



PORADNIK MAGAZYN Y ENERGII · 8 MIN

## Bariery na poziomie ogniwa i modułu: papier z włókien, laminaty mikroporowate i aerożel w porównaniu

Który materiał barierowy najpewniej zapobiega propagacji między ogniwami i modułami? Techniczne porównanie papieru z włókien, laminatów mikroporowatych i kompozytów aerożelowych dla stacjonarnych magazynów energii.

### Dlaczego pierwsza linia obrony zaczyna się w ogniwie

Niekontrolowany wzrost temperatury (thermal runaway) zaczyna się zawsze w pojedynczym ogniwie. To, czy powstanie z tego zdarzenie ograniczone lokalnie, czy pełny pożar całego kontenera magazynowego, rozstrzyga się w pierwszych sekundach i minutach – a konkretnie w kwestii, czy ogniwo sąsiednie musi przyjąć wprowadzone ciepło, czy nie. Właśnie tu wkraczają bariery termiczne na poziomie ogniwa i modułu: cienkie warstwy rozdzielające między ogniwami oraz płyty rozdzielające między modułami, które ograniczają strumień ciepła tak długo, aż uwolniona energia zostanie odprowadzona lub rozłożona.

Dla projektantów i wykonawców stacjonarnych magazynów energii temat ma podwójne znaczenie. Po pierwsze, procedury badawcze takie jak UL 9540A oceniają zachowanie propagacyjne od ogniwa przez moduł aż po jednostkę – skuteczna bariera na poziomie ogniwa poprawia wynik na wszystkich poziomach wyższych. Po drugie, przestrzeń zabudowy w nowoczesnych rackach jest skrajnie ograniczona: każdy milimetr materiału barierowego konkuruje z gęstością energii. Dobór materiału jest dlatego zawsze kompromisem między wydajnością termiczną, grubością, zachowaniem mechanicznym i kosztami.

**Wskazówka:** Lista wymagań wobec bariery międzyogniowej — Bariera między ogniwami musi umieć więcej niż tylko izolować: musi krótkotrwale wytrzymać gorące cząstki i gazy z uszkodzonego ogniwa, izolować elektrycznie, mechanicznie znosić przez cały okres eksploatacji cykliczne „oddychanie” ogniwa (swelling) i zachowywać przy tym stabilność kształtu. Żaden pojedynczy materiał nie spełnia wszystkich punktów idealnie – dlatego w praktyce dominują kompromisy i układy wielowarstwowe.

### Papier z włókien: solidny klasyk

Papiery i maty z włókien wysokotemperaturowych – klasyczna wełna glinokrzemianowa lub biorozpuszczalna wełna z krzemianów ziem alkalicznych – są od dziesięcioleci ugruntowane w budowie pieców przemysłowych. Ich mocne strony: bardzo wysokie temperatury klasyfikacyjne (zależnie od rodzaju włókna typowo w zakresie od około 1100 do 1400 °C), dobra dostępność, prosta konfekcja przez wykrawanie lub cięcie oraz umiarkowana

cena. Jako warstwa rozdzielająca między modułami lub jako wykładzina obudów modułowych pełnią niezawodną służbę.

Ich granice leżą w przewodności cieplnej i w zachowaniu mechanicznym. Papiery z włókien izolują wyraźnie słabiej niż materiały mikroporowate czy aerożele, dla tego samego efektu ochronnego wymagają więc większej grubości. Pod trwałym naciskiem tracą ponadto zdolność powrotu do pierwotnego kształtu – dla pozycji, w których swelling ogniwi musi być przyjmowany sprężystość, są dlatego samodzielnie tylko warunkowo przydatne. W przypadku klasycznych włókien glinokrzemianowych należy dodatkowo uwzględnić klasyfikację jako substancji potencjalnie rakotwórczej, która pociąga za sobą szczególne środki ochronne przy obróbce i demontażu; włókna biorozpuszczalne omijają ten problem.

