

Beata SWINAREW

Instytut Inżynierii Materiałów Polimerowych i Barwników, Oddział Farb i Tworzyw w Gliwicach,
ul. Chorzowska 50A, 44-100 Gliwice; e-mail: b.swinarew@impib.pl

Poliuretany – nowoczesne wszechstronne materiały.

Część II – pianki poliuretanowe

W części pierwszej artykułu stanowiącego przegląd literatury dotyczący poliuretanów (PUR) omówiono zagadnienia, związane z otrzymywaniem surowców – diizocyjanianów i dioli – oraz klasycznych wielkocząsteczkowych związków poliuretanowych, a także w skrócie techniki formowania poliuretanów. W niniejszym artykule omówiono szerzej zagadnienia, związane z wykorzystaniem PUR do syntezy pianek.

POLYURETHANES – MODERN VERSATILE MATERIALS. PART II – POLYURETHANE FOAM.

The first part of the article reviewing the literature for the polyurethane (PUR) discusses the problems associated with the preparation of raw materials – diisocyanates and diols – and classic polyurethane macromolecular compounds as well as in short molding technique polyurethanes. This article discusses the wider issues associated with the use PUR for the synthesis as a polyurethane foam.

1. Wstęp

Nie sposób omówić właściwości poliuretanów ogólnie, ponieważ zależą one od zastosowania i ich postaci. Pianka poliuretanowa jest obecnie materiałem, który cieszy się coraz większą popularnością i to w wielu branżach. Zastosowanie pianki poliuretanowej jest korzystne ze względu na liczne zalety tego materiału. Najgroźniejszymi konkurentami pianki poliuretanowej są wełna mineralna oraz styropian.

Dzięki różnorodności form wełny mineralnej, możliwe jest jej zastosowanie w wielu miejscach. Wełną mineralną z powodzeniem można ocieplać systemy suche, nieco gorzej sprawdza się ona w miejscach, które narażone są na działanie wilgoci. Kolejnym materiałem izolacyjnym jest styropian. To tworzywo sztuczne, lekko porowate. Składa się z niewielkich komórek, które są odpowiednio spienione i wypełnione specjalną pianką. Decydując się na ten rodzaj wykonania izolacji musimy pamiętać o tym, że styropian słabo przepuszcza wil-

goć, co może powodować tworzenie się na jego powierzchni grzybów i pleśni.

W obliczu tego typu problemów pianka poliuretanowa wydaje się silną konkurencją dla wełny mineralnej i styropianu. Jest odporna na działanie wody i nie przepuszcza powietrza ani wilgoci. Bardzo łatwo się ją nakłada, a stosowana technika natrysku pozwala na dokładne i równomierne pokrycia pianką danej powierzchni. Pianka poliuretanowa poza właściwościami izolacyjnymi przejawia także właściwości zabezpieczające, stosuje się ją do ochrony drewna przed działaniem pleśni oraz metali przed korozją.

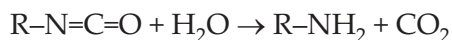
2. Surowce

Podstawowym surowcem do produkcji pianek poliuretanowych są poliiole, poliestry lub polietera, zawierające w cząsteczce dwie lub więcej grup wodorotlenowych. Często stosowany jest również olej rycynowy i jego pochodne [1]. Do produkcji pianek elastycznych stosuje się mieszaniny polioli zawierające wię-

cej składników dwufunkcyjnych, a do produkcji pianek sztywnych stosuje się większe dodatki polioli trój- lub więcej funkcyjnych. Od charakteru i funkcyjności polioliu zależą przede wszystkim właściwości pianki, takie jak wytrzymałość i odporność chemiczna. Polietry stosowane do produkcji pianek poliuretanowych najczęściej otrzymywane są z kwasu adypinowego i glikolu etylenowego, dietylenowego lub propylenowego, a także alkoholi wielowodorotlenowych. Z grupy polieterów stosowane są połączenia addycyjne tlenu propylenu z alkoholami wielowodorotlenowymi [1].

