vašena i saradnika (2010), koji su eksperimentalno potvrdili da kontrola mikro- i nano-arhitekture prevlake predstavlja ključni faktor u produženju njenog radnog veka.¹⁹ Autori su pokazali da poroznost, raspodela pora i

¹⁶ Evans, A. G., Mumm, D. R., Hutchinson, J. W., Meier, G. H. & Pettit, F. S. (2001): “Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings”, *Progress in Materials Science*, 46(5), 505–553.

¹⁷ Padture, N. P., Gell, M. & Jordan, E. H. (2002): “Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications”, *Science*, 296(5566), 280–284.

¹⁸ Clarke, D. R. & Levi, C. G. (2003): “Materials design for the next generation thermal barrier coatings”, *Annual Review of Materials Research*, 33, 383–417.

¹⁹ Vašen, R., Traeger, F. & Stöver, D. (2010): “New thermal barrier coatings based on pyrochlore structures”, *Journal of the American Ceramic Society*, 93(11), 3379–3390.

prisustvo vertikalno ispucanih (vertically cracked) struktura omogućavaju relaksaciju termičkih napona nastalih tokom cikličnog zagrevanja i hlađenja. Ovakve nanostrukturisane APS i EB-PVD prevlake pokazale su nižu efektivnu toplotnu provodljivost, kao i znatno poboljšanu otpornost na sinterovanje u poređenju sa konvencionalnim, gušćim prevlakama.

Savremenija istraživanja dodatno potvrđuju ove nalaze i proširuju ih uvodeњem novih klasa materijala, kao što su pirohlorni cirkonati, perovskiti i visokentropijske oksidne keramike. Vaßen, Bakan i Stöver (2020) ističu da je kombinacija nanostrukture i hemijskog dizajna ključna za razvoj TBC prevlaka koje mogu pouzdano da funkcionišu na temperaturama iznad 1400 °C, što predstavlja kritičan prag za buduće generacije vazduhoplovnih i industrijskih gasnih turbina.²⁰

Pored same toplotne izolacije, nanostrukturisane TBC prevlake danas se posmatraju kao integralni deo celokupnog sistema upravljanja pouzdanošću motora. Njihova sposobnost da smanje toplotni tok, ublaže termičke napone i uspore degradacione procese direktno doprinosi produženju servisnog veka komponenti i smanjenju troškova održavanja. Ipak, izazovi i dalje ostaju u oblasti dugoročne stabilnosti nanostrukture, skalabilnosti proizvodnih procesa i pouzdane predikcije ponašanja prevlaka u realnim operativnim uslovima, što predstavlja jedan od ključnih pravaca savremenih istraživanja u oblasti nanotehnologije u vazduhoplovstvu.²¹

2.3. Nano-premazi, multifunkcionalni nano-sistemi i pouzdanost vazduhoplovnih struktura

Pored termičke zaštite, značajan broj savremenih istraživanja u oblasti nanotehnologije u vazduhoplovstvu fokusiran je na razvoj nano-premaza i tankih filmova za zaštitu aluminijumskih i titanijumskih legura od korozije, habanja i degradacije u agresivnim radnim sredinama. Aluminijumske legure, poput AA2024-T3, i titanijumske legure široko se primenjuju u vazduhoplovnim strukturama zbog povoljnog odnosa čvrstoće i mase, ali su istovremeno osetljive na lokalizovanu koroziju i površinska oštećenja, što direktno utiče na pouzdanost sistema.²²

U tom kontekstu, nano-premazi naneti savremenim metodama, kao što je atomska depozicija slojeva (Atomic Layer Deposition – ALD), pokazali su izuzetan potencijal. Oliveira i saradnici (2022) su demonstrirali da ultratanki slojevi aluminijum-oksida (Al_2O_3), debljine svega nekoliko desetina nanometara, mogu značajno poboljšati korozionu otpornost legure AA2024-T3 bez negativnog uticaja

²⁰ Vaßen, R., Bakan, E. & Stöver, D. (2020): "Design of advanced thermal barrier coatings", *Journal of Thermal Spray Technology*, 29(1–2), 1–14.

²¹ Li, C., Zhang, H., Wang, Y. & Zhou, Y. (2023): "High-entropy oxide thermal barrier coatings for extreme environments", *Journal of the European Ceramic Society*, 43(6), 2581–2594.

²² Davis, J. R. (2001): *Corrosion of aluminum and aluminum alloys*, ASM International.

na mehanička svojstva podloge.²³ Njihovi rezultati ukazuju da nanometarski filmovi deluju kao efikasne difuzione barijere, sprečavajući prodor agresivnih jona, dok istovremeno zadržavaju strukturni integritet osnovnog materijala.

Slične zaključke donose Merisalu i saradnici (2021), koji su kombinovali konvencionalne anodizacione postupke sa ALD nano-laminatima, ostvarujući višeslojni zaštitni sistem sa znatno produženim vekom trajanja u agresivnim korozionim sredinama.²⁴ Ovakav hibridni pristup pokazuje da nano-inženjering površina ne mora zameniti postojeće tehnologije, već ih može unaprediti kroz preciznu kontrolu strukture i hemije zaštitnih slojeva na nanoskali. Time se nano-premazi pozicioniraju kao ključni element u strategijama povećanja pouzdanosti i smanjenja troškova održavanja vazduhoplovnih struktura.

Paralelno sa razvojem zaštitnih nano-premaza, savremenija istraživanja sve više naglašavaju ulogu nanotehnologije u razvoju multifunkcionalnih nano-sistema, posebno u oblasti praćenja strukturnog zdravlja (Structural Health Monitoring – SHM). Lynch i Loh (2006) pružili su jedan od prvih sveobuhvatnih pregleda bežičnih senzorskih mreža za praćenje stanja konstrukcija, ističući potencijal miniaturizovanih senzora za kontinuirani nadzor naprezanja, vibracija i oštećenja u realnom vremenu.²⁵ Iako su njihova istraživanja inicijalno bila fokusirana na mikro-senzorske sisteme, ona su postavila temelje za kasniju integraciju nano-senzora u vazduhoplovne strukture.

