

**KOMPOZIT MATERIALLARDA MATRITSA VA MUSTAHKAMLOVCHI
O'RTASIDAGI INTERFEYS TUZILISHINI BOSHQARISH USULLARI**

Mengliyeva Anora Narzulla qizi

Navoiy davlat universiteti tayanch doktoranti

anoramengliyeva9@gmail.com

Kamalova Dilnavoz Ixtiyorovna

Navoiy davlat universiteti professori

kamalova.di@mail.ru

Annotatsiya. Ushbu maqolada tolali polimer kompozit materiallarda (FRP) matritsa va mustahkamlovchi tolalar o'rtasidagi interfeys va interfaza tuzilishi, ularning mexanik xossalarga ta'siri hamda yuk uzatish mexanizmlari tahlil qilingan. Interfeysning buzilishi, mikro yoriqlar hosil bo'lishi va tashqi muhit ta'siri natijasida kompozit materiallarning ishlash xususiyatlari o'zgarishi yoritilgan. Shuningdek, interfeysni tavsiflashda qo'llaniladigan nazariy modellar va eksperimental usullar ko'rib chiqilgan.

Kalit so'zlar: tolali polimer kompozitlar, FRP, interfeys, interfaza, matritsa, mustahkamlovchi tolalar, yuk uzatish, mikro yoriqlar, Cottrell–Kelly–Tyson modeli, mexanik xossalalar.

Аннотация: В статье анализируются структура интерфейса и интерфазы между матрицей и армирующими волокнами в полимерных композиционных материалах (FRP), а также их влияние на механические свойства и механизмы передачи нагрузки. Рассматриваются процессы разрушения интерфейса, образование микротрещин и влияние внешней среды. Также обсуждаются теоретические модели и экспериментальные методы.

Ключевые слова: FRP, интерфейс, интерфаза, матрица, армирующие волокна, передача нагрузки, микротрещины, модель Коттрелла–Келли–Тайсона.

Abstract: This article analyzes the interface and interphase structure between matrix and reinforcing fibers in fiber-reinforced polymer (FRP) composites, their influence on mechanical properties and load transfer mechanisms. Interface degradation, microcrack formation, and environmental effects are discussed. Theoretical models and experimental methods are also reviewed.

Keywords: FRP, interface, interphase, matrix, reinforcing fibers, load transfer, microcracks, Cottrell–Kelly–Tyson model

Kirish. Dunyo tabiat tomonidan taqdim etilgan turli xil materiallar bilan to'la bo'lib, insoniyat turli davrlarda turli materiallardan foydalanish imkoniyatiga ega bo'lgan. Tadqiqotchilar tosh davridan tortib alyuminiy davrigacha va hozirgi kunda polimerlar davrigacha bo'lgan turli materiallar bilan ishlaganlar.

Bu o'zgarishlarning barchasi insonning atrof-muhitga ta'siri natijasida yuzaga kelgan bo'lib, zamonaviy ehtiyoj va qo'llanilishlarga mos keluvchi yanada takomillashgan materiallarga bo'lgan zaruratni keltirib chiqargan. O'zining noyob xususiyatlari tufayli eng yaxshi materiallardan biri hisoblangan polimer keng ko'lamli qo'llanilish sohalarida ustunlikka ega bo'lib, hozirgi asrning

asosiy materiali sifatida e'tirof etilmoqda. Material turli sohalarda yuqori samaradorlik ko'rsatishi uchun zarur xossalarga yetarli darajada ega bo'lishi lozim. Shu sababli polimerlar odatda boshqa materiallar bilan mustahkamlanib, kompozit materiallar hosil qilinadi. Demak, polimer matritsali kompozitlar (PMK)ni yaratish polimerlarning xossalari ta'sir ko'rsatishning eng samarali usullaridan biri bo'lib qolmoqda.

