

**YUQORI HARORATGA CHIDAMLI MATERIALLAR:
SUPERQOTISHMALAR TARKIBI, XOSSALARI VA GAZ
TURBINALARIDA QO‘LLANILISHI**

Ahmadova Shahrizoda G‘olib qizi

“TIQXMMI” Milliy tadqiqot universiteti talabasi

[*ahmadovashahrizoda8@gmail.com*](mailto:ahmadovashahrizoda8@gmail.com)

Abduraxmonova Shoxidaxon Abduqodirovna

“TIQXMMI” Milliy tadqiqot universiteti assistenti

[*abdurahmonovashohida3@gmail.com*](mailto:abdurahmonovashohida3@gmail.com)

Annotasiya: Ushbu maqolada yuqori haroratga chidamli materiallar - xususan nikel va kobalt asosidagi superqotishmalar - tarkibi, mexanik xossalari va termik barqarorligi nuqtai nazaridan qiyosiy tahlil qilinadi. Gaz turbinalarida qo‘llaniladigan qotishmalarning ishlash chegaralari, qoplama texnologiyalari va kristallografik tuzilishning yuksak ishlash haroratlaridagi o‘rni ko‘rib chiqiladi. Maqola zamonaviy energetika va aviatsiya sanoatida ushbu materiallarning dolzarbligi, shuningdek termik barqarorlikni oshirishning istiqbolli yo‘nalishlarini yoritadi.

Kalit so‘zlar: superqotishmalar, yuqori harorat, termik barqarorlik, gaz turbinasi, nikel asosidagi qotishmalar, kobalt asosidagi qotishmalar, issiqlikka chidamli materiallar.

Kirish: Zamonaviy energetika, aviatsiya va kosmik sanoatning jadal rivojlanishi yuqori haroratga chidamli materiallarga bo‘lgan talabni keskin oshirib yubordi. Gaz turbina dvigatellarida ishchi temperatura 1400-1600°C gacha yetishi, natijada konstruktiv materiallar nafaqat yuqori mexanik zo‘riqlashlarga, balki intensiv oksidlanish, korroziya va termik charchoqqa ham dosh berishga majbur bo‘ladi.

Yuqori haroratga chidamli materiallar - superqotishmalar (superalloys) deb nom olgan ushbu material sinfi - XX asrning o‘rtalarida harbiy aviatsiya ehtiyojlari uchun ishlab chiqila boshlangan. Bugungi kunda ular nafaqat samolyot dvigatellarida, balki sanoat gaz turbinalarida, yadro reaktorlarida va kimyoviy reaktorlarda ham keng qo‘llaniladi.

Dunyo bozorida superqotishmalar segmenti yiliga 10 milliard dollardan ortiq hajmni tashkil etadi va bu ko'rsatkich doimiy o'sish tendensiyasini saqlaymoqda.

Ushbu maqolaning maqsadi nikel asosidagi va kobalt asosidagi superqotishmalarni qiyosiy tahlil qilish, ularning tarkibiy-xossa munosabatlarini ochib berish va gaz turbinalarida samarali qo'llash yo'llarini ko'rib chiqishdan iborat.

Yuqori haroratga chidamli metal materiallari uch asosiy guruhga bo'linadi: nikel asosidagi superqotishmalar, kobalt asosidagi superqotishmalar va temir-nikel asosidagi superqotishmalar. Ushbu tasnif nafaqat kimyoviy tarkib, balki mikrotuzilish va qo'llanilish sohasi bilan ham bog'liq.

Nikel asosidagi superqotishmalar (Ni-based superalloys) zamonaviy aviatsiya va energetika sanoatida eng keng tarqalgan yuqori haroratli materiallar hisoblanadi. Ularning asosiy qotishma elementlari quyidagilar:

- Xrom (Cr, 10-20%): oksidlanishga va issiq korroziyaga chidamlilikni ta'minlaydi
- Alyuminiy (Al, 1-6%) va Titan (Ti, 1-5%): gamma-shtrix (γ') fazasini shakllantiradi
- Volfram (W), Molibden (Mo), Rheniy (Re): qattiq eritmani mustahkamlaydi
- Kobalt (Co, 5-15%): yuqori haroratdagi mustahkamlikni oshiradi

Nikel asosidagi superqotishmalarning asosiy mustahkamlovchi mexanizmi kogerent gamma-shtrix (γ' - Ni_3Al) fazasining gamma (γ) matritsaga cho'kmasi hisoblanadi. Bu nanostrukturli dispersion mustahkamlash 1100-1150°C gacha bo'lgan haroratlarda yuqori mexanik xossalarni ta'minlaydi. Mashhur vakillar: IN-738, CMSX-4, Rene N5, MAR-M247.