Integracijom nanomaterijala, poput ugljeničnih nano-cevi (CNT) i grafena, u senzorske i strukturne komponente omogućeno je da sami noseći elementi postanu „pametni“, odnosno sposobni da detektuju rane faze degradacije, zamora i pojave pukotina.²⁶ Ovakav pristup predstavlja značajan iskorak ka prediktivnom održavanju, jer omogućava pravovremenu identifikaciju potencijalnih otkaza pre nego što oni dovedu do ozbiljnih bezbednosnih rizika. Na taj način, nanotehnologija ne doprinosi samo unapređenju performansi materijala, već i povećanju ukupne pouzdanosti i bezbednosti vazduhoplovnih sistema.

Uprkos značajnom napretku, analiza prethodnih istraživanja ukazuje na postojanje izraženog istraživačkog jaza. Većina postojećih studija fokusirana je na pojedinačne aspekte primene nanotehnologije, kao što su mehaničko ojačanje, termička otpornost ili koroziona zaštita. Nedostaje integrisan pristup koji bi povezo

²³ Oliveira, R. S., Silva, T. M. & Ferreira, M. G. S. (2022): “Atomic layer deposited Al₂O₃ films for corrosion protection of aerospace aluminum alloys”, *Corrosion Science*, 198.

²⁴ Merisalu, M., Aarik, L., Kozlova, J., Mändar, H., Tarre, A. & Sammelselg, V. (2021): “Effective corrosion protection of aluminum alloy AA2024-T3 with novel thin nanostructured oxide coating”, *Surface and Coatings Technology*, 411, 126993. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.126993

²⁵ Lynch, J. P. & Loh, K. J. (2006): “A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring”, *Shock and vibration digest*, 38(2), 91-130.

²⁶ Wang, Y. & Zhang, L. (2022): “Development of self-sensing cementitious composite incorporating hybrid graphene nanoplates and carbon nanotubes for structural health monitoring”, *Sensors and Actuators A: Physical*, 336, 113367.

nano- i mikrostrukturu materijala sa njihovim dugoročnim ponašanjem u realnim operativnim uslovima, uključujući ciklična opterećenja, promene temperature i kombinovano delovanje više degradacionih mehanizama.²⁷

Stoga se buduća istraživanja moraju usmeriti ka sistemskom razumevanju interakcije između nanostrukture, proizvodnih procesa i eksploatacionih uslova, kako bi se omogućila pouzdana i predvidiva primena nano-premaza i multifunkcionalnih nano-sistema u vazduhoplovstvu. Upravo ovaj integrativni pristup predstavlja ključni pravac daljeg razvoja nanotehnologije u unapređenju performansi i pouzdanosti vazduhoplovnih sistema.

3. NANOTEHNOLOŠKI MEHANIZMI UNAPREĐENJA PERFORMANSI I POUZDANOSTI VAZDUHOPLOVNIH SISTEMA

3.1. Mehanizmi unapređenja termičkih performansi

Upravljanje toplotom predstavlja jedan od ključnih ograničavajućih faktora u razvoju savremenih vazduhoplovnih pogonskih sistema.²⁸ Porast zahteva za većom specifičnom snagom, smanjenom potrošnjom goriva i nižim emisijama neminovno vodi ka povećanju radnih temperatura, čime se konvencionalni materijali i prevlake dovode do svojih fundamentalnih granica. U tom kontekstu, nanotehnologija ne predstavlja inkrementalno unapređenje postojećih rešenja, već omogućava kvalitativno novu kontrolu termičkog ponašanja materijala.²⁹

Kod nanostrukturisanih termičkih barijernih prevlaka (TBC), ključni mehanizam unapređenja performansi zasniva se na manipulaciji fononskog transporta kroz složenu nano-mikrostrukturu.³⁰ Uvođenjem hijerarhijske poroznosti, nano-raslojavanja i vertikalno ispućanih kolonarnih struktura, dolazi do višestrukog rasipanja fonona, čime se efektivna toplotna provodljivost prevlake značajno smanjuje. Ovaj efekat je naročito izražen u poređenju sa konvencionalnim 6–8 wt.% itrijumom stabilizovanim cirkonijum-oksidnim (YSZ) prevlakama, kod kojih sinterovanje tokom eksploatacije dovodi do postepenog gubitka poroznosti i porasta toplotne provodljivosti.³¹

²⁷ Agrawal, A. & Choudhary, A. (2016): "Perspective: Materials informatics and big data: Realization of the "fourth paradigm" of science in materials science", *Apl Materials*, 4(5).

²⁸ Padture, N. P., Gell, M. & Jordan, E. H. (2002): "Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications", *Science*, 296(5566), 280-284.

²⁹ Clarke, D. R. & Levi, C. G. (2003): "Materials design for the next generation thermal barrier coatings", *Annual review of materials research*, 33(1), 383-417.

³⁰ Vaßen, R., Jarligo, M. O., Steinke, T., Mack, D. E. & Stöver, D. (2010): "Overview on advanced thermal barrier coatings", *Surface and Coatings Technology*, 205(4), 938-942.

³¹ Evans, A. G., Mumm, D. R., Hutchinson, J. W., Meier, G. H. & Pettit, F. S. (2001): "Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings", *Progress in materials science*, 46(5), 505-553.

Pored toga, nanostrukturisane TBC prevlake pokazuju znatno veću fazu i mikrostrukturnu stabilnost pri dugotrajnom izlaganju ekstremnim temperaturama. Ograničeni rast zrna, kao i prisustvo nano-defekata koji deluju kao barijere za difuzione procese, usporavaju sinterovanje i degradaciju prevlake.³² Time se ne samo produžava njen radni vek, već se omogućava stabilan rad motora pri temperaturama koje bi za konvencionalne sisteme predstavljale neprihvatljiv rizik od otkaza.