Hozirgi kunda tolali polimer kompozitlar (FRP — Fibre Reinforced Polymer) aviatsiya, avtomobilsozlik, qurilish, kemasozlik va energetika sohalarida keng qo'llanilmoqda. Buning asosiy sababi ularning yuqori solishtirma mustahkamligi, korroziyaga chidamliligi, yengilligi va uzoq xizmat qilish xususiyatlariga ega ekanligidir. Shu bilan birga, kompozit materiallarning samaradorligi ko'p jihatdan matritsa va mustahkamlovchi o'rtasidagi interfeys holatiga bog'liq bo'ladi.

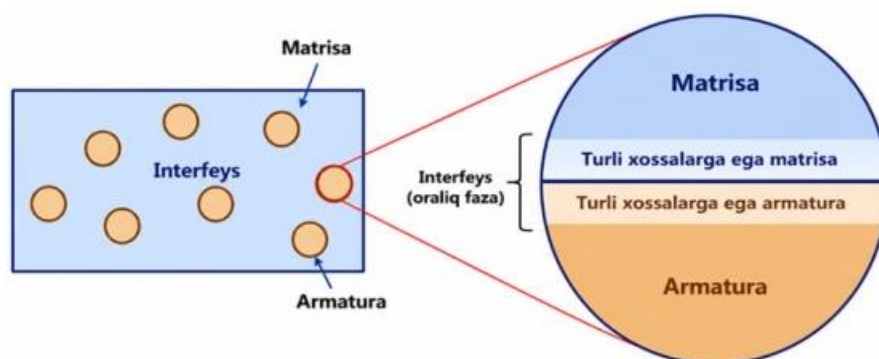
Asosiy qism. Interfeys kompozit tarkibidagi ikki faza orasidagi chegaraviy hudud bo'lib, yuklamaning matritsadan mustahkamlovchiga uzatilishini ta'minlaydi. Interfeysning yetarlicha mustahkam bo'lmasligi natijasida kompozit materiallarda interfeys ajralishi, tolalarning sug'urilib chiqishi, qatlamlanish kabi buzilish jarayonlari yuzaga keladi. Natijada materialning mexanik va ekspluatatsion xossalari sezilarli darajada pasayadi. Shu sababli interfeys tuzilishini boshqarish va mustahkamlash kompozit materiallar texnologiyasining muhim ilmiy yo'nalishlaridan biri hisoblanadi.

Kuchlanishning konsentratsiyalanishi tolalar yoki matritsaga qaraganda ko'proq interfeysda yuz beradi, shu sababli mikro yoriqlar ham aynan tola/matritsa interfeysida osonroq hosil bo'ladi. Mikro yoriqlar kengayib borgani sari tolali polimer kompozit materialining yuk ko'tarish qobiliyati kamayadi. Shu bois tolali polimer kompozit materialidan samarali foydalanish uchun tola/matritsa interfeysining xossalari chuqur o'rganish zarur.

Bundan tashqari, agressiv tashqi muhit sharoitlarida tolali polimer kompozit materialining uzoq muddatli mexanik xususiyatlari ham aynan tola/matritsa interfeysiga bog'liq bo'ladi. Silu Huang va hammuallifliklar tolali polimer kompozit materialining yuqori namlik muhitida (masalan, 95% nisbiy namlikda) ishlatilganda, uning mexanik xususiyatlarining yomonlashuvi tolalar, matritsa va tola/matritsa interfeysining buzilishi natijasida yuz berishini ko'rsatadi. Yuqori namlik sharoitida uzoq muddat ta'sir davomida dastlabki bosqichlarda shishish nomutanosibli tufayli hosil bo'lgan mikro yoriqlar namlik diffuziyasi uchun yangi yo'llarni ochadi va shu orqali tolalar, matritsa hamda tola/matritsa interfeysida shikastlanishning yanada tez rivojlanishiga sabab bo'ladi.

