

ULTRA YUQORI MOLEKULYAR OG‘IRLIKLI POLIETILEN ASOSLI KOMPOZITLARDA MEXANIK VA ISHQALANISH XUSUSIYATLARINI OPTIMALLASHTIRISH

Madaminov Nodirbek Zafarbek o‘g‘li

“Materialshunoslik va kimyo muhandisligi” kafedrasida assistenti,

Andijon davlat texnika instituti

madaminovnodir1993@gmail.com

ANNOTATSIYA. Mazkur maqolada UHMWPE asosli kompozitlarning mexanik (cho‘zilishdagi mustahkamlik, qattqlik, zarbiy yopishuvchanlik) va ishqalanish (ishqalanish koeffitsiyenti, yedirilish intensivligi) xususiyatlarini optimallashtirish yondashuvlari tahlil qilingan. Mustahkamlovchi to‘ldiruvchi sifatida nano-SiO₂, ko‘p qatlamli uglerod nanonaylar (MWCNT) va grafen oksid (GO) ning konsentratsiyaviy ta’siri o‘rganildi. Issiq presslash usulida tayyorlangan namunalar to‘rt darajali to‘ldiruvchi miqdorida (0,25–3,0 wt.%) ishlab chiqarilib, pin-on-disk sxemasi bo‘yicha 5–20 N yuk va 0,1–0,5 m/s siljish tezligida tekshirildi. Olingan natijalarga ko‘ra, MWCNT 1,0 wt.% miqdorida qo‘shilganda yedirilish intensivligi 47 %, ishqalanish koeffitsiyenti 28 % kamayadi, cho‘zilishdagi mustahkamlik esa 18 % ga oshadi. Optimal to‘ldiruvchi miqdori 1,0–1,5 wt.% oralig‘ida ekanligi aniqlandi.

KALIT SO‘ZLAR. UHMWPE; nano-to‘ldiruvchi; tribologik xususiyatlar; ishqalanish koeffitsiyenti; yedirilish chidamliligi; mexanik mustahkamlik; uglerod nanonaylar; grafen oksid; nanokompozit; optimallashtirish.

АННОТАЦИЯ. В работе рассмотрены подходы к оптимизации механических (предел прочности при растяжении, твёрдость, ударная вязкость) и трибологических (коэффициент трения, интенсивность изнашивания) свойств композитов на основе UHMWPE. В качестве упрочняющих наполнителей исследовано влияние nano-SiO₂, многостенных углеродных нанотрубок (MWCNT) и оксида графена (GO) при четырёх уровнях концентрации (0,25–3,0 вес.%). Образцы изготавливались методом горячего прессования и

испытывались по схеме pin-on-disk при нагрузках 5–20 Н и скоростях скольжения 0,1–0,5 м/с. Установлено, что при введении 1,0 вес.% MWCNT интенсивность изнашивания снижается на 47 %, коэффициент трения - на 28 %, а предел прочности при растяжении возрастает на 18 %. Оптимальная концентрация наполнителя находится в диапазоне 1,0–1,5 вес.%.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. UHMWPE; нанонаполнитель; трибологические свойства; коэффициент трения; износостойкость; механическая прочность; углеродные нанотрубки; оксид графена; наноккомпозит; оптимизация.

ABSTRACT. This paper analyzes approaches to optimization of mechanical (tensile strength, hardness, impact toughness) and tribological (friction coefficient, wear rate) properties of UHMWPE-based composites. The concentration effect of three reinforcing fillers - nano-SiO₂, multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) and graphene oxide (GO) - was studied at four loading levels (0.25–3.0 wt.%). Specimens were produced by hot pressing and tested under pin-on-disk conditions at loads of 5–20 N and sliding speeds of 0.1–0.5 m/s. The results show that incorporation of 1.0 wt.% MWCNT reduces the wear rate by 47 %, decreases the friction coefficient by 28 %, and increases tensile strength by 18 %. The optimal filler content was found to lie in the range of 1.0–1.5 wt.%.

KEYWORDS. UHMWPE; nanofiller; tribological properties; friction coefficient; wear resistance; mechanical strength; carbon nanotubes; graphene oxide; nanocomposite; optimization.

