

Wykorzystanie warstw antykondensacyjnych w celu ochrony materiałów ceramiki budowlanej

The use of anti-condensation layers to protect building ceramics materials

SŁOWA KLUCZOWE

warstwy ochronne, warstwy antykondensacyjne

KEY WORDS

protective layers, anti-condensation layers

Andrzej Grzebielec

Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa,

andrzej.grzebielec@pw.edu.pl

STRESZCZENIE

Powłoki antykondensacyjne znajdują szerokie zastosowanie w chłodnictwie, klimatyzacji czy chociażby technologii okrętowej. Coraz częściej są stosowane także do zabezpieczania konstrukcji betonowych czy też ceramicznych. Potrafią zmagazynować określoną ilość wody we własnej objętości, a następnie zwrócić ją w sprzyjających warunkach. Powłoki antykondensacyjne stosowane są również do ochrony konstrukcji stalowych przed wilgocią. W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych wymiany ciepła i masy w powłoce antykondensacyjnej w warunkach konwekcji naturalnej i wymuszonej. Wyniki eksperymentalne uzyskano dla płyt poziomych i nachylonych.

SUMMARY

Anti-condensation coatings are widely used in refrigeration, air conditioning or even ship technology. More and more often they are also used to protect concrete or ceramic structures. They can store a certain amount of water in their own volume and then return it under favorable conditions. Anti-condensation coatings are also used to protect steel structures against moisture. The paper presents the results of experimental research on heat and mass transfer in an anti-condensation coating under natural and forced convection conditions. Experimental results were obtained for horizontal and inclined slabs.

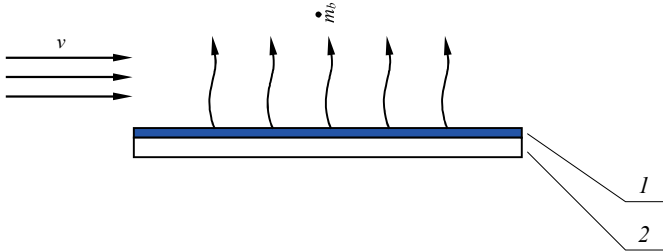
1. Wprowadzenie

Powłoki antykondensacyjne są stosowane w aplikacjach gdzie spotyka się okresowo obniżoną temperaturę. Bardzo istotne jest pojęcie „okresowo” - np dzień-noc. Potrafią magazynować określoną ilość wody we własnej objętości i uwalniać ją w sprzyjających warunkach. Zapobiegają również zawilgoceniu konstrukcji. Duże, otwarte konstrukcje są często zadane bez konieczności ich docieplania. Takie rozwiązania można znaleźć na stadionach, trybunach, parkingach, garażach, wiatkach i chłodniach. Profilowana blacha doskonale nadaje się do budowy takiego pokrycia dachowego. Ponieważ warunki pogodowe często się zmieniają, para wodna ma tendencję do kondensacji na spodniej stronie arkusza blachy, co może prowadzić do uszkodzeń związanych z obecnością wilgoci. Wykraplająca się woda znacznie pogarsza właściwości izolacyjne części stropu i ścian konstrukcyjnych, co jest konsekwencją zwiększonego zawilgocenia i pogorszenia izolacyjności. Ponadto trzymanie wody z dala od materiałów, z których wykonana jest konstrukcja, zwiększa ich trwałość; brak wilgoci na powierzchni minimalizuje korozję tych materiałów. Farby antykondensacyjne stosowane są do pokrywania odcinków rurociągów, na których niemożliwe jest zastosowanie tradycyjnych technik izolacyjnych oraz na stalowych elementach urządzeń elektronicznych lub telekomunikacyjnych. W przemyśle stoczniowym i zbrojeniowym