Sun'iy tolalarning gidrolizi o'simlik asosidagi tabiiy tolalarnikiga qaraganda ancha kam ahamiyatga ega. Biroq bunda ham matritsaning gidrolizi hamda tola va matritsaning turlicha shishish darajasi tufayli yuzaga keladigan interfeys nomutanosibli mavjud bo'lib, ular sun'iy tolali polimer kompozitlarining qisqa va uzoq muddatli mexanik xususiyatlariga ta'sir ko'rsatadi.[1]

Bradley W.L. va Grant T.S. lar tomonidan o'rganilgan tadqiqot ishida gidroliz jarayoni matritsa yoki tolalarda (ayniqsa o'simlik asosidagi tabiiy tolalarda) sodir bo'lib, ularning mexanik xususiyatlarini pasaytirishini ko'rsatadi. Matritsaga kirib boruvchi namlik interfeysdagi kimyoviy bog'lanish va mexanik ilashishni susaytirish orqali interfeys bog'lanishini yemiradi. Bundan tashqari, tola va matritsaning turlicha shishishi ularning interfeysida mikro yoriqlar hosil qiladi.[2]



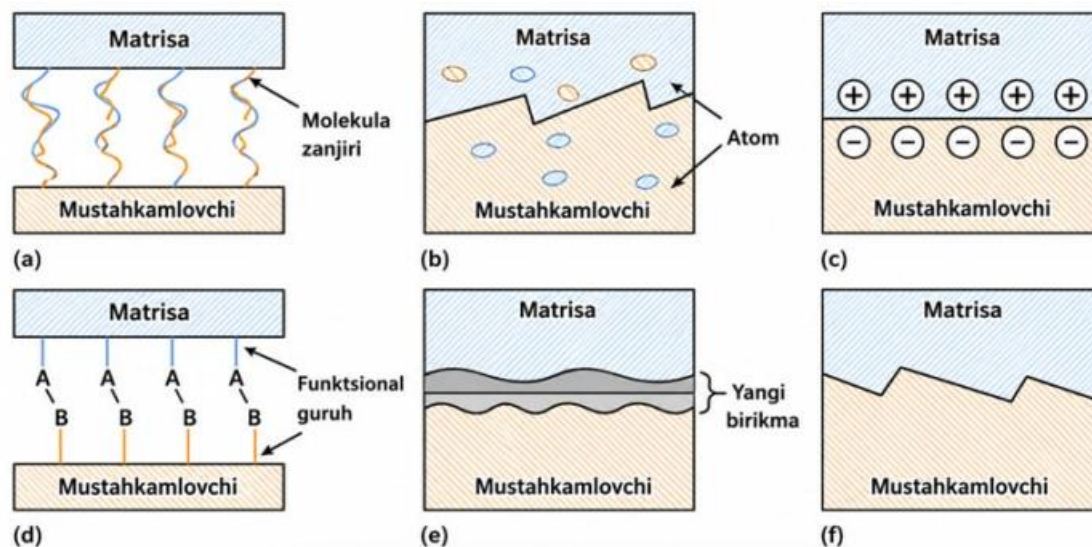
1-rasm: Kompozitdagi oraliq fazaning sxematik tasviri

1-rasmda ko'rsatilganidek, makro miqyosda interfeys — bu mustahkamlovchi element tolalar va polimer matritsa orasidagi umumiy chegara hisoblanadi. Mikro miqyosda esa ushbu “chegara” ma'lum hajmga ega bo'lgan o'tish zonasi — interfaza deb ataladi. Bu hududda kimyoviy, fizik va mexanik xususiyatlar mustahkamlovchi materialdan matritsaga tomon uzluksiz yoki bosqichma-bosqich o'zgaradi.[3]

Interfazaning ta'rifiga ko'ra — kompozit material tarkibidagi matritsa va mustahkamlovchi orasidagi o'tish sohasi bo'lib, unda fizik, kimyoviy va mexanik xossalari o'zgaradi ya'ni aniqroq qilib aytganda matritsa va armaturalovchi komponent o'rtasida hosil bo'ladigan, ularning o'zaro ta'siri natijasida shakllangan va alohida xossalarga ega bo'lgan oraliq fazadir. Interfaza tolali polimer kompozitidagi tolani ikki qismga ajratish mumkin. Birinchi qism matritsa bilan aloqaga kirishmaydi va asl tolalarning xususiyatlarini saqlab qoladi. Ikkinchi qism esa matritsa ta'sirida bo'lib, uning xususiyatlari boshlang'ich tolalarnikidan farq qiladi. Ushbu farqning ikki asosiy sababi mavjud.