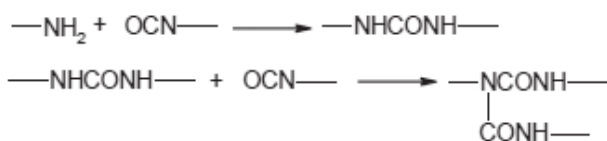
3. Metody otrzymywania

Otrzymywane są w wyniku spieniania masy poliuretanowej dwiema metodami [2]: fizyczną i chemiczną. W metodzie fizycznej do spieniania wykorzystuje się ciepło egzotermicznej reakcji syntezy poliuretanu do odparowania obecnej w środowisku procesu obojętnej cieczy o dużej lotności (np. fluorotrichlorometan). W metodzie chemicznej najczęściej do środowiska reakcji dodaje się wody, która reaguje z grupą izocyjanianową poliuretanu z utworzeniem dwutlenku węgla, który odgrywa rolę czynnika spieniającego – poroforu (schemat 1).



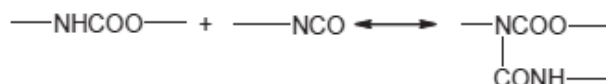
Schemat 1. Spienianie poliuretanów – etap 1.

Powstająca w reakcji grupa aminowa może następnie reagować z grupą izocyjanianową poliuretanu tworząc pochodną mocznikową, która w reakcji z kolejną grupą izocyjanianową tworzy tzw. ugrupowanie biuretowe (schemat 2).



Schemat 2. Spienianie poliuretanów – etap 2.

Ugrupowania uretanowe mogą także reagować z grupą izocyjanianową, tworząc pochodną allofanianową (schemat 3):



Schemat 3. Spienianie poliuretanów – etap 3.

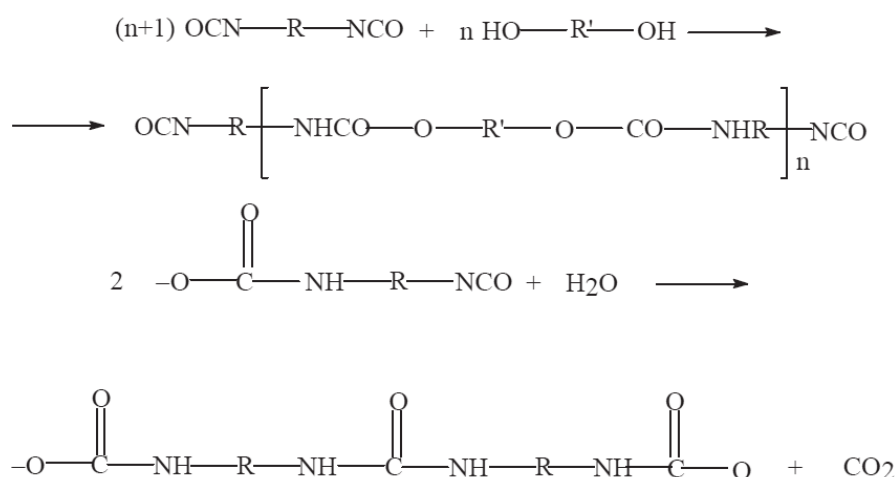
Przemysłowo pianki poliuretanowe otrzymywane są w procesie mieszania, a następnie spieniania i sieciowania mieszaniny polioli (lub prepolimeru) i di- lub triizocyjanianów przy współudziale wody (lub innych poroforów) i aktywatorów.

W zależności od gęstości usieciowania pianki poliuretanowe dzieli się na [3]:

- ELASTYCZNE (miękkie) – o małej gęstości usieciowania,
- SZTYWNE (twarde) – o dużej gęstości usieciowania,
- PÓLSZTYWNE – o pośredniej gęstości usieciowania.

Do produkcji pianek elastycznych stosowane są mieszaniny polioli zawierające więcej składników dwufunkcyjnych, natomiast do produkcji pianek sztywnych stosuje się większe dodatki polioli trój- lub więcej funkcyjnych.