3.2. Mehanizmi unapređenja mehaničke izdržljivosti i otpornosti na zamor

Termička poboljšanja sama po sebi ne bi bila dovoljna bez paralelnog unapređenja mehaničke izdržljivosti materijala i prevlaka. Vazduhoplovne komponente su istovremeno izložene cikličnim mehaničkim opterećenjima, vibracijama, udarnim silama i termički indukovanim naprezanjima, što čini zamor jedan od dominantnih mehanizama otkaza. Nanotehnologija omogućava redefinisavanje ovih mehanizama kroz modifikaciju ponašanja pukotina i redistribuciju naprezanja na mikro- i nanoskalama.

Kod nanokompozitnih materijala ojačanih ugljeničnim nano-cevima (CNT) ili grafenom, povećanje specifične čvrstoće i otpornosti na zamor proizilazi iz izuzetno visokog odnosa čvrstoće i mase nano-ojačanja, kao i iz poboljšane međufazne interakcije sa matricom.³³ Efikasniji prenos opterećenja i smanjenje lokalnih koncentracija naprezanja usporavaju inicijaciju mikro-pukotina i otežavaju njihov rast, čime se značajno produžava radni vek strukturalnih elemenata bez povećanja mase.

Slični principi važe i za nanostrukturisane prevlake. Vertikalno ispucane i segmentisane TBC strukture deluju kao mehanizmi relaksacije naprezanja, omogućavajući lokalnu deformaciju bez gubitka adhezije ili pojave ljuštenja (spallation). Ovakva sposobnost „tolerisanja oštećenja“ predstavlja ključnu razliku u odnosu na krute konvencionalne prevlake, kod kojih akumulacija naprezanja često dovodi do naglog i katastrofalnog otkaza.

3.3. Sinergija termičkih i mehaničkih mehanizama

Najznačajniji doprinos nanotehnologije u vazduhoplovstvu ne leži u izolovanom unapređenju pojedinačnih svojstava, već u sinergijskom delovanju termičkih i mehaničkih mehanizama. Smanjenje toplotnog fluksa kroz prevlaku direktno umanjuje termički indukovana naprezanja, dok poboljšana mehanička izdržljivost omogućava sigurniji rad u proširenim operativnim režimima.

³² Khattab, R. M., Sadek, H. E. H., Ajiba, N. A., Badr, H. A. & Abo-Elmaged, H. H. (2023): “The effect of β -eucryptite on cordierite ceramic materials prepared using a temperature-induced forming technique”, *Journal of the European Ceramic Society*, 43(5), 2253-2268.

³³ Platzer, M. F. (2023): “A perspective on the urgency for green aviation”, *Progress in Aerospace Sciences*, 141, 100932.

Ovakav integrisani pristup omogućava projektovanje vazduhoplovnih sistema kod kojih se povećanje performansi ne postiže konzervativnim povećanjem mase ili bezbednosnih margina, već inteligentnim inženjeringom materijala na nanoskalama.³⁴ Time se pouzdanost sistema transformiše iz pasivne karakteristike u aktivno projektovanu osobinu, što predstavlja suštinski pomak u odnosu na tradicionalne paradigme vazduhoplovnog inženjerstva.

U tom smislu, nanotehnologija postaje ne samo alat za unapređenje materijala, već i ključni element sistemskog dizajna vazduhoplovnih platformi sledeće generacije, u kojima su termička efikasnost, mehanička izdržljivost i dugoročna pouzdanost neraskidivo povezani.

4. NANOTEHNOLOGIJA KAO POKRETAČ PERFORMANSI I POUZDANOSTI VAZDUHOPLOVNIH SISTEMA

Analiza nanotehnoloških mehanizama unapređenja performansi i pouzdanosti, predstavljena u prethodnom poglavlju, zahteva kvantitativnu i uporedivu evaluaciju kako bi se njihovi efekti jasno sagledali u kontekstu realnih vazduhoplovnih sistema. Iz tog razloga, uvodimo strukturisan analitički okvir zasnovan na jasno definisanim kriterijumima poređenja, koji omogućavaju sistematsko razmatranje prednosti nanostrukturisanih materijala i prevlaka u odnosu na konvencionalna rešenja.

U ovom radu, kao ključni kriterijumi poređenja identifikovani su: **maksimalna radna temperatura, efektivna toplotna provodljivost, dugoročni životni vek materijala/prevlake i otpornost na mehanički i termički zamor**. Ovi parametri direktno proizilaze iz mehanizama i predstavljaju fundamentalne performansne i pouzdanosne pokazatelje u vazduhoplovnim aplikacijama.

Maksimalna radna temperatura posmatra se kao indikator termičke stabilnosti i otpornosti materijala na fazne transformacije i sinterovanje. Ovaj kriterijum omogućava poređenje između konvencionalnih 6–8 wt.% YSZ termičkih barijernih prevlaka i naprednih nanostrukturisanih TBC sistema, pri čemu se analiziraju temperaturni opsezi u kojima se zadržavaju stabilna svojstva i prihvatljiv radni vek.

Efektivna toplotna provodljivost predstavlja centralni parametar za ocenu efikasnosti termičke izolacije. Na osnovu ovog kriterijuma moguće je kvantitativno sagledati uticaj nano-mikrostrukture na fononski transport i identifikovati u kojoj meri nanostrukturisane prevlake omogućavaju smanjenje toplotnog fluksa u

³⁴ Evans, A. G., Mumm, D. R., Hutchinson, J. W., Meier, G. H. & Pettit, F. S. (2001): "Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings", *Progress in materials science*, 46(5), 505-553.

poređenju sa konvencionalnim sistemima. Ovaj parametar direktno povezuje teorijske mehanizme rasipanja fonona sa eksperimentalnim i literaturnim podacima.