Drzal LT va hammualliflikdagi tadqiqot ishida birinchi sababi quyidagi tarzda keltirilgan – kompozit hosil qilishdan oldin mustahkamlovchi yoki matritsa yuzasiga ishlov berilishi yoki u yerda ma'lum moddalar adsorbsiyalanishidir. Tolalar yuzasiga ishlov berish natijasida dastlabki yuzaga funksional guruhlar qo'shilishi yoki olib tashlanishi mumkin. Shu tufayli tola yuzasi kimyoviy va strukturaviy jihatdan asl toladan farq qiladi. Bundan tashqari, tolalar yoki matritsa yig'ilishdan oldin havoda turganda, havo tarkibidagi kimyoviy moddalarning yuzaga adsorbsiyasi sodir bo'lishi mumkin. Bu esa ayrim yuzaviy reaktivliklarning o'zgarishi yoki yo'qolishiga olib kelib, interfeys bog'lanishining pasayishiga sabab bo'ladi.[4]

Ikkinchi sabab esa tolalar va matritsa orasidagi diffuziya yoki kimyoviy reaksiyalar bilan bog'liq bo'lib, ular interfeys mexanizmlaridagi o'zaro diffuziya, kimyoviy bog'lanish va reaksiyon bog'lanish jarayonlarida namoyon bo'ladi.



2-rasm. Interfeysda bog'lanishning hosil bo'lishi: (a) molekulyar o'ralashish; (b) elementlarning o'zaro diffuziyasi; (c) elektrostatik tortishish; (d) mustahkamlovchi va matritsa sirtlaridagi guruhlar o'rtasidagi kimyoviy reaksiya; (e) yangi birikma hosil qiluvchi kimyoviy reaksiya, ayniqsa metall matritsali kompozitlarda (MMK); (f) mexanik o'zaro ilashish. [5]

Interfeys bog'lanishi hosil bo'lish jarayonida mustahkamlovchi va matritsa bir-biriga tegishidan oldin dastlab fizik tortishish kuchlari (jumladan elektrostatik tortishish va elektr neytral jismlar orasidagi fizik tortishish) yuzaga kelishi mumkin. Mustahkamlovchi va matritsa o'zaro kontaktga kimgach esa molekulyar chigallanish va o'zaro diffuziya kabi boshqa mexanizmlar ishga tushadi. Natijada, mustahkamlovchi va matritsa orasidagi yakuniy bog'lanish ushbu mexanizmlarning alohida yoki ko'pincha birgalikda ishlashi orqali shakllanadi [5].

Tola-matritsa interfeysini tavsiflash hali ham amaliy va nazariy jihatdan bir qator qiyinchiliklarga ega. Amaliy tomondan, juda nozik yakka tolalar bilan ishlash, murakkab tayyorlash jarayoni, maxsus sinov qurilmalari va ba'zan standartlashtirilmagan usullarni talab qiladi. Nazariy jihatdan esa parametrlarni tanlash va sinov natijalaridan interfeys xossalarini ajratib olish usullari bo'yicha turli qarama-qarshiliklar mavjud. [6]

