PEDAGOGIK TADQIQOTLAR JURNALI
ISSN: 3060-4923 Impact Factor –7,212

SANOATDA QO‘LLANILADIGAN KOMPOZITSION MATERIALLARNI ISHLAB CHIQARISH TEXNOLOGIYALARINING QIYOSIY TAHLILI

Mengliyeva Anora Narzullo qizi
G’afforova Barchinoy Omonboy qizi
Navoiy Davlay Universiteti
Tayanch doktarantura talabasi
anoramengliyeva9@gmail.com
https://doi.org/10.5281/zenodo.22049305

Anotatsiya: Ushbu maqolada polimer kompozit materiallar (PKM) dolzarbligi, ularning zamonaviy sanoat tarmoqlaridagi o‘rni va ishlab chiqarish texnologiyalarining qiyosiy tahlili ko‘rib chiqilgan. PKMning an’anaviy og‘ir metallar o‘rnini bosish xususiyatlari, xususan, vaznni kamaytirish va konstruksiya mustahkamligini oshirishdagi afzalliklari Airbus samolyotlari va elektromobillar misolida yoritilgan. Tadqiqotda an’anaviy qoliplash usullari (qo‘lda qatlamlash, vakuumli infuziya, avtoklav) bilan bir qatorda zamonaviy ishlab chiqarish texnologiyalari — sirt qoplama usullari (plazmali purkash, magnetronli changitish, sol-gel), qo‘shma ishlab chiqarish (3D/4D bosib chiqarish) hamda magnit impulsli changni siqish texnologiyalarining o‘ziga xos xususiyatlari, afzalliklari va cheklovlari tizimli ravishda tahlil qilingan. Yakunda PKM ishlab chiqarish samaradorligini oshirish va tannarxni kamaytirishga qaratilgan texnologik istiqbollar belgilab berilgan.
Kalit so‘zlar: Polimer kompozit materiallar, vakuumli infuziya, sirt qoplamasi, magnetronli changitish, qo‘shma ishlab chiqarish, 3D bosib chiqarish, magnit impulsli siqish, mexanik xususiyatlar.

Аннотация: В данной статье рассматривается актуальность полимерных композиционных материалов (ПКМ), их роль в современных отраслях промышленности и проводится сравнительный анализ технологий их производства. На примере самолетов Airbus и электромобилей освещаются преимущества ПКМ перед традиционными тяжелыми металлами, в частности, в снижении веса и повышении прочности конструкций. В исследовании системно проанализированы особенности, преимущества и ограничения как традиционных методов формования (ручная укладка, вакуумная инфузия, автоклав), так и современных технологий производства — методов нанесения поверхностных покрытий (плазменное напыление, магнетронное напыление, золь-гель), аддитивного производства (3D/4D-печать) и магнитно-импульсного прессования порошков. В заключении определены технологические перспективы, направленные на повышение эффективности производства и снижение себестоимости ПКМ.
Ключевые слова: Полимерные композиционные материалы, вакуумная инфузия, поверхностное покрытие, магнетронное напыление, аддитивное производство, 3D-печать, магнитно-импульсное прессование, механические свойства.

Abstract: This paper discusses the relevance of polymer matrix composites (PMCs), their pivotal role in modern industries, and provides a comparative analysis of their manufacturing technologies. The advantages of PMCs over traditional heavy metals, particularly in weight reduction and structural strength enhancement, are highlighted through examples of Airbus aircraft and electric vehicles. The study systematically analyzes the characteristics, advantages, and limitations of conventional molding methods (hand lay-up, vacuum infusion, autoclave) as well as advanced manufacturing technologies, including surface coating techniques (plasma spraying, magnetron

sputtering, sol-gel), additive manufacturing (3D/4D printing), and magnetic pulse powder compaction. Finally, technological perspectives aimed at improving production efficiency and reducing the cost of PMCs are outlined.

Keywords: Polymer matrix composites, vacuum infusion, surface coating, magnetron sputtering, additive manufacturing, 3D printing, magnetic pulse compaction, mechanical properties.