- Typowe zastosowanie: warstwy rozdzielające między modułami, wykładzina obudów modułowych i rackowych, podłożenie kanałów odprowadzania gazu
- Mocne strony: wysoka odporność temperaturowa, prosta obróbka, korzystna cena
- Słabe strony: wyższa przewodność cieplna, ograniczona sprężystość powrotna, kwestia pyłu włóknistego zależnie od rodzaju włókna

## Laminaty mikroporowate: maksymalna izolacyjność na każdy milimetr ochrony przed żarem

Materiały mikroporowate składają się z krzemionki pirogenicznego ze środkami zmętniającymi i osiągają wielkości porów poniżej średniej drogi swobodnej cząsteczek powietrza. Wynikiem jest przewodność cieplna, która w wysokich temperaturach leży poniżej przewodności powietrza w spoczynku – żaden inny stosowany w praktyce materiał nie izoluje lepiej na milimetr przy kontakcie z gorącym gazem. Temperatury klasyfikacyjne mieszczą się, zależnie od produktu, najczęściej w okolicach 1000 °C. Właśnie ta kombinacja czyni płyty i laminaty mikroporowate pierwszym wyborem tam, gdzie na skrajnie małej przestrzeni trzeba utrzymać stromy gradient temperatury.

Ceną za to jest wrażliwość mechaniczna: materiał jest wrażliwy na nacisk i pyli, dlatego praktycznie zawsze przetwarza się go w postaci kaszerowanej – zgrzany w folie, opleciony tkaniną szklaną albo jako laminat z warstwami okrywowymi z miki lub folii metalowej. Takie laminaty łączą izolacyjność rdzenia mikroporowatego z wytrzymałością na przebicie i odpornością warstwy okrywowej na erozję cząstkami. Dla pozycji z cykliczną kompresją – bezpośrednio między „oddychającymi” ogniwami – materiał jest natomiast nieodpowiedni, ponieważ pod obciążeniem zmiennym może ulegać zagęszczeniu i traci swoją strukturę.

**Wskazówka:** Mika jako partner — Płyty z miki wnoszą to, czego brakuje rdzeniom mikroporowatym: wysoką sztywność mechaniczną, doskonałą izolację elektryczną i odporność na strumienie gorących cząstek. W barierach wielowarstwowych mika przejmuje często stronę gorącą, obciążoną cząstkami, podczas gdy rdzeń mikroporowaty utrzymuje gradient temperatury.

## Kompozyty aerożelowe: cienkie, elastyczne, odporne na kompresję

Aerożele krzemionkowe należą do ciał stałych o najniższej przewodności cieplnej w ogóle; kompozyty aerożelowe wzmocnione włóknami osiągają w temperaturze pokojowej przewodność cieplną rzędu od 0,015 do 0,02 W/(m·K). Dla poziomu ogniwa interesująca jest jednak przede wszystkim kombinacja izolacyjności, małej grubości i podatności mechanicznej: maty aerożelowe o grubości kilku milimetrów mogą krótkotrwale wytrzymać bardzo wysokie temperatury płomienia i jednocześnie sprężystość przyjmować oddychanie i pęcznienie ogniwi przez tysiące cykli, nie budując przy tym istotnego odkształcenia trwałego.

Kompozyty aerożelowe zajmują tym samym pozycję, której nie pokrywają papier z włókien ani laminaty mikroporowate: bezpośrednią barierę ogniwo–ogniwo w modułach pryzmatycznych oraz między ogniwami typu pouch, gdzie bariera i mata kompresyjna łączą się w jednym elemencie. Wadami są wyższa cena, zależna od produktu ograniczona temperatura pracy ciągłej w porównaniu z włóknem ceramicznym oraz możliwe pylenie, opanowywane również przez kaszerowanie. Dla wielkopowierzchniowych rozdzieleń modułów lub wykładzin

obudów nie są one ekonomicznie często pierwszym wyborem.