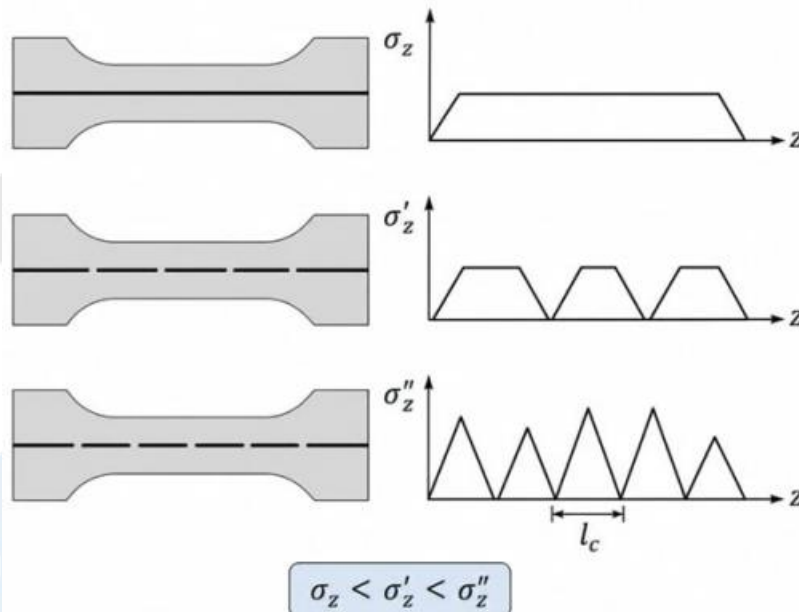
Interfeysni tavsiflashda bevosita yoki bilvosita kuzatuv usullaridan ham foydalaniladi. Bunga skanerlovchi elektron mikroskopiya (SEM), transmission elektron mikroskopiya (TEM) hamda Fourier-transform infraqizil spektroskopiya (FTIR) kiradi. Ushbu usullar interfeysning morfologik, strukturaviy yoki kimyoviy bog'lanish xususiyatlarini aniqlashga yordam beradi va interfeys hosil bo'lish mexanizmlarini fizik hamda fizik-kimyoviy jihatdan tushunish imkonini beradi.

Cottrell-Kelly-Tyson modeli — kompozit materiallarda tolalar va matritsa orasidagi kuchlanish uzatilishini tavsiflovchi nazariy model hisoblanadi. Cottrell-Kelly-Tyson modeli doirasida Cottrell hamda Kelly va Tyson bir vaqtning o'zida, ammo bir-biridan mustaqil ravishda, o'rtacha interfeyslararo siljish mustahkamligini (IFSS) hisoblash uchun oddiy kuch muvozanatidan foydalanganlar. Ular matritsa ideal plastik holatda bo'ladi va interfeyslararo siljish kuchlanishi tiklanish hududida doimiy hamda matritsaning siljishdagi oqish mustahkamligi — τ_y ga teng deb faraz qilganlar.

Natijada tolalar fragmenti uchida 0 qiymatdan boshlanib, tolalar uchidan uzoqlashgan sari qo'llanilgan kuchlanish darajasigacha chiziqli ravishda ortib boruvchi bo'ylama kuchlanish hosil

bo‘ladi va ma’lum nuqtada plato holatiga yetadi. To‘yinganlik holatida fragmentlar qo‘llanilgan kuchlanishga erishish uchun juda qisqa bo‘lib qoladi, shu sababli plato qismlari yo‘qoladi (3-rasmda tasvirlangan).

Ushbu modelda (oddiy siljish-sirg‘anish modeli deb ham ataladi) interfeys IFSS qiymatigacha bo‘lgan barcha siljish kuchlanishlarini ko‘tara oladi, undan keyin esa deformatsiya interfeys bo‘ylab sirg‘anish orqali yuz beradi. Mazkur modelga ko‘ra, uzilgan tolada kuchlanishning tiklanishi to‘liq siljish-sirg‘anish mexanizmi orqali sodir bo‘ladi.[7-8]