powłoki antykondensacyjne stosuje się do pokrywania powierzchni wewnętrznych: pokładów statków i opancerzenia pojazdów bojowych. W budownictwie mieszkaniowym powłoki te znajdują zastosowanie w miejscach o dużej wilgotności, takich jak łazienki i kuchnie, a także na pokryciach domów mobilnych, przyczep kempingowych czy jachtów. Farby antykondensacyjne zawierają substancje na bazie biocydów, które powstrzymują rozwój zanieczyszczeń mikrobiologicznych w warunkach zwiększonej wilgotności. Cecha ta sprawia, że nadają się do ochrony takich pomieszczeń jak parkingi podziemne, piwnice, chłodnie, zbiorniki wody pitnej, silosy zbożowe, zakłady przetwórstwa mięsnego i owocowo-warzywnego przed wilgocią i zanieczyszczeniami mikrobiologicznymi. Większość powłok antykondensacyjnych jest niepalna i nietoksyczna oraz nie wydziela toksycznych gazów. Mogą być stosowane w pomieszczeniach, w których przechowywana jest żywność. Powłoki antykondensacyjne chronią również przed korozją. Zapobiegają przedostawaniu się kropeł wody do podatnych na korozję powierzchni i elementów konstrukcji, ponieważ woda wchłonięta przez środek antykondensacyjny jest rozpraszana na dużym obszarze powłoki. Po zatrzymaniu procesu kondensacji wchłonięta woda szybko odparowuje. Inną wspólną cechą powłok antykondensacyjnych jest pochłanianie dźwięku; tłumią drgania w blachach, co w pewnym stopniu pomaga wyciszyć hałas powodowany przez wiatr czy deszcz.

2. Model matematyczny

Model matematyczny będzie się skupiał głównie na procesie suszenia warstwy antykondensacyjnej, gdyż jest on najbardziej pożądanym procesem w trakcie pracy warstwy. Suszenie powłoki antykondensacyjnej jest procesem wymiany ciepła i masy. Powłoka jest bardzo cienka, więc temperaturę powierzchni powłoki T_{surf} można traktować jako temperaturę całej warstwy powłoki.



Rys. 1. Idea wymiany masy w powłoce antykondensacyjnej 1 – powłoka antykondensacyjna, 2 – płyta aluminiowa izolowana termicznie od spodu.

Ciepło dostarczane z zewnątrz wykorzystywane jest do odparowywania wody powodując także zmianę temperatury powierzchni. Ciepło dostarczane jest na dwa sposoby. Przez konwekcję i promieniowanie. Przewodnictwo w modelu jest zaniechane, ponieważ do testowania dolna płyta aparatu jest izolowana cieplnie. W wielu modelach promieniowanie jest również pomijane [1], ale według naszych obliczeń promieniowanie jest bardzo ważną częścią strumienia ciepła. Na rysunku 1 przedstawiono ideę wymiany ciepła i masy. Można zatem napisać równanie na strumień ciepła wypływający z powłoki [6].

$$\dot{Q} = h_{heat} A_s (T_{air} - T_{surf}) + A_s \sigma \epsilon (T_{air}^4 - T_{surf}^4) \quad (1)$$

W tym samym czasie woda odparowuje z powłoki antykondensacyjnej w stosunku masowym

$$\dot{m}_b = k_{mass} A_{ef} (\rho_{w, surf} - \rho_{w, air}) \quad (2)$$

Gdzie A_{ef} jest powierzchnią efektywną. Oznacza to, że tylko z części powierzchni A_s woda jest odparowywana [1].

$$A_{ef} = \phi A_s \quad (3)$$

Gdzie ϕ zostanie nazwany efektywnym współczynnikiem powierzchni. Używając stanu równania gazu doskonałego, możemy zamienić równanie 2 na:

$$\dot{m}_b = k_{mass} \phi A_s \frac{M_s}{R} \left(\frac{P_{surf}}{T_{surf}} - \frac{P_{air}}{T_{air}} \right) \quad (4)$$

Do połączenia wymiany ciepła z przenoszeniem masy możemy użyć analogii Chlinton Colburna [2].