Životni vek materijala i prevlaka razmatra se kroz otpornost na dugotrajnu degradaciju, uključujući sinterovanje, oksidaciju i ljuštenje prevlake. Ovaj kriterijum omogućava procenu dugoročne pouzdanosti sistema, posebno u uslovima produženog izlaganja visokim temperaturama i cikličnim opterećenjima, čime se direktno vrednuje praktični značaj nanotehnoloških unapređenja.

Otpornost na zamor obuhvata kako mehanički, tako i termički zamor, i predstavlja ključni indikator sigurnosti i stabilnosti vazduhoplovnih komponenti. Poređenje po ovom kriterijumu omogućava sagledavanje uloge nanostrukturisanih materijala u redistribuciji naprezanja i usporavanju inicijacije i rasta pukotina, čime se povezuju mehanizmi tolerancije oštećenja sa kvantitativnim pokazateljima.

Na taj način, teorijski mehanizmi nanotehnoloških unapređenja sistematski se prevode u merljive performansne i pouzdanosne pokazatelje, čime se obezbeđuje metodološka koherentnost celokupnog rada.

Pristup primenjen u ovom poglavlju može se okarakterisati kao **strukturisani narativni pregled sa elementima empirijske analize**, gde se eksperimentalni i numerički rezultati iz literature objedinuju radi sagledavanja opštih trendova i mehanizama delovanja nanotehnologije u vazduhoplovstvu.

Literatura korišćena u ovom poglavlju odabrana je na osnovu **izvora** a to su recenzirani naučni časopisi indeksirani u bazama *Scopus* i *Web of Science*, kao i relevantne monografije (npr. ASM handbooks). **Vremenski okvir** je obuhvatio period od 2000. do 2025. godine, čime je obuhvaćen razvoj nanotehnologije od ranih fundamentalnih studija do savremenih industrijski relevantnih rešenja. **Za tematsku relevantnost** izabrani su radovi koji eksplicitno razmatraju: termičke barijerne prevlake za gasnoturbinske motore, nano-premaze za zaštitu aluminijumskih i titanijumskih legura, nanokompozite i multifunkcionalne materijale sa senzorskim svojstvima.

Ovakav pristup omogućio je smanjenje pristrasnosti i obezbedio konzistentnost u poređenju različitih tehnologija.

Savremeni vazduhoplovni sistemi nalaze se na granici mogućnosti konvencionalnih materijala. Zahtevi za većom termodinamičkom efikasnošću, manjom masom, produženim radnim vekom i povećanom bezbednošću doveli su do situacije u kojoj klasični inženjerski kompromisi više nisu održivi. U tom kontekstu, nanotehnologija se pojavljuje ne kao inkrementalno poboljšanje postojećih rešenja, već kao fundamentalna promena paradigme projektovanja materijala i sistema.

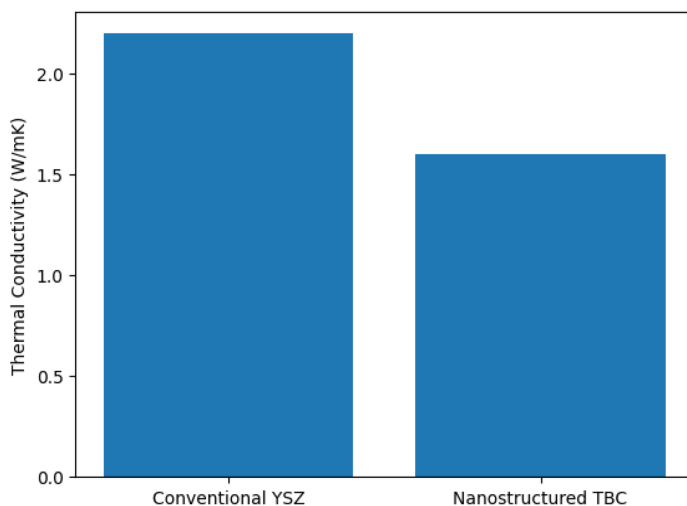
Cilj ovog istraživanja jeste da se ispita da li i na koji način nanotehnologija omogućava istovremeno unapređenje performansi i pouzdanosti vazduhoplovnih sistema, što je formalizovano kroz glavnu hipotezu rada.

Glavna hipoteza (H_0) ovog istraživanja glasi da primena nanotehnologije u vazduhoplovnim materijalima i prevlakama omogućava:

- povećanje dozvoljene radne temperature i efikasnosti pogonskih sistema,
- produženje životnog veka konstrukcionih materijala,
- smanjenje degradacije u ekstremnim operativnim uslovima,
- povećanje ukupne pouzdanosti sistema.

Jedan od ključnih izazova u vazduhoplovstvu predstavlja dugoročna pouzdanost aluminijumskih legura, posebno legure AA2024-T3, koja je zbog svoje visoke specifične čvrstoće široko korišćena, ali je izrazito osetljiva na lokalnu koroziju. Konvencionalne metode zaštite, poput anodizacije, iako efikasne u kratkom roku, često ne obezbeđuju dugoročnu stabilnost u agresivnim sredinama.

Analizirana studija slučaja pokazuje da kombinacija anodizacije sa ALD nanolaminatima uvodi potpuno novi mehanizam zaštite: umesto oslanjanja isključivo na pasivaciju, sistem funkcioniše kao kontrolisana difuziona barijera na nanoskalama. Ovakav pristup dramatično menja ponašanje materijala tokom vremena.