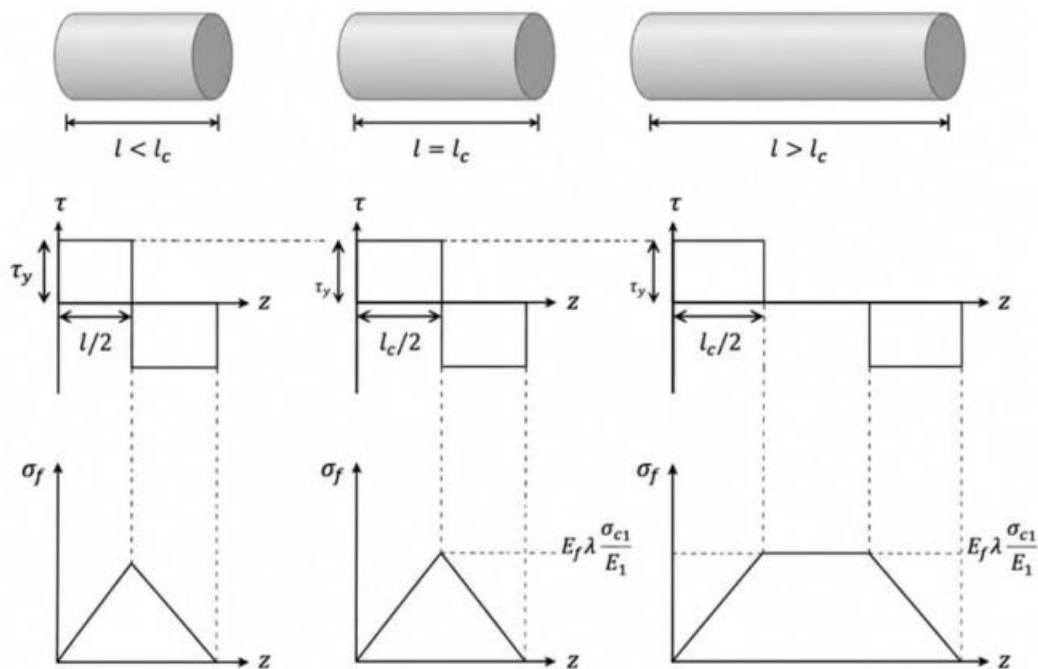
3-rasm. SFFT dagi fragmentatsiya jarayonining sxematik tasviri. Chapda: yuklanishning ortishi natijasida tolada sinishlar soni ortib borayotgan namuna. O‘ngda: mos qo‘llanilgan kuchlanish darajalari uchun tola uzunligi bo‘ylab (x o‘qi bo‘yicha) bo‘ylama kuchlanishning taqsimlanishi. Nol kuchlanishlar tolada sinishlar mavjud bo‘lgan joylarga mos keladi.[9]

Tolaning kritik uzunligi — ya’ni interfeys orqali yetarli yuk uzatilmagani sababli tola bundan keyin fragmentatsiyalanmaydigan uzunlik — quyidagicha hisoblanadi:

$$l_l = \frac{d \sigma_f}{\sigma_f} (1 - \frac{d \sigma_f}{\sigma_f})$$

Bu yerda d -tolaning diametri, σ_f esa l_l uzunlikdagi tolaning uzilish mustahkamligini bildiradi. Ushbu modelga asoslanib, l_l ko‘pincha materialning doimiy kattaligi deb qaraladi va qo‘llanilgan deformatsiyaga bog‘liq emas deb hisoblanadi [10].

VOLUME-6, ISSUE-5



4-rasm. Cottrell–Kelly–Tyson modeli ga ko‘ra, tola uzunligining tola bo‘ylab bo‘ylama va siljish kuchlanishlari taqsimotiga ta’siri

Fragment uzunliklari odatda ikki usul bilan aniqlanadi: to‘g‘ridan-to‘g‘ri transmissiyaviy optik mikroskopiya orqali yoki bilvosita akustik emissiya (AE) yordamida. Ushbu bog‘lanishning modifikatsiyalangan variantlari kritik uzunlikning ta’riflanishi yoki σ_f ning uzunlikka bog‘liqligini hisobga olish bilan farqlanadi. [11] quyidagicha aniqlanishi mumkin:

- to‘yinganlik holatidagi fragment uzunliklarining arifmetik o‘rtacha qiymati sifatida, $l = \frac{l_1 + l_2 + \dots + l_n}{n}$
- keng qo‘llaniladigan ta’rif bo‘yicha, $l = l_c$ (bu tuzatilgan uzunlik deb ham ataladi),
- maksimal fragment uzunligi sifatida, $l = l_c$ yoki maksimal bo‘ylama kuchlanish yakka tola cho‘zilish sinovlarida aniqlangan nominal mustahkamlikka teng bo‘ladigan tola fragmenti uzunligi sifatida [11].