Pianki poliuretanowe otrzymuje się metodą prepolimerową lub jednoetapową [1]. Metoda prepolimerowa polega na prowadzeniu procesu w dwu etapach. W pierwszym polioli reaguje wstępnie z umiarkowanym nadmiarem diizocyjanianu w stosunku do grup wodorotlenowych polioliu. Izocyjanian przyłącza się do grup końcowych polioliu z utworzeniem produktu zawierającego wolne grupy izocyjanianowe. Powstały prepolimer w drugim etapie poddaje się spienianiu mieszając z wodą i ewentualnymi aktywatorami. Woda reaguje z grupą izocyjanianową z wydzieleniem dwutlenku węgla, który jest czynnikiem spieniającym oraz z utworzeniem grupy aminowej, zdolnej do dalszej reakcji z grupą izocyjanianową następnego łańcucha. Powstaje wówczas wiązanie mocznikowe. Schemat zachodzących reakcji:



Metody prepolimerowe stosuje się wtedy, kiedy wymagana jest większa lepkość początkowa polimeru.

W metodzie jednoetapowej miesza się wszystkie składniki równocześnie i proces może być prowadzony sposobem periodycznym lub ciągłym. Elastyczne pianki poliuretanowe mają zastosowanie w przemyśle odzieżowym, tapicerskim, samochodowym i lotniczym, jak również do sporządzania filtrów powietrza, wykładzin, uszczelnień, zabawek i opakowań. Pianki sztywne wytwarza się podobnie jak elastyczne. Poliestry i polietera stosowane do ich otrzymywania powinny zawierać większą liczbę grup wodorotlenowych niż w przypadku pianek elastycznych. Im pianka zawiera więcej tri- i tetrawodorotlenowych polioli, tym jej struktura jest sztywniejsza i odznacza się większą wytrzymałością.

W procesie wytwarzania pianek poliuretanowych wyróżnia się następujące etapy [3]:

1) Okres utajony – zaczyna się z chwilą zmieszania komponentów, zaś kończy, gdy mieszanina zacznie powiększać swoją objętość. W tym czasie rozpoczyna się wydzielanie dwutlenku węgla w ilości niewiele przekraczającej granice jego rozpuszczalności. Etap ten, ze względu na tworzenie się zaczątków porów, nazywa się okresem tworzenia zarodników.

2) Okres wzrostu pianki – rozpoczyna się w momencie, gdy pianka w sposób wyraźny i szybki zaczyna powiększać swoją objętość, a kończy z chwilą uzyskania przez piankę

maksymalnej objętości. Okres ten charakteryzuje się intensywnym wydzielaniem dwutlenku węgla. Wydzielające się pęcherzyki gazu powodują spienianie mieszaniny.

3) Okres stabilizacji pianki – okres powstawania polimeru. Proces ten nabiera intensywności w koocowym etapie wzrostu pianki. Charakteryzuje się przechodzeniem ciekłych składników mieszaniny w stały polimer o dużym ciężarze cząsteczkowym.

4) Okres dojrzewania – jest to dość długi etap, w którym budowa strukturalna polimeru ulega usztywnieniu. Zachodzi proces sieciowania poliuretanu. Makrocząsteczki polimeru wiążą się wiązaniami poprzecznymi, tworząc produkt usieciowany.

Z każdym z powyższych etapów związane są charakterystyczne reakcje chemiczne. W etapie pierwszym i drugim powstawania pianki zachodzi głównie reakcja izocyjanianu z wodą, powodująca wydzielanie CO_2 , oraz reakcja izocyjanianu z grupami wodorotlenowymi polioli, wskutek której następuje wzrost łańcucha makrocząsteczki poliuretanu. W etapie trzecim, czyli podczas stabilizacji pianki, dwutlenek węgla przestaje się wydzielać na skutek wyczerpania wody w mieszaninie, natomiast dalej przebiega reakcja wzrostu łańcucha powstającego polimeru. W czwartym etapie dojrzewania przeważają procesy sieciowania prowadzące do utwardzenia pianki i utworzenia przestrzennie usieciowanych produktów. Podczas polimeryzacji diizocyjaniany

mogą również reagować ze sobą, tworząc dimery i trimery [3].

POLIURETANOWE PIANKI ELASTYCZNE

Pianki elastyczne otrzymywane są najczęściej z liniowych lub nieznacznie rozgałęzionych poliesterów lub polieterów o masie cząsteczkowej 2000-8000. W skład mieszaniny reakcyjnej wchodzi również diizocyanian, woda, katalizator, emulgator oraz inne środki porotwórcze. Wyroby z tych pianek produkowane są w sposób ciągły w postaci płyt i bloków lub okresowy w postaci różnych kształtek.