1. Kirish

Ultra yuqori molekulyar og'irlikli polietilen (UHMWPE - Ultra-High Molecular Weight Polyethylene) molekulyar og'irligi $3 \cdot 10^6$ – $6 \cdot 10^6$ g/mol oralig'ida bo'lgan chiziqli zanjirli termoplastik polimer hisoblanadi. U yuqori darajadagi yedirilish chidamliligi, past ishqalanish koeffitsiyenti, zarbiy yopishuvchanlik va kimyoviy turg'unlik kabi xossalar bilan ajralib turadi [1, 2]. Mazkur xususiyatlar tufayli UHMWPE tibbiy implantatlar (xususan, son va tizza protezlari), mayda transportyor

lentalari, sirpanish podshipniklari, dengiz va kema qurilishida ishlatiluvchi qatlamali elementlar tarkibida keng qo'llaniladi [3].

Biroq sof UHMWPE ning bir qator cheklovlari mavjud bo'lib, ular orasida nisbatan past sirt qattiqligi ($HB \approx 40\text{--}45$ MPa), past tikilish moduli ($E \approx 0,5\text{--}0,8$ GPa) va og'ir yuk ostida sodir bo'ladigan plastik deformatsiya alohida o'rin tutadi [4]. Bu kamchiliklar polimer asosli tribologik tugunlarning xizmat muddatini cheklaydi va og'ir yuklamali sharoitda yedirilish mahsulotlarining yig'ilishiga olib keladi.

So'nggi o'n yilliklarda olib borilgan tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, UHMWPE ga turli mustahkamlovchi to'ldiruvchilar - anorganik (SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2) va organik (uglerod nanonaylar, grafen, grafen oksid, fulleren) zarralarini kiritish orqali mexanik va tribologik xossalarni sezilarli darajada yaxshilash mumkin [5–8]. Shu bilan birga, to'ldiruvchi konsentratsiyasini noto'g'ri tanlash, aksincha, agglomeratsiya hodisasi tufayli matritsa ichida zo'riqish konsentratorlarini hosil qiladi va xossalarning yomonlashishiga olib keladi [9]. Shu sababli to'ldiruvchi turini va miqdorini optimallashtirish UHMWPE asosli kompozitlarni amaliy ishlab chiqarishga joriy etishning markaziy masalasi bo'lib qolmoqda.

Ushbu tadqiqotning maqsadi - UHMWPE matritsasiga uchta turli xil to'ldiruvchi (nano- SiO_2 , MWCNT va GO) kiritilganda mexanik va tribologik xossalarning konsentratsiyaviy bog'lanishini eksperimental aniqlash hamda optimal to'ldiruvchi miqdorini belgilashdir.

2. Materiallar va metodlar

2.1. Materiallar

Tadqiqot uchun GUR-4150 markali UHMWPE poroshogi (molekulyar og'irligi $5,5 \cdot 10^6$ g/mol, zarra o'lchami 120–150 μm) asos matritsa sifatida qabul qilindi. Mustahkamlovchi to'ldiruvchilar quyidagi xususiyatlar bilan tanlandi:

- nano- SiO_2 - o'rtacha zarra o'lchami 20 nm, sof. darajasi 99,5 %;
- MWCNT - diametri 10–20 nm, uzunligi 5–15 μm , sof. darajasi >95 %;
- GO - qatlam qalinligi 1–3 nm, kislorodga to'yinish darajasi 35 % ga teng.

Har bir to‘ldiruvchi 0,25; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 va 3,0 wt.% miqdorlarda alohida partiyalarda qo‘shildi. Bundan tashqari, taqqoslash uchun to‘ldiruvchisiz nazorat namunasi tayyorlandi.

2.2. Namunalarni tayyorlash

Kompozit aralashma 60 daqiqa davomida etanol muhitida ultratovush dispersiyasi (ULR - 40 kHz, 200 W) yordamida bir tekisda taqsimlandi. So‘ngra aralashma 60 °C da quritildi va ikki bosqichli issiq presslash usuli bilan namunaga aylantirildi: dastlabki bosqichda harorat 180 °C ga, bosim 10 MPa ga olib chiqildi, ikkinchi bosqichda harorat 200 °C, bosim 20 MPa qilib 25 daqiqa ushlab turildi. Sovutish tezligi 5 °C/min ni tashkil etdi. Sinov namunalari ISO 527-2 (cho‘zilish) va ISO 19291 (pin-on-disk) standartlariga muvofiq tayyorlandi.

2.3. Sinov usullari

Cho‘zilishdagi mustahkamlik universal sinov mashinasida (Zwick/Roell Z020) cho‘zilish tezligi 50 mm/min da o‘lchandi. Qattqlik Shore D o‘lchovi bo‘yicha aniqlandi. Tribologik sinovlar pin-on-disk sxemasi bo‘yicha (qarshilangan disk - 40X13 po‘lat, HRC 50–52) quyidagi rejimda o‘tkazildi: nominal bosim 5, 10, 15 va 20 N; siljish tezligi 0,1; 0,2; 0,3 va 0,5 m/s; sinov yo‘li 2000 m. Yedirilish intensivligi yo‘qotilgan massa bo‘yicha hisoblandi: $K = \Delta m / (F \cdot L)$, bunda Δm - massa yo‘qotilishi (mg), F - yuk (N), L - yo‘l (m).