Shuni ta’kidlash kerakki, Cottrell–Kelly–Tyson modeli faqat tola uchlaridagi plastik zonada sodir bo‘ladigan yuk uzatilishini hisobga oladi, tolaning markaziy qismidagi elastik yuk uzatilishining ta’siri esa e’tiborga olinmaydi ($\tau = 0$). Ushbu yondashuv faqat matritsaning plastik deformatsiya chegarasi (yoki interfeys bo‘ylab sirg‘anish chegarasi) juda kichik bo‘lgandagina to‘g‘ri hisoblanadi. Shu sababli, plastik deformatsiya (yoki sirg‘anish) elastik yuklanish bosqichisiz, yuklanishning boshidayoq yuz beradi.

To‘yinganlik holatiga erishish asosan tolaning uzilish deformatsiyasi bilan emas, balki matritsaning oqish deformatsiyasi bilan belgilanadi. Bu esa matritsa tizimining uzilish deformatsiyasi mustahkamlangan tolanikidan yuqori bo‘lishi zarurligini ko‘rsatadi. Odatda, matritsaning uzilish

deformatsiyasi tolaning uzilish deformatsiyasidan kamida uch baravar katta bo'lishi tavsiya etiladi

Muqobil usul sifatida, to'yinganlik holatiga erisha olmaydigan mo'rt smola tizimlari uchun qo'llanish doirasini kengaytirish maqsadida koaksial geometriyali fragmentatsiya sinovi (ikki matritsali SFFT) qo'llanilishi mumkin. Ushbu murakkab usulda qattiq smola mustahkam smola bilan qoplanishidan oldin, avvalo qiziqish uyg'otayotgan mo'rt smolaning yupqa qatlami tola yuzasiga surtiladi [12-13].

Cottrell–Kelly–Tyson modeli ga asoslangan SFFTdan o'rtacha IFSSni aniqlash yondashuvi haddan tashqari soddalashtirilgan bo'lib, u faqat to'liq debonding yoki matritsaning to'liq oqishi holatlarida asosli bo'lishi mumkin.

Yaxshiroq ma'lumotlarni qayta ishlash (data reduction) sxemasini izlash natijasida interfeysni inelastik va elastik hududlarga ajratadigan qisman elastik modellar ishlab chiqildi va CKT modelidagi kritik uzunlikning deformatsiyaga bog'liq bo'lmagan material konstantasi ekanligi inkor etildi. Bundan tashqari, interfeysdagi siljish kuchlanishining doimiyligi haqidagi faraz ham eksperimental natijalar bilan rad etildi [14].

Keyingi tajribalar CKT modelining yana bir qator asosiy farazlarini ham inkor etdi, jumladan: to'liq to'yinganlik holatiga erishish imkoniyati, yopishgan va ajralgan sirtlarni farqlay olmasligi, hamda matritsa plastiklik xossasi va interfeys ishqalanishining hisobga olinmasligi. So'nggi yillarda CKT modelining hamda uning aslidan kelib chiqqan Bader–Bowyer modelining modifikatsiyalangan variantlari taklif qilindi Ushbu yangi modellar qisqa (nisbat <20) va o'ta qisqa (nisbat <10) tolali kompozitlarda IFSSni hisoblash imkonini beradi hamda asl modelda hisobga olinmagan tola uchlaridagi ta'sirlarni ham inobatga oladi.[11]

Xulosa qilib aytganda, tolali polimer kompozit materiallar (FRP) zamonaviy muhandislik sohalarida yuqori samaradorligi bilan ajralib turadi. Biroq ushbu materiallarning mexanik va ekspluatatsion xossalari asosan matritsa va mustahkamlovchi tolalar o'rtasidagi interfeys holatiga bog'liq ekanligi aniqlangan. Interfeys va interfaza hududlarida yuz beradigan fizik, kimyoviy va mexanik jarayonlar yuk uzatish samaradorligini belgilaydi hamda materialning umumiy mustahkamligiga bevosita ta'sir ko'rsatadi.

Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, namlik, harorat va agressiv muhitlar interfeys bog'lanishining buzilishiga, mikro yoriqlar hosil bo'lishiga va natijada kompozitning erta yemirilishiga olib keladi. Shu bilan birga, interfeysni tavsiflash va modellashtirishda Cottrell–Kelly–Tyson modeli kabi yondashuvlar muhim ahamiyatga ega bo'lsa-da, ular ayrim soddalashtirilgan farazlarga asoslanganligi sababli cheklovlarga ega.

Shu sababli, zamonaviy tadqiqotlarda interfeysni aniqroq tavsiflash, qisman elastik modellarni ishlab chiqish hamda yangi eksperimental usullarni qo'llash dolzarb yo'nalishlardan biri hisoblanadi. Umuman olganda, interfeys tuzilishini chuqur o'rganish va uni boshqarish FRP kompozitlarning ishonchligini oshirishda asosiy omil bo'lib qoladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Silu Huang va b. "Characterization of interfacial properties between fibre and polymer matrix in composite materials – A critical review". Journal of materials reaserach and technology. 2021. 13. (1441-1445 b)

2. Bradley W.L., Grant T.S. The effect of the moisture absorption on the interfacial strength of polymeric matrix composites. *J Mater Sci.* 1995. 30(21). (5537-5542 b).
3. Kim J.K., Mai Y.W. Introduction. In: *Engineered interfaces in fiber reinforced composites.* Elsevier. 1998. (1-4 b).
4. Drzal L.T., Rich M.J., Lloyd P.F. Adhesion of graphite fibers to epoxy matrices: I. The role of fiber surface treatment. *J Adhes.* 1983. 16(1). (1-30 b)
5. Kim J.K, Mai Y.W. Characterization of interfaces. In: *Engineered interfaces in fiber reinforced composites.* Elsevier. 1998. (5-41 b)
6. Sørensen B.F., Lilholt H. Fiber pull-out test and single fiber fragmentation test – analysis and modelling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 37th Risø International Symposium on Materials Science. 2016. (139 b)
7. Cottrell A.H. Strong solids. *Proceedings of the Royal Society A.* 1964. 282. (2-9 b)
8. Kelly A., Tyson W.R. Tensile properties of fibre reinforced metals: copper/tungsten and copper/molybdenum. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids.* 1965. 13. (329-50 b).
9. Huang Y., Young R.J. Analysis of the fragmentation test for carbon-fibre/epoxy model composites by means of Raman spectroscopy. *Composites Science and Technology.* 1994. 52. 505-17.
10. Verpoest I., Desaegeer M., Keunings R. Critical Review of Direct Micromechanical Test Methods for Interfacial Strength Measurements in Composites. In the *Proceedings of the 3rd International Conference on Composite Interfaces (ICCI-III).* Cleveland. Ohio. USA. 1990.
11. Sina Ahmadvash Aghbash va b. Methods and models for fibre-matrix interface characterisation in fibre-reinforced composites: a review. (4-7 b)
12. Tripathi D., Turton T., Chen F., Jones F.R. A new method to normalize the effect of matrix properties on the value of interfacial shear strength obtained from the fragmentation test. *Journal of Materials Science.* 1997. 32. (4759-4765 b)
13. Lodeiro M.J., Maudgal S., McCartney L.N., Morrell R., Roebuck B. Project CPD3 – Report Interface Characterisation and Behaviour: Critical Review of Interface Testing Methods for Composites. 1998.
14. Galiotis C. A Study of mechanisms of stress transfer in continuous- and discontinuous-fibre model composites by laser Raman spectroscopy. *Composite Science and Technology.* 1993. 48. (15-28 b)