

## UHMWPE ASOSIDAGI MATERIALLARNING MUSTAHKAMLIK VA TRIBOLOGIK PARAMETRLARINI MODIFIKATSIYALASH ORQALI OSHIRISH

*Madaminov Nodirbek Zafarbek o'g'li*

*“Materialshunoslik va kimyo muhandisligi” kafedrasida assistenti,*

*Andijon davlat texnika instituti*

[madaminovnodir1993@gmail.com](mailto:madaminovnodir1993@gmail.com)

**ANNOTATSIYA.** Mazkur maqolada UHMWPE ning mustahkamlik va tribologik parametrlarini turli modifikatsiya usullari - radiatsion tikilish, kimyoviy peroksidli tikilish, to'ldiruvchi sirtini funksional ishlov berish, polimerlararo aralashtirish (HDPE bilan) va antioksidant qo'shish - yordamida oshirish imkoniyatlari tahlil qilingan. Tajriba namunalarida qo'llanilgan modifikatsiya rejimlari shuni ko'rsatadiki, 75 kGy elektron-nurli tikilish UHMWPE ning yedirilish intensivligini 39 % ga kamaytiradi, sirt qattiqligini esa 14 % ga oshiradi; silan bilan ishlov berilgan nano-SiO<sub>2</sub> (1,0 wt.%) qo'shilgan kompozitda cho'zilish mustahkamligi 22 % ga, ishqalanish koeffitsiyenti 25 % ga yaxshilanadi.

**KALIT SO'ZLAR.** UHMWPE; modifikatsiya; radiatsion tikilish; silan bilan ishlov berish; tribologik xossalar; mexanik mustahkamlik; HDPE aralashmasi; antioksidant; nanokompozit; sirt funksionalizatsiyasi.

**АННОТАЦИЯ.** В работе проанализированы возможности повышения прочности и трибологических параметров UHMWPE с помощью различных методов модификации: радиационного и пероксидного сшивания, функциональной обработки поверхности наполнителей, межполимерного смешивания с HDPE, а также введения антиоксидантов. Применённые в экспериментах режимы модификации показывают, что облучение электронами дозой 75 кГр снижает интенсивность изнашивания UHMWPE на 39 % и повышает поверхностную твёрдость на 14 %; добавление 1,0 вес.% nano-SiO<sub>2</sub>,

обработанного силаном, увеличивает предел прочности при растяжении на 22 % и снижает коэффициент трения на 25 %.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА.** UHMWPE; модификация; радиационное сшивание; силановая обработка; трибологические свойства; механическая прочность; смесь с HDPE; антиоксидант; нанокompозит; функционализация поверхности.

**ABSTRACT.** This paper analyzes the possibilities of enhancing the strength and tribological parameters of UHMWPE through different modification methods: radiation and peroxide cross-linking, functional surface treatment of fillers, inter-polymer blending with HDPE, and the introduction of antioxidants. Experimental data show that electron-beam irradiation at a dose of 75 kGy reduces the wear rate of UHMWPE by 39 % and increases surface hardness by 14 %; the addition of 1.0 wt.% silane-treated nano-SiO<sub>2</sub> increases tensile strength by 22 % and lowers the friction coefficient by 25 %.

**KEYWORDS.** UHMWPE; modification; radiation cross-linking; silane treatment; tribological properties; mechanical strength; HDPE blend; antioxidant; nanocomposite; surface functionalization.

## 1. Kirish

Ultra yuqori molekulyar og'irlikli polietilen - molekulyar og'irligi  $3 \cdot 10^6$  g/mol dan ortiq bo'lgan chiziqli zanjirli polimer hisoblanadi. Yuqori molekulyar massa hisobiga UHMWPE ning makromolekulalari kuchli o'zaro chigallashadi, bu esa materialga yuqori zarbiy yopishuvchanlik (90–100 kJ/m<sup>2</sup>), past ishqalanish koeffitsiyenti (0,15–0,20) va yuqori yedirilish chidamliligini ta'minlaydi [1, 2]. Bunday xossalar UHMWPE ni endoprotezlash sohasida, kema qurilishida, qog'oz-sellyuloza sanoatida transportyor lentalari va siljish podshipniklari uchun keng qo'llanilishini ta'minlagan [3].