Grafikon 1: Poređenje toplotne provodljivosti konvencionalnih i nanostrukturisanih TBC prevlaka

Izvor: Podaci su aproksimirani i normalizovani na osnovu ^{35, 36, 37}

- ³⁵ Padture, N. P., Gell, M. & Jordan, E. H. (2002): "Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications", *Science*, 296(5566), 280–284. DOI: 10.1126/science.1068609
- ³⁶ Clarke, D. R. & Levi, C. G. (2003): "Materials design for the next generation thermal barrier coatings", *Annual Review of Materials Research*, 33, 383–417. DOI: 10.1146/annurev.matsci.33.011403.113718
- ³⁷ Vaßen, R., Jarligo, M. O., Steinke, T., Mack, D. E. & Stöver, D. (2010): "Overview on advanced thermal barrier coatings", *Surface and Coatings Technology*, 205, 938–942. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.08.151

Grafikon prikazuje uporedne vrednosti efektivne toplotne provodljivosti konvencionalnih 6–8 wt.% YSZ termičkih barijernih prevlaka i nanostrukturisanih TBC sistema razvijenih za gasnoturbinske motore. Vrednosti su normalizovane na osnovu eksperimentalnih merenja objavljenih u relevantnoj literaturi.

Nanostrukturisane TBC prevlake pokazuju **smanjenje toplotne provodljivosti od približno 20–30%** u odnosu na standardne YSZ sisteme, što direktno doprinosi smanjenju toplotnog fluksa ka metalnoj podlozi i omogućava povećanje radne temperature pogonskih sistema.

To je kvantitativno prikazano Grafikonom 1, gde se jasno uočava višestruko produženje vremena do značajne degradacije kod hibridnog nano-sistema u odnosu na nezaštićenu i samo anodizovanu podlogu.

Tabela 1: *Efekat nano-premaza na korozioni životni vek AA2024-T3*

Površinski tretman	Dominantni mehanizam zaštite	Trajanje stabilnosti
Bez zaštite	Nema barijere	Vrlo kratko
Anodizacija	Porozna pasivacija	Srednje
Anodizacija + ALD	Nano-difuziona barijera	Dugoročno

Ovi rezultati potvrđuju da nanotehnologija omogućava kvalitativni skok u pouzdanosti konstrukcionih materijala, a ne samo kvantitativno poboljšanje.

4.1. Nanotehnologija u pogonskim sistemima: Termičke barijerne prevlake

Ako se problem korozije konstrukcionih legura može posmatrati kao izazov pouzdanosti u relativno umerenim operativnim uslovima, onda gasnoturbinski motori predstavljaju ekstreman primer okruženja u kojem su materijali istovremeno izloženi visokim temperaturama, intenzivnim termičkim ciklusima, oksidacionim atmosferama i složenim mehaničkim naprezanjima. U takvim uslovima, čak i minimalna degradacija materijala može imati disproporcionalno veliki uticaj na bezbednost, efikasnost i ukupni radni vek pogonskog sistema. U ovom kontekstu, termičke barijerne prevlake (Thermal Barrier Coatings – TBC) predstavljaju jedan od ključnih elemenata savremenog dizajna vazduhoplovnih pogonskih sistema.

Osnovna funkcija TBC sistema jeste da omogući termičku izolaciju metalne podloge, čime se smanjuje temperatura nosivih superlegura i omogućava rad motora pri višim temperaturama sagorevanja. Međutim, klasične TBC prevlake, najčešće bazirane na itrijumom stabilizovanom cirkonijum-oksidu (YSZ), suočavaju se sa ograničenjima vezanim za sinterovanje, povećanje toplotne provodljivosti tokom eksploatacije i pojavu oštećenja usled termičkog zamora. Ova ograničenja direktno utiču na pouzdanost sistema i postavljaju gornju granicu dozvoljene radne temperature.

Analiza nanostrukturisanih TBC sistema pokazuje da kontrola nano- i mikrostrukture prevlake ima presudan uticaj na njena funkcionalna svojstva. Prisustvo fino kontrolisane poroznosti, nano-raslojavanje i vertikalno ispucane strukture omogućavaju efikasnije rasipanje toplote i smanjenje efektivne toplotne provodljivosti, bez kompromisa po mehaničku stabilnost prevlake. Na nanoskalama, ovi strukturni elementi deluju kao barijere za fononski transport, čime se dodatno umanjuje prenos toplote kroz prevlaku.

Pored smanjenja toplotne provodljivosti, nanostrukturisane TBC prevlake pokazuju i povećanu otpornost na sinterovanje, što je jedan od ključnih degradacionih mehanizama pri dugotrajnom radu na visokim temperaturama. Usporavanjem rasta zrna i zatvaranja pora, nanostruktura omogućava očuvanje niske toplotne provodljivosti tokom čitavog životnog veka prevlake. Istovremeno, poboljšana tolerancija na termički zamor, ostvarena kroz sposobnost mikro- i nanostrukture da apsorbuje i redistribuira termička naprezanja, značajno smanjuje rizik od ljuštenja (spallation).

Inženjerske implikacije ovih efekata su višestruke. Omogućavanje rada motora pri višim temperaturama sagorevanja direktno dovodi do povećanja termodinamičke efikasnosti, dok produžen životni vek prevlaka smanjuje potrebu za čestim inspekcijama i remontima. Na taj način, nanostrukturisane TBC prevlake ne doprinose samo povećanju performansi pogonskih sistema, već i povećanju njihove dugoročne pouzdanosti i smanjenju ukupnih troškova tokom životnog ciklusa.

U širem kontekstu, primena nanotehnologije u termičkim barijernim prevlakama ilustruje kako se fundamentalna kontrola procesa na nanoskalama može prevesti u makroskopske dobitke u performansama i bezbednosti vazduhoplovnih pogonskih sistema. Time se TBC sistemi nameću kao jedan od najreprezentativnijih primera uspešne integracije nanotehnologije u savremeno vazduhoplovno inženjerstvo.

