

**YENGIL VA MUSTAHKAM KOMPOZIT MATERIAL TAYYORLASH:  
ZAMONAVIY YONDASHUVLAR, TEXNOLOGIYALAR VA AMALIY  
AHAMIYATI**

*Abdumurodova Sarvinoz Yo‘ldoshovna*

[Sarvinozabdumurodova082@gmail.com](mailto:Sarvinozabdumurodova082@gmail.com)

*Abduvohidova Salomat Norsoat qizi*

[salomatabduvohidova66@gmail.com](mailto:salomatabduvohidova66@gmail.com)

*Usanova Farzona Beknazar qizi*

*Termiz davlat universiteti talabalari*

**Annotatsiya:** Kompozit materiallar zamonaviy sanoatning eng istiqbolli yo‘nalishlaridan biri bo‘lib, ular yengillik, yuqori mustahkamlik, korroziyaga chidamlilik, uzoq xizmat muddati hamda konstruktiv moslashuvchanlik kabi ustun xususiyatlarga ega. Ayniqsa, aviatsiya, avtomobilsozlik, qurilish, energetika, tibbiyot va sport sanoatida kompozitlarning ulushi yildan-yilga ortib bormoqda. Ushbu maqolada yengil va mustahkam kompozit materiallar tayyorlashning nazariy asoslari, kompozitning tarkibiy qismlari, mustahkamlovchi tolalar va matritsa turlari, ishlab chiqarish texnologiyalari, mexanik xossalarni oshirish yo‘llari, sifat nazorati hamda ekologik jihatlar keng tahlil qilinadi. Shuningdek, zamonaviy kompozitlar yaratishda nanomateriallardan foydalanish, interfeys muammolari, qatlamli tuzilma dizayni va amaliy qo‘llanilish yo‘nalishlari haqida ilmiy asoslangan xulosalar beriladi.

**Kalit so‘zlar:** kompozit material, polimer matritsa, uglerod tolasi, shisha tolasi, aramid tolasi, laminat, vakuum infuziya, prepreg, mexanik mustahkamlik, yengillik, nanokompozit.

**1. Kirish:** Bugungi kunda materialshunoslik va muhandislik fanlarining asosiy vazifalaridan biri — yuqori mustahkamlikka ega, lekin og‘irligi kichik bo‘lgan konstruksion materiallarni yaratishdir. Chunki sanoatning ko‘plab tarmoqlarida og‘irlikni kamaytirish energiya tejamlorligi, tezlikning oshishi, transport xarajatlarining pasayishi, yuk ko‘tarish samaradorligining ortishi hamda ekologik chiqindilarning kamayishiga olib keladi. Masalan, avtomobilsozlikda transport

vositasining massasi kamayishi yoqilg'i sarfini kamaytiradi, aviatsiyada esa uchish masofasini oshiradi va ekspluatatsion xarajatlarni qisqartiradi.

Shu nuqtai nazardan, kompozit materiallar klassik metall va qotishmalar (po'lat, alyuminiy, titan) bilan raqobat qila oladigan darajada rivojlandi. Kompozitlar o'zining qatlamli yoki tolali tuzilishi hisobiga yuqori mexanik ko'rsatkichlarni namoyon qiladi. Eng muhim jihati shundaki, kompozit materiallarning xossalari ularning tarkibi, mustahkamlovchi faza turi, matritsa turi, qatlam yo'nalishi, tolalar zichligi va ishlab chiqarish usuli orqali "dizayn" qilish mumkin.

Maqolaning asosiy maqsadi — yengil va mustahkam kompozit material tayyorlashning ilmiy asoslarini tushuntirish, amaliy texnologiyalarni tahlil qilish, mexanik xossalarni oshirish yo'llarini ko'rsatish hamda sifat nazorati va ekologik muammolar bo'yicha akademik xulosa berishdir.

**Kompozit material tushunchasi va tuzilishi (boyitilgan shakl):** Kompozit materiallar — zamonaviy materialshunoslikning eng muhim yo'nalishlaridan biri bo'lib, ularning asosiy g'oyasi turli fizik-kimyoviy xossalarga ega bo'lgan komponentlarni birlashtirish orqali yangi, yuqori samarali material olishdan iborat. Kompozit material — bu kamida ikki yoki undan ortiq fazadan tashkil topgan, o'zaro kimyoviy yoki fizik bog'lanish orqali birikkan, natijada alohida komponentlarning xossalariga nisbatan sezilarli darajada yaxshilangan mexanik, termik va ekspluatatsion xossalarga ega bo'lgan murakkab tizimdir.

