# AKKUMULYATOR MODULLARI UCHUN AEROGEL–POLIMER ISSIQLIK TO'SIQLARINI LOYIHALASH VA BAHOLASH MEZONLARI

**Soataliyev Diyorbek Bahodir o'g'li**
Namangan davlat texnika universiteti magistranti
E-mail: soataliyevdiyorbek1@gamil.com | Tel.: +998 99 806 15 16
02.00.07 — Kompozitsion, lok-bo'yoq va rezina materiallari kimyosi va texnologiyasi

**Annotatsiya.** Elektromobil akkumulyator bloklaridagi qo'shni elementlar orasida issiqlik tarqalishini sekinlashtirish maqsadida aerogel–polimer qatlamni loyihalashning ilmiy-texnologik mezonlari ko'rib chiqiladi. Issiqlik izolatsiyasi, siqilishdagi barqarorlik va odatiy sovitish rejimi o'rtasidagi muvozanatga urg'u beriladi.

**Kalit so'zlar:** aerogel, $SiO_2$, polimer matritsa, issiqlik to'siq, termik qochish, akkumulyator moduli.

**Asosiy matn**

Termik qochishning bir batareya elementidan boshqasiga o'tishi konduksiya, konveksiya va nurlanish omillarining birgalikdagi ta'siriga bog'liq. Zamonaviy sharhlarda passiv termik to'siqlar, jumladan aerogel asosidagi qatlamlar, avariya vaqtidagi issiqlik tarqalishini kechiktirishi mumkinligi muhokama qilingan [2, 3]. Ammo past issiqlik o'tkazuvchanlikning o'zi yetarli emas: real konstruksiyada qalinlik, bosim ostidagi deformatsiya va qatlamlararo kontakt hal qiluvchi omillardir.

Tadqiqot konsepsiyasida silikon yoki boshqa mos polimer bog'lovchi asosiga g'ovak $SiO_2$ komponentini kiritib, nazorat va bir necha tarkib seriyalarini olish nazarda tutiladi. Kompozit yuzasi va ichki qismida mineral fazaning taqsimlanishi mikroskopik usullar bilan, namlikka sezuvchanligi massa o'zgarishi orqali, siqilishdagi qaytuvchanlik esa mexanik sinovlar bilan baholanadi. Polimer turi va qatlam geometriyasi texnik topshiriq tasdiqlangandan keyin aniqlanadi.

Bir o'lchamli statsionar modelda issiqlik oqimi zichligi $q = \lambda \Delta T/L$ bilan ifodalanadi. Bunda $\lambda$ — issiqlik o'tkazuvchanlik ($W/(m \cdot K)$), $\Delta T$ — qatlam yuzalari orasidagi harorat farqi (K), L — qalinlik (m). Haqiqiy ko'p qatlamli va g'ovak materialda kontakt, nurlanish hamda vaqtga bog'liq holatlarni hisobga oladigan qo'shimcha model zarur. Termik diffuziyani ASTM E1461 bo'yicha aniqlash imkoniyati materialning bir jinsliligi va anizotropiyasi hisobga olingan holda tekshiriladi [5].

Taklif etilgan sinovlar ketma-ketligi: xona haroratidagi issiqlik xossalari → haroratga bog'liq o'zgarish → siqilish va termik sikllash → qatlamlar adgeziyasi → nazorat ostidagi modulli termik ta'sir. Yuqori haroratli modul sinovlari faqat maxsus jihozlangan laboratoriyada xavfsizlik protokollari bilan bajarilishi lozim. Natijalar sovitish tizimi bilan uyg'unlashgan konstruktiv mezonlar asosida talqin qilinadi.

Ilmiy asos va tadqiqot doirasi

Batareya modulidagi passiv termik to'siqning vazifasi favqulodda lokal qizish chog'ida energiya uzatilishining tezligini kamaytirishdan iborat. Bu vazifa doimiy ishlashdagi sovitish vazifasidan farq qiladi. G'ovak kremniy dioksid aerogeli asosidagi kompozitlar qiziqish uyg'otishi mumkin, biroq aerogelning alohida o'lchangan xossalarini bog'lovchi qo'shilgan tayyor plastina xossalariga tenglashtirib bo'lmaydi [3].