Elastyczne pianki poliuretanowe znajdują szerokie zastosowanie z uwagi na ich bardzo dobre właściwości, a więc duże wydłużenie przy zerwaniu (200-600%), dużą gęstość (około 30 kg/m³), dobre właściwości izolacyjne (akustyczne i ciepłe) i dobre właściwości amortyzacyjne [2].

Główne zastosowanie pianek poliuretanowych to przemysł tapicerski (materace), samochodowy, lotniczy, gospodarstwo domowe, jako materace, warstwy izolacyjne (ocieplające), laminowanie tkanin a także izolacje przeciwhałasowe i przeciwwstrząsowe. Inne zastosowania to produkcja gąbek, poduszek, ociepleń, uszczelnień, odzieży zabawek [1].

POLIURETANOWE PIANKI SZTYWNE

Pianki sztywne otrzymywane są najczęściej z polioliu o dużym stopniu rozgałęzienia i masie cząsteczkowej poniżej 1000. W skład mieszaniny reakcyjnej wchodzi także woda lub inny środek spieniający, wysokoreaktywny katalizator, emulgatory oraz niekiedy środki zmniejszające palność. Poliestry i polietera wykorzystywane w produkcji tych pianek powinny zawierać większą liczbę grup hydroksylowych niż w przypadku pianek elastycznych. Generalnie, im więcej polioli tri- lub tetrahydroksylowych zawiera pianka, tym sztywniejszą strukturą i większą wytrzymałością się charakteryzuje. Podobnie zastosowanie poli-

olu z pierścieniem heterocyklicznym, a szczególnie aromatycznym zwiększa wytrzymałość pianki poliuretanowej. Polietera stosowane do produkcji pianek sztywnych to zwykle addycyjne połączenia tlenu propylenu z alkoholami wielowodorotlenowymi (gliceryna, pentaerytryt). Stosuje się również olej rycynowy. Jako środek spieniający wykorzystywany jest fluorotrchlorometan [1]. W przemyśle pianki sztywne najczęściej otrzymuje się metodą dwuetapową poprzez zalewanie w formach zamkniętych oraz metodą natryskiwania.

Pianki sztywne charakteryzują się większą gęstością i wytrzymałością niż pianki elastyczne. Stosowane są głównie w budownictwie do wypełniania pustych przestrzeni (uszczelniania) w konstrukcjach budowlanych, drzwiach, ramach okiennych, do wyrobu izolacyjnych płyt konstrukcyjnych, izolacji rurociągów, chłodni, zbiorników. Stosowane są również, jako elementy wyposażenia i uszczelnienia kabin statków i samolotów. Inne zastosowania to umacnianie konstrukcji podłogowo-sufitowych, a także, jako izolacja akustyczna i ciepła [2].

Mimo znakomych właściwości izolacyjnych sztywne pianki PUR nie spełniają wymagań najnowszych testów przeprowadzanych przez towarzystwa ubezpieczeniowe. Zwiększenie liczby opóźniaczy palenia powoduje wzrost emisji gazów toksycznych podczas spalania, zwiększa ilość dymu utrudniającego akcję ratowniczą, znacznie pogarsza odporność cieplną i wytrzymałość mechaniczną poliuretanu [4]. Powoduje to, że główne zalety izolacji poliuretanowej, czyli lekkość i wytrzymałość, tracą na wartości. Mała jest również odporność płyt PUR na przepalanie. Okazuje się jednak, że wiele z tych wad można usunąć dzięki stosowaniu tworzyw spienionych wytwarzanych w wyniku tzw. niekonwencjonalnych reakcji izocyanianów [5]. W połowie XX w. badano reakcje izocyanianów aromatycznych. Z badań wynikało, że związki te mogą pod wpływem odpowiednich katalizatorów tworzyć ugrupowania charakteryzujące się lepszą odpornością termiczną [6]. W klasycznych poliuretanach

występują ugrupowania uretanowe (o temp. rozkładu: 150–250°C), mocznikowe (temp. rozkładu: 180–250°C), biuretowe i allofanianowe (temp. rozkładu: 120–180°C). Ugrupowania izocyjanurowe i karbodiimidowe mają natomiast temperaturę rozkładu powyżej 270°C. Grupy izocyjanurowe wprowadza się najczęściej w wyniku cyklotrimeryzacji grup izocyjanianowych. Czasem mogą tworzyć się również sztywne ugrupowania karbodiimidowe.

