ISSN:3030-332X
Impact factor: 9,493
International journal of scientific researchers

ELEKTROMOBIL AKKUMULYATOR BLOKLARI UCHUN OLOVGA CHIDAMLI VA ISSIQLIK IZOLATSIYALOVCHI POLIMER–MINERAL KOMPOZITSIYALARNI LOYIHALASHNING KIMYOVIY-TEXNOLOGIK ASOSLARI

Soataliyev Diyorbek Bahodir o‘g‘li
Namangan davlat texnika universiteti magistranti
E-mail: soataliyevdiyorbek1@gmail.com
Tel.: +998 99 806 15 16
02.00.07 — Kompozitsion, lok-bo‘yoq va rezina materiallari kimyosi va texnologiyasi
https://doi.org/10.5281/zenodo.23362943

Annotatsiya. Maqolada elektromobil litiy-ion akkumulyator modullarining issiqlik xavfsizligi uchun polimer–mineral kompozitsion qatlamlarni shakllantirish prinsiplari ilmiy adabiyotlar asosida tahlil qilinadi. $Mg(OH)_2$ va $Al(OH)_3$ антипиренларининг endotermik parchalanishi, SiO_2 aerogelining issiqlik izolatsiyasi hamda polimer matritsa bilan mineral faza orasidagi adgeziya masalalari bir tizimda ko‘rib chiqiladi. Ikki qatlamli funksional arxitektura va uning sinov algoritmi taklif qilinadi. Maqola eksperimental natijalar hisoboti emas; tavsiya etilgan tarkiblar va texnologik parametrlar tajribada tekshirilishi lozim.

Kalit so‘zlar: elektromobil, litiy-ion akkumulyator, polimer–mineral kompozit, magniy gidroksid, aluminiy gidroksid, aerogel, антипирен, termik qochish, issiqlik izolatsiyasi.

Kirish

Litiy-ion batareyada termik qochish (thermal runaway) — ajralayotgan issiqlikni chiqarib yuborish imkoniyatidan yuqori bo‘lgan ekzotermik jarayonlar ketma-ketligidir. Mexanik shikastlanish, elektr nosozligi yoki qizib ketish bunday holatni boshlashi mumkin [1]. Alohida elementning favqulodda qizishi qo‘shni elementlarga o‘tsa, modul darajasida kaskadli nosozlik xavfi yuzaga keladi [2]. Shu sababli himoya qatlami faqat yonishni sekinlashtirish emas, balki issiqlik oqimini cheklash va yuqori haroratda geometriyasini saqlash vazifalarini ham bajarishi kerak.

Bunda «issiqlik o‘tkazmaydigan» atamasi fizik jihatdan mutlaq ma’noda qo‘llanmaydi: real materiallarning issiqlik o‘tkazuvchanligi noldan katta. Ilmiy aniq maqsad — talab etilgan sharoitda past issiqlik o‘tkazuvchanlik va yetarli termo-mexanik barqarorlikka erishishdir.

Tadqiqot maqsadi va yondashuv

Maqsad — polimer–mineral kompozitning tarkibi, mikrotuzilishi, olish texnologiyasi va ekspluatatsion samaradorligi orasidagi bog‘lanishlarni tahlil qilish hamda akkumulyatorlar orasiga joylashtiriladigan passiv himoya qatlami uchun tekshiriladigan texnologik konsepsiyani asoslash. Usul: tanlangan sharh maqolalar va standartlarni qiyosiy tahlil qilish, issiqlik uzatishning asosiy tenglamalari bilan konseptual baholash.

Mineral komponentlarning vazifalari

$Al(OH)_3$ va $Mg(OH)_2$ qizdirilganda endotermik jarayon orqali parchalanib, suv ajratadi va oksid qoldig‘ini hosil qiladi: $2Al(OH)_3 \rightarrow Al_2O_3 + 3H_2O$; $Mg(OH)_2 \rightarrow MgO + H_2O$. Mazkur mexanizm polimerning yonuvchan fazasini suyultirish va issiqlikni yutish bilan bog‘liq [4]. Biroq samaradorlik

polimer turiga, zarracha sirtiga, konsentratsiya va disperslanishga bog‘liq; аппликен qo‘shilgan har qanday tarkibni avtomatik tarzda «olovga chidamli» deb baholash noto‘g‘ri.

SiO_2 asosidagi aerogel yoki aerogel-kompozit strukturalar past issiqlik uzatish xususiyati bilan termik to‘siq vazifasini bajarishi mumkin [3]. Bunda aerogelning mo‘rtligi, chang ajralishi, siqilishdagi deformatsiyasi va polimer bilan birikishi konstruksiyaning uzoq muddatli ishonchliligini belgilaydi.