Superqotishmalarning oziga xosligi tekshiruv ikki fazali mikrostrukturasidadir:

1. γ

2. (γ' -faza ($\text{Ni}_3(\text{Al},\text{Ti})$))

Muammoli holat: Harorat 1000°C dan oshganda, (γ') Kobalt asosidagi superqotishmalar: Kobalt asosidagi superqotishmalar nikel qotishmalariga nisbatan past mustahkamlikka ega bo'lsa-da, bir qator muhim afzalliklarga ega: yuqori erish nuqtasi (1490-1500°C), issiq korroziyaga va oksidlanishga yuqori chidamlilik, hamda termal charchoqqa yaxshi qarshilik. Asosiy qotishma elementlari: Cr (20-30%), W (5-15%), Ni (10-20%), C (0.1-0.6%). Karbon karbidlar (M_6C va M_{23}C_6)

hosil qilib, don chegaralarini mustahkamlaydi. Mashhur vakillari: Haynes 188, FSX-414, Mar-M509.

Materiallar va uslublari. Quyidagi jadvalda ikki asosiy superqotishma turining asosiy xossalari taqqoslanadi(1-jadval).

1-Jadval

Superqotishmalarning asosiy xossalari taqqoslash jadvali

Xossa	Ni-asosidagi	Co-asosidagi	Fe-Ni asosidagi
Erish nuqtasi (°C)	1300 - 1400	1490 - 1500	1370 - 1430
Max. ish harorati (°C)	1150 - 1200	1000 - 1100	800 - 900
Zichlik (g/cm ³)	8.0 - 9.0	8.5 - 9.5	7.9 - 8.4
Mustahkamlash mexanizmi	γ' dispersion	Karbid + qattiq eritma	γ' + γ'' dispersion
Oksidlanishga chidamlilik	A'lo (Al ₂ O ₃ qatlam)	Yaxshi (Cr ₂ O ₃)	O'rtacha
Soha	Turbina qanoti, disk	Yonish kamerasi	Turbina disk

Gaz turbinasi dvigateli zamonaviy sanoatning eng murakkab va eng yuqori haroratli tizimlaridan biridir. Turbina qanoti (blade) harorat 1500-1600°C gacha yetadigan yonish mahsulotlari bilan to'g'ridan-to'g'ri aloqa qiladi - bu nikel asosidagi qotishmalarning erish nuqtasidan ham yuqori temperatura.

Turbina qanotlari: Turbina qanotlari gaz turbinadagi eng muhim va eng yuqori yuklamali element hisoblanadi. Ular bir vaqtda quyidagi ta'sirlarga dosh berishi kerak: 1500°C dan ortiq gaz harorati; markazdan qochma kuch natijasida 150-200 MPa tortilish kuchlari; termik charchoq (isitish/sovitish sikllari); oksidlanish va korroziya.

Ushbu talablarga javob berish uchun zamonaviy turbina qanotlarida bir nechta texnologik yondashuv birgalikda qo'llaniladi. Birinchidan, yo'naltirilgan

kristallizatsiya va bitta kristall texnologiyalari qo'llaniladi. DS qanotlarda don chegaralari yuklamaga parallel yo'naltiriladi, bu esa oquvchanlik xarakteristikalarini 30-40% yaxshilaydi. SC qanotlarda esa don chegaralari butunlay yo'q qilinadi - natijada yuqori haroratda mustahkamlik maksimal darajaga yetadi. CMSX-4 va Rene N5 kabi ikkinchi avlod SC qotishmalariga (Re, 3%) qo'shish oquvchanlikni yana 2 baravar uzaytirdi.

Ikkinchidan, plyonkali sovitish texnologiyasi qo'llaniladi. Qanotlar ichida mikrokanallar orqali siqilgan havo siqdirilib, metallning haqiqiy harorati 200-300°C gacha pasaytiriladi. Bugungi kunda qanotga kiradigan havo massasining 20-30% sovitishga sarflanadi.

Termik to'siq qoplamalar (TBC) turbina qanotlari uchun muhim texnologiya bo'lib, metallning ish haroratini 100-200°C pasaytiradi yoki dvigateldagi ish haroratini oshirish imkonini beradi. Standart TBC tizimi ikki qatlamdan iborat: bog'lovchi qoplamasi (Bond Coat) va keramik qoplamasi (Ceramic Top Coat). Bog'lovchi qoplamasi MCrAlY (M=Ni, Co yoki ularning aralashmasi) qotishmasidan iborat bo'lib, 50-150 mkm qalinlikda, 950°C gacha oksidlanish muhitida mustahkam Al₂O₃ qatlamini hosil qiladi.

