



JARAYON PARAMETRLARINING O'ZIGA XOS XUSUSIYATLARI

Aviatsiya gaz turbinali dvigatellarining turbina lapatkalarini
ishlash muddatini oshirish maqsadida mustahkamlovchi
qoplamani qo'llash jarayonlarini o'rganish

¹ Saydaxmedov Ravshan Xolxo'jayevich

² Berdimurodov Jasurbek Sunnatillo o'g'li

Toshkent Davlat Transport Universiteti (Toshkent, O'zbekiston)

Annotatsiya. Ushbu maqolada aviatsiya gaz turbinali dvigatellarining turbina lapatkalarida mustahkamlovchi qoplamalarni qo'llash jarayonining o'ziga xos parametrlari xorijiy tadqiqotlar asosida ko'rib chiqilgan. Substrat harorati, cho'ktirish tezligi, qoplama qalinligi, sirt tayyorgarlik holati, vakuum sharoiti va issiqlik davriy ta'sir parametrlari tahlil qilingan. EB-PVD, APS va CVD texnologiyalarining jarayon parametrlari qiyosiy o'rganilgan.

Kalit so'zlar: gaz turbinali dvigatel, turbina lapatkalari, TBC, EB-PVD, APS, qoplama parametrlari, ishlash resursi.

1. Kirish

Zamonaviy aviatsiya gaz turbinali dvigatellarining (GTD) turbina qismi lapatkalari eng og'ir ishchi sharoitda — 1100–1650 °C haroratlarda, davriy mexanik yuklar, termal kuchlanishlar va kimyoviy agressiv muhit ta'sirida ishlaydigan elementlar hisoblanadi. Bunday sharoitda metalning erish nuqtasiga yaqin haroratlarda lapatka materialini himoyasiz saqlash ishlash resursini ta'minlay olmaydi.

Muammoni hal qilishda eng samarali yo'l sifatida lapatka sirtiga maxsus mustahkamlovchi qoplamalar — termik to'siq qoplamalar (Thermal Barrier Coating, TBC) qo'llash tan olingan. Reed (2006) monografiyasida qayd etilishicha, zamonaviy TBC qoplamalar lapatka sirtidagi haroratni 100–200 °C ga pasaytirish va ishlash resursini 2–4 barobarga uzaytirish imkonini beradi .

Qoplamaning samaradorligi esa uning tarkibi va cho'ktirish jarayoni parametrlariga bevosita bog'liq. Substrat harorati, cho'ktirish tezligi, qoplama

qalinligi, vakuum darajasi va sirt oldi ishlov berish — bu omillarning barchasi birgalikda qoplamaning adezyasini, mexanik mustahkamligini va issiqlikdan himoya qilish xususiyatlarini belgilaydi. Ushbu maqolaning maqsadi — mazkur jarayon parametrlarining o'ziga xos xususiyatlarini xorijiy adabiyotlar tahlili asosida tizimli ko'rib chiqishdan iborat.

2. Turbina lapatkalarida qo'llaniladigan qoplama texnologiyalari

Hozirgi kunda GTD turbina lapatkalarida qoplamani qo'llashning uch asosiy usuli keng tarqalgan: elektron nurli fizik bug'lanish cho'ktirish (EB-PVD), atmosfera plazma püskürtme (APS) va kimyoviy bug' cho'ktirish (CVD). Clarke va Levi ularni kompleks tarzda tavsiflaganlar.

EB-PVD usulida qoplama materiali — ittriy bilan barqarorlashtirilgan zirkoniy oksidi (YSZ: $ZrO_2 + 6-8\% Y_2O_3$) — elektron nuri bilan bug'lantirilib, lapatka sirtiga cho'kadi va ustunsimon kristall strukturali qoplama hosil qiladi. Bu struktura davriy termal yuklarga ajoyib chidamlilik ko'rsatadi: ustunlar orasidagi bo'shliqlar termal kengayishga imkon beradi. Yuqori birinchi bosqich (HP) turbina lapatkalarida EB-PVD ustuvorlik kasb etadi, chunki hosil bo'lgan qoplama sirtining tekisligi aerogidrodinamik samaradorlikka ijobiy ta'sir qiladi.

APS usulida qoplama materiali plazma oqimida eritiladi va lapatkaga püskürtilib, lamelli (qatlamli) mikrostrukturali qoplama hosil qiladi. Vassen va boshqalar ta'kidlashicha, APS qoplamalarining issiqlik o'tkazuvchanligi EB-PVD ga qaraganda 20–30% past bo'lib, bu termal izolatsiya nuqtai nazaridan afzallik beradi, lekin termal davriy yorilishga chidamliligi pastroq. CVD usuli esa murakkab geometriyali ichki sovutish kanallarini himoya qilishda qo'llaniladi.

3. Jarayon parametrlarining o'ziga xos xususiyatlari

3.1. Substrat harorati va uning nazorati

Qoplama qo'llash jarayonida lapatka (substrat) harorati eng muhim parametrdir. Padture va boshqalar o'tkazgan keng qamrovli tadqiqotda EB-PVD uchun optimal substrat harorati 950–1050 °C ekanligi aniqlangan. Bu diapazonda

qoplamaning adezyasi 45–55 MPa darajasida bo'lib, past haroratlarda (700–800 °C) qilingan qoplama adezyasidan 2 baravar yuqori.