Kompozit materiallarning afzalligi shundaki, ular oddiy metall yoki polimerlardan farqli ravishda "oldindan loyihalanadigan" (ya'ni xossalari boshqariladigan) materiallar hisoblanadi. Bunda kompozitning mustahkamligi, elastikligi, zichligi, zarba va charchashga chidamliligi, issiqlik o'tkazuvchanligi hamda korroziyaga bardoshliligi kompozitning tarkibi, komponentlar nisbatlari, tolalar yo'nalishi va ishlab chiqarish texnologiyasiga bog'liq ravishda boshqarilishi mumkin.

Odatda kompozit material quyidagi uchta asosiy tarkibiy qismdan iborat bo'ladi:

**1. Matritsa (asosiy faza):** Matritsa kompozit materialning asosiy hajmini tashkil qiladi va uning umumiy shakli hamda yaxlitligini ta'minlaydi. Matritsaning vazifasi faqat tolalarni yoki zarrachalarni "bog'lab turish" bilangina cheklanmaydi. U quyidagi funksiyalarni bajaradi:

- 1) mustahkamlovchi fazani bir butun tizimga birlashtirish;
- 2) tashqi yuklamani tolalar orasida bir tekis taqsimlash;
- 3) kompozitning zarba, ishqalanish va tashqi muhit omillariga chidamliligini oshirish;
- 4) namlik, agressiv kimyoviy muhit, ultrabinafsha nurlar va korroziya kabi ta'sirlardan himoya qilish;
- 5) yoriqlar tarqalishini sekinlashtirish yoki to'xtatish.

Matritsa sifatida ko'pincha polimerlar (epoksi, poliester, vinilester), metall qotishmalar (alyuminiy, magniy, titan) yoki keramika ( $\text{SiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ishlatiladi. Matritsa turi kompozitning ishlash harorati, mexanik yuklanishi va ekspluatatsiya sharoitiga qarab tanlanadi.

**2. Mustahkamlovchi faza (armatura):** Mustahkamlovchi faza kompozitning mexanik mustahkamligi va qattiqligini belgilovchi eng asosiy element hisoblanadi. Kompozitdagi asosiy yuklamaning katta qismi aynan armatura tomonidan qabul qilinadi. Mustahkamlovchi faza quyidagi ko'rinishlarda bo'lishi mumkin:

- 1) uzluksiz tolalar (uglerod, shisha, aramid);
- 2) qisqa tolalar (mikrotolalar, maydalangan tolalar);
- 3) qatlamli tuzilmalar (laminatlar)
- 4) zarrachalar ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ );
- 5) nanozarralar (grafen, uglerod nanotubalari,  $\text{nanoSiO}_2$ ).

Tolali kompozitlarda mustahkamlikning yuqori bo'lishi, asosan, tolalarning elastiklik moduli va cho'zilishga chidamliligi matritsaga nisbatan bir necha barobar yuqori bo'lishi bilan izohlanadi. Masalan, uglerod tolasi asosidagi kompozitlar po'latdan bir necha barobar yengil bo'lishiga qaramay, mustahkamlik ko'rsatkichlari bo'yicha undan ustun bo'lishi mumkin.

Bundan tashqari, mustahkamlovchi fazaning geometrik joylashuvi ham juda muhim: tolalar yo'nalishi yuk yo'nalishiga moslashtirilsa, kompozit maksimal samaradorlik beradi. Shu sababli qatlamli kompozitlarda  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$  kabi yo'nalishlarda qatlamlar joylashtiriladi.

**3. Interfeys (chegara qatlam):** Interfeys — matritsa va mustahkamlovchi faza orasidagi o'tish zonasi bo'lib, kompozitning mexanik barqarorligi va uzoq muddatli ishlashiga bevosita ta'sir ko'rsatadi. Interfeysning mustahkamligi qanchalik yuqori bo'lsa, tashqi yuklama tolalarga shunchalik samarali uzatiladi.