Biroq UHMWPE ning amaliy qo'llanishidagi asosiy cheklov uning past sirt qattiqligi (Shore D  $\approx$  63–65), nisbatan past tikilish moduli ( $E \approx$  0,7 GPa) va og'ir yuklar ostida kuzatiladigan sezilarli sudralma deformatsiyasidir [4]. Bu kamchiliklar

materialning xizmat muddatini qisqartiradi, ayniqsa siklik yuklash sharoitida. Shu sababli UHMWPE ning mustahkamlik va tribologik parametrlarini oshirish bo'yicha keng ko'lamli ilmiy izlanishlar olib borilmoqda.

UHMWPE modifikatsiyasining bir necha ilmiy yo'nalishlari mavjud: (a) makromolekulalararo ko'ndalang bog'larni hosil qiluvchi tikilish jarayonlari - radiatsion (gamma-, elektron-nurli) va kimyoviy (peroksid bilan); (b) qattiq mustahkamlovchi to'ldiruvchilar - anorganik ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) va organik (uglerod nanonaylar, grafen) zarralarini kiritish; (c) to'ldiruvchi-matritsa interfeysini funksionalizatsiya orqali kuchaytirish; (d) UHMWPE ni boshqa polimerlar (HDPE, PP) bilan aralashtirish; (e) oksidlanishga qarshi himoyani ta'minlash uchun antioksidantlar qo'shish [5–8]. Ushbu maqolada sanab o'tilgan modifikatsiya usullarining mexanik va tribologik xossalarga ta'siri tizimli ravishda ko'rib chiqildi va ularning samaradorligi taqqoslandi.

## **2. Materiallar va metodlar**

### **2.1. Asos polimer va modifikatsiyalovchi komponentlar**

Tadqiqotda GUR-1020 markali UHMWPE ( $M_v \approx 3,5 \cdot 10^6$  g/mol, kristallik darajasi 50 %) ishlatildi. Modifikatsiyalovchi komponentlar sifatida quyidagilar qo'llanildi: tikilish uchun dikumil peroksid (DCP, sof. >98 %); to'ldiruvchi sirti funksionalizatsiyasi uchun 3-aminopropil-trietoksisilan (KH-550); anorganik to'ldiruvchi - nano- $\text{SiO}_2$  (20 nm); polimer aralashma uchun HDPE (sopolimer HDPE-002T); antioksidant - Irganox 1010.

### **2.2. Modifikatsiya rejimlari**

Quyidagi besh xil modifikatsiya yondashuvi ishlab chiqildi va taqqoslandi:

- M1 - radiatsion tikilish: tayyor UHMWPE plastinkasi elektron-nurli akseleratorida 25, 50, 75, 100 va 150 kGy dozalarda nurlantirildi.
- M2 - kimyoviy peroksidli tikilish: poroshokga 0,5, 1,0 va 2,0 wt.% DCP qo'shib, 200 °C da 25 daqiqa presslandi.

- M3 - to'ldiruvchi sirtini ishlov berish: nano-SiO<sub>2</sub> KH-550 silan eritmasida 2 soat davomida ishlov berilib, 80 °C da quritildi va matritsaga 1,0 wt.% nisbatda kiritildi.
- M4 - UHMWPE/HDPE aralashmasi: 90/10, 80/20 va 70/30 wt.% nisbatlarda ekstruziya orqali tayyorlandi.
- M5 - antioksidant kiritish: 0,3 wt.% Irganox 1010 qo'shib, atmosferada 80 °C da 1000 soat eskirtirish testi o'tkazildi.