Pianki PIR wymagają odpowiednich pochodnych silikonowych ułatwiających mieszanie składników i pomagających stabilizować układ przed usieciowaniem. Każda z firm produkujących te środki oferuje produkty tego typu [7]. W przeszłości jako porofory do pianek PIR stosowane były te same środki co do sztywnych pianek poliuretanowych (niskowrzące fluorochlorowęglowodory: CFC 11, CFC 12, HCFC 141B) [8]. Obecnie stosowane są: izomery pentanu (n-pentan, c-pentan, i-pentan oraz ich mieszaniny), fluorowęglowodory o zerowym potencjale niszczenia ozonu (HFC 245fe, HFC 365/227) [9], mrówczan metylu, metylal itp. Pojawiają się informacje o stosowaniu do pentanu dodatku trans-dichloroetyleny. Środek ten nie niszczy ozonu, mimo że zawiera chlor oraz wykazuje mały efekt cieplarniany [10]. Korzystnie wpływa on na zmniejszenie palności pianek PIR. W związku z wprowadzeniem pentanu, jako środka spieniającego pojawił się problem adhezji do okładzin [11]. Zapobiegano temu przez wprowadzenie promotorów adhezji bądź użycie nowych polioli poliesterowych [12].

Czynnikiem odróżniającym pianki PIR od pianek poliuretanowych jest zdolność tworzenia zwęgliny dającej uzyskiwanej izolacji odporność ogniową na przepalenie. Właśnie ta cecha spowodowała, że już w latach 70. Pianki PIR były wykorzystywane w konstrukcjach pojazdów kosmicznych. Pianki PIR stosowane są głównie, jako materiał termoizolacyjny. Wypierają one klasyczne sztywne pianki PUR o podwyższonej trudnopalności.

Pianki PIR produkuje się najczęściej, jako:

- panele w okładzinach sztywnych z blachy stalowej, blachy aluminiowej, płyt gipsowo-kartonowych, drewnianych płyt OSB itp.,
- płyty w okładzinach elastycznych (np. z folii aluminiowej, papieru, papy itp.),
- bloki pianki PIR cięte na arkusze o określonej grubości,
- systemy do wytwarzania izolacji „in situ” bądź wyrobów prefabrykowanych.

Pianki PUR możemy także podzielić w aspekcie ich struktury komórkowej, czyli:

- pianka o otwartej strukturze (tzw. lekka)
- pianka o zamkniętej strukturze (tzw. ciężka)

Pianka poliuretanowa otwartokomórkowa jak sama nazwa wskazuje, posiada w swojej budowie przeważającą liczbę komórek otwartych, dzięki czemu „oddycha”. Pozwala to na utrzymanie przyjemnego środowiska w pomieszczeniu. Para wodna krążąca w powietrzu (będąca wynikiem złej wentylacji) nie skrapla się na jej powierzchni i nie powoduje powstania pleśni. Ten rodzaj jest idealny do ocieplania i wygłuszenia poddaszy użytkowych, nie tylko ze względu na swoją paroprzepuszczalność. Masa pianki lekkiej to około 12 kg/m³ (ciężkiej to od 30-60 kg/m³), nie obciąża, więc ona konstrukcji, a sztywniejac dodatkowo ją wzmacnia. Piana PUR nakładana jest przez hydrodynamiczny natrysk, co pozwala na wypełnienie wszystkich trudno dostępnych miejsc. Jest to istotne ze względu na skomplikowane kształty konstrukcji dachowych. Piana poliuretanowa otwartokomórkowa nie nadaje się, ze względu na swoje właściwości, do ocieplania fundamentów (możliwość chłonicia wody, brak wytrzymałości na ściskanie).

Pianka zamkniętokomórkowa zawiera komórki zamknięte (minimum 90% takich komórek w zależności od przeznaczenia). Jej gęstość będzie się wahać od 30-60 kg/m³. Ten rodzaj pianki ze względu na dużą gęstość, zamknięte komórki, małą paroprzepuszczalność oraz dużą odporność na zgniatanie nadaje się idealnie do termo i hydroizolacji płaskich dachów i stropodachów, ścian, fundamentów, budynków inwentarskich, chłodni itp.