$$k_{mass} = \frac{h_{heat}}{\rho c_p Le^{2/3}} \quad (5)$$

co ostatecznie daje

$$\dot{m}_b = \frac{h_{heat}}{\rho c_p Le^{2/3}} \phi A_s \frac{M_s}{R} \left(\frac{P_{surf}}{T_{surf}} - \frac{P_{air}}{T_{air}} \right) \quad (6)$$

Z prawa zachowania energii można wyznaczyć równanie

$$h_{heat} A_s (T_{air} - T_{surf}) + A_s \sigma \epsilon (T_{air}^4 - T_{surf}^4) = \dot{m}_b h_{fg} + \frac{m_{ws} c_{p, ws} dT_{surf}}{dt} \quad (7)$$

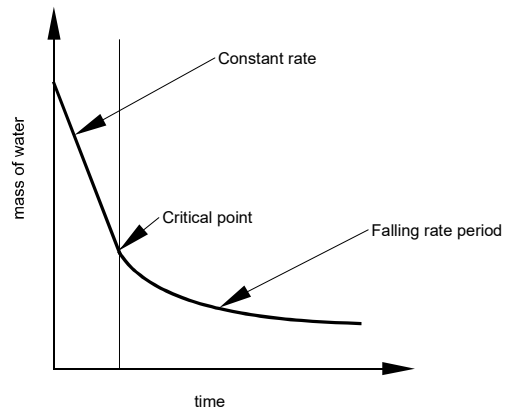
Z zasady zachowania masy wynika jeszcze jedno równanie. Zmiana masy powłoki zależy od szybkości parowania.

$$\frac{dm_s}{dt} = -\dot{m}_b \quad (8)$$

Aby rozwiązać problem suszenia, równania 7 i 8 muszą być rozwiązane jednocześnie..

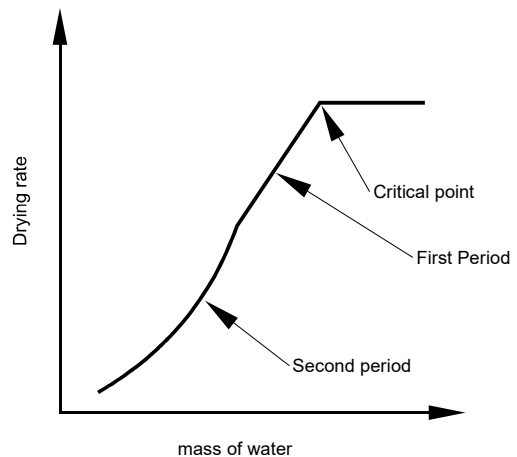
2.1. Kinetyka suszenia

Zgodnie z teorią suszenia [2, 4] proces suszenia należy podzielić na dwa okresy. Okres stałej szybkości suszenia i malejącej szybkości suszenia (rysunek 2).



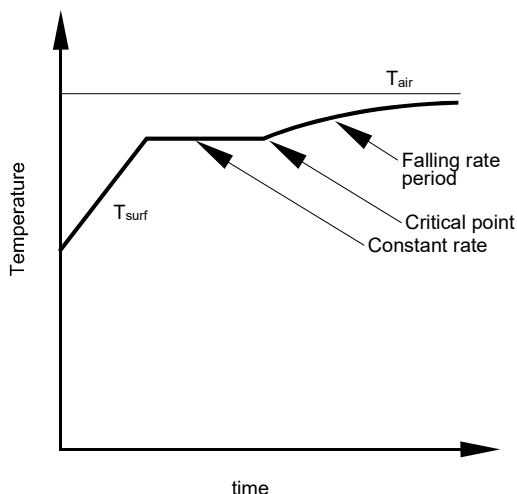
Rys. 2. Okresy szybkości suszenia

Pierwszy etap suszenia to okres o stałej szybkości. Po przekroczeniu punktu krytycznego proces przebiega ze spadającą szybkością suszenia.