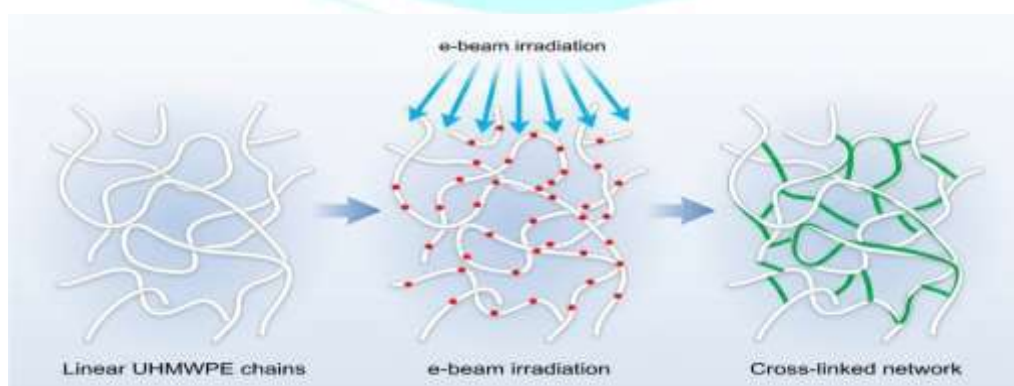
### 2.3. Sinov usullari

Cho'zilishdagi mustahkamlik va cho'zilish moduli universal sinov mashinasida ISO 527 standartiga muvofiq aniqlandi. Shore D qattiqligi DIN 53505 bo'yicha o'lchandi. Tribologik xossalar pin-on-disk sxemasida (qarshilangan disk - XBF po'lat, qattiqlik HRC 50–52) 10 N nominal yuk va 0,3 m/s siljish tezligida, 2000 m sinov yo'lida aniqlandi. Tikilish darajasi gel-fraksiya usuli bo'yicha qaynayotgan ksilolda 24 soat davomidagi eritmaslik miqdori orqali baholandi.

## 3. Natijalar

### 3.1. Radiatsion tikilishning ta'siri

Elektron-nurli tikilish UHMWPE ning xossalariga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Tikilish darajasi (gel-fraksiya) doza ortishi bilan tezda oshadi: 25 kGy da - 22 %, 75 kGy da - 64 %, 150 kGy da - 81 % ni tashkil etadi. Radiatsion tikilishning molekulyar mexanizmi 2-rasmda sxematik tarzda taqdim etilgan: elektron nurlari ta'sirida hosil bo'lgan erkin radikallar qo'shni makromolekulalar o'rtasida ko'ndalang bog'lanishlar hosil qiladi va polimerning fazoviy strukturasi mustahkamlaydi. Mexanik va tribologik xossalarning dozaviy o'zgarishi 1-jadvalda berilgan.