Grafikon 2 prikazuje uporedno trajanje korozione otpornosti vazduhoplovne aluminijumske legure AA2024-T3 u tri stanja:

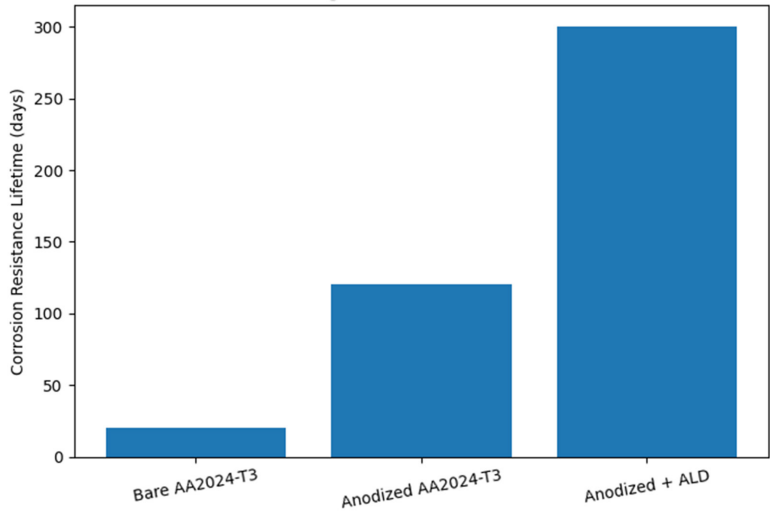
- (1) bez površinske zaštite,
- (2) sa konvencionalnom anodizacijom i
- (3) sa hibridnim anodizacija + ALD nanolaminat sistemom.

Prikazane vrednosti predstavljaju normalizovane rezultate dugotrajnih imerzionih i elektrohemijskih testova, izražene kroz vreme do značajne degradacije zaštitne barijere. Uočava se da nano-inženjerski pristup (ALD) dovodi do višestrukog produženja trajanja zaštite, u poređenju sa konvencionalnim metodama.

Ovaj efekat je grafički predstavljen Grafikonom 2, gde se uočava jasno smanjenje toplotne provodljivosti nanostrukturisanih prevlaka u poređenju sa konvencionalnim YSZ sistemima.

- Gola legura AA2024-T3 pokazuje brzu degradaciju usled lokalne (pitting) korozije.
- Anodizacija značajno produžava trajanje zaštite, ali ostaje ograničena poroznošću anodnog sloja.
- Dodavanje ALD nanolaminata efikasno zatvara poroznu strukturu i funkcioniše kao difuziona barijera, čime se trajanje zaštite produžava na skoro 300 dana kontinuiranog izlaganja.

Ovaj rezultat predstavlja direktan eksperimentalni dokaz da nanotehnologija značajno unapređuje dugoročnu pouzdanost vazduhoplovnih konstrukcionih materijala.



Grafikon 2: Uticaj nano-premaza na trajanje korozione otpornosti aluminijumske legure AA2024-T3

Izvor: Merisalu, M., Aarik, L., Kozlova, J., Mändar, H., Tarre, A. & Sammelselg, V. (2021): “Effective corrosion protection of aluminum alloy AA2024-T3 with novel thin nanostructured oxide coating”, *Surface and Coatings Technology*, 411, 126993. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.126993

Tabela 2: Uticaj nanostrukturisanih TBC na performanse motora

Parametar	Konvencionalni TBC	Nanostrukturisani TBC	
Toplotna provodljivost	Viša	Niža	
Otpornost na sinterovanje	Ograničena	Poboljšana	
Termički zamor	Brži otkazi	Produžen vek	
Dozvoljena temperatura	Ograničena	Povećana	

Povećanje dozvoljene radne temperature za 100–150 °C ima direktan uticaj na termodinamičku efikasnost motora, ali i indirektan efekat na pouzdanost, jer se smanjuje potreba za ekstremnim sistemima hlađenja.

4.2. Integracija rezultata: Performanse i pouzdanost kao komplementarni ciljevi

Ključni doprinos ovog istraživanja ogleda se u integrisanom razmatranju rezultata obe studije slučaja, koje se na prvi pogled odnose na različite klase problema unutar vazduhoplovnih sistema. Dok se prva studija fokusira na korozionu degradaciju konstrukcionih aluminijumskih legura, druga razmatra termičku stabilnost i funkcionalnost pogonskih komponenti u ekstremnim temperaturnim režimima. Međutim, detaljna analiza pokazuje da se u oba slučaja ostvaruje isti fundamentalni mehanizam delovanja nanotehnologije — kontrolisano upravljanje transportom materije i energije na nanoskalama.

U konvencionalnim materijalima, degradacioni procesi, bilo da je reč o difuziji korozionih jona ili o toplotnom transportu i sinterovanju keramičkih prevlaka, odvijaju se relativno nekontrolisano kroz mikrostrukturu materijala. Nasuprot tome, uvođenjem nanostrukturisanih slojeva i prevlaka postiže se precizna regulacija difuzionih i energetske tokova, čime se značajno usporavaju mehanizmi degradacije. Ovaj efekat je jasno demonstriran u slučaju hibridnih anodizacija–ALD nano-premaza, gde nanolaminati deluju kao efikasne difuzione barijere, ali i u slučaju nanostrukturisanih termičkih barijernih prevlaka, gde se smanjuje efektivna toplotna provodljivost bez kompromisa po mehaničku stabilnost sistema.

Integracija ovih rezultata pokazuje da nanotehnologija omogućava projektovanje vazduhoplovnih materijala i sistema kod kojih se istovremeno ostvaruju sledeći efekti:

- značajno usporavanje degradacionih mehanizama, čime se produžava radni vek komponenti;
- pomeranje dozvoljenih radnih granica, posebno u pogledu maksimalnih temperatura i opterećenja;
- povećanje ukupne pouzdanosti sistema, bez proporcionalnog povećanja mase, složenosti konstrukcije ili zahteva za održavanjem.