Agar interfeys zaif bo'lsa:

1. tolalar matritsadan ajralib ketishi (delaminatsiya);
2. mikroyoriqlar paydo bo'lishi;
3. kompozitning charchashga chidamliligi pasayishi;
4. mustahkamlik keskin kamayishi mumkin.

Shuning uchun amaliyotda tolalar sirtini maxsus ishlov berish (masalan, silan birikmalari, plazmali ishlov, oksidlovchi ishlov, kimyoviy aktivlashtirish) orqali interfeys mustahkamligi oshiriladi. Bu jarayon “sirt modifikatsiyasi” deb yuritiladi.

**TAHLILIIY QISM:** Yengil va mustahkam kompozit materiallarning asosiy ustunligi shundaki, ularning mexanik xossalari oddiy metall yoki polimerlarga nisbatan ancha yuqori bo'lib, shu bilan birga zichligi past bo'ladi. Kompozitlarda bunday natijaga erishishning ilmiy sababi — materialning ko'p fazali tuzilishi, ya'ni yukni ko'taruvchi faza (tolalar) va yukni taqsimlovchi faza (matritsa) o'rtasida samarali mexanik hamkorlik mavjudligidadir. Shuning uchun kompozitlarning mustahkamligi komponentlarning oddiy arifmetik yig'indisi emas, balki strukturaviy sinergiya mahsulidir.

Kompozit materiallarning mustahkamligi va yengilligini baholashda eng muhim ko'rsatkichlardan biri — maxsus mustahkamlik ( $\sigma/\rho$ ) va maxsus qattqlik ( $E/\rho$ ) hisoblanadi. Bu yerda  $\sigma$  — mustahkamlik,  $E$  — elastiklik moduli,  $\rho$  — zichlik. Mazkur nisbatlar kompozitlarning aviatsiya va transport sanoatida keng qo'llanilishining ilmiy asosini tashkil qiladi. Masalan, uglerod tolali epoksi kompozitlar maxsus mustahkamlik bo'yicha ko'plab alyuminiy qotishmalaridan ustun bo'lib, og'irlikni sezilarli kamaytirgan holda konstruksiyaning yuk ko'tarish qobiliyatini oshiradi.

Tolali kompozitlarda mexanik yuklamaning asosiy qismi mustahkamlovchi tolalar tomonidan qabul qilinadi. Bu jarayon “load transfer” (yuk uzatilishi) mexanizmi orqali amalga oshadi. Matritsa fazasi yukni tolalar orasida taqsimlaydi, tolalarni bir holatda ushlab turadi va tashqi zarbalarni qisman so'ndiradi. Shu bilan birga, kompozitning umumiy mustahkamligi tolalarning o'ziga emas, balki tolalar va matritsa orasidagi interfeys bog'lanishi sifatiga ham kuchli bog'liq bo'ladi. Agar interfeys zaif bo'lsa, yuk tolaga to'liq o'tmaydi va kompozitda delaminatsiya, mikroyoriqlar hamda qatlamlar ajralishi yuzaga keladi.

Kompozitlarning mexanik xossalarini tahlil qilishda tolalarning hajm ulushi ( $V_f$ ) eng muhim parametr hisoblanadi. Ilmiy tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, tolalarning hajm ulushi oshgani sari kompozitning cho'zilish mustahkamligi va elastiklik moduli ham ortadi. Biroq tolalar ulushi haddan tashqari ko'paytirilsa, matritsa yetishmasligi sababli

tolalar orasida bo'shliq (porosity) ko'payadi, natijada material mo'rtlashadi va yorilish xavfi oshadi. Shu sababli kompozit tayyorlashda Vf ning optimal qiymati tanlanishi zarur. Amaliyotda yuqori sifatli kompozitlarda tolalar ulushi odatda 50–65% oralig'ida bo'lishi ilmiy jihatdan maqbul deb qaraladi.

