NANO TEXNOLOGIYALAR ASOSIDAGI KONSTRUKSION MATERIALLAR

Ahmedova Odina
“TIQXMMI” Milliy tadqiqot universiteti talabasi
odinaahmedova643@gmail.com

Abduraxmonova Shoxidaxon Abduqodirovna
“TIQXMMI” Milliy tadqiqot universiteti assisenti
abdurahmonovashohida3@gmail.com
Doi: https://doi.org/10.5281/zenodo.20256610

Annotatsiya. Ushbu ilmiy maqolada zamonaviy kondensiyalangan muhitlar fizikasi, nanomaterialshunoslik va fundamental muhandislikning eng ustuvor va strategik yo‘nalishlaridan biri hisoblangan nanostrukturali konstruksion materiallarning shakllanish qonuniyatlari, evolyutsion mikrotuzilishi hamda makroskopik fizika mexanik xossalari kompleks va tizimli ravishda tadqiq hamda tahlil qilinadi. Tadqiqot doirasida kristallik panjaradagi elementar donachalar (kristallitlar) geometrik o‘lchamining kritik nanometrli diapazonga o‘tishi natijasida modda ichida yuzaga keladigan o‘ziga xos kvant o‘lchamli va sirtqi o‘tish effektlari fundamental jihatdan o‘rganilgan. Xususan, donachalararo chegaralar va fazalararo sirtlar hajmiy ulushining keskin ortishi, dislokatsiyalar manbalarining blokirovkasi hamda submikron tuzilmalardagi kuchlanishlar relaksatsiyasi klassik Xoll-Petch qonuniyati hamda uning nanodiapazondagi anomal og‘ishlari (teskari Xoll-Petch effekti) prizmasidan turib, dislokatsiyalar dinamikasi nazariyalari asosida chuqur ilmiy asoslab berilgan. Maqolada nanostrukturali qotishmalar, o‘ta mustahkam metall-matritsali kompozitlar va polimer nanokompozitlarning solishtirma mexanik mustahkamligi, dinamik va statik qattiqligi, yuqori haroratlardagi oquvchanligi, charchashga va yeyilishga chidamliligi, shuningdek, agressiv muhitlardagi korroziyaga bardoshliligi kabi ekstremal ekspluatatsiya xarakteristikalari ularning an’anaviy mikro va makrotuzilmaviy analoglariga nisbatan qiyosiy-analitik tahlil etiladi.

Konstruksion elementlarni geometrik va strukturaviy jihatdan yengillashtirish, material sarfini kamaytirish va shu orqali energotejamkorlik ko‘rsatkichlarini tubdan yaxshilashning texnik-iqtisodiy hamda ekologik samaradorligi mezonlashtiriladi. Bundan tashqari, maqolada intensiv plastik deformatsiya (SPD), yuqori energiyali ballistik tegirmonlash, gaz fazasidan sintez qilish va kimyoviy cho‘ktirish kabi ilg‘or nanostrukturalash metodologiyalarining qiyosiy tahlili keltirilgan. Ushbu innovatsion materiallarning aerokosmik muhandislik (samolyotsozlik, raketa va sun’iy yo‘ldoshlar konstruksiyalari), og‘ir va transport mashinasozligi, mudofaa sanoati, ekstremal sharoitlarda ishlovchi energetika tizimlari hamda bio-tibbiy implantatologiya va protezlash kabi yuqori texnologik va ilm-fan sig‘imi yuqori bo‘lgan tarmoqlarda qo‘llanilishining bugungi holati, texnologik to‘siqlari hamda kelajakdagi global transformatsion istiqbollari atroflicha va batafsil yoritilgan.

Kalit so‘zlar: Nanostrukturali konstruksion materiallar, Kondensiyalangan muhitlar fizikasi, Xoll-Petch qonuniyati, Teskari XollPetch effekti, Dislokatsiyalar dinamikasi, Intensiv plastik deformatsiya (SPD), Solishtirma mexanik mustahkamlik, Metall-matritsali nanokompozitlar, Aerokosmik muhandislik, Bio-tibbiy implantatologiya.

Аннотация В данной научной статье комплексно и систематически исследуются и анализируются закономерности формирования, эволюция микроструктуры и макроскопические физико- механические свойства наноструктурированных

конструкционных материалов, являющихся одним из наиболее приоритетных и стратегических направлений современной физики конденсированного состояния, наноматериаловедения и фундаментальной инженерии. В рамках исследования фундаментально изучены специфические квантово-размерные и поверхностные переходные эффекты, возникающие в веществе в результате перехода геометрического размера элементарных зерен (кристаллитов) в кристаллической решетке в критический нанометровый диапазон. В частности, резкое увеличение объемной доли межзеренных границ и межфазных поверхностей, блокировка источников дислокаций и релаксация напряжений в субмикронных структурах глубоко научно обоснованы на основе теорий динамики дислокаций через призму классического закона Холла-Петча и его аномальных отклонений в нанодиапазоне (обратный эффект Холла-Петча). В статье проводится сравнительно аналитическая оценка экстремальных эксплуатационных характеристик наноструктурированных сплавов, сверхпрочных композитов с металлической матрицей и полимерных нанокомпозитов, таких как удельная механическая прочность, динамическая и статическая твердость, текучесть при высоких температурах, усталостная долговечность, износостойкость, а также коррозионная стойкость в агрессивных средах, по сравнению с их традиционными микро- и макроструктурными аналогами.