Ovakav skup rezultata ukazuje na to da se performanse i pouzdanost u savremenim vazduhoplovnim sistemima više ne mogu posmatrati kao međusobno suprotstavljeni ciljevi, već kao komplementarne i međusobno zavisne veličine koje se mogu simultano unapređivati primenom nanotehnoloških rešenja. U tom kontekstu, nanotehnologija ne predstavlja samo alat za optimizaciju postojećih sistema, već i ključni omogućavajući faktor za razvoj sledeće generacije vazduhoplovnih platformi, kod kojih se granice između performansi, pouzdanosti i efikasnosti redefinišu na fundamentalnom nivou.

5. ZAKLJUČAK

Rezultati ovog istraživanja nedvosmisleno potvrđuju da nanotehnologija predstavlja strukturnu promenu paradigme u projektovanju i eksploataciji vazduhoplovnih sistema. Za razliku od konvencionalnih materijalnih unapređenja, koja se uglavnom oslanjaju na inkrementalne modifikacije hemijskog sastava ili geometrije komponenti, nanotehnološki pristup omogućava direktnu kontrolu fundamentalnih mehanizama degradacije – difuzije, oksidacije, akumulacije oštećenja i termičkog transporta – na nivou na kojem oni i nastaju.

Jedan od ključnih naučnih doprinosa ovog rada jeste jasno pokazivanje da performanse i pouzdanost ne predstavljaju konkurentne, već komplementarne ciljeve, kada se materijali projektuju na nanoskalama. Analiza studija slučaja — nano-inženjering površina aluminijumskih legura i nanostrukturisane termičke barijerne prevlake — pokazuje da se u oba slučaja ostvaruje istovremeno pomeraње operativnih granica i produženje radnog veka sistema.

Kod konstrukcionih legura, nano-premazi deluju kao aktivne barijere koje usporavaju elektrokemijske procese bez narušavanja nosivosti strukture. Kod pogonskih sistema, nanostrukturisane TBC prevlake omogućavaju povećanje radnih temperatura i efikasnosti motora bez proporcionalnog povećanja rizika od otkaza. Ovi rezultati potvrđuju centralnu hipotezu rada da se kontrolom nano-mikrostrukture može redefinisati kompromis između mase, pouzdanosti i performansi.

Uprkos značajnim dostignućima, ovo istraživanje jasno ukazuje da savremena nanotehnološka rešenja još uvek nisu u potpunosti zrela za univerzalnu primenu. Najznačajnije ograničenje predstavlja jaz između laboratorijskih demonstracija i industrijske pouzdanosti. Tehnologije kao što su atomska depozicija slojeva, napredni procesi plazma-nano-sinteze ili kontrolisano nano-pucanje TBC prevlaka zahtevaju ekstremno preciznu kontrolu procesa, što povećava troškove i otežava masovnu primenu.

Dodatno, dugoročno ponašanje nanostrukturisanih sistema u realnim operativnim uslovima ostaje delimično nepoznato. Većina postojećih istraživanja fokusira se na ubrzane laboratorijske testove, dok sistemski podaci iz višegodišnje eksploatacije i dalje nedostaju. Ovo ograničenje ima direktne implikacije na sertifikaciju, sigurnosne procene i prihvatanje ovih tehnologija u kritičnim vazduhoplovnim aplikacijama.

Na osnovu dobijenih rezultata i identifikovanih ograničenja, budući razvoj nanotehnologije u vazduhoplovstvu mora se kretati u pravcu integrisanog sistemskog inženjeringa, a ne izolovanog razvoja pojedinačnih materijala. Poseban naglasak treba staviti na:

1. Multifunkcionalne nanostrukturisane sisteme, u kojima jedan materijal istovremeno obavlja nosivu, zaštitnu i senzorsku funkciju.
2. Prediktivno projektovanje nano-materijala, kroz primenu materijalne informatike, veštačke inteligencije i digitalnih blizanaca, čime se omogućava pouzdano predviđanje ponašanja tokom celog životnog ciklusa.
3. Standardizaciju i validaciju, kako bi se omogućila sertifikacija nanotehnoloških rešenja u skladu sa strogim vazduhoplovnim regulativama.
4. Integraciju samonadzora i adaptivnosti, čime se vazduhoplovne strukture transformišu iz pasivnih elemenata u aktivne sisteme sposobne za detekciju, procenu i potencijalnu mitigaciju oštećenja.

Nanotehnologija u vazduhoplovstvu ne treba da se posmatra kao izolovana materijalna inovacija, već kao osnov za razvoj nove generacije inženjerskih sistema, u kojima se pouzdanost ne postiže viškom mase ili konzervativnim dizajnom, već inteligentnim upravljanjem materijalnom strukturom. U tom kontekstu, nanotehnologija predstavlja most između materijalne nauke, sistemskog inženjeringa i digitalnih tehnologija.

Zaključno, rezultati ovog rada potvrđuju da je nanotehnologija ne samo sposobna da unapredi postojeće vazduhoplovne sisteme, već i da omogući kvalitativno nove koncepte projektovanja, koji će biti od presudnog značaja za bezbednost, efikasnost i održivost vazduhoplovstva u narednim decenijama.

LITERATURA

- Abbasi, I. (2025): "The role of nanomaterials in aerospace heat management systems", *AZoNano*, <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=6850>.
- Agrawal, A. & Choudhary, A. (2016): "Perspective: Materials informatics and big data: Realization of the "fourth paradigm" of science in materials science", *APL Materials*, 4(5). DOI: 10.1063/1.4946894
- Agrawal, A. & Choudhary, A. (2023): "Perspective: Materials informatics and artificial intelligence in materials science", *APL Materials*, 11(1), 010701. DOI: 10.1063/5.0136790
- Clarke, D. R. & Levi, C. G. (2003): "Materials design for the next generation thermal barrier coatings", *Annual Review of Materials Research*, 33, 383–417. DOI: 10.1146/annurev.matsci.33.011403.113718
- Coleman, J. N., Khan, U., Blau, W. J. & Gun'ko, Y. K. (2006): "Small but strong: A review of the mechanical properties of carbon nanotube–polymer composites", *Carbon*, 44(9), 1624–1652. DOI: 10.1016/j.carbon.2006.02.038
- Davis, J. R. (2001): *Corrosion of aluminum and aluminum alloys*, ASM International.