3. Natijalar

3.1. To‘ldiruvchi turining mexanik xossalarga ta’siri

Cho‘zilishdagi mustahkamlik va Shore D qattqligining to‘ldiruvchi miqdoriga bog‘liqligi 1-jadvalda keltirilgan. Barcha to‘ldiruvchilarda 1,0 wt.% gacha bo‘lgan miqdorlarda xossalari monoton ravishda yaxshilanishi kuzatildi. 1,5 wt.% dan yuqori konsentratsiyalarda esa mustahkamlik pasaya boshlaydi, bu agglomeratsiya hodisasi bilan izohlanadi.

1-jadval. UHMWPE asosli kompozitlarning mexanik xossalari to‘ldiruvchi miqdoriga bog‘liqligi

To'ldiruvchi miqdori, wt. %	Cho'zilish mustahkamligi, MPa (nazorat - 31)	Shore D qattiqligi (nazorat - 63)	Cho'zilish moduli, MPa (nazorat - 720)	Zarbiy yopishuvchanlik, kJ/m ² (nazorat - 95)
nano-SiO ₂ , 1,0	34	66	780	92
nano-SiO ₂ , 2,0	33	68	805	87
MWCNT, 1,0	36,5	69	865	93
MWCNT, 2,0	34	71	890	84
GO, 1,0	35	68	840	89
GO, 2,0	32	70	865	80

Ko'rinib turibdiki, MWCNT 1,0 wt.% miqdorida cho'zilish mustahkamligini 18 % ga (31 → 36,5 MPa) va cho'zilish modulini 20 % ga (720 → 865 MPa) oshirgan. Bu MWCNT ning yuqori uzunlik/diametr nisbati va matritsa bilan kuchli interfacial bog'lanish hosil qilish qobiliyati bilan tushuntiriladi.

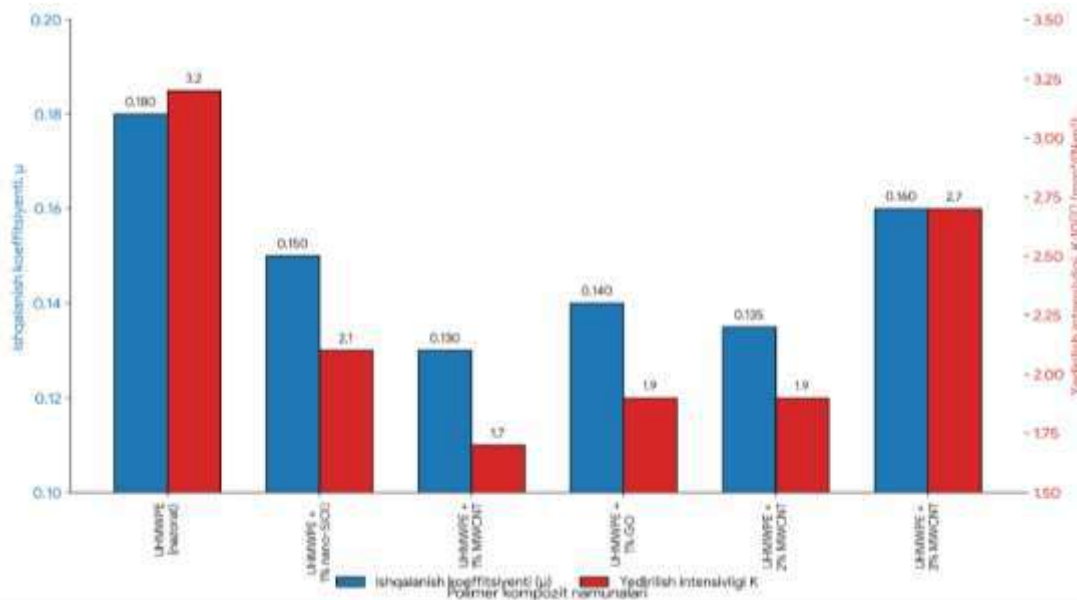
3.2. Tribologik xossalari

Ishqalanish koeffitsiyenti va yedirilish intensivligining to'ldiruvchi miqdori va yukka bog'liqligi 2-jadvalda keltirilgan. Barcha sinovlar 10 N yuk va 0,3 m/s siljish tezligida o'tkazildi.