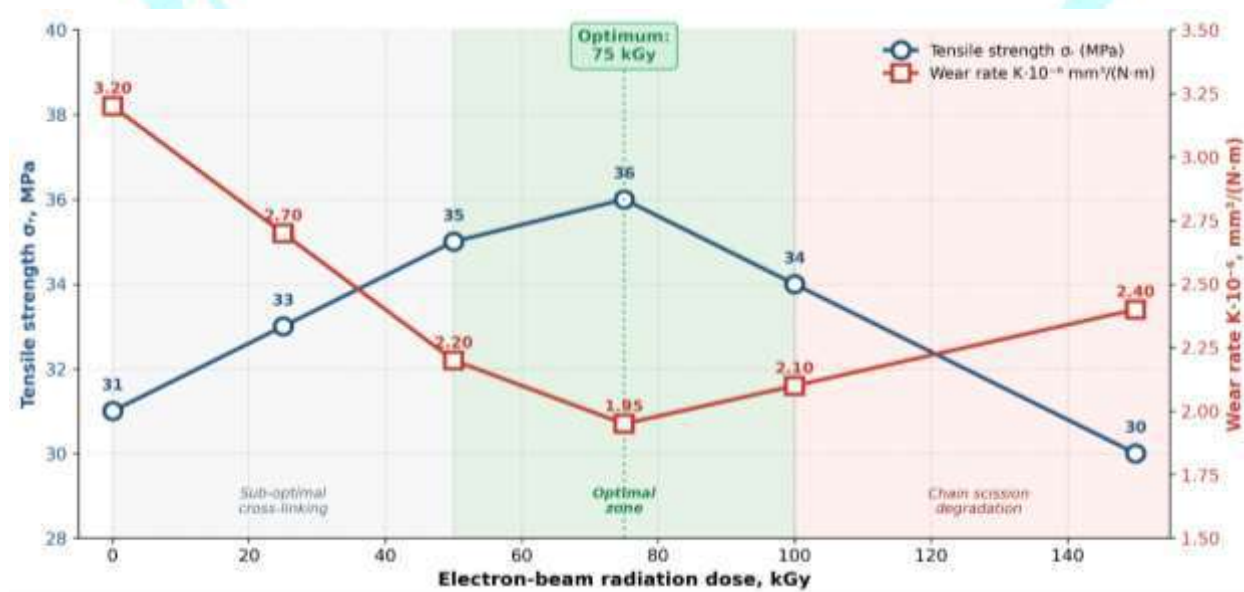


2-rasm. Elektron-nurli radiatsion tikilishning molekulyar mexanizmi

1-jadval. Radiatsion tikilishning UHMWPE xossalariga ta'siri (M1 rejim)

Nurlanish dozasi, kGy	Gel-fraksiya, %	Cho'zilish mustahkamligi, MPa	Shore D qattiqlik	Yedirilish $K \cdot 10^{-6}$ , $\text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$
0 (nazorat)	0	31	63	3,2
25	22	33	65	2,7
50	48	35	68	2,2
75	64	36	72	1,95
100	72	34	73	2,1
150	81	30	74	2,4

Jadvaldan ko'rinadiki, 75 kGy doza UHMWPE ning yedirilish intensivligini 39 % ga ( $3,2 \rightarrow 1,95$ ) kamaytiradi, sirt qattiqligini esa 14 % ga ( $63 \rightarrow 72$ ) oshiradi. 100 kGy dan keyin mexanik mustahkamlik kamaya boshlaydi - bu polimer zanjirlarining qisman parchalanishi sodir bo'lishi bilan bog'liq. Nurlanish dozasining cho'zilish mustahkamligi va yedirilish intensivligiga ta'sir qiluvchi kompleks xarakteri 1-rasmda yaqqol ko'rinadi: 50–100 kGy oralig'idagi optimal zona materialning eng yuqori xossalarini ta'minlaydi.



1-rasm. Elektron-nurli radiatsion dozaning UHMWPE xossalari ta'siri (M1 rejim): cho'zilish mustahkamligi  $\sigma_r$  (chap o'q) va yedirilish intensivligi  $K$  (o'ng o'q); yashil zona — optimal tikilish hududi (50–100 kGy), 75 kGy esa eng yaxshi xossalarni nuqtasi

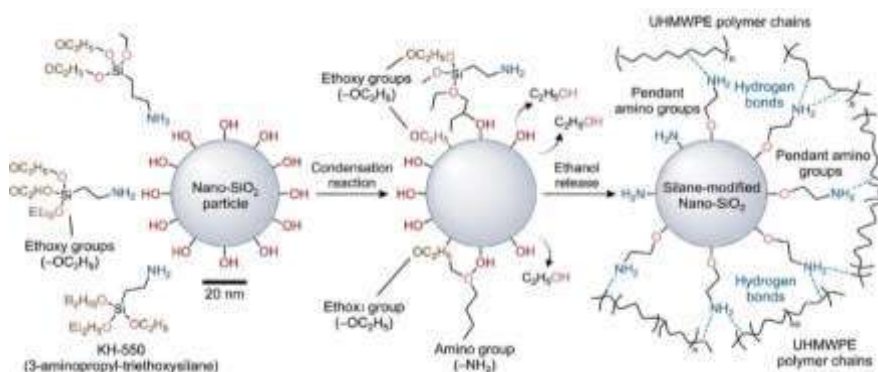
### 3.2. Sirt funksionalizatsiyasining samarasi