Taklif etilayotgan funksional konstruksiya

Bir jinsli, yuqori darajada mineral bilan to‘ldirilgan qatlam o‘rniga ikki funksiyali arxitektura ilmiy gipoteza sifatida ilgari suriladi: (I) mineral gidroksid bilan modifikatsiyalangan polimerning sirtga yaqin olovdan himoyalovchi qatlami; (II) aerogel yoki g‘ovak silikat fazasiga ega issiqlik izolatsiyalovchi yadro. Bog‘lovchi sifatida silikon elastomer yoki boshqa mos termoreaktiv tizim alohida tekshirish obyekti bo‘lishi mumkin; tanlovni texnologik harorat, gaz ajralishi, dielektrik xossalar va eskirish sinovlari belgilaydi.

Funktsional mezon	Modifikatsiya yo‘nalishi	Ehtimoliy cheklov
Olovga javob reaksiyasi	$Mg(OH)_2$/$Al(OH)_3$ va matritsa moslashuvi	Ko‘p to‘ldirgichda mo‘rtlik, yuqori qovushqoqlik
Issiqlik izolatsiyasi	Aerogel/g‘ovak silikatli oraliq qatlam	Siqilish va xizmatdagi issiqlik yig‘ilishi
Mexanik yaxlitlik	Sirt modifikatsiyasi va qatlamlararo adgeziya	Termik siklda ajralish va yorilish
Elektr xavfsizligi	Izolatsion matritsa, namlik nazorati	Namlik yutilishi va dielektrik degradatsiya

Texnologik jarayon loyihasi

Taklif etilayotgan laboratoriya zanjiri: (1) mineral zarrachalarni namlik va granulometriya bo‘yicha tekshirish; (2) kerak bo‘lsa, sirtni mos silan birikmasi bilan funksionallashtirish; (3) polimer bog‘lovchi bilan nazoratli aralashtirish va gaz pufaklarini kamaytirish; (4) alohida termoizolatsion qatlamni shakllantirish; (5) qatlamlarni birlashtirish va belgilangan rejimda qotirish; (6) qalinlik, zichlik va nuqsonlar nazorati. Aralashtirish harorati, sarf me’yorlari va qotish vaqti matritsa turi tanlanmaguncha raqam bilan belgilanishi ilmiy asosli emas.

Baholash metodikasi va ilmiy tekshiriladigan gipotezalar

Materialning issiqlik o‘tkazuvchanligi zichlik ρ, issiqlik sig‘imi c_p va termik diffuziya a orqali $\lambda = a\rho c_p$ ifodasi bilan baholanishi mumkin [5]. Shu bilan birga, g‘ovak hamda anizotrop qatlamlarga ASTM E1461 ni bevosita qo‘llash cheklovlari tekshiriladi: asosiy natija issiqlik oqimining qatlam tekisligiga tik yo‘nalishdagi qiymati bo‘lishi kerak. Qalinligi L bo‘lgan tekis qatlamda statsionar yaqinlashuv $q = \lambda\Delta T/L$ bo‘lib, bu ifoda kontakt qarshiligi va nurlanish kabi ta’sirlarni alohida tekshirish zaruratini bekor qilmaydi.

Yonishga javobni dastlab UL 94 kichik namunali sinovlari bo‘yicha qiyoslash mumkin, ammo UL 94 sinfi akkumulyator modulining termik qochishga qarshi himoyalanganligini mustaqil tasdiqlamaydi [7]. Issiqlik ajralish tezligi va tutun hosil bo‘lishini ISO 5660-1 konus kalorimetri bilan baholash taklif etiladi [6]. Keyingi bosqichda xavfsiz, nazorat qilinadigan laboratoriya sharoitida modulga mos issiqlik ta’siri sinovlari, termik sikllash, siqilish, adgeziya va dielektrik mustahkamlik baholanadi.

Asosiy tekshiriladigan gipoteza: ikki funksional qatlam bir xil umumiy qalinlikdagi bir jinsli kompozitga nisbatan issiqlik oqimi va yong‘inga javob ko‘rsatkichlari o‘rtasidagi muvozanatni yaxshilashi mumkin. Bu hozircha tadqiqot farazi bo‘lib, tajriba bilan isbotlanmagan.