Tadqiqot predmeti aerogel-polimer mikrostrukturasi, qatlam qalinligi, siqilishdagi holat va issiqlik uzatish o'rtasidagi bog'liqlikdir. Rejalashtirilayotgan ish materialning avariyaviy himoyadagi



© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

imkoniyatini aniqlash bilan bir vaqtda normal ekspluatatsiyada sovitishga salbiy ta'sirini ham baholashga qaratiladi. Tizimning umumiy xavfsizligi faqat qatlam tanlash bilan hal etilmasligi boshidanoq metodik cheklov sifatida qabul qilinadi.

Aerogel mikrostrukturasi va polimer bilan aloqasi

Aerogelning kichik hajmiy zichlik va murakkab g'ovak tuzilma kabi umumiy xususiyatlari kompozit materialda bir xil saqlanib qolishi shart emas. Suyuq bog'lovchi g'ovak tizimga kirib borishi mumkin; bu mexanik kontaktni kuchaytirsa ham, qisman issiqlik o'tkazuvchi ko'priklar paydo bo'lishiga olib kelishi ehtimoli mavjud. Shu sababli polimerning reologiyasi, impregnatsiya usuli va qotirish rejimi alohida tadqiqot omillaridir.

Kukunli aerogel, granula va tayyor tolali aerogel matlari bir xil ishlab chiqarish marshrutiga ega emas. Tayyor qatlamni tanlashda materialni kesish, o'rnatish va siqish paytidagi maydalanish xavfi hisobga olinadi. Polimer elastikligining ortishi montaj uchun qulay bo'lishi mumkin, biroq bosim ostida yakuniy qalinlik kamayishi va termik qarshilik o'zgarishi ehtimoli mavjud. Bunday bog'lanishlar alohida o'lchov orqali aniqlanishi kerak.

Issiqlik uzatish modeli va chegaralari

Oddiy statsionar modelda $q = \lambda \Delta T/L$ tenglamasi berilgan qatlamdagi bir o'lchamli issiqlik oqimini baholaydi. Issiqlik qarshiligi $R = L/\lambda$ shaklida aniqlanadi; bunda geometrik o'lcham va samarali $\lambda$ bir xil fizik holat uchun olingan bo'lishi shart. Haroratga bog'liq $\lambda$ va siqilish natijasida o'zgaradigan L qiymatlarini doimiy deb olish modelning aniqligini pasaytiradi.

Batareya elementining tez qizishi nostatsionar rejimdir. Bu holatda harorat vaqt bo'yicha o'zgaradi va qatlamning issiqlik sig'imi ham muhim bo'ladi. Bir o'lchamli model faqat dastlabki saralash uchun yaroqli bo'lishi mumkin; keyingi bosqichda element–kontakt–to'siq–qo'shni element tizimini hisoblash tavsiya etiladi. Nurlanish, konveksiya va gaz oqimi mavjud bo'lsa, ular ham modelga kiritilishi kerak.

Qatlamlararo kontakt qarshiligi ba'zan umumiy qarshilikka sezilarli hissa qo'shishi mumkin. Lekin bu hissani doimiy foydali xususiyat deb qarash xavfli: montaj kuchi, tebranish va termik kengayish kontaktni o'zgartiradi. Shu bois himoya variantlarini solishtirganda faqat laboratoriya plastinasining $\lambda$ qiymati emas, real siqilgan holatdagi umumiy temperatura profili o'lchanadi.

Namuna tayyorlash va eksperiment rejasi

Dastlab bog'lovchisiz yoki referens sifatida tanlangan bazaviy material hamda turli bog'lovchi ulushli kompozit namunalar tayyorlanadi. Ularning qalinligi, maydon zichligi, ko'rinadigan nuqsonlari va namlikdan keyingi holati qayd etiladi. Har bir kompozitsiya uchun xomashyo kelib chiqishi va tayyorlash ketma-ketligi hujjatlashtiriladi. Tarkib tanlashda g'ovaklikning saqlanish darajasi hamda ishlab chiqarishdagi takrorlanuvchanlik asosiy mezonlar sifatida olinadi.