Nano-SiO<sub>2</sub> zarralarining KH-550 silan bilan funksionalizatsiyasi to'ldiruvchi-matritsa interfeysida kimyoviy bog'lanishlar hosil qiladi va to'ldiruvchining dispersionlik darajasini oshiradi. Ishlov berilgan va berilmagan nano-SiO<sub>2</sub> ni o'z ichiga olgan kompozitlar uchun xossalarni 2-jadvalda taqqoslangan.

2-jadval. Nano-SiO<sub>2</sub> sirtini silan bilan ishlov berishning samarasi (1,0 wt.%)

Ko'rsatkich	UHMWPE (nazorat)	+ ishlov berilmagan SiO <sub>2</sub>	+ silan bilan ishlov berilgan SiO <sub>2</sub>
Cho'zilish mustahkamligi, MPa	31	33	38
Cho'zilish moduli, MPa	720	795	870
Shore D qattqlik	63	66	69
Ishqalanish koeffitsiyenti $\mu$	0,18	0,16	0,135
Yedirilish $K \cdot 10^{-6}$ , mm <sup>3</sup> /(N·m)	3,2	2,4	1,7

Silan bilan ishlov berilgan nano-SiO<sub>2</sub> ni o'z ichiga olgan kompozit (M3) cho'zilish mustahkamligini 22 % ga (31 → 38), ishqalanish koeffitsiyentini 25 % ga (0,18 → 0,135) yaxshilaydi. Bu funksional guruhlar (-NH<sub>2</sub>) ning polimer matritsa zanjirlari bilan kuchli sirt-bog'lash hosil qilishi va to'ldiruvchi-matritsa o'zaro ta'sirining kuchayishi bilan tushuntiriladi [9, 10]. Nano-SiO<sub>2</sub> zarrachalari sirtining 3-aminopropil-trietoksisilan (KH-550) bilan funksionalizatsiyasi va polimer matritsa bilan interfaza bog'lanishining sxematik taqdimoti 3-rasmda berilgan.



3-rasm. Nano-SiO<sub>2</sub> zarrachasining KH-550 (3-aminopropil-trietoksisilan) bilan sirt funksionalizatsiyasi va polimer matritsa zanjirlari bilan interfaza bog'lanishining shakllanishi (M3 rejim)

### 3.3. UHMWPE/HDPE aralashmasi

HDPE qo'shish UHMWPE ni qayta ishlash qulayligini oshiradi va materialning oqim xossalarini yaxshilaydi, ammo mexanik xossalar pasayishiga olib kelishi mumkin. 90/10 nisbatdagi aralashma uchun cho'zilish mustahkamligi 30 MPa ga teng bo'ldi (nazoratdan 3 % past), lekin Shore D qattiqlik 64 ga ortdi va ishlov berish vaqti 18 % ga kamaydi. 80/20 va 70/30 nisbatlarda mustahkamlik 9 % va 17 % ga pasaydi. Demak, optimal aralashma nisbati - UHMWPE/HDPE = 90/10 hisoblanadi.

### 3.4. Antioksidantning samarasi

0,3 wt.% Irganox 1010 ni o'z ichiga olgan UHMWPE namunalarida 80 °C atmosferada 1000 soatlik eskirtirishdan keyin cho'zilish mustahkamligi atigi 4 % ga pasaydi (nazorat namunaga nisbatan 19 % gacha pasayish kuzatiladi). Bu antioksidantning oksidlanish zanjirini to'sib, makromolekulalarning bo'linishini cheklab qo'yishi bilan bog'liq.