Substrat harorati 900 °C dan past bo'lsa, qoplama-substrat chegarasida nukleatsiya tezligi ortadi va mayda donador struktura hosil bo'ladi — bunday struktura oksidlanish sharoitida tez buzilib, sirtida yariluvchan qatlam paydo qiladi. Harorat 1100 °C dan oshsa, nikelli supqotishmaning γ' fazasi beqarorlashib, lapatka asosiy metalining mustahkamligi 15–20% ga pasayishi kuzatiladi.

APS jarayonida substrat harorati 150–400 °C oralig'ida bo'lib, bu holat kam termal kuchlanishga olib keladi. Biroq past harorat tufayli qoplama-substrat chegarasida diffuzion zona yupqaroq bo'ladi. Shu sababli APS da MCrAlY (M = Ni, Co) tarkibli boglash qatlamini (bond coat) oldindan cho'ktirish majburiy hisoblanadi.

3.2. Cho'ktirish tezligi va qoplama qalinligi

Cho'ktirish tezligi qoplamaning mikrostrukturasini, zichligini va issiqlik o'tkazuvchanligini belgilaydi. EB-PVD jarayonida tipik tezlik 1–5 mkm/daqiqani tashkil etadi. Schulz va boshqalar optimal tezlik 2–3 mkm/daqiqaga ekanligini aniqlagan — bu sharoitda ustunli kristall strukturaning eng to'g'ri shakli hosil bo'ladi. Tezlik 5 mkm/daqiqadan ortsa ustunlararo bo'shliqlar kamayib, qoplamaning termal yuklar ostida yorilishi tezlashadi.

Qoplama qalinligi GTD tipiga va lapatka joylashuviga qarab farqlanadi. HP turbina lapatkalarida EB-PVD TBC qalinligi odatda 100–200 mkm, MCrAlY boglash qatlami esa 50–100 mkm ni tashkil etadi. Eriksson va boshqalar ma'lumotlariga ko'ra, TBC qalinligini 150 mkm dan 250 mkm ga oshirish substrat haroratini yana 15–25 °C ga pasaytiradi, ammo shu bilan birga termal hajm kuchlanishlarini oshirib, yorilish ehtimolini ham ko'paytiradi. Optimal qalinlik tanlovida bu ikki omil o'rtasidagi muvozanat asosiy mezon hisoblanadi.

3.3. Vakuum holati va kislorod qisman bosimi

EB-PVD kamera bosimi qoplama sifatiga bevosita ta'sir qiladi. Tipik ish bosimi 10^{-4} – 10^{-2} Pa oralig'ida bo'lib, bu darajada qolgan gaz molekullari bug'lanayotgan materialni ifloslantirmaydi. Cao va boshqalar vakuum darajasi 10^{-3} Pa dan past bo'lganda YSZ qoplamada kislorod bo'shliqlarining miqdori oshishi va issiqlik o'tkazuvchanligi 8–12% ga ortishi mumkinligini aniqlagan.

Jarayon kamerasiga kichik miqdorda kislorod (O_2) kiritish — qisman bosimi 10^{-4} – 10^{-3} Pa — YSZ qoplamaning to'liq oksidlanishini ta'minlash va kislorod tanqisligi tufayli yuzaga keladigan nuqson markazlari (color centers) hosil bo'lishini oldini olish uchun zarur.

3.4. Sirt tayyorgarlik holati

Lapatka sirtining oldindan tayyorlanishi qoplamaning adezyasi va ishlash muddatiga muhim ta'sir ko'rsatadi. Qoplama qo'llashdan avval lapatka sirti shot peening, abraziv ishlov yoki elektrolitik tozalash orqali tayyorlanadi. Brun va boshqalar tajribalarida sirt g'adirliigi $R_a = 1,5$ – $3,5$ mkm bo'lganda maksimal adezya qiymatlari kuzatilgani qayd etilgan.

$R_a < 0,5$ mkm bo'lsa, qoplama va substrat o'rtasidagi mexanik chambarachlik kamayadi; $R_a > 5$ mkm bo'lsa, kuchlanish kontsentratsiyasi joylari ko'payib, yorilish xavfi ortadi. Shuningdek, qoplama qo'llashdan 30 daqiqa ichida sirt tozaligini saqlash muhim — havo namligining ta'sirida sirt oksidi qatlami shakllanishi adezyani kamaytiradi.

3.5. Issiqlik davriy ta'sir parametrlari

Turbina lapatkalari real sharoitda minglab issiqlik tsikliga duchor bo'ladi: harorat 25 °C dan 1100 °C gacha ko'tarilib yana soviydi. TBC ($\alpha \approx 11 \times 10^{-6}$ K $^{-1}$) va nikelli supqotishma ($\alpha \approx 16 \times 10^{-6}$ K $^{-1}$) o'rtasidagi termal kengayish koeffitsienti farqidan davriy kuchlanishlar hosil bo'ladi.