Kirish. Polimer kompozit materiallar (PKM) dolzarbligi bugungi kunda shunchaki ilmiy qiziqish emas, balki global sanoat inqilobining talabidir**.** Polimer kompozitlar o‘zining yuqori mexanik xususiyatlari, issiqlikka chidamliligi, olovga bardoshliligi ya’ni yonuvchanlik darajasi pastligi, zarbaga va korroziyaga chidamliligi tufayli aviatsiya, aerokosmik, avtomobilsozlik, harbiy, tibbiyot, qishloq xo‘jaligi va sanoat sohalarida keng qo‘llanilib kelmoqda. Umuman olganda, ularni ishlab chiqarish jarayoni polimer kompozitlarning xizmat ko‘rsatish muddatiga ta’sir qiluvchi asosiy omillardan biridir. Polimer kompozit materiallarining o’ziga xos afzalliklari an’anaviy og’ir metallarni masalan, po’lat va alyuminiy o’rnini bosuvchi hamda yengil vaznlilik va aqlli tizimlarni amalga oshirish imkonini bermoqda. PKMlar, ayniqsa uglerod tolali kompozitlar, po‘latdan 5 marta yengil, lekin undan bir necha marta mustahkamroq bo‘la oladi. Bu xususiyat muhandislarga material vaznini kamaytirgan holda konstruksiya xavfsizligini oshirish imkonini beradi. Avtomobil sanoatida yengil vaznli konstruksiyalarni loyihalash maqsadida gibrid elektromobillar va elektromobil akkumulyatorlarini ishlab chiqarishda ko’p miqdorda polimer kompozitlardan foydalanilmoqda.[1] Transport vositasi qanchalik yengil bo‘lsa, uni harakatlantirish uchun shunchalik kam energiya yoki yoqilg‘i sarflanadi.Kenaf shisha tolalari bilan mustahkamlangan gibrid polimer kompozitlar samolyot sirtining spesifik mustahkamligi va yomg’ir eroziyaga chidamliligini oshiradi. Shuningdek, karbon tolalari bilan mustahkamlangan kremniy karbid polimer kompozitlar, samolyot tormozlarida qo’llanilganda, taxminan 1200°C haroratga chidamli bo’ladi.[2] Ko’plab misollar yetakchi samolyot ishlab chiqaruvchilarning polimer kompozitlardan keng foydalanganini ko’rsatadi. Masalan, Airbus A320 modelida alyuminiy qotishma qismlarni polimer kompozitlar bilan almashtirish orqali taxminan 800 kg og’irlikni kamaytirgan. Shu yondashuv A330,A340, va A380 modellari uchun ham qo’llanilgan.[3]

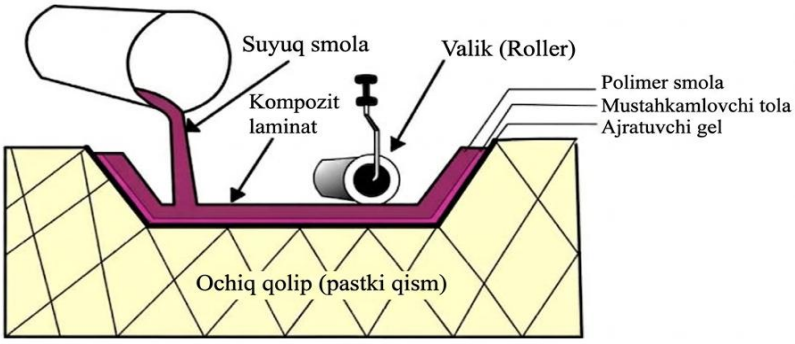
Tadqiqot metodologiyasi - Mazkur tadqiqot polimer kompozit materiallarni ishlab chiqarish va qayta ishlashning an’anaviy hamda zamonaviy texnologiyalarini tizimli tahlil qilishga asoslangan. Tadqiqot metodologiyasi polimer kompozit materiallarning tarkibi, ishlab chiqarish texnologik parametrlari, shakllantirish usullari, sirt xususiyatlari hamda tayyor materialning ekspluatatsion ko‘rsatkichlari o‘rtasidagi bog‘liqlikni aniqlashga yo‘naltirildi. Ishlab chiqarish texnologiyasini tanlashda matritsaning turi va xususiyatlari, xomashyoning shakli va geometriyasi, tayyor kompozitning shakli hamda uning qo‘llanish sohasi asosiy mezonlar sifatida qabul qilindi.