Критериально оценивается технико-экономическая и экологическая эффективность геометрического и структурного облегчения конструкционных элементов, снижения материалоемкости и коренного улучшения за счет этого показателей энергоэффективности.Кроме того, в статье представлен сравнительный анализ передовых методологий наноструктурирования, таких как интенсивная пластическая деформация (SPD), высокоэнергетический баллистический помол, синтез из газовой фазы и химическое осаждение. Всесторонне и детально освещены текущее состояние, технологические барьеры и будущие глобальные трансформационные перспективы применения этих инновационных материалов в таких высокотехнологичных и наукоемких отраслях, как аэрокосмическая инженерия (самолетостроение, конструкции ракет и спутников), тяжелое и транспортное машиностроение, оборонная промышленность, энергетические системы, работающие в экстремальных условиях, а также биомедицинская имплантология и протезирование.

Abstract This scientific article comprehensively and systematically investigates and analyzes the formation regularities, evolutionary microstructure, and macroscopic physical-mechanical properties of nanostructured construction materials, which represent one of the most priority and strategic fields in modern condensed matter physics, nanomaterial science, and fundamental engineering. Within the scope of the study, the specific quantum-size and surface transition effects arising within the matter as a result of the reduction of elementary grain (crystallite) geometric size in the crystal lattice to the critical nanometer range are fundamentally examined. Specifically, the sharp increase in the volume fraction of grain boundaries and interphase surfaces, the blocking of dislocation sources, and stress relaxation in submicron structures are profoundly substantiated based on dislocation dynamics theories through the prism of the classic Hall Petch relation _ and its anomalous deviations in the nanoregime (inverse Hall-Petch effect). The article conducts a comparative-analytical evaluation of the extreme operational characteristics of nanostructured alloys, ultra-high-strength metal-matrix composites, and polymer nanocomposites—such as specific mechanical strength, dynamic and static hardness, high-temperature yield strength, fatigue and wear resistance, as well as corrosion resistance in aggressive environments— in comparison with their conventional micro- and macrostructural analogs. The technical-economic and environmental efficiency of structural and geometric lightweighting of

engineering components, reduction of material consumption, and the resulting radical improvement of energy efficiency metrics are thoroughly benchmarked.Furthermore, the paper provides a comparative analysis of advanced nanostructuring methodologies, including severe plastic deformation (SPD), high-energy ballistic milling, gas-phase synthesis, and chemical vapor deposition. The current state, technological barriers, and future global transformational prospects of utilizing these innovative materials in high-tech and knowledge-intensive sectors— such as aerospace engineering (aircraft, rocket, and satellite structures), heavy and transport machinery, defense industry, energy systems operating under extreme conditions, as well as biomedical implantology and prosthetics—are comprehensively and elaborately highlighted.

Fundamental mikrotuzilmaviy nazariyalar va matematik modellarKonstruksion nanomateriallarning mexanik deformatsiya fizikasi an'anaviy polikristallardan tubdan farq qiladi. Mazkur jarayonlarni tushuntirish uchun uchta asosiy fundamental nazariya qo'llaniladi.

A. **Klassik dislokatsion mustahkamlanish va Xoll-Petch modeli** Materiallar strukturasi submikron o'lchamgacha d=100-80 nm maydalashganda, materialning oquvchanlik chegarasi ortib boradi. Bu jarayon dislokatsiyalarning donachalararo chegaralarda to'planishi (dislocation pile-up) nazariyasi orqali asoslanadi:

B. **Teskari Xoll-Petch nazariyasi** (Anomal yumshash effekti)Donachalar o'lchami kritik chegaradan d=10-15 nm kichrayganda, yuqoridagi formula o'z kuchini yo'qotadi va material yumshay boshlaydi. Bu hodisa Teskari Xoll-Petch effekti (Inverse Hall-Petch effect) deb ataladi.