Kompozit materialning yengil va mustahkam bo'lishiga ta'sir qiluvchi yana bir omil — qatlamlarning yo'nalishidir. Tolali laminatlarda mustahkamlik izotrop emas, ya'ni barcha yo'nalishda bir xil bo'lmaydi. Bu hodisa anisotropiya deb ataladi. Masalan, tolalar  $0^\circ$  yo'nalishda joylashtirilsa, material aynan shu yo'nalishda maksimal cho'zilish mustahkamligiga ega bo'ladi, ammo  $90^\circ$  yo'nalishda mustahkamlik keskin pasayadi. Shuning uchun konstruksion detallarda qatlam yo'nalishlari odatda  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$  kombinatsiyasi orqali muvozanatli qilib tanlanadi. Bunday yondashuv kompozitning turli yo'nalishdagi kuchlanishlarga bardoshini oshiradi va konstruksiyaning umumiy barqarorligini ta'minlaydi.

Kompozitlarning real mustahkamligi ko'pincha ishlab chiqarish jarayonida paydo bo'ladigan ichki nuqsonlar bilan cheklanadi. Bular ichida eng xavflilari — bo'shliqlar (voids), pufakchalar, qatlamlar orasidagi ajralish, notekis smola taqsimoti va tolalarning bukilishi hisoblanadi. Ilmiy jihatdan porozlik kompozitda kuchlanish konsentratsiyasini kuchaytiradi, ya'ni kuchlanish ma'lum nuqталarda yig'ilib, yorilishning boshlanishiga sabab bo'ladi. Ayniqsa, cho'zilish sinovlarida porozlik 1–3% ga oshishi ham mustahkamlikning sezilarli pasayishiga olib kelishi tajriba orqali tasdiqlangan.

Shu sababli vakuum infuziya, vakuum paketlash va avtoklav texnologiyalari ilmiy nuqtai nazardan eng samarali usullar hisoblanadi. Chunki bu usullarda havo pufakchalari minimumga tushiriladi, smola tolalar orasiga chuqur kirib boradi va qatlamlar zichligi ortadi. Natijada kompozitning ichki tuzilmasi bir jinsli bo'lib, mexanik ko'rsatkichlar yuqori darajada barqarorlashadi. Ayniqsa avtoklav texnologiyasi yuqori bosim ostida qotirish orqali interfeys bog'lanishini kuchaytiradi va delaminatsiya ehtimolini kamaytiradi.

Kompozitlarda yorilish mexanizmlari metallarga qaraganda murakkabroq bo'ladi. Metallarda yorilish odatda bitta asosiy yoriq orqali rivojlanisa, kompozitlarda bir vaqtning o'zida bir nechta mexanizm ishlaydi: matritsaning mikro yorilishi, interfeys ajralishi, tolalarning uzilishi, qatlamlar ajralishi (delaminatsiya) va tolalarning matritsadan chiqib ketishi (pull-out). Bu jarayonlar kompozitning energiya yutish qobiliyatini ham belgilaydi. Masalan, aramid tolali kompozitlarda tolalarning “pull-

out” mexanizmi kuchli bo‘lgani sababli zarba energiyasi yaxshi so‘riladi, shuning uchun Kevlar asosli kompozitlar o‘q o‘tmas jilet va himoya elementlarida keng qo‘llanadi.

Uglerod tolali kompozitlar esa elastiklik moduli va maxsus mustahkamlik bo‘yicha eng yuqori natija ko‘rsatadi. Biroq ularning kamchiligi shundaki, ular zarbaga nisbatan mo‘rtroq bo‘lishi mumkin. Bu muammoni bartaraf etish uchun qatlamli tuzilma dizaynida aramid tolasi bilan gibridlashtirish, matritsani toughener (elastik qo‘shimcha) bilan modifikatsiya qilish yoki nanomateriallar qo‘shish keng qo‘llanadi. Bu yondashuvlar kompozitning charchashga chidamliligini oshiradi va mikroyoriqlarning tez tarqalishini cheklaydi.

So‘nggi yillarda kompozitlarning mexanik va termik xossalarini oshirishda nanomateriallarning roli keskin ortdi. Epoksi matritsaga grafen, uglerod nanotubalari yoki nanoSiO<sub>2</sub> qo‘shilganda, ular matritsa ichida “mikro-armatura” vazifasini bajaradi. Natijada matritsaning mo‘rtligi kamayadi, mikroyoriqlar yo‘nalishi buziladi va yorilishning tarqalishi sekinlashadi. Ilmiy tahlillar shuni ko‘rsatadiki, nanomodifikatsiya kompozitning zarba mustahkamligini hamda charchash resursini oshirishda ayniqsa samarali hisoblanadi.