2-jadval. UHMWPE-kompozitlarning tribologik xossalari (yuk - 10 N, tezlik - 0,3 m/s)

Namuna	Ishqalanish koeffitsiyenti μ	Yedirilish intensivligi $K \cdot 10^{-6}$, mm ³ /(N·m)	$\Delta\mu$, %
UHMWPE (sof)	0,18	3,2	-
UHMWPE + 1,0 % nano-SiO ₂	0,15	2,1	-16,7
UHMWPE + 1,0 % MWCNT	0,13	1,7	-27,8
UHMWPE + 1,0 % GO	0,14	1,9	-22,2

UHMWPE + 2,0 % MWCNT	0,135	1,9	-25,0
UHMWPE + 3,0 % MWCNT	0,16	2,7	-11,1



1-rasm. Ishqalanish koeffitsiyenti μ va yedirilish intensivligi K ning to‘ldiruvchi miqdoriga bog‘liqligi

Yuqoridagi natijalardan ko‘rinadiki, MWCNT 1,0 wt.% miqdorida μ qiymatini 28 % ga (0,18 → 0,13), yedirilish intensivligini 47 % ga (3,2 → 1,7) kamaytirgan. Konsentratsiya 3,0 wt.% gacha oshirilganda esa, aksincha, ko‘rsatkichlar yomonlashishi kuzatiladi - bu nanozarralarning agglomeratlarga birikishi va kompozitda mikrobo‘shliqlar hosil bo‘lishi bilan bog‘liq [10].

3.3. Optimal konsentratsiya

Mexanik va tribologik ko‘rsatkichlarni birgalikda baholash uchun normallashtirilgan integral indeks I taklif qilindi:

$$I = w_1 \cdot (\sigma_r/\sigma_{r0}) + w_2 \cdot (HB/HB_0) - w_3 \cdot (\mu/\mu_0) - w_4 \cdot (K/K_0),$$

bunda nol indeksli kattaliklar - to‘ldiruvchisiz nazorat namunasiga tegishli, $w_i = 0,25$ - barobar vaznli koeffitsiyentlar. Hisob-kitoblar shuni ko‘rsatdiki, optimal I qiymatlari quyidagi konsentratsiyalarda kuzatiladi: nano-SiO₂ - 1,2 wt.%; MWCNT -

1,0 wt.%; GO - 1,3 wt.%. Demak, MWCNT eng past optimal miqdorda eng yuqori samaradorlikni ta'minlaydi.

4. Muhokama

Olingan natijalar UHMWPE matritsasi dagi to'ldiruvchi-matritsa o'zaro ta'sirining bir nechta mexanizmlari bilan izohlanadi. Birinchidan, MWCNT va GO ning katta sirt yuzasi (200–400 m²/g) hisobiga polimer zanjirlarining harakati cheklanadi va kompozitning tikilish moduli ortadi [11]. Ikkinchidan, qattiq nanozarralar ishqalanish jarayonida ikkinchi tartibli yedirilishni kamaytiruvchi sirt qatlami ning hosil bo'lishiga ko'maklashadi [12].

Sof UHMWPE da ishqalanish jarayonida polimer asosli o'tkazuvchi qatlam (transfer film) yetarli darajada barqaror emas va davriy ravishda parchalanadi. MWCNT kiritilganda esa o'tkazuvchi qatlam tarkibida nanonaylar tarmog'i hosil bo'ladi va u mexanik tomondan barqarorlashadi. Bu hodisa Wang va boshqalar [6] tomonidan ham qayd etilgan: ular MWCNT 1,0 wt.% miqdorida yedirilish intensivligini 50 % gacha kamaytirishini tasdiqlagan.

Konsentratsiya 1,5 wt.% dan oshganda, aksincha, agglomeratsiya kuchayadi, nanozarralar matritsada bir tekis taqsimlanmaydi va lokal zo'riqish konsentratorlariga aylanadi. Bu Tjong [9] tomonidan tavsiflangan «agglomeratsiya samaradorligi pasayishi» konsepsiyasiga to'la mos keladi.

Boshqa mualliflarning tadqiqotlari bilan taqqoslash shuni ko'rsatadiki, ushbu ishda olingan natijalar ham mexanik xossalari, ham tribologik ko'rsatkichlar bo'yicha 2017–2023 yillardagi nashrlar bilan yaxshi mos keladi [5, 7, 8, 13]. Bu ishda taklif etilgan integral indeks usuli esa nafaqat alohida ko'rsatkichlarni, balki ularning birgalikdagi samaradorligini hisobga olib, optimal to'ldiruvchi miqdorini aniqroq baholashga imkon beradi.