Rys. 3. Zmiana szybkości suszenia podczas procesu suszenia

Jednocześnie, jak pokazano na rysunku 3, etap suszenia ze zmienną szybkością suszenia składa się z dwóch podokresów. W pierwszym spadek strumienia masy jest liniowo proporcjonalny do masy wody, w drugim liniowość zanika.



Rys. 4. Temperatura powierzchni podczas suszenia

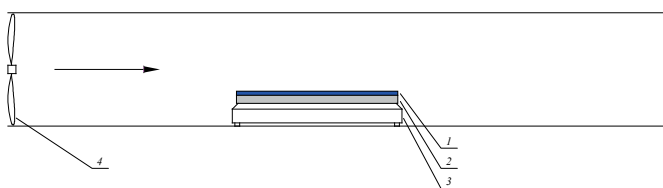
Na rysunku 4 przedstawiono temperaturę powierzchni T_{surf} zmieniającą się w czasie. Jak można zauważyć początkowo wzrasta, aż temperatura osiągnie stałą wartość. Następnie po przekroczeniu punktu krytycznego. Temperatura zaczyna ponownie rosnąć, zbliżając się do temperatury otoczenia T_{air} .

3. Badania eksperymentalne

W celu weryfikacji modelu stanowisko doświadczalne (rys. 5) w celu uzyskania informacji o zmianach masy wody w warstwie antykondensacyjnej podczas procesu suszenia. Aparat posiada możliwość pozyskiwania informacji z konwekcji naturalnej i konwekcji wymuszonej przy zmiennej prędkości powietrza [3].

Do badań przygotowano płaskie aluminiowe płyty 193x193x2 mm, pokryte trójwarstwową powłoką antykondensacyjną o grubości 0,45 mm. Przed testami każdą powierzchnię płytek zwilżono wodą o gramaturze 180g/m². Następnie każdą płytkę umieszczono na skalibrowanej wadze. Test ten miał na celu analizę wymiany masy z powierzchni płytki za pomocą precyzyjnej wagi podłączonej do komputera rejestrującego zmiany wartości masy. Warunki otoczenia zarejestrowane podczas badania: temperatura 22,5 °C, ciśnienie 1013,25 hPa, wilgotność względna 0,38.

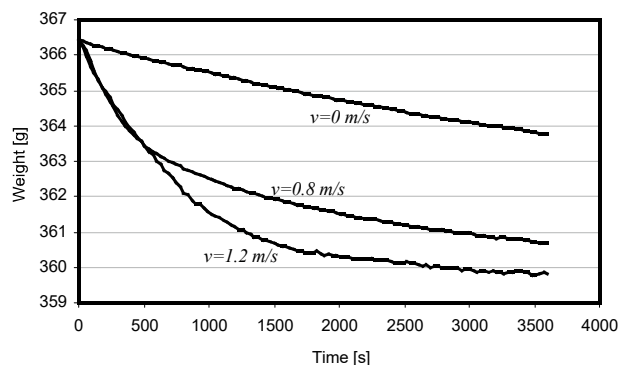
W celu porównania wyników przeprowadzono również test parowania zwierciadła wody w warunkach konwekcji naturalnej.



Rys. 5. Aparatura doświadczalna

1 - warstwa antykondensacyjna, 2 - warstwa aluminiowa, 3 - waga, 4 - wentylator.

W ramach eksperymentu przebadano kilka przypadków. Pierwszy był pod konwekcją naturalną drugi z prędkością powietrza w kanale 0,8 m/s oraz 1,2 m/s.



Rys. 6. Wyniki eksperymentu

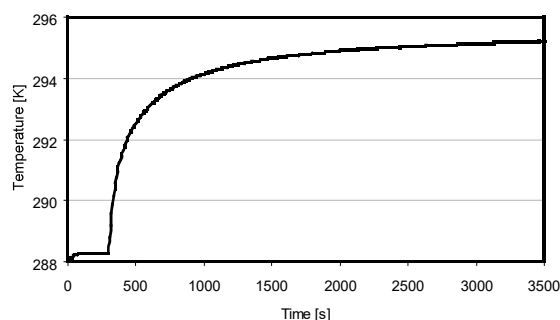
Na rysunku 6 przedstawiono wyniki eksperymentalnego suszenia powłoki antykondensacyjnej dla trzech wcześniej wymienionych przypadków. Prezentowana masa to łączna waga płyty z farbą i wodą. Zgodnie z oczekiwaniami najszybszy był proces, w którym prędkość powietrza była największa.