4. Zastosowanie

Izolacja termiczna paroprzepuszczalna.

Pianki poliuretanowe bardzo dobrze nadają się do izolacji poddaszy. Posiadają dobrą dyfuzję powietrzną umożliwiając przepływ nadmiaru pary wodnej z budynku. Kolejną zaletą jest szybkość nanoszenia, która jest zdecydowanie większa niż konkurencyjnych metod termoizolacji. Umożliwia to minimalizację kosztów robocizny.

Na membranę dachową i konstrukcje dachu nanoszona jest pianka termoizolacyjna. Tworzy ona trwałą wolną od mostków termicznych powierzchnie termoizolacyjną. Dzięki dobrym właściwościom penetrującym pianka wypełnia wszystkie wolne przestrzenie. Można ją bez problemu nanosić na skomplikowane konstrukcje.

Izolacje termiczne dachów wykonuje się również z wełny mineralnej. Wymaga to wykonania dodatkowych warstw paroizolacyjnych i paroszczelnych. W przypadku namożenia ulega uszkodzeniu i nie spełnia właściwości termoizolacyjnych. Nie wypełnia idealnie pustki przeznaczonej na izolację, co może powodować powstawanie mostków termicznych. Kolejną wadą wełny mineralnej jest to, iż w czasie eksploatacji ulega ona powolnemu rozpadowi powodując pylenie. Pył ten jest szkodliwy dla zdrowia, ponadto może powodować różnego rodzaju uczulenia u ludzi wrażliwych i alergików.

Styropian nie jest dobrym materiałem przeznaczonym na izolację dachu. Tworzy, bowiem szczelną powierzchnie, w której nie występuje dyfuzja pary wodnej. W związku z powyższym na poddaszu może występować nadmierna wilgotność, co wpływa na rozwój grzybów i pleśni. Ponadto ze względu na zwartą strukturę i określony kształt może prowadzić do powstawania mostków termicznych.

Izolacja termiczna i akustyczna.

Poza bardzo dobrymi właściwościami termoizolacyjnymi pianki poliuretanowe posia-

dają bardzo dobre właściwości wygłuszające. Ich bardzo dobra przyczepność do podłoża stanowi kolejną zaletę. Usztywnia dodatkowo konstrukcje. Czas nanoszenia izolacji na przegrody zewnętrzne wynosi do paru minut na 1 mb przegrody w standardowym budownictwie mieszkalnym. Umożliwia to bardzo szybkie i trwałe wykonanie przegród i minimalizację kosztów poniesionej robocizny. Można na rynku znaleźć już pianki samogasnące.

Pianka posiada bardzo dobre właściwości penetrujące w związku, z czym wypełnia najmniejszą nawet szczelinę. Jej duża sztywność powoduje dodatkowe zwiększenie sztywności i trwałości muru.

Izolacje termiczne i akustyczne wykonuje się również z wełny mineralnej. Jest ona umieszczana wewnątrz ściany zbudowanej z płyt gipsowo kartonowych. Posiada jednak pewną wadę, ponieważ nie wypełnia w pełni przegrody i pozostawia pustkę powietrzną, przez którą bez problemu mogą przenosić się hałasy. Kolejną wadą wełny mineralnej jest wspomniane wcześniej pylenie. Wad tych nie posiada pianka poliuretanowa, gdyż ze względu na swoją zwartą strukturę nie powoduje pylenia w żadnej postaci.

Styropian o ile nadaje się do izolacji termicznej jest bardzo słabym izolatorem akustycznym. Powoduje to, że dźwięki tylko nieznacznie osłabione przedostają się na drugą stronę izolacji. Ponadto tak jak w przypadku ścian zewnętrznych uniemożliwia dyfuzję pary wodnej pomiędzy pomieszczeniami, wywołując w ten sposób podniesienie wilgotności i w efekcie możliwość powstania grzybów i pleśni.

Izolacja termiczna ścian zewnętrznych i hydroizolacja.