Muhokama

Adabiyotlarda izolatsion to‘siq termik qochishning qo‘shni elementlarga o‘tishini kechiktirishi mumkinligi ko‘rsatiladi [2, 3]. Biroq himoya qatlami oddiy ishlash rejimida issiqlikni chiqarish tizimi o‘rnini egallamaydi; material qalinligi, massa, joylashuvi hamda sovitish tizimi bilan uyg‘unligi akkumulyator blokining umumiy konstruksiyasi darajasida baholanishi kerak [2]. Metall gidroksidli faza va aerogelni bitta tizimda qo‘llash g‘oyasi sinovlar bilan tasdiqlanmaguncha uning ustunligini qat’iy ta’kidlash mumkin emas.

Ilmiy muammoning qo‘yilishi va texnologik maqsad

Elektromobil batareya tizimlarida material tanlash faqat alangaga chidamlilik bilan chegaralanmaydi. Himoya elementining vazifasi lokal issiqlik zarbasini qo‘shni konstruktiv hududlarga uzatishni cheklash, shu bilan birga mexanik mahkamlash va ekspluatatsion muhitda butunligini saqlashdan iborat. Adabiyotlarda termik qochish jarayonining mexanizmlari va uni cheklash uchun ko‘p darajali himoya yondashuvlari muhokama qilinadi [1, 2]. Kompozit material darajasida esa muammoning markazida polimer matritsa, mineral антипiren va mikrostrukturani boshqarish turadi.

Bu ishda ikki funksiyani bitta qatlamga majburan yuklash o‘rniga, yong‘inga javobni boshqaradigan va issiqlikni izolyatsiyalaydigan qatlamlarning o‘zaro bog‘liq loyihasi nazariy jihatdan muhokama qilinadi. Bunday arxitektura tayyor konstruksiyaning ma’lum talablarga javob berishini kafolatlamaydi; u keyingi eksperimental qiyoslash uchun gipotezadir. Texnologik maqsad tarkib–struktura–xossa bog‘lanishini taqqoslanadigan namuna seriyalari orqali ochib berishdan iborat.

Polimer matritsani tanlash prinsiplari

Polimer tanlashda uning termik parchalanish mexanizmi, qotirish jarayoni, qayta ishlash qovushqoqligi, mineral yuzasi bilan adgeziyasi va batareya atrofidagi servis muhitiga mosligi hisobga olinadi. Silikon elastomerlar, termoreaktiv bog‘lovchilar va boshqa polimer sinflari bir xil jarayon orqali tayyorlanmaydi. Shu bois “universal” retseptura ishlab chiqishdan ko‘ra, avval matritsa turini qat’iy belgilash, so‘ng to‘ldirgichni shu matritsaga mos optimallashtirish ilmiy jihatdan izchilroqdir.

Matritsaning elastikligi texnologik yig‘ishda va termik kengayishdagi farqlarni qisman kompensatsiya qilishi mumkin, lekin yuqori haroratda shaklni saqlash bilan har doim ham mos kelavermaydi. Qattiq matritsa esa yuqori mustahkamlik berishi mumkin, biroq mahalliy termik deformatsiyalarda mo‘rtlashish ehtimoli bor. Ushbu imkoniyatlar aniq material sinfi va tarkibga bog‘liq gipoteza sifatida baholanadi; tanlov uchun siqilish, egilish, qarish va termik tahlil natijalarini birgalikda taqdim etish zarur.

Mineral to‘ldirgichlarning reaksiya mexanizmi

Gidroksidli mineral qo‘shimchalarning yong‘inga qarshi ishlashi endotermik dehidratatsiya jarayoni bilan bog‘lanadi. Soddalashtirilgan kimyoviy tenglamalar: $2Al(OH)_3 \rightarrow Al_2O_3 + 3H_2O$ va $Mg(OH)_2 \rightarrow MgO + H_2O$. Mazkur reaksiyalar uchun sodir bo‘lish sharoiti, kinetika va amaliy samaradorlik zarracha morfologiyasi hamda kompozit tizimiga bog‘liq. Reaksiyalarning o‘zi kompozitning sinovda avtomatik ravishda muayyan yong‘in sinfini olishini anglatmaydi [4].

Mineral yuklama ortgani sayin organik fazaning nisbiy ulushi kamayishi mumkin, lekin ayni vaqtda materialning zichligi, aralashmaning qovushqoqligi va zarralararo aglomeratsiya ehtimoli ortadi. Sirtni funksionallashtirish mineral fazaning polimerda taqsimlanishini yaxshilashi mumkin; ammo qo‘shimcha moddalar mustaqil omil sifatida nazorat qilinishi kerak. Aks holda natijadagi farq mineral turi yoki uning sirt modifikatsiyasidan qaysi biri hisobiga yuzaga kelganini ajratish qiyinlashadi.