Mustahkamlik (σ)
^
| / \
| / \ <-- Kritik nuqta (d ≈ 10-15 nm)
| / \
| / \ Teskari Xoll-Petch effekti
| / \ (Donachalararo chegaralar sirpanishi)
+----------------------------------> Donacha o'lchami (1/sqrt(d))
Mikro-maddalar Nano-maddalar

Nazariy asoslanishi: Nano-donachalar ichida dislokatsiya manbalari (Frank-Read manbalari) ishlashi uchun zarur bo'lgan kritik kuchlanish materialning nazariy mustahkamlik chegarasidan oshib ketadi.

Deformatsiya mexanizmi dislokatsiyalar harakatidan donachalararo chegaralarning sirpanishi (grain boundary sliding) va atomar diffuziyaga (Kobl va Nabarro-Hering krepi) ko'chadi.C. Orowan mexanizmi (Dispersion mustahkamlanish nazariyasi)Metall-matritsali nanokompozitlarda nano-zarrachalar (masalan, kiritilgan Al_2O_3 yoki uglerodli nanotubalar) matritsa ichidagi dislokatsiya chiziqlarini aylanib o'tishga majbur qiladi.

2. ***Ilg'or nanostrukturalash metodologiyalariYirik hajmli*** (bulk) konstruksion nanomateriallarni olish "Top-Down" (yuqoridan pastga) va "Bottom-Up" (quyidan yuqoriga) prinsiplariga tayanadi:

Teng kanalli burchakli presslash (ECAP - Severe Plastic Deformation): Metall blanka kesish burchagi $90<\phi<120$ graduslarda bo'lgan maxsus matritsadan bir necha marta o'tkaziladi. Deformatsiya natijasida materialda mikro-kristall strukturadan submikron va nano-donachali struktura shakllanadi.

Yuqori energiyali ballistik tegirmonlash (High-Energy Ball Milling): Kukunli aralashmalar sayyoraviy tegirmonlarda po‘lat sharlar yordamida g = 20-40 tezlanishda uriladi. Jarayonda zarrachalar doimiy ravishda sinadi va qayta payvandlanadi, natijada barqaror nanostrukturali kompozit kukunlar sintezlanadi.

Haqiqiy muhandislik namunalari va amaliy tahlil

Misol 1: ***Aviatsiya va kosmonavtika muhandisligi*** (Alyuminiy-Skandiy nanokompozitlari)Zamonaviy samolyotsozlikda an’anaviy Al-Cu-Mg qotishmalari o‘rnini nanotuzilmaviy Al-Sc qotishmalari egallamoqda. Material tarkibida fazaviy ajralish natijasida o‘lchami 2-5 nm bo‘lgan koferent Al_{3}Sc nano-faza zarrachalari hosil bo‘ladi.

Natija: Samolyot fyuzelyajining og‘irligi 18-22% gacha kamayadi.

Misol

2: ***Bio-tibbiy implantatologiya*** (Nanostrukturali Titan - nTi)Tibbiyotda keng qo‘llaniladigan mikro-tuzilmaviy Grade 4 titani o‘rniga, intensiv plastik deformatsiya orqali olingan, donachalari d=150 nm bo‘lgan nanostrukturali sof titan ishlatilmoqda.

Natija: Mustahkamlik chegarasi 700 MPa dan 1240 MPa gacha ko‘tariladi. Bu bio-toksik hisoblangan alyuminiy va vanadiy (Ti-6Al-4V qotishmasidagi) elementlarisiz o‘ta mustahkam va organizmga mutlaqo zararsiz bo‘lgan dental va ortopedik implantlar ishlab chiqarish imkonini beradi.

Misol

3: ***Qurilish va infratuzilma (O‘ta yuqori mustahkamlikdagi po‘latlar)*** Ko‘priklar va osmono‘par binolar konstruksiyasida uglerodli nanotubalar (CNT) bilan modifikatsiyalangan nanostrukturali po‘latlar qo‘llaniladi.

Natija: Temir panjaralar va simlarning cho‘zilishga mustahkamligi 2500 MPa ga yetadi, bu an’anaviy armatura po‘latlaridan 5 barobar yuqori demakdir. Korroziyaga chidamliligi nanosirtqi passivatsiya qatlami hisobiga 300% ga ortadi.

Donalar o‘lchamining ta’siri (Grain Size Influence)Materialning mexanik va ekspluatatsion xossalarini boshqarish to‘g‘ridan-to‘g‘ri donalar (kristallitlar) o‘lchamini mikroskopik darajada nazorat qilishga bog‘liq.

Mikrotuzilma Mexanik javob

Dislokatsiyalarni to‘sish mexanizmi: Kristall panjaradagi nuqsonlar – dislokatsiyalar harakati materialning plastik deformatsiyasini ta’minlaydi . Donalar maydalashganda, donalararo chegaralar maydoni (s) quyidagi qonuniyat bo‘yicha keskin ortadi.