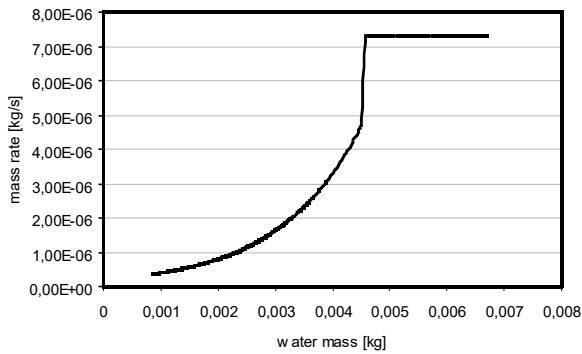
4. Wyniki

Zgodnie z teorią procesu suszenia i przeprowadzonego eksperymentu zauważono wyraźnie, że proces suszenia składa się z dwóch etapów. Pierwszy etap to suszenie stałym strumieniem odparowanej wody, drugi, po przejściu punktu krytycznego, to etap, w którym przepływ wody maleje. Oba te kroki należy rozpatrywać osobno. Dość istotny jest fakt, że punkt krytyczny musi być wyznaczony eksperymentalnie. Okazuje się, że w przypadku konwekcji naturalnej ($v = 0$) identyfikacja punktu krytycznego okazała się niemożliwa. Wynika to z faktu, że czas ten był tak długi, że nie udało się zachować założonych warunków pracy - głównie adiabatycznych. Dlatego w dalszych analizach nie uwzględniono konwekcji naturalnej.

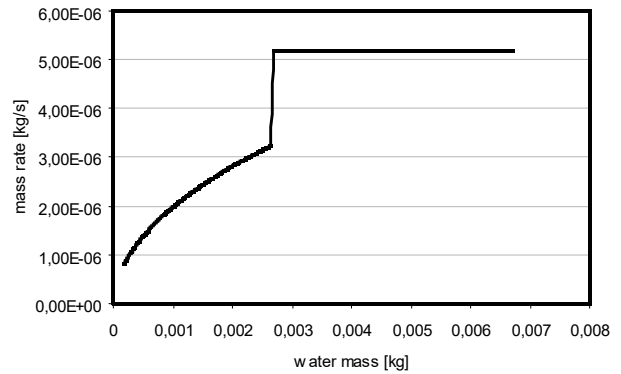
Po wyznaczeniu punktu krytycznego możliwe było wyznaczenie warunków brzegowych dla równań 6 i 7. Umożliwiło to dokończenie analizy warunków suszenia warstwy antykondensacyjnej.

Na rysunku 7 przedstawiono zmianę temperatury podczas konwekcji wymuszonej dla $v=0,8$ m/s.

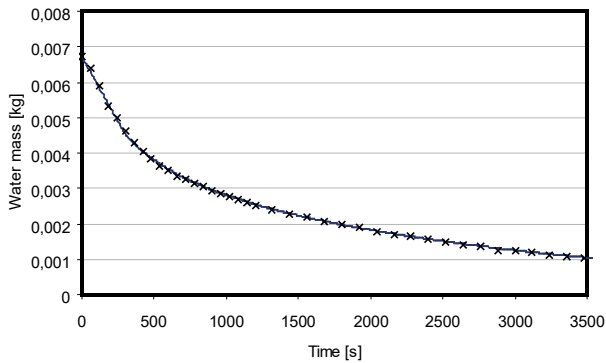
Rys. 7. Zmiana temperatury powierzchni podczas suszenia dla prędkości powietrza $v=0,8$ m/s



