



M. Kovačić\*

Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu  
Zavod za polimerno inženjerstvo i organsku  
kemijsku tehnologiju procesa, Savska cesta 16, 