Ikkinchi bosqichda siqilishdagi deformatsiya, qaytuvchanlik va siklik yuklamadan keyingi qalinlik baholanadi. Bu sinovlar termik o'lchashdan oldin va keyin qo'llansa, mexanik ta'sirning issiqlik izolyatsiyasiga munosabatini ko'rish mumkin. Biroq sinovdan oldingi holat bilan keyingi holat bir xil konditsiyalash sharoitida qiyoslanishi kerak; aks holda namlik yoki vaqt omili noto'g'ri xulosaga olib kelishi mumkin.

Issiqlik va yong'inga javob sinovlari

Issiqlik diffuzivligini baholashda ASTM E1461 kabi mos usul va sinov uskunasi imkoniyatlari ko'rib chiqilishi mumkin [5]. Biror standartning namunaga tatbiq etilishi material geometriyasi, g'ovaklik va laboratoriya uslubiy cheklovlariga muvofiq tekshiriladi. Agar $\lambda = \alpha \rho c_p$ hisobidan



© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

foydalanilsa, solishtirma issiqlik sig'imi va zichlik tegishli harorat va namuna holatida olinadi; hisoblangan qiymatning xatoligi ham ko'rsatiladi.

Yong'inga javob va issiqlik izolyatsiyasi turli xossalardir. Aerogel-polimer qatlam issiqlikni sust o'tkazgan holda, bog'lovchining termik degradatsiyasi sabab boshqa cheklovlarga duch kelishi mumkin. Shu bois sinov dasturiga massa yo'qotish, yuqori haroratdagi strukturaviy butunlik va zarur hollarda konus kalorimetriyani kiritish maqsadga muvofiq [6]. Har bir sinov natijasi faqat o'sha tajriba sharoitiga oid xulosa berishi tushuntiriladi.

Mezonlar, xavf va amaliy qo'llash

Termal to'siqni baholash mezonlari uch guruhga bo'linadi: termik (samarali λ, issiqlik oqimi, qo'shni yuzaning qizish dinamikasi), mexanik (siqilish, tiklanish, qatlam ajralishi) va texnologik (kesilish, yopishtirilish, shakllanish, massa). Muayyan kompozitga ustunlik berish uchun uning barcha mezonlar bo'yicha ko'rsatkichlari mavjud bo'lishi kerak. Minimal xavfsizlik cheklovi bajarilmagan tarkib boshqa bitta ko'rsatkichda yaxshi chiqqani bilan maqbul bo'lib qolmaydi.

Alohida e'tibor izolyatorning sovitish kanallariga, elektr izolatsiyasi talablariga, ventilyatsiya va favqulodda gaz chiqarish yo'llariga ta'siriga qaratiladi. Modullarning konstruktiv sxemasi o'zgarganda ilgari olingan natija qayta tekshirilishi kerak. Himoya detalini noto'g'ri joylashtirish issiqlikni kerakli yo'nalishda chiqarishga to'sqinlik qilishi mumkin. Demak laboratoriya natijasini modul darajasida tasdiqlash keyingi zarur bosqich hisoblanadi.

Ilmiy natijani asoslash shartlari

Bu metodik taklif yangi tayyor aerogel kompozit mavjudligini yoki uning raqobatchidan ustunligini da'vo qilmaydi. Taxmin qilinayotgan asosiy ilmiy hissa — bog'lovchi infiltratsiyasi va siqilishdagi strukturaviy o'zgarishni termik xossa bilan birgalikda tahlil qiluvchi sinov sxemasidir. Buning uchun mustaqil namuna partiyalari, nazorat guruhlari va o'lchov noaniqligi ko'rsatilgan natijalar zarur.