Rys. 8. Zmiana strumienia masy podczas procesu suszenia dla prędkości powietrza $v=0,8$ m/s



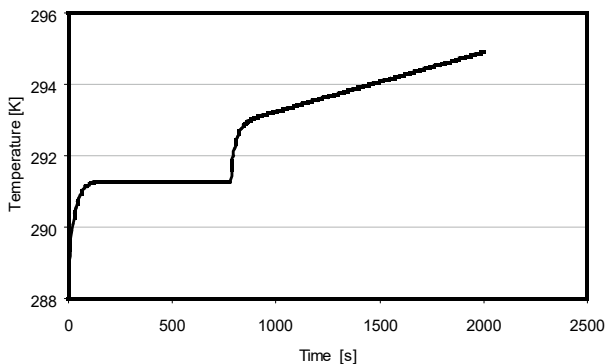
Rys. 11. Zmiana strumienia masy podczas procesu suszenia dla prędkości powietrza $v=1,2$ m/s



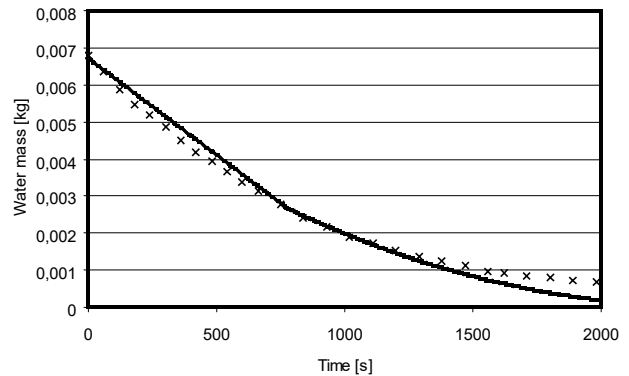
Rys. 9. Zmiana masy wody podczas suszenia. Linia ciągła – obliczenia, krzyżki – eksperyment

Na rysunku 8 przedstawiono zmianę strumienia masy wody w funkcji zawartości masy w powłoce.

Na rysunku 9 przedstawiono porównanie wyników symulacji z badaniami eksperymentalnymi konwekcji wymuszonej dla prędkości powietrza $v=0,8$ m/s.



Rys. 10. Zmiana temperatury powierzchni podczas suszenia dla prędkości powietrza $v=1,2$ m/s



Rys. 12. Zmiana masy wody podczas procesu suszenia dla prędkości powietrza $1,2$ m/s. Linia ciągła – obliczenia, krzyżki – eksperyment

Na schematach 10, 11, 12 przedstawiono wyniki obliczeń dla wartości prędkości powietrza $v=1,2$ m/s.

5. Wnioski

Modelowanie procesu suszenia to połączenie wymiany ciepła i masy. Wymiana masy w przypadku suszenia składa się z kilku etapów, które należy rozpatrywać osobno. Niektórzy naukowcy twierdzą, że rozwiązaniem zachowania równania masy może być jedno równanie w całym zakresie [5]. Niniejsze badania tego nie potwierdzają. Niemożliwe jest poprawne rozwiązanie w ten sam sposób etapu odparowywania fazowego o stałym stosunku ze zmiennym współczynnikiem. Ponadto głównym problemem symulacji jest wyznaczenie punktu krytycznego suszenia. Zależy to od szybkości wymiany ciepła i masy, od suszonego materiału i warunków otoczenia. Bez znajomości punktu krytycznego symulacja suszenia może być bardzo trudna, ale gdy punkt krytyczny jest określany prawidłowo, wyniki są bardzo zgodne z badaniami eksperymentalnymi. Co można zaobserwować na rysunkach 9 i 12.

Przy wyższych prędkościach powietrza przepływ powietrza jest bardziej wydajnym procesem ciągłego odparowywania i pozwala na osiągnięcie niższego stężenia wody w suszonym materiale.