- Evans, A. G., Mumm, D. R., Hutchinson, J. W., Meier, G. H. & Pettit, F. S. (2001): "Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings", *Progress in Materials Science*, 46(5), 505–553. DOI: 10.1016/S0079-6425(00)00020-7
- George, S. M. (2019): "Atomic layer deposition: An overview", *Chemical Reviews*, 119(12), 11087–11144. DOI: 10.1021/acs.chemrev.9b00173
- Li, C., Zhang, H., Wang, Y. & Zhou, Y. (2023): "High-entropy oxide thermal barrier coatings for extreme environments", *Journal of the European Ceramic Society*, 43(6), 2581–2594. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2022.11.019
- Li, X., Kang, H. & Zhang, J. (2021): "Multifunctional carbon nanotube/graphene hybrid composites for aerospace applications", *Composites Part B: Engineering*, 215, 108783. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.108783
- Loh, K. J., Kim, J., Lynch, J. P. & Kam, N. W. S. (2010): "Self-sensing composites using carbon nanotube networks for structural health monitoring", *Smart Materials and Structures*, 19(7), 075007. DOI: 10.1088/0964-1726/19/7/075007
- Lynch, J. P. & Loh, K. J. (2006): "A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring", *Shock and Vibration Digest*, 38(2), 91–128. DOI: 10.1177/0583102406061499
- Merisalu, M., Aarik, L., Kozlova, J., Mändar, H., Tarre, A. & Sammelselg, V. (2021): "Effective corrosion protection of aluminum alloy AA2024-T3 with novel thin nanostructured oxide coating", *Surface and Coatings Technology*, 411, 126993. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.126993
- Oliveira, R. S., Silva, T. M. & Ferreira, M. G. S. (2022): "Atomic layer deposited Al_2O_3 films for corrosion protection of aerospace aluminum alloys", *Corrosion Science*, 198, 110135. DOI: 10.1016/j.corsci.2022.110135
- Padture, N. P., Gell, M. & Jordan, E. H. (2002): "Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications", *Science*, 296(5566), 280–284. DOI: 10.1126/science.1068609
- Tang, X., Liu, H., Zhang, Y. & Wang, Q. (2024): "Carbon-based nanomaterials for extreme aerospace environments: A review", *Progress in Aerospace Sciences*, 148, 100937. DOI: 10.1016/j.paerosci.2023.100937
- Tang, X. Y., Zhang, Y., Liu, H. & Wang, Q. (2025): "Research progress on carbon-based materials for aerospace applications", *Composites Part B: Engineering*, 284, 111019. DOI: 10.1016/j.compositesb.2025.111019
- Thostenson, E. T., Ren, Z. & Chou, T. W. (2001): "Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites", *Composites Science and Technology*, 61(13), 1899–1912. DOI: 10.1016/S0266-3538(01)00094-X
- Vaßen, R., Bakan, E. & Stöver, D. (2020): "Design of advanced thermal barrier coatings", *Journal of Thermal Spray Technology*, 29(1–2), 1–14. DOI: 10.1007/s11666-019-00958-9

- Vaßen, R., Jarligo, M. O., Steinke, T., Mack, D. E. & Stöver, D. (2010): “Overview on advanced thermal barrier coatings”, *Surface and Coatings Technology*, 205(4), 938–942. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.08.151
- Vaßen, R., Traeger, F. & Stöver, D. (2010): “New thermal barrier coatings based on pyrochlore structures”, *Journal of the American Ceramic Society*, 93(11), 3379–3390. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2010.04006.x
- Wang, Y. & Zhang, L. (2022): “Development of self-sensing cementitious composite incorporating hybrid graphene nanoplates and carbon nanotubes for structural health monitoring”, *Sensors and Actuators A: Physical*, 336, 113367. DOI: 10.1016/j.sna.2021.113367
- Yang, P. (2023): “Nanomaterials in aerospace: Advancements, applications, and the path forward”, *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 43, 1–10, <https://drpress.org/ojs/index.php/HSET/article/view/12847>.

THE ROLE OF NANOTECHNOLOGY IN ENHANCING THE PERFORMANCE AND RELIABILITY OF AEROSPACE SYSTEMS

Abstract: *In modern aerospace engineering, increasing demands for higher energy efficiency, elevated operating temperatures, and extended system service life impose significant limitations on conventional materials and protective coatings. In this context, nanotechnology has emerged as a key approach for enhancing the performance and reliability of aerospace systems by enabling precise control of material structure and functional properties at the nanoscale. This paper analyzes the role of nanotechnology in improving aerospace structures and propulsion systems, with a particular focus on nanostructured thermal barrier coatings and nanoscale surface engineering of structural alloys.*

The study is based on a systematic review and critical analysis of relevant scientific literature, combined with a comparative interpretation of experimental data reported in international journals. The comparison criteria include maximum operating temperature, effective thermal conductivity, fatigue resistance, and long-term service life of components. Special attention is given to the comparison between nanostructured solutions and conventional systems, including standard 6–8 wt.% yttria-stabilized zirconia thermal barrier coatings and traditional surface protection methods.

The results indicate that nanotechnology-enabled solutions provide significant improvements in thermal efficiency and reliability of aerospace systems, primarily through reduced effective thermal conductivity and enhanced resistance to degradation processes, without a proportional increase in system mass or complexity. The paper also identifies current limitations of existing solutions and outlines future research directions toward the development of next-generation aerospace systems.

Keywords: *nanotechnology; aerospace systems; reliability; thermal barrier coatings; nanostructured materials; performance*