Keyingi bosqichda eng yaxshi laboratoriya konfiguratsiyasi haqiqiy konstruktiv qalinlik va montaj bosimida tekshiriladi. Shundan so'nggina qatlamning akkumulyator moduli doirasidagi termik tarqalishni kechiktirishga qay darajada xizmat qilishi haqida ehtiyotkor xulosa chiqarish mumkin. Ushbu yondashuv material xossasi bilan tizim xavfsizligi orasidagi mantiqiy farqni saqlab qoladi.

Tadqiqotning ilmiy chegaralari

Taklif etilayotgan yondashuv material yaratishning tajriba oldi konsepsiyasidir. Hozircha olingan namunalarning termik, mexanik yoki yong'in xavfsizligi bo'yicha o'lchangan ko'rsatkichlari mavjud deb hisoblanmaydi. Shuning uchun alohida tarkibning ustunligi, ma'lum haroratga bardoshliligi yoki batareya moduli xavfsizligini oshirish darajasi haqida sonli xulosa berish mumkin emas. Tadqiqot savoli quyidagicha qo'yiladi: mineral faza turi, uning taqsimlanishi va polimer bilan chegaraviy aloqasi birgalikda qaysi xossalar muvozanatini belgilaydi?

Laboratoriyada olingan material natijalarini butun akkumulyator bloki uchun avtomatik ravishda qo'llash metodologik xatodir. Laboratoriya namunasi olov ta'sirida ma'lum javobni ko'rsatishi mumkin, biroq yig'ilgan modulda elektr kontaktlari, ventilyatsiya kanallari, bosim, mexanik mahkamlash va elementlar joylashuvi issiqlik oqimini o'zgartiradi. Shu sababli dastlab material, keyin konstruktiv detal, undan keyingina modul miqyosida baholash ketma-ketligi tavsiya etiladi.

Xavfsizlik va natijalarni talqin qilish

Yonuvchanlikni baholashda bitta sinov bilan cheklanish maqsadga muvofiq emas. Masalan, kichik alangaga javob bilan doimiy tashqi issiqlik oqimida ajraladigan issiqlik miqdori bir xil kattalik emas.



© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

ISO 5660-1 konus kalorimetri usuli issiqlik ajralish tezligi va tutun hosil bo'lishini sinashga tegishli [6]. Bunda natijalar namuna qalinligi, orientatsiyasi, tashqi issiqlik oqimi va tayyorlash rejimiga bog'liq bo'lishi mumkin. Hisobotda aynan sinov sharoiti va kuzatilgan o'zgaruvchilar ko'rsatilishi zarur.

Issiqlikdan himoyalovchi polimer-mineral qatlam batareyaning avariyaviy rejimiga mo'ljallangan passiv element sifatida ko'riladi. U elektr boshqaruv tizimi, elementlarning ishonchli mexanik himoyasi va ishchi sovitish tizimining o'rnini bosa olmaydi. Ayniqsa, issiqlikni kam o'tkazish xususiyati normal zaryadlanish va razryadlanishda issiqlikning chiqib ketishini qiyinlashtirishi ehtimolini baholash kerak. Material tanlashda ushbu qarama-qarshi talablarning konstruktorlik darajasidagi muvozanati ko'zda tutiladi.

Xulosa

Aerogel–polimer kompozitlar istiqbolli passiv termik to'siq sinfi bo'lsa-da, ularning elektromobil moduliga mosligini isbotlash uchun faqat λ qiymati emas, mexanik barqarorlik va tizim darajasidagi issiqlik rejimi ham tekshirilishi zarur. Bayon etilgan sxema hozircha metodik taklif hisoblanadi.

**Foydalanilgan adabiyotlar**

[2] Jiang Y., Jiang Y., Wang P. A review on mitigating thermal runaway propagation in battery packs: from mechanisms to modeling and design optimization. Energy Advances. 2026;5:777–809. https://doi.org/10.1039/D5YA00351B

[3] Research progress of aerogel used in lithium-ion power batteries. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2024;92:105433. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105433

[5] ASTM E1461-13(2022). Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method. ASTM International. https://doi.org/10.1520/E1461-13R22



© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.