Przy specyficznych powłokach antykondensacyjnych stosowanych w chłodnictwie warto zauważyć, że często pracowały one w obszarze zmiennej prędkości parowania, dlatego modelowanie tego typu aplikacji powinno skupiać się tylko na tym obszarze.

Literatura

1. Avci A., Can M., Etemoglu A. B.: A theoretical approach to the drying process of thin film layers, *Applied Thermal Engineering* 21 (2001) 465-479.
2. Cengel Y.A. 2006, *Heat and Mass transfer: A practical Approach*, Mc Graw Hill.
3. Kołodziej A., Rusowicz A.: Experimental studies of anti-condensation coatings under natural convection. (in Polish) *Chłodnictwo* 3/2011 s.26-30.
4. Kreith F. *Heat and Mass Transfer*, CRC Press LLC, 1999.
5. Lahsasni S, Kouhila M, Mahrouz M, Idlimam A, Jamali A.: Thin layer convective solar drying and mathematical modeling of prickly pear peel (*Opuntia ficus indica*). *Energy* 29 (2004) 235-248.
6. Madejski J.: *Teoria wymiany ciepła*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej. Szczecin 1998.
7. Wang G., Chen D., Lu L., Wang X., Yang Y. A novel anti-condensation coating *Journal of Coatings Technology* 883 (1998), 55-59.
8. Kócs Lenke, Mohammad H. Jilavi, Dirk Beckelmann, Bruno Schäfer, Alexander May, Marcus Koch, Peter W. de Oliveira, Water-based silica coatings: An environmentally friendly process on an industrial scale of single-layer anti-reflective coatings for large substrates, *Ceramics International*, Volume 48, Issue 3, 2022, Pages 4165-4171,
9. Li Mingjie, Wenxin Luo, Haoyang Sun, Jingfu Xu, Yi Liu, Xing Cheng, Superhydrophobic coatings fabricated by paraffin wax and silica nanoparticles with enhanced adhesion stability, *Materials Letters*, Volume 309, 2022, 131316,
10. Li Xiaofei, Xiao Wang, Yukun Yuan, Mingyuan Wu, Qingyun Wu, Jiuyi Liu, Jianjun Yang, Jianan Zhang, Sprayable, durable, and superhydrophobic coating of silica particle brushes based on octadecyl bonding and polymer grafting via surface-initiated ATRP for efficient oil/water separation, *European Polymer Journal*, Volume 159, 2021, 110729,
11. Luchkin A.Yu., O.A. Goncharova, I.A. Arkhipushkin, N.N. Andreev, Yu.I. Kuznetsov, The effect of oxide and adsorption layers formed in 5-Chlorobenzotriazole vapors on the corrosion resistance of copper, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Volume 117, 2020, Pages 231-241,
12. Moreira André, Sara Madeira, Mihaela Buciumeanu, Joana Fialho, Angela Carvalho, Filipe Silva, Fernando J. Monteiro, João Caramês, Design and surface characterization of micropatterned silica coatings for zirconia dental implants, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Volume 126, 2022, 105060,
13. Morrow Alison M, Norman S Allen, Michele Edge, Derek Aldcroft, Helen Jones, A kinetic investigation into the effect of silica properties on the photo-oxidation of a water based silica coating, *Polymer Degradation and Stability*, Volume 66, Issue 1, 1999, Pages 95-105,
14. Sbardella F, M.P. Bracciale, M.L. Santarelli, José M. Asua, Waterborne modified-silica/acrylates hybrid nanocomposites as surface protective coatings for stone monuments, *Progress in Organic Coatings*, Volume 149, 2020, 105897,
15. Sharma Konica, Amrita Hooda, M.S. Goyat, Radheshyam Rai, Ajay Mittal, A review on challenges, recent progress and applications of silica nanoparticles based superhydrophobic coatings, *Ceramics International*, 2021,



Dr inż. Andrzej Grzebielec jest pracownikiem Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. W swoich pracach naukowych skupia się na instalacjach związanych z chłodnictwem, klimatyzacją i pompami ciepła spotykanymi w dużych zakładach przemysłowych.