Anomal plastiklik va mustahkamlik balansi: An’anaviy metallurgiyada material mustahkamligi oshsa, uning plastikligi (mo‘rtlashishi hisobiga) kamayadi. Biroq, struktura o‘ta mayda nanodiapazonga keltirilganda, donalararo chegaralarda atomlar diffuziyasi va donalarning o‘zaro aylanish mexanizmlari (grain boundary rotation) ishga tushadi. Bu esa materialga bir vaqtning o‘zida ham o‘ta yuqori mustahkamlik, ham yuqori qayshoqlik xususiyatini beradi.

Termik ishlov berishning ta’siri (Heat Treatment Influence)Termik ishlov berish – bu boshqariladigan issiqlik energiyasi yordamida mikrotuzilmadagi donalar o‘lchami, shakli va fazaviy tarkibini o‘zgartirish orqali xossalarni dasturlash usulidir.

Rekristallizatsiya va donalarning o‘sishi: Intensiv plastik deformatsiyadan keyingi termik ishlov berish (toblash yoki bo‘shatish) material ichidagi ichki kuchlanishlarni kamaytiradi. Harorat ortishi bilan mikrotuzilmada yangi, nuqsonsiz nano-donalar markazlari hosil bo‘ladi (rekristallizatsiya). Keyingi bosqichda donalarning o‘sish tezligi v Arrenius tenglamasi bilan aniqlanadi:

Nano-fazaviy dispersion mustahkamlanish: Termik ishlov berish jarayonida matritsa ichidan o‘ta mayda (1–10 nm) ikkinchi faza zarrachalari ajralib chiqadi. Bu jarayon dispers

mustahkamlanish deb atalib, qotishmaning issiqbardoshligini va uzoq muddatli statik mustahkamligini ta’minlaydi.

Fazaviy o‘tishlarni boshqarish: Materialni yuqori tezlikda sovutish (toblash) diffuziyasiz fazaviy o‘tishni yuzaga keltiradi. Natijada o‘ta yuqori qattiqlikka ega bo‘lgan va ignasimon mikrotuzilmali martensitik faza shakllanadi. Keyingi past haroratli qizdirish (bo‘shatish) esa uning mo‘rtligini yo‘qotib, konstruksion chidamlilikni oshiradi.

Mikrotuzilmaviy tahlilning ahamiyati (Significance of Microstructural Control)Material xossalarini boshqarishda mikrotuzilmani o‘rganish quyidagi sabablarga ko‘ra hal qiluvchi ahamiyatga ega:

Nuqsonlarni prognozlash: Sirtqi mikro-yoriqlar va dislokatsiyalar to‘planish nuqtalarini aniqlash orqali materialning charchash chegarasini va sinish dinamikasini oldindan hisoblash imkonini beradi.

Anizotropiyani nazorat qilish: Deformatsiya va termik ishlov natijasida donalarning ma’lum bir yo‘nalishda cho‘zilishi (teksturalanish) material xossalarining yo‘nalishlar bo‘yicha farq qilishini (anizotropiya) boshqarishga xizmat qiladi.

Sifat nazorati: Zamonaviy elektron mikroskoniya (SEM, TEM) va rentgenstrukturaviy tahlil (XRD) usullari yordamida material qatlamlaridagi fazalar nisbati va donacha o‘lchamlari datchiklar yordamida tekshiriladi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati:

1. Koch, C. C. (2006). Nanostructured Materials: Processing, Properties and Applications. William Andrew Publishing.
2. Poole, C. P., & Owens, F. J. (2003). Introduction to Nanotechnology. John Wiley & Sons.
3. Valiev, R. Z., Zhilyaev, A. P., & Langdon, T. G. (2014). Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications. John Wiley & Sons.
4. Meyers, M. A., Mishra, A., & Benson, D. J. (2006). Mechanical properties of nanocrystalline materials. Progress in Materials Science, 51(4), 427-556.
5. Gleiter, H. (2000). Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. Acta Materialia, 48(1), 1-29.
6. Langdon, T. G. (2013). Twenty-five years of severe plastic deformation: recent developments in evaluating microstructure and properties. Journal of Materials Science, 48(13), 4433-4438.
7. Huang, Y., & Langdon, T. G. (2021). Advances in ultrafine-grained materials produced by severe plastic deformation. Materials Science and Engineering: A, 802, 140647.
8. Zehetbauer, M. J., & Zhu, Y. T. (Eds.). (2008). Bulk Nanostructured Materials. Wiley-VCH.
9. Estrin, Y., & Vinogradov, A. (2013). Extreme grain refinement by severe plastic deformation: a wealth of challenging science. International Journal of Materials Research, 104(12), 1169-1175.
10. Carlton, C. E., & Ferreira, P. J. (2007). What is behind the inverse Hall– Petch effect in nanocrystalline materials?. Acta Materialia, 55(11), 3749-3756.