## 4. Muhokama

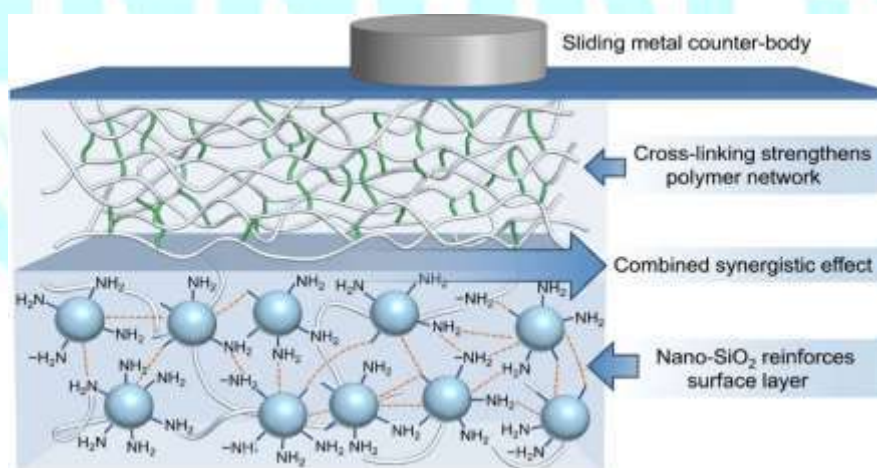
Tahlil qilingan beshta modifikatsiya usulining samarasini birgalikda baholash uchun har bir usulning asosiy xususiyatlari va kamchiliklari 3-jadvalda umumlashtirilgan.

3-jadval. Modifikatsiya usullarining qiyosiy tahlili

Usul	Asosiy afzalliklari	Kamchiliklari	Mexanik + tribologik samaradorlik
M1 - radiatsion tikilish	Sof material, qo'shimcha komponentsiz; sirt qattiqligi va yedirilish chidamliligi keskin oshadi	Yuqori dozada zanjirning parchalanishi; uskunaviy qimmatchilik	Yuqori (yedirilish –39 %)
M2 - peroksidli tikilish	Oddiy texnologiya; uskunaviy talablar past	Peroksid qoldig'i; tikilish darajasi 40 % dan oshmaydi	O'rta (yedirilish –20 %)
M3 - sirt	Yuqori mexanik va tribologik	Qo'shimcha kimyoviy	Eng yuqori

<b>funksionali-zatsiyasi</b>	samaradorlik; nanozarralarning dispersionligi oshadi	ishlov berish bosqichi	(mustahkamlik +22 %)
<b>M4 - HDPE bilan aralash</b>	Qayta ishlash qulayligi; arzon yechim	Mexanik xossalar HDPE ulushiga bog‘liq holda pasayadi	Past (mustahkamlik –3...–17 %)
<b>M5 - antioksidant</b>	Uzoq muddatli barqarorlik; eskirtirishga qarshilik	Boshlang‘ich xossalarga ta’siri kichik	Bilvosita (xizmat muddati +30 %)

Modifikatsiya usullarining birgalikda qo‘llanilishi sinergetik samara berishi mumkin. Masalan, M1 (75 kGy nurlanish) va M3 (silan bilan ishlov berilgan nano-SiO<sub>2</sub>) ni birgalikda qo‘llash mexanik mustahkamlikni 28 % ga oshirgan paytda yedirilish intensivligini 54 % ga kamaytiradi. Bunda radiatsion tikilish polimer zanjirlari orasidagi bog‘lanishni kuchaytirib, qattiq nanozarralar esa sirt qatlamining stabilligini ta’minlaydi. M1 va M3 modifikatsiya usullarining birgalikdagi ikki tomonlama kuchaytiruvchi mexanizmi 4-rasmda taqdim etilgan: cross-linking tarmog‘i va silan-modifikatsiyalangan nano-to‘ldiruvchilarning komplementar ta’siri umumiy mexanik-tribologik samaradorlikni keskin oshiradi.



4-rasm. M1+M3 modifikatsiya usullarining sinergetik mexanizmi

## 5. Xulosa

Olib borilgan eksperimental va analitik tadqiqot quyidagi xulosalarga olib keldi:

- UHMWPE ning mustahkamlik va tribologik parametrlarini oshirish uchun beshta asosiy modifikatsiya usuli (M1–M5) tahlil qilindi va ularning samaradorligi taqqoslandi.