Pianki poliuretanowe nawet w przypadku dużego zawilgocenia środowiska zachowują swoje parametry termoizolacyjne, gdyż ich nasiąkliwość wodą wynosi zaledwie 2%. Są odporne na wpływ środowiska w związku, z czym mogą być umieszczane na ścianach fundamentów. Piankę nanosi się metodą na-

trysku bezpośredniego na fundament, bądź podłogę. Powstała w ten sposób jednorodna powierzchnia pozbawiona jest jakichkolwiek łączy. Zastosowanie pianki skutecznie chroni ścianę przed utratą ciepła. Zapobiegając nadmiernemu wystudzeniu ścian zapobiegamy równocześnie wykraplaniu się wody na ścianach wewnętrznych. Współczynnik oporu dyfuzyjnego pary wodnej gwarantuje, iż ściana będzie nadal oddychać i nie zaczną powstawać wewnątrz grzyby.

Wełna mineralna praktycznie nie jest stosowana w izolacji termicznej ścian zewnętrznych. Jej bardzo wysoka nasiąkliwość powoduje, iż bardzo szybko traci właściwości izolacyjna pod wpływem zawilgocenia. W przypadku zastosowania jej niezbędne są kosztowne i skomplikowane izolacje, które zabezpieczą ją przed wpływami środowiska. Bardzo mała sztywność wełny sprawia, iż nie można bezpośrednio na niej wykonać wykończenia końcowego ściany i należy przykryć ją kolejną warstwą sztywnej przegrody.

Dość popularnym sposobem izolacji ścian zewnętrznych jest izolacja ich styropianem. Styropian posiada nieco gorsze własności termoizolacyjne od pianki. Jedną z największych wad styropianu jest jego opór dyfuzyjny pary wodnej. Powoduje to znaczne nagromadzenie się pary wodnej w pomieszczeniach. W przypadku niewystarczającej wentylacji istnieje poważne ryzyko wystąpienia na ścianach grzybów i pleśni.

W następnych częściach planowana jest dokładniejsza charakterystyka elastomerów oraz klejów i poliuretanów stosowanych w medycynie.

Literatura

- [1] Pielichowski J., Puszyński A., *Technologia tworzyw sztucznych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003.
- [2] Szlezyngier W., *Tworzywa sztuczne*, Tom 1, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1996.
- [3] Praca zbiorowa pod red. Florjańczyk Z., Penczek S., *Chemia polimerów. Podstawowe polimery syntetyczne i ich zastosowanie*, Tom 2, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2001.
- [4] L. Żabski, „Pianki poliuretanowo-izocyjanurowe – nowy materiał termoizolacyjny dla budownictwa”, *„Materiały Budowlane”*, nr 1/2005, s. 46–47
- [5] H. Ulrich, „Unconventional Chemistry of Isocyanates”, *„Journal of Elastomers and Plastics”*, vol. 3 (2)/1971, pp. 97–111.
- [6] K. Tokumoto, Y. Tamano, K.M. Gay, R. Van Maris, „An Insight into the Characteristics of Trimerisation Catalysts for Polyisocyanurate Foam Systems”, [w:] materiały konferencji „Polyurethanes 2005. Technical and Trade Fair Conference”, Houston – Texas, October 2005.
- [7] Ch. Eilbracht, C. Schiller, P. Hohl, „Often Overlooked Factors in PIR Surfactant Development”, [w:] materiały konferencji „Polyurethanes 2005. Technical and Trade Fair Conference”, Houston – Texas, October 2005.
- [8] H.E. Reymore, P.S. Carleton, R.A. Kolakowski, A.A.S. Sayigh, „Isocyanurate Foams: Chemistry, Properties and Processing”, *„Journal of Cellular Plastics”*, vol. 11 (6)/1975, pp. 328–344.
- [9] T.W. Volz, M.J. Skowronski, „Comparison of Blowing Agent Performance in Isocyanurate Foams Used in the Production of Rigid Faced Continuous Panels”, [w:] materiały konferencji „Polyurethanes 2008. Technical Conference”, San Antonio – Texas, September 2008.
- [10] J. Wu, C. Bertelo, L. Caron, „Trans-1,2-dichloroethylene for improving fire performance of urethane foam”, [w:] materiały konferencji „The API Polyurethanes 2003 Conference”, Orlando – Florida 2003, s. 454–462.
- [11] J. Kusan-Bindel, „New foam formulations for PIR insulation boards”, [w:] materiały konferencji „Utech Conference”, Maastricht 2006.
- [12] L. Żabski, J. Papiński „PIR foams – insulation of the rigid polyurethane foam” *IZOLACJE* 6/2012.