Issiqlik izolyatsiyasi va ko‘p qatlamli tuzilma

SiO_2 aerogeliga asoslangan g‘ovak strukturada issiqlik o‘tishining qattiq skelet, gaz fazasi va nurlanish bilan bog‘liq mexanizmlari muhim. Bunday to‘ldirgichning kompozitga kiritilishi g‘ovaklikni qisman yo‘qotishi yoki bog‘lovchi bilan infiltratsiya tufayli issiqlik o‘tkazuvchanligini o‘zgartirishi mumkin. Shu sababli sof aerogel xususiyatini tayyor aerogel–polimer kompozit xususiyati deb ko‘rsatish noto‘g‘ri. Tayyor namunadagi samarali issiqlik o‘tkazuvchanlik alohida o‘lchanishi lozim [3, 5].

Ikki qatlamli konsepsiyada tashqi ta’sirga qaragan антипirenli qism mexanik yaxlitlik va yong‘inga javob vazifasini, ichki g‘ovak izolatsion qism esa qisqa muddatli issiqlik oqimini cheklash vazifasini bajarishi taxmin qilinadi. Qatlamlar orasidagi adgeziya, haroratdan kelib chiqadigan kengayish farqi va kontakt qarshiligi alohida muhandislik muammolaridir. Bir qatlam samarali bo‘lsa ham, qatlamlar ajralishi umumiy strukturaning ishonchliligini pasaytirishi mumkin.

Texnologik jarayonning taklif etilayotgan ketma-ketligi

Birinchi bosqichda polimerning partiyasi, mineralning granulometrik tarkibi va namligi qayd qilinadi. Ikkinchi bosqichda to‘ldirgich oldindan tayyorlanadi va polimerga takrorlanuvchi tartibda kiritiladi. Uchinchi bosqichda aralashtirishning bir xil davomiyligi, qurilma geometriyasi va temperatura rejimi saqlanadi. To‘rtinchi bosqichda havo pufaklarini kamaytirish va bir xil qalinlikda qoliplash amalga oshiriladi. Yakuniy bosqichda qotirish, konditsiyalash va identifikatsiya raqami berish orqali namuna tarixini kuzatish imkoniyati yaratiladi.

Polimer va mineralning bir-biriga mos kelmasligi natijasida aglomerat, mikrobo‘shliq yoki lokal qattiq zonalar hosil bo‘lishi ehtimoli mavjud. Ular issiqlik oqimining yo‘nalishi va mexanik yoriqning paydo bo‘lishiga ta’sir qilishi mumkin. Shu sababli sifat nazoratida faqat nominal massaviy tarkib emas, ko‘ndalang kesim mikrotuzilishi, g‘ovaklik va ishlab chiqarishdagi disperslanish takrorlanuvchanligi ham muhim mezon sifatida olinadi.

Tajriba dizayni va o‘lchashlar

Tajriba dizayni ikki pog‘onaga ajratiladi. Skrining bosqichida matritsa va to‘ldirgichlarning bir nechta kombinatsiyasi bir xil qalinlik hamda ishlab chiqarish sharoitida solishtiriladi. Keyingi optimallashtirishda istiqbolli tarkibning to‘ldirgich ulushi, zarracha o‘lchami va sirt holati kabi omillari alohida o‘zgartiriladi. Har bir seriyada nazorat tarkibi mavjud bo‘lishi, sinov tartibi esa avvaldan belgilanishi zarur. Minimal takror soni statistik quvvat va uskunaning dispersiyasi asosida asoslanishi kerak; u bu matnda o‘zboshimchalik bilan belgilanmaydi.

Termogravimetrik analiz massa yo‘qotish bosqichlarini kuzatishga, differensial skanerlovchi kalorimetriya termik o‘tishlarni baholashga yordam beradi. Issiqlik diffuzivligini flash usuli orqali aniqlash uchun ASTM E1461 singari metodik asosdan foydalanish mumkin [5]. Issiqlik o‘tkazuvchanlikni α, ρ va c_p o‘rtasidagi $\lambda = \alpha\rho c_p$ munosabati orqali hisoblashda barcha kattaliklar mos haroratda va ishonchli o‘lchangan bo‘lishi shart.