- Papier z włókien: duży zapas temperaturowy, wymaga grubości – dobry do rozdzielania modułów i obudów
- Laminat mikroporowaty: najlepsza izolacyjność na milimetr, wrażliwy na nacisk – dobry do barier statycznych przy ciasnocie
- Kompozyt aerożelowy: izoluje bardzo dobrze i amortyzuje swelling – dobry na pozycję ogniwo–ogniwo
- Mika: mocna mechanicznie i elektrycznie, prawie nie izoluje cieplnie – dobra jako warstwa okrywowa w układzie zespolonym

## Dobór w projekcie: od przypadku obciążenia do dowodu

Dobór materiału zaczyna się nie od karty katalogowej, lecz od przypadku obciążenia: jaką ilość energii uwalnia ogniwo, jak długo trwa odgazowanie, jakie temperatury i strumienie cząstek występują na barierze oraz jaką maksymalną temperaturę może osiągnąć strona zimna, aby ogniwo sąsiednie nie weszło w zakres krytyczny? Z tych warunków brzegowych wynikają grubość i budowa – często jako układ wielowarstwowy łączący rdzeń izolacyjny, ochronę przed cząstkami i izolację elektryczną.

Dowód skuteczności następuje ostatecznie w badaniu: testy propagacji na poziomie ogniwa i modułu, w Ameryce Północnej znormalizowane przez UL 9540A, pokazują, czy bariera rzeczywiście zatrzymuje rozprzestrzenianie, czy tylko je opóźnia. Ważne dla operatorów: zmiana materiału w trakcie życia produktu – na przykład z powodów kosztowych lub dostawczych – może podważyć ważność istniejących dowodów badawczych. Materiały barierowe należą dlatego do kontroli zmian w koncepcji bezpieczeństwa, a nie do swobodnych zakupów.

## Często zadawane pytania

### Czy bariera na poziomie ogniwa wystarczy, aby zrezygnować ze środków na poziomie kontenera?

Nie. Bariery międzyogniwe zmniejszają prawdopodobieństwo propagacji, nie zastępują jednak ani separacji przeciwpożarowej kontenera, ani detekcji gazów, odciążenia wybuchowego czy techniki gaśniczej. Skuteczna ochrona powstaje dopiero ze współdziałania wszystkich poziomów – ogniwa, modułu, racka i pomieszczenia.

### Dlaczego aerożel nie jest stosowany wszędzie, skoro izoluje najlepiej?

Kompozyty aerożelowe są znacznie droższe od papieru z włókien i ujawniają swoje zalety przede wszystkim tam, gdzie jednocześnie wymagane są mała grubość i określone zachowanie przy kompresji – a więc bezpośrednio między ogniwami. Dla wielkopowierzchniowych, statycznych rozdzielaczy wyroby z włókien lub laminaty mikroporowate są często rozwiązaniem bardziej ekonomicznym i równie skutecznym.

### Co oznacza „oddychanie” ogniw dla doboru bariery?

Ogniwa litowo-jonowe rozszerzają się przy ładowaniu i w miarę starzenia. Bariera między ogniwami musi przyjmować tę zmianę grubości sprężysto, bez trwałego zagęszczenia – inaczej traci izolacyjność, a pakiet ogniw swoje zdefiniowane napięcie wstępne. Materiały o niskim odkształceniu trwałym po ścisnieniu mają tu wyraźną przewagę.

### Porozmawiajmy o Państwa projekcie

Odpowiedź w ciągu 24 godzin w dni robocze.

[info@sbs-rs.de](mailto:info@sbs-rs.de)

**+49 89 541 960 200**

Czytaj online: [www.sbs-rs.de/batteriespeicher/ratgeber/barriere-zelle-modul](http://www.sbs-rs.de/batteriespeicher/ratgeber/barriere-zelle-modul)