Polimer kompozitlarni ishlab chiqarish texnologiyasi deganda, polimer mahsulotlarini olish, materiallarning xususiyatlarini namoyon qilish va yangi materiallarni ishlab chiqish usulidir. Polimer kompozitlarni qoliplashning an’anaviy ishlab chiqarish texnologiyasi asosan qo’lda qatlamlash, ekstruzion qoliplash, yuqori bosim ostida quyish, kalandrlash, issiq presslash va yuqori darajada takrorlanuvchilikka ega bo’lgan, jarayonni nazorat qilish hamda yuqori sifatli komponentlarni yetkazib berish imkonini beradigan boshqa usularni o’z ichiga oladi.[4] Ushbu texnologiyalar jarayonning takrorlanishini ta’minlaydi va ishlab chiqarish parametrlarini aniq nazorat qilish imkonini beradi, bu esa doimiy sifatli kompozitlar ishlab chiqarishga xizmat qiladi. Ammo, qismlarning murakkab shakli va kesim ko’rinishi dizaynni sezilarli darajada murakkablashtirishi va qolip tayyorlash xarajatlarini oshirishi mumkin.Shu muammo sababli polimer kompozitlar uchun ilg’or ishlab chiqarish usullarini rivojlantirish va joriy tish amalga oshirilmoqda.[5]

Ishlab chiqarish yoki qayta ishlash texnikasi polimer kompozitlarning mexanik xususiyatlari va uzoq muddatli chidamliligiga ta’sir qiluvchi asosiy omilllardan biridir.Tegishli texnologiyani bajarish quyidagilarga bog’liq:

- ✓ Matritsaning turi va xususiyatlari;
- ✓ Xom ashyoning shakli va geometriyasi;
- ✓ Kompozitning yakuniy shakli;
- ✓ Maqsad qilingan qo’llanilish sohasi - makro yoki mikro muhitlar uchun.

Hozirgi vaqtda doimiy ravishda rivojlanib va takomillashib borayotgan ko‘plab ishlab chiqarish texnologiyalari mavjud. Polimer kompozit materiallarni ishlab chiqarishning eng qadimgi, eng oddiy va eng keng tarqalgan an’anaviy usullaridan biri – **qo’lda qatlamlash** hisoblanadi. Oddiy qilib aytganda, bu jarayonda mustahkamlovchi material masalan, shisha tolasi, uglerod tolasi yoki matosi ochiq qolip ustiga qo‘lda ketma-ket joylashtiriladi va har bir qatlam ustidan suyuq polimer smola epoksid yoki poliefir quyilib, valik yordamida shimdiriladi.



1-rasm.Qo’lda qatlamlash jarayoni sxemasi.

Vakuumli infuziya usuli — bu polimer kompozit materiallarni yopiq muhitda ishlab chiqarishning zamonaviy va yuqori texnologik usulidir. "Qo‘lda qatlamlash" usulidan farqli o‘laroq, bu yerda smola matoga qo‘lda surtilmaydi. Quruq mato (shisha yoki uglerod tolasi) qolipga yotqizilib, ustidan maxsus germetik plyonka yopiladi va ichidagi havo vakuum nasosi yordamida butunlay so‘rib olinadi. Hosil bo‘lgan manfiy bosim (vakuum) hisobiga suyuq polimer smola matoning ichiga o‘zi so‘rilib kiradi va uni har tomonlama tekis shimdiradi.

Ekstruziya va kalandrlash kabi usullar asosan termoplastik kompozitlarni ishlab chiqarishda ishlatiladi, ular termoplastik matritsani mustahkamlovchi tolalar bilan aralashtirishga imkon beradi, va keyinchaliknmaterialni lentalar yoki varaqlar shaklida shakllantirish mumkin bo’ladi. Bu texnologiyalar tez ishlab chiqarish va qayta ishlash imkonini beradi,ammo kompozitning barqarorligi va bir xilligini ta’minlash uchun harorat va sovutish tezligini aniq nazorat qilish talab etiladi.