Yong‘inga javobni tavsiflashda namuna massasining o‘zgarishi, alangalanish vaqti, maksimal issiqlik ajralish tezligi, umumiy issiqlik ajralishi va tutun ko‘rsatkichlari maqsadga muvofiq. Sinov metodi ko‘rsatadigan hodisa bilan foydalaniladigan da’vo chegarasi bir-biriga mos bo‘lishi kerak. Polimer plastina uchun kichik alanga sharoitida olinadigan UL 94 tasnifi avtomatik ravishda butun batareya blokining termik qochishga chidamliligini tasdiqlamaydi [7].

Matematik model va ko‘rsatkichlarni optimallashtirish

Statsionar, bir o‘lchamli, doimiy parametrli qatlam uchun $q = \lambda\Delta T/L$ ifodasi dastlabki baholashda qo‘llanadi; bunda q — issiqlik oqimi zichligi, λ — samarali issiqlik o‘tkazuvchanlik, L — qalinlik va ΔT — haroratlar farqi. Qatlamlar ketma-ket joylashganda ideal kontakt sharoitida umumiy termik qarshilik $R = \Sigma(L_i/\lambda_i)$ ko‘rinishida ifodalanadi. Biroq termik qochish tez o‘zgaruvchi hodisa bo‘lib, bunday model uning to‘liq o‘rnini bosa olmaydi.

Material tanlash ko‘p mezonli masaladir: λ kichik bo‘lishi, issiqlik ta’siridagi yaxlitlik va mexanik barqarorlik saqlanishi, massa hamda texnologik xarajat oqilona chegarada qolishi zarur. Bunday mezonlarni bitta ixtiyoriy ballga birlashtirishdan oldin har bir ko‘rsatkichning fizik mazmuni va xavfsizlik bo‘yicha minimal talablar aniqlanadi. Tanlov natijasi “optimal” deb atalishi faqat tekshirilgan alternativalar va belgilangan mezonlar doirasida asosli bo‘ladi.

Ilmiy yangilikning tekshiriladigan gipotezasi

Tadqiqot yangiligi sifatida faqat “mineral qo‘shimcha qo‘shildi” degan yondashuv yetarli emas. Tekshiriladigan gipoteza: differensial funksiyali qatlamlar va mineralning boshqarilgan disperslanishi muayyan matrisa tarkibida issiqlik izolyatsiyasi, yong‘inga javob va mexanik ishlash o‘rtasidagi kompromissni yaxshilashi mumkin. Buni isbotlash uchun bir qatlamli va ko‘p qatlamli variantlar bir xil umumiy qalinlik hamda massada solishtiriladi.

Xulosa natijalar mavjud bo‘lmaguncha konseptual darajada qoladi. Eksperimental maqola sifatida topshirishda aynan yangi o‘lchashlar, xatolik oraliqlari, statistik tahlil va mikrostrukturaviy dalillar kiritilishi zarur. Shundagina texnologik yechimning mavjud analoglarga nisbatan ustunligi to‘g‘risida aniq hukm chiqarish mumkin.

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. 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

1. Kompozitni loyihalashda kamida uch mezon — yong‘inga javob, issiqlik qarshiligi va mexanik yaxlitlik — birgalikda optimallashtirilishi kerak.

2. $Mg(OH)_2/Al(OH)_3$ fazasi endotermik himoya mexanizmini, g‘ovak silikat fazasi esa issiqlik oqimini cheklash imkoniyatini beradi; real natija matritsa va mikrotuzilishga bog‘liq.

3. Taklif etilgan ikki qatlamli texnologiya tajriba rejasidir, tayyor tasdiqlangan mahsulot emas.

4. Ilmiy yangilikni dalillash uchun tarkib–struktura–xossa bog‘lanishi hamda standartlashtirilgan sinov natijalari zarur.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Feng X., Ouyang M., Liu X., Lu L., Xia Y., He X. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review. Energy Storage Materials. 2018;10:246–267. https://doi.org/10.1016/j.ensm.2017.05.013
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
4. Fire retardant action of mineral fillers. Polymer Degradation and Stability. 2011;96(8):1462–1469. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2011.05.006
5. ASTM E1461-13(2022). Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method. ASTM International. https://doi.org/10.1520/E1461-13R22
6. ISO 5660-1:2015. Reaction-to-fire tests — Heat release, smoke production and mass loss rate — Part 1: Cone calorimeter method. International Organization for Standardization. https://www.iso.org/standard/57957.html
7. UL Solutions. Combustion (Fire) Tests for Plastics: UL 94 flame ratings. https://www.ul.com/services/combustion-fire-tests-plastics