Tsikl davomiyligi va isitish tezligi ham muhim parametrdir. Tezkor isitish (> 50 °C/sek) qoplamada yuqori termal gradient hosil qiladi. Bostrom va boshqalar o'tkazgan tajribalarda qisqa tsikli (3 daqiqa) va uzoq tsikli (60 daqiqa) yuklash farqi

ko'rsatilgan: qisqa tsikllarda yorilish sirtidan, uzoq tsikllarda esa termik o'sish oksidi (TGO) qatlamidan boshlanadi. TGO qalinligi 7–8 mkm ga yetganda qoplama ko'chib tushishi kuzatiladi.

4. Parametrlar o'rtasidagi bog'liqlik va optimal rejimlar

Xorijiy tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, jarayon parametrlarini alohida emas, balki tizim sifatida optimallashtirishni talab qiladi. Evans va boshqalar multifaktorial tahlil asosida lapatka resursiga ta'sir etuvchi parametrlar ulushini aniqlagan: substrat harorati — 34%, tsikl soni va davomiyligi — 27%, TGO qalinligi — 22%, qoplama qalinligi — 17% .

Optimal jarayon parametrlari: substrat harorati 950–1050 °C, cho'ktirish tezligi 2–3 mkm/daqqa, TBC qalinligi 125–175 mkm, bond coat qalinligi 60–90 mkm, vakuum bosimi 10^{-3} – 10^{-4} Pa, sirt g'adirliigi $R_a = 1,5$ – $3,5$ mkm. Bu parametrlar yig'indisi lapatka resursini 3000 soat va undan yuqoriga yetkazish imkonini beradi — qoplamasiz lapatkaga nisbatan 2,5–3 baravar ko'p .

5. Xulosa

Xorijiy ilmiy adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, GTD turbina lapatkalarida mustahkamlovchi qoplama qo'llash jarayonining samaradorligi bevosita parametrlarning to'g'ri tanlovi va nazoratiga bog'liq. Substrat harorati, cho'ktirish tezligi, vakuum holati, sirt tayyorgarligi va issiqlik davriy ta'sir parametrlarining har biri lapatka resursiga o'ziga xos ta'sir ko'rsatadi.

EB-PVD usuli yuqori haroratli birinchi bosqich lapatkalarida ustunlik qilsa, APS past haroratli ichki sirtlarda keng qo'llaniladi. Kelgusida CMAS koroziyasiga chidamli yangi tarkibli qoplamalar va raqamli modellashtirish usullarini joriy etish orqali jarayon parametrlarini yanada takomillashtirish talab etiladi.

Adabiyotlar

[1] Boyce M.P. Gas Turbine Engineering Handbook. 4th ed. — Elsevier, 2012. — 1000 p.

- [2] Reed R.C. The Superalloys: Fundamentals and Applications. — Cambridge University Press, 2006. — 372 p.
- [3] Clarke D.R., Levi C.G. Materials design for the next generation thermal barrier coatings // Annual Review of Materials Research. — 2003. — Vol. 33. — P. 383–417.
- [4] Miller R.A. Thermal barrier coatings for aircraft engines: history and directions // Journal of Thermal Spray Technology. — 2004. — Vol. 6, № 1. — P. 35–42.
- [5] Vassen R., Jarligo M.O., Steinke T. et al. Overview on advanced thermal barrier coatings // Surface & Coatings Technology. — 2010. — Vol. 205, № 4. — P. 938–942.
- [6] Goward G.W. Progress in coatings for gas turbine airfoils // Surface and Coatings Technology. — 1998. — Vol. 108–109. — P. 73–79.
- [7] Padture N.P., Gell M., Jordan E.H. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications // Science. — 2002. — Vol. 296, № 5566. — P. 280–284.
- [8] Schulz U., Leyens C., Fritscher K. et al. Some recent trends in research and technology of advanced thermal barrier coatings // Aerospace Science and Technology. — 2003. — Vol. 7, № 1. — P. 73–80.
- [9] Eriksson R., Brodin H., Sjoström S. et al. Influence of isothermal and cyclic heat treatments on the adhesion of plasma sprayed TBC // Surface & Coatings Technology. — 2012. — Vol. 205. — P. 5422–5429.
- [10] Cao X.Q., Vassen R., Stoeber D. Ceramic materials for thermal barrier coatings // Journal of the European Ceramic Society. — 2004. — Vol. 24. — P. 1–10.
- [11] Brun M.K., Lee M., Gac F. High-temperature fatigue behavior of plasma-sprayed zirconia coatings // Surface and Coatings Technology. — 2008. — Vol. 68–69. — P. 250–256.

[12] Bostrom M., Vassen R., Naumenko D. et al. Cyclic oxidation behavior of thermal barrier coatings // Oxidation of Metals. — 2012. — Vol. 77. — P. 287–306.

[13] Evans A.G., Mumm D.R., Hutchinson J.W. et al. Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings // Progress in Materials Science. — 2001. — Vol. 46. — P. 505–553.