Siqish qoliplash va avtoklavda qotirish — bu asosan polimer kompozit materiallar (ayniqsa, termoreaktiv smolalar va qatlamli kompozitlar) hamda rezina mahsulotlariga yuqori bosim va harorat ostida shakl berish texnologiyasidir, avtoklavda qotirish esa nazorat ostidagi muhitda qo’shimcha bosim berib,material zichligi va mexanik xususiyatlarni maksimal darajada oshiradi.bu usullar,qimmat va murakkab uskunalar talab qilinadi,ammo juda sifatli mahsulotlar beradi.

An’anaviy qoliplash jarayonlarining cheklovlarini bartaraf etish uchun bir nechta zamonaviy texnologiyalar ishlab chiqilgan:

Sirt qoplama texnologiyasi - Bu usul tayyorlangan substrant (asos) yuzasiga icngichka plyonka surtishni o’z ichiga oladi. Substrant material polimer yoki polimer bo’lmagan material bo’lishi mumkin.Polimer substrantlarga qo’llanganda, bu qoplamalar biotibbiyotda keng qo’llaniladigan kompozit materiallarni beradi.Polimer bo’lmagan substrantlarga – masalan, metall yoki keramika – qo’llanganda esa, bu qoplamalar asosan agressiv kimyoviy yoki atrof muhit sharoitlarida

korroziyadan himoya qilish uchun ishlatiladi. Sirt qoplamalarini yaratish texnologiyasi asosan plazmali purkash,magnetronli changitish, elektrokimyoviy cho'ktirish va sol-gel texnologiyalarini o'z ichiga oladi.[6-7-8]

1-jadval Turli xil qoplama texnologiyalarining xarakteristikalari

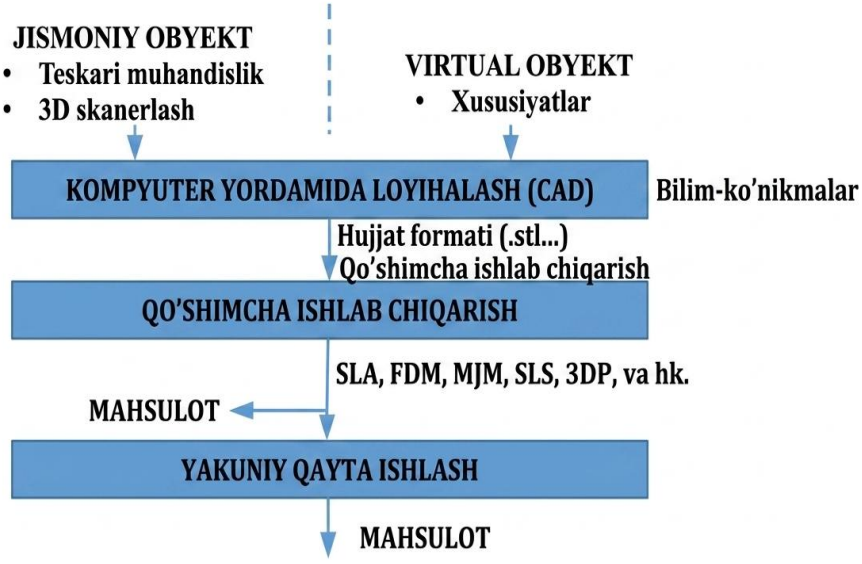
Sirt qoplamasini yaratish texnologiyasi	Materiallar	Afzalliklari	Kamchiliklari	Qo'llanish sohasi
Plazmali purkash	Polimer kompozit qoplamalar	Yuqori birikish mustahkamligi,sodda ish jarayoni, yaxshi ish moslashuvchanlik xususiyati	O'zaro bog'liq parametrlarining ko'pligi, teshiklar ichki qismini bo'yash/qoplashni qiyinligi	Substraning korroziyaga chidamliligini oshirish uchun polimer qoplamalar tayyorlash
Magnetronli changitish	Polimer metall nanokompozitlar	Oddiy uskunalar, nazorat qilish osonligi kuchli adgeziya,substratga minimal Zarar yetishi, qo'llaniladigan materiallar qamrovining kengligi	Izolyator pardalarni (plyonkalarni) tayyorlashning qiyinligi va qimmatligi	Datchiklar (sensorlar) va reflektorlarda qo'llash uchun izolyatsion polimer substrantlarda metall nanopardalar tayyorlash
Elektrokimyoviy cho'ktirish	Ko'p devorli uglerod nanotubali polimer kompozitlar	Sodda ish jarayoni, yuqori moslanuvchanlik va ishonchlilik	Texnologik jarayon parametrlarining o'zgarishiga nisbatan sezgirlik	Kema korpuslaridagi metall materiallarni himoya qilish maqsadida metall substrantlarga uglerod nanotubasi-polimer kompozit pardalarini tayyorlash
Sol-gel texnologiyasi	Nanotuzilmali polimer kompozitlar	Tarkibni yaxshi nazorat qilish va pardani bir jinsli (gomogen) holga keltirish qobiliyati, past harorat	Quritish jarayonida yorilishga moyillik, uzoq qoliplash sikli va xomashyo narxining yuqoriligi	Quyosh panellari, ko'zoynaklar va teleskop linzalari uchun yorug'lik o'tkazuvchanligini oshiruvchi qoplamalar tayyorlash