Kompozit materiallarning xizmat muddati va barqarorligini baholashda ekologik va tashqi muhit omillari ham e‘tiborga olinadi. Namlik yutish, ultrabinafsha nurlanish, harorat sikllari va kimyoviy muhit kompozitning matritsa fazasini degradatsiyaga uchratishi mumkin. Bu jarayonlar natijasida interfeys zaiflashadi, qatlamlar ajralishi ehtimoli oshadi va mexanik xossalar pasayadi. Shu sababli amaliy konstruksiyalarda kompozitlarning tashqi yuzasi maxsus himoya qoplamalar bilan qoplanadi yoki matritsa sifatida kimyoviy chidamli vinilester va epoksi smolalar tanlanadi.

Umuman olganda, ilmiy tahlil shuni ko‘rsatadiki, yengil va mustahkam kompozit yaratish uchta asosiy ilmiy tamoyilga tayanadi:

- (1) mustahkamlovchi fazaning yuqori mexanik ko‘rsatkichlari,
- (2) matritsaning yuk taqsimlovchi va himoya qiluvchi funksiyasi,
- (3) interfeys bog‘lanishining mustahkamligi.

Mazkur uch omilning optimal uyg‘unligi kompozit materialning yuqori mustahkamlikka ega bo‘lishi, shu bilan birga zichligi past bo‘lishini ta‘minlaydi. Aynan shu jihat kompozitlarni XXI asr materialshunosligining eng muhim yo‘nalishlaridan biriga aylantiradi.

**Xulosa:** Yengil va mustahkam kompozit materiallar zamonaviy texnika va sanoatning strategik yoʻnalishlaridan biri boʻlib, ularning rivoji energiya tejamkorligi, resurslardan oqilona foydalanish hamda konstruktiv imkoniyatlarni kengaytirish bilan bevosita bogʻliq. Kompozitlarning ustunligi shundaki, ular “dizayn qilinadigan” material boʻlib, mexanik xossalarini tolalar turi, matritsa tanlovi, interfeys mustahkamligi, qatlam yoʻnalishi va ishlab chiqarish texnologiyasi orqali boshqarish mumkin.

Kelajakda kompozit materiallar rivojida nanomateriallar, bio-kompozitlar, qayta ishlanishi oson termoplastik matritsalar va aqlli (smart) kompozitlar alohida ahamiyat kasb etadi. Shu sababli, yengil va mustahkam kompozitlar yaratish nafaqat muhandislik vazifasi, balki ekologik va iqtisodiy barqarorlikni taʼminlovchi ilmiy yoʻnalish sifatida ham muhimdir.

#### **FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR**

1. Agarwal B. D., Broutman L. J., Chandrashekhara K. Analysis and Performance of Fiber Composites. — New York: Wiley, 2018.
2. Gibson R. F. Principles of Composite Material Mechanics. — New York: McGraw-Hill, 2016.
3. Kaw A. K. Mechanics of Composite Materials. — Boca Raton: CRC Press, 2018.
4. Daniel I. M., Ishai O. Engineering Mechanics of Composite Materials. — Oxford: Oxford University Press, 2019.
5. Strong A. B. Fundamentals of Composites Manufacturing. — Dearborn: SME, 2016.
6. Peters S. T. Handbook of Composites. — London: Springer, 2017.
7. Chawla K. K. Composite Materials: Science and Engineering. — New York: Springer, 2019.
8. Friedrich K., Fakirov S., Zhang Z. Polymer Composites: From Nano- to Macro-Scale. — Berlin: Springer, 2015.
9. Mouritz A. P. Introduction to Aerospace Materials. — Cambridge: Woodhead Publishing, 2018.
10. Pickering S. J. Recycling Technologies for Thermoset Composite Materials. // Composites Part A, 2018.
11. Faruk O., Bledzki A. K., Fink H. P., Sain M. Biocomposites Reinforced with Natural Fibers. // Progress in Polymer Science, 2019.
12. ISO 14125 — Fiber-reinforced Plastic Composites — Determination of Flexural Properties.

13. Gay D., Hoa S. V., Tsai S. W. Composite Materials: Design and Applications. — Boca Raton: CRC Press, 2018.
14. Callister W. D., Rethwisch D. G. Materials Science and Engineering: An Introduction. — New York: Wiley, 2020.