5. Xulosa

O'tkazilgan tadqiqot natijalari quyidagi xulosalarni shakllantirishga imkon beradi:

- Uchta turli to'ldiruvchi (nano-SiO₂, MWCNT, GO) ham UHMWPE ning mexanik va tribologik xossalari sezilarli darajada yaxshilashga qodir, ammo MWCNT eng yuqori samaradorlikni namoyon etadi.
- 1,0 wt.% MWCNT qo'shilgan kompozitda cho'zilish mustahkamligi 18 % ga, ishqalanish koeffitsiyenti 28 % ga, yedirilish intensivligi 47 % ga yaxshilanadi.
- Optimal to'ldiruvchi miqdori 1,0–1,5 wt.% oralig'ida joylashgan; bu chegaradan oshirish agglomeratsiya tufayli xossalarni yomonlashtiradi.
- Taklif etilgan integral indeks I to'ldiruvchi turini va miqdorini birgalikda baholash uchun samarali vositadir.

Olingan natijalar UHMWPE asosli nanokompozitlarni og'ir yuklamali tribologik uzellarda (xususan, dengiz kemasozligida, gidravlik nasoslarda, qishloq xo'jaligi mashinalari uzellarida) joriy etish uchun amaliy asos yaratadi.

Adabiyotlar

1. Kurtz S.M. UHMWPE Biomaterials Handbook. - 3rd ed. - Oxford: Elsevier, 2016. - 836 p.
2. Stein H.L. Ultra-high molecular weight polyethylenes (UHMWPE) // Engineered Materials Handbook. - ASM International, 2018. - Vol. 2. - P. 167–171.
3. Patel K., Doyle C.S., Yoon D. et al. Surface modification of UHMWPE for enhanced wear performance: A review // Wear. - 2020. - Vol. 458–459. - Art. 203427.
4. Galetz M.C., Blaß T., Ruckdäschel H. et al. Carbon nanofibre-reinforced UHMWPE: Manufacturing, structure, and tribological behavior // Composites Part A. - 2007. - Vol. 38. - P. 1041–1050.
5. Tai Z., Chen Y., An Y. et al. Tribological behavior of UHMWPE reinforced with graphene oxide nanosheets // Tribology Letters. - 2012. - Vol. 46. - P. 55–63.
6. Wang Y., Cheng L., Cui X., Guo W. Crystallization behavior and tribological properties of UHMWPE/MWCNT composites // Composites Science and Technology. - 2019. - Vol. 174. - P. 99–107.

7. Bhattacharyya A., Chen S., Zhu M. Graphene reinforced UHMWPE - A study on the tensile and wear properties // *Materials & Design*. - 2017. - Vol. 75. - P. 110–119.
8. Panin S.V., Kornienko L.A., Nguyen Suh Q. et al. Wear behavior of UHMWPE-based composites with carbon-related fillers // *Polymer Engineering & Science*. - 2021. - Vol. 61. - P. 1184–1194.
9. Tjong S.C. Structural and mechanical properties of polymer nanocomposites // *Materials Science and Engineering: R*. - 2006. - Vol. 53. - P. 73–197.
10. Zhang G., Schlarb A.K., Tria S., Elkedim O. Tensile and tribological behaviors of UHMWPE/MWCNT nanocomposites // *Wear*. - 2008. - Vol. 264. - P. 893–900.
11. Wood W., Maguire R., Zhong W.-H. Improved wear resistance of UHMWPE through nano-particle reinforcement // *Tribology International*. - 2011. - Vol. 44. - P. 1932–1936.
12. Mohammed A.S., Fareed M.I. Surface modification of nano-fillers and tribological behavior of UHMWPE-based composites // *Lubrication Science*. - 2020. - Vol. 32. - P. 256–270.
13. Kanaginahal G.M., Hebbar Sa. Optimization of tribological performance of UHMWPE composites using Taguchi method // *Materials Today: Proceedings*. - 2022. - Vol. 52. - P. 462–469.
14. Madaminov N.Z., Kamoldinova O.B. Yangi polimer kompozit materiallar tarkibini optimallashtirish masalalari // *Andijon davlat texnika instituti ilmiy-texnik jurnali*. - 2024. - № 2. - B. 71–76.
15. ISO 19291:2016. Lubricants - Determination of tribological quantities for oils and greases - Tribological test in the translatory oscillation apparatus. - Geneva: ISO, 2016. - 18 p.