Qo'shma ishlab chiqarish

Bu usul pastdan yuqoriga qatlamlash printsipiga asoslangan bo'lib, yuqori aniqlik va ichki barqaror tuzilmalarni yaratish imkonini beradi. Tezkor ishlab chiqarish texnologiyasi sifatida ham tanilgan qo'shma ishlab chiqarish — bu materiallarni qatlamma-qatlam joylashtirish (to'plash) orqali

mahsulot yaratadigan ko‘p o‘lchovli ishlab chiqarish texnologiyasi bo‘lib, odatda 3D bosib chiqarish texnologiyasini anglatadi [9]. 3D bosib chiqarish texnologiyasi asosida keyinchalik 4D va 5D bosib chiqarish usullari ham rivojlantirildi; ulardan 3D bosib chiqarish texnologiyasi hozirda ancha yetuk hisoblanadi, biroq faqatgina ayrim yuqori texnologiyali va maxsus buyurtma (individual) mahsulotlar uchun qo‘llaniladigan 4D va 5D bosib chiqarish texnologiyalari hozirgi vaqtda hali to‘liq rivojlanib yetmagan [10].qo’shma ishlab chiqarish texnologiyasining asosiy afzalliklari qayta ishlanadigan material hajmining cheklanganligi va ishlab chiqarishning nisbatan sekinligi.

Uch o’lchovli bosib chiqarish – obyektlarni qatlamma-qatlam chop etish uchun kukunsimon metall, plastik va yopishtiruvchi materiallardan foydalanadigan prototiplash texnologiyasi hisoblanadi. Sirt qoplamalarini yaratishdan farqli o‘laroq, 3D bosib chiqarish mustaqil (yakka) texnologiya bo‘lmay, balki kompyuter, kompyuter ko‘magidagi loyihalash (CAD), lazer, bosib chiqarish va raqamli dasturli boshqaruv (RDB/CNC) orqali ishlov berish texnologiyalarini o‘zida birlashtiradi. Ushbu texnologiyalarning rivojlanishi bilan 3D bosib chiqarish ham jadal taraqqiy etdi va uning turli shakllari, jumladan: qatlamlarni eritib joylashtirish (FDM), selektiv lazerli sinterlash (SLS), kukunli qatlam va purkagichli kallak yordamida 3D bosib chiqarish (3DP) hamda stereolitografiya (SLA) usullari asta-sekin kirib keldi.[4]



2-rasm. Uch o’lchovli bosib chiqarish jarayoni[4]