Kimyoviy tarkibni optimallashtirish: Termik barqarorlikni oshirishning eng asosiy yo'li qotishma tarkibini maqbullashtirish hisoblanadi. Rheniy (Re) qo'shish yuqori harorat oquvchanlik xarakteristikasini sezilarli yaxshilaydi - u γ/γ' chegara energiyasini oshiradi va diffuziya tezligini kamaytiradi. Rutheniy (Ru) to'rtinchi avlod SC qotishmalarida topologik yopiq faza (TCP - Topologically Close-Packed Phase) hosil bo'lishini kamaytiradi. Hafniy (Hf) don chegaralarini mustahkamlaydi va oksid qatlamining yopishqoqligini oshiradi. Bor (B) va Sirkoniy (Zr) miqdori 0.01-0.1% don chegaralari mustahkamligini yaxshilaydi.

Mikrotuzilishni boshqarish-Gamma-shtrix (γ') zarrachalarining o'lchami va shakli yuqori harorat xossalriga bevosita ta'sir ko'rsatadi. Optimal γ' zarracha o'lchami 0.3-0.5 mkm bo'lib, kubik shakl eng yuqori chidamlilikni ta'minlaydi. Issiqlik qayta ishlash rejimi (solution treatment va aging) γ' zarrachalarini maqbul holga keltirish uchun aniq nazorat qilinishi lozim. Yaxlitlanish (rafting) deb atalgan hodisa - γ' zarrachalarining yuqori harorat va kuchlanish ta'sirida uzayib ketishi - oquvchanlik xarakteristikasini yomonlashtiradi.

Natija va ularning tahlili: Yuqori entropiyali qotishmalar (High Entropy Alloys - HEA) so‘nggi yillarda intensiv tadqiqot ob‘ektiga aylandi. Besh va undan ortiq asosiy elementdan iborat MoNbTaWCr kabi qotishmalar 1300°C gacha yuqori mustahkamlikni saqlab qoladi. Shlam metallurgiyasi (Ceramic Matrix Composites - CMC): SiC tolasi bilan mustahkamlangan SiC matritsa 2400°C gacha ishlash qobiliyatiga ega va metallardan 4 baravar engil. Havо portlovchi Boeing 787 va GE9X dvigatellari allaqachon CMC turbina qismlarini qo‘llayapti.

Aditivli ishlab chiqarish (3D printing) texnologiyasi murakkab sovitish kanallarini to‘g‘ridan-to‘g‘ri quyish imkonini beradi. Selektiv lazer eritish (SLM) orqali tayyorlangan IN718 qanotlari an‘anaviy yo‘l bilan tayyorlanganlardan past bo‘lmaganligi isbotlangan.

Xulosa: O‘tkazilgan qiyosiy tahlil asosida quyidagi xulosalar chiqarish mumkin:

- Nikel asosidagi superqotishmalar, xususan birinchi-to‘rtinchi avlod bitta kristall qotishmalar, hozirgi vaqtda turbina qanotlari uchun optimal materiallar hisoblanadi. Ularda γ' fazasi dispersiyasi, sovitish texnologiyasi va TBC yoritadi kompleksida qo‘llanilishi harorat-kuchlanish imkoniyatlarini maksimal darajada ro‘yobga chiqaradi.

- Kobalt asosidagi superqotishmalar issiq korroziyaga yuqori chidamliligi tufayli yonish kamerasi, soplolar va statsionar gaz turbinalarining bir qator komponentlari uchun mos keladi. Ularning past hajmiy mustahkamligi muammosini karbidlarni optimallashtirish orqali qisman hal etish mumkin.

- Istiqbolda keramik-matritsa kompozitlar (CMC) va yuqori entropiyali qotishmalar (HEA) aviatsiya va energetika dvigatellarining keyingi avlodlarida superqotishmalar o‘rnini bosishi kutilmoqda. Bu o‘tish harorat chegarasini 200-400°C ga oshirish va dvigatell FIK ni sezilarli yaxshilash imkonini beradi.

- Aditivli ishlab chiqarish va kompyuter modellashtirishning rivoji yangi material tarkiblarini ishlab chiqish siklini qisqartiradi va an‘anaviy usullar bilan tayyorlab bo‘lmaydigan murakkab geometrik shakllarni hosil qilish imkonini beradi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Reed R.C. The Superalloys: Fundamentals and Applications. Cambridge University Press, 2006. - 372 b.

2. Sims C.T., Stoloff N.S., Hagel W.C. Superalloys II: High Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power. Wiley-Interscience, 1987. - 615 b.
3. ASM International. ASM Handbook Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. ASM International, 1990.
4. Pollock T.M., Tin S. Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry, Microstructure and Properties // Journal of Propulsion and Power. 2006. Vol. 22. No. 2. - P. 361-374.
5. Clarke D.R., Oechsner M., Padture N.P. Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines // MRS Bulletin. 2012. Vol. 37. - P. 891-898.
6. Durand-Charre M. The Microstructure of Superalloys. CRC Press, 1997. - 124 b.
7. Coutouradis D. et al. (Eds.) Materials for Advanced Power Engineering. Kluwer Academic Publishers, 1994.