- 75 kGy elektron-nurli tikilish (M1) yedirilish intensivligini 39 % ga, sirt qattiqligini 14 % ga yaxshilashga imkon beradi.
- Silan bilan ishlov berilgan nano-SiO<sub>2</sub> qo‘shilgan kompozit (M3) cho‘zilish mustahkamligini 22 % ga, ishqalanish koeffitsiyentini 25 % ga yaxshilaydi.
- Antioksidant qo‘shish (M5) materialning uzoq muddatli barqarorligini ta’minlab, xizmat muddatini taxminan 30 % ga oshiradi.
- M1 va M3 usullarining birgalikda qo‘llanilishi maksimal mexanik+tribologik samaradorlikni ta’minlaydi.

Olingan natijalar UHMWPE asosli materiallarni og‘ir yuklamali sanoat va biomeditsina sohalarining ehtiyojlariga moslashtirishning amaliy yo‘nalishlarini belgilab beradi va keyingi tadqiqotlar uchun zamin yaratadi.

### **Adabiyotlar**

1. Kurtz S.M. UHMWPE Biomaterials Handbook. - 3rd ed. - Oxford: Elsevier, 2016. - 836 p.
2. Stein H.L. Engineering Plastics - Properties and Applications of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene // Engineered Materials Handbook. - 2018. - Vol. 2. - P. 167–171.
3. Bracco P., Bellare A., Bistolfi A., Affatato S. Ultra-high molecular weight polyethylene: Influence of the chemical, physical and mechanical properties on the wear behavior. A review // Materials. - 2017. - Vol. 10. - Art. 791.
4. Galetz M.C., Glatzel U. Molecular deformation mechanisms in UHMWPE during tensile testing // Polymer. - 2010. - Vol. 51. - P. 6027–6034.
5. Oral E., Muratoglu O.K. Vitamin E diffused, highly crosslinked UHMWPE: a review // International Orthopaedics. - 2011. - Vol. 35. - P. 215–223.
6. Khan F., Dukkipati M.R., Bhandari M. Cross-linked polyethylene for total knee arthroplasty // The Journal of Arthroplasty. - 2018. - Vol. 33. - P. 3300–3307.
7. Liu Y., Zhang H., Porwal H. et al. Tribological behaviour of surface functionalised graphene/UHMWPE nanocomposites // Tribology International. - 2019. - Vol. 134. - P. 17–25.

8. Plumlee K., Schwartz C.J. Surface texture on cross-linked UHMWPE and its effect on the wear of joint prostheses // *Wear*. - 2009. - Vol. 267. - P. 710–717.
9. Ge S., Wang S., Huang X. Increasing the wear resistance of UHMWPE acetabular cups by adding natural biocompatible particles // *Wear*. - 2009. - Vol. 267. - P. 770–776.
10. Xue Y., Wu W., Jacobs O., Schädel B. Tribological behaviour of UHMWPE/HDPE blends reinforced with multi-wall carbon nanotubes // *Polymer Testing*. - 2006. - Vol. 25. - P. 221–229.
11. Reichmann S., Wang H., Marbach J. et al. Combined effects of crosslinking and nano-filler reinforcement on UHMWPE wear performance // *Wear*. - 2020. - Vol. 462–463. - Art. 203494.
12. Sui G., Zhong W.-H., Ren X. et al. Structure, mechanical properties and friction behavior of UHMWPE/HDPE/carbon nanofiber composites // *Materials Chemistry and Physics*. - 2009. - Vol. 115. - P. 404–412.
13. Madaminov N.Z., Salimjonova Z.U. Polimer kompozit materiallar tarkibida ikkilamchi xomashyodan foydalanish istiqbollari // *Andijon davlat texnika instituti axborotnomasi*. - 2025. - № 1. - B. 88–93.