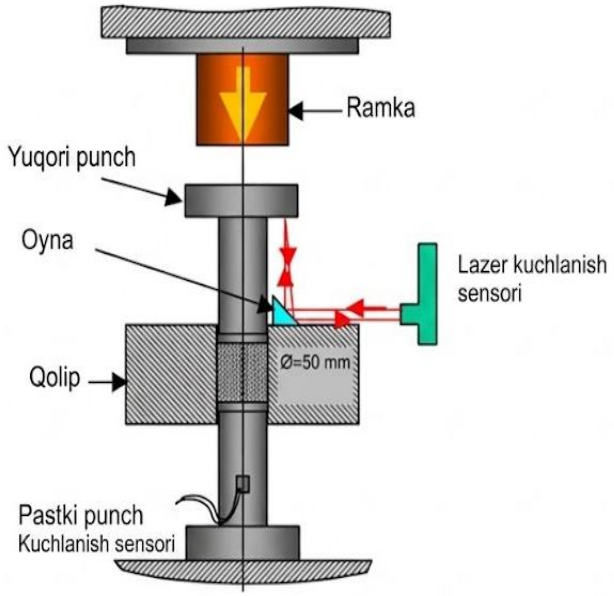
Ushbu texnologiya asosida termoplastik polimer materiallarni bosib chiqarishga imkon yaratadi, ammo bugunki kunda bunday kompozitlarda ishlatiladigan polimerlarning aksariyati nisbatan past mexanik ko’rsatkichlarga ega hisoblanadi.

Magnit impulsli changni siqish texnologiyasi

Bu usul changlarni impuls-modulyatsiyalangan elektromagnit maydon bosimi orqali siqishni amalga oshiradi. Ushbu texnologiya bir nechta afzalliklarga ega bo’lib, yuqori iqtisodiy samaradorlik, tez ishlov berish va nisbatan soda texnologik joriy etish.Ammo, uning cheklovlari ham mavjud, u odatda faqat oddiy shakldagi qismlar uchun mos va sezilarli energiya yo’qotishlarga ega. Chang qolip sifatini asosan siqilish zichligi belgilaydi. An’anaviy quasi-statik usullar — masalan, ekstruziya kalıplash, injeksiya kalıplash va issiq presslash — siqilgan material ichida zichlikning birxil bo‘lmasligiga olib keladi. Chang zarrachalari va qolip devorlari orasidagi ishqalanish energiya yo‘qotilishiga va sinterlash jarayonida sezilarli qoldiq stress hosil bo‘lishiga olib keladi, bu esa yakuniy qismlarda yoriqlar paydo bo‘lishiga sabab bo‘ladi.

Boshqa tomondan, magnit impulsli changni siqish — dinamik, yuqori tezlikdagi jarayon bo‘lib, tez prototiplash uchun mos keladi. Boshqa yuqori tezlikdagi siqish texnologiyalariga o‘xshab — masalan, portlashli siqish — u zichlikni oshirish uchun stress to‘lqinlarini tarqatishga asoslanadi, bu 8-rasmda sxematik ko‘rsatilgan [11].

Tadqiqotchilarning turli siqish tezliklarining mahsulot sifati uchun muhim omillar ekanligini o‘rganishgan. Texnik qiyinchiliklardan biri portlashli siqish tezligini nazorat qilishdir. Zarba bolg‘asining tushish balandligini sozlash orqali siqish tezligini tartibga solish mumkin; ammo bu ham shovqin darajasining oshishiga olib keladi [12].



3-rasm.Yuqori tezlikdagi siqishning sxematik tasviri.[4]

Changni siqish jarayonida chang zarrachalari 3 bosqichdan o’tadi:

1. zarracha qayta joylashuvi
2. elastoplastik deformatsiya
3. sinish

Sezilarli deformatsiya zarracha yuzalarida katta issiqlik hosil qiladi,bu esa local payvandlanishga olib keladi. Bugunki kunda magnit impulsli changni siqish texnologiyasiga doir tadqiqotlar asosan metall matritsali kompozitlar, noorganik metall bo’lmagan materiallar va yaxshi elektr va issiqlik o’tkazuvchanligiga ega boshqa changlarga qaratilgan.Magnit impulsli changni siqish texnologiyasi yuqori tezlik va bir jinsli taqsimot, yuqori kompleks unumdorlik, past elastik tiklanish,arzon tannarx va yuqori mahsuldorlik kabi afzalliklarga ega ammo texnologiyning energiyadan foydalanish samaradorligi juda past va energiyaning katta qismi ishchi qismga o’tuvchi magnit maydon, g’altak qarshiligining qizishi va magnit maydonning qoldiq energiyaning issiqlikka aylanishi hisobiga sarflanadi.

Polimer kompozit materiallar (PKM) zamonaviy sanoat inqilobining poydevori hisoblanib, ularning an’anaviy og‘ir metallar (po‘lat, alyuminiy) o‘rnini egallashi aviatsiya, avtomobilsozlik va elektrotexnika sohalarida energiya samaradorligi hamda konstruksiya xavfsizligini ta’minlashda tub burilish yasadi. Maqolada keltirilgan tahlillar shuni ko‘rsatadiki, PKMning yakuniy mexanik xususiyatlari, chidamliligi va xizmat muddati bevosita ularni ishlab chiqarish hamda qayta ishlash texnologiyasiga bog‘liqdir.

Tadqiqot doirasida ko‘rib chiqilgan texnologiyalar asosida quyidagi muhim xulosalarga kelindi:

An’anaviy usullar (Qo‘lda qatlamlash, Vakuumli infuziya, Ekstruziya, Avtoklav): Ushbu usullar bugungi kunda sanoatda doimiy sifat va yuqori takrorlanuvchanlikni ta’minlovchi asosiy bazaviy texnologiyalar hisoblanadi. Biroq, murakkab shakldagi qismlarni ishlab chiqarishda qolip xarajatlarining yuqoriligi va texnologik cheklovlar muqobil muhandislik yechimlarini talab etmoqda.

Sirt qoplama texnologiyalari (Plazmali purkash, Magnetronli changitish, Elektrokimyoviy cho‘ktirish, Sol-gel): Ushbu innovatsion yondashuvlar materiallar yuzasini korroziyadan himoya qilish, bio-tibbiy xususiyatlarni yaxshilash va nano-tuzilmali aqlli tizimlarni yaratishda yuqori samaradorlik ko‘rsatdi. Har bir usul muayyan xomashyo (polimer, metall yoki keramika) turiga qarab o‘ziga xos afzallik va texnologik sezgirlikka ega.

Qo‘shma ishlab chiqarish (3D/4D/5D bosib chiqarish): Raqamli dizayn (CAD) va qatlamma-qatlam shakllantirish tamoyillarining integratsiyasi murakkab geometriyali detallarni minimal xomashyo sarfi bilan tezkor prototiplash imkonini beradi. Bugungi kunda termoplastik polimerlarning mexanik ko‘rsatkichlarini yanada oshirish ushbu sohadagi asosiy ilmiy yo‘nalishlardan biridir.

Magnit impulsli changni siqish texnologiyasi: Dinamik va yuqori tezlikdagi usul sifatida material ichida zichlikning bir xil taqsimlanishini ta’minlaydi va qoldiq stresslar hisobiga yuzaga keladigan yoriqlarning oldini oladi. Biroq, texnologiyaning energiya samaradorligi pastligi va faqat oddiy geometrik shakllar bilan cheklanganligi uni yanada takomillashtirish zarurligini ko‘rsatadi.

Tadqiqot natijalari asosida polimer kompozit materiallarning texnologik rivojlanishida uchta asosiy yo‘nalish ajratildi: (1) an’anaviy texnologiyalarni optimallashtirish va avtomatlashtirish; (2) sirt va interfeys xususiyatlarini boshqarishga asoslangan funksional qoplamalarni rivojlantirish; (3) raqamli va yuqori tezlikdagi ishlab chiqarish texnologiyalarini takomillashtirish. Ushbu yo‘nalishlarning rivojlanishi polimer kompozitlarning mexanik mustahkamligi, chidamliligi, funksionalligi va ishlab chiqarish samaradorligini oshirish uchun muhim ilmiy-amaliy asos yaratadi.

Umuman olganda, tadqiqot natijalari polimer kompozit materiallarning ekspluatatsion xususiyatlari faqat matritsa va mustahkamlovchi komponentlarning tabiati bilan emas, balki ularni shakllantirish va qayta ishlash jarayonining texnologik parametrlari bilan ham belgilanadi, degan xulosaga kelish imkonini berdi. Shu sababli zamonaviy PKM ishlab chiqarishda “tarkib–tuzilish–texnologiya–xossa” o‘rtasidagi o‘zaro bog‘liqlikni kompleks boshqarish eng istiqbolli ilmiy yo‘nalishlardan biri sifatida qaralishi mumkin.

Yakuniy xulosa o‘rnida aytish mumkinki, polimer kompozit materiallar ishlab chiqarishning kelajagi an’anaviy qoliplash usullarini raqamli 3D texnologiyalar va yuqori tezlikdagi dinamik siqish usullari bilan gibridlashtirish hamda jarayonlarni to‘liq avtomatlashtirish bilan uzviy bog‘liqdir. Aynan ushbu yondashuv ishlab chiqarish tannarxini kamaytirish va material unumdorligini maksimal darajaga ko‘tarish imkonini beradi.

Foydalanilgan adabiyotlar.

1. Muhammad, A.; Rahman, M.R.; Baini, R.; Bakri, M.K.B. 8-Applications of sustainable polymer composites in automobile and aerospace industry. Adv. Sustain. Polym. Compos. 2021, 185–207b
2. . Rajak, D.K.; Pagar, D.D.; Menezes, P.L.; Linul, E. Fibre-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications. Polymers 2019, 11, 1667.
3. Irving, P.E.; Soutis, C. Polymer Composites in the Aerospace Industry; Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 2019;. 3–22b
4. Chenchen Wu., Fan X uva boshqalar. Manufacturing Technologies of Polymer Composites—A Review. Polymers. 2023. 15, 712. 3-4b
5. Milan Bukvi´va boshqalar. Production Technologies and Application of Polymer Composites in Engineering: A Review. Polymers.2025. 17, 2187.

6. Jinho, S.; Kwangmin, L.; Jeongtae, K.; Hyeju, S.; Hyunseung, K.; Hyun-Pil, L.; Kwidug, Y.; Gyejeong, O.; Seokwoo, L.; Heekyun, O.; et al. Hydroxyapatite coatings on nanotubular titanium dioxide thin films prepared by radio frequency magnetron sputtering. J. Nanosci. Nanotechnol. 2013, 13, 5807–5810.
7. Boccaccini, A.R.; Keim, S.; Ma, R.; Li, Y.; Zhitomirsky, I. Electrophoretic deposition of biomaterials. J. R. Soc. Interface 2010, 7, 581–613.
8. Layrolle, P.; Ito, A.; Tateishi, T. Sol-gel synthesis of amorphous calcium phosphate and sintering into microporous hydroxyapatite bioceramics. J. Am. Ceram. Soc. 1998, 81, 1421–1428.
9. ISO/ASTM 52900; Additive Manufacturing-General Principles-Fundamentals and Vocabulary. National Standards Authority of Ireland: Dublin, Ireland, 2021.
10. Kumar, P.; Roy, S.; Hegde, H.; Bharti, S.; Kumar, M. Chapter 8–4D and 5D printing: Healthcare's new edge. In 3D Printing Technology in Nanomedicine; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2019; pp. 143–163.
11. Liu, W.; Sun, L.; Luo, Y.; Wu, R.; Jiang, H.; Chen, Y.; Zeng, G.; Liu, Y. Facile transition from hydrophilicity to superhydrophilicity and superhydrophobicity on aluminum alloy surface by simple acid etching and polymer coating. Appl. Surf. Sci. 2013, 280, 193–200
12. Addonizio, M.L.; Fusco, L. Adhesion and Barrier Properties Analysis of Silica-Like Thin Layer on Polyethylene Naphthalate Substrates for Thin Film Solar Cells. Adv. Sci. Technol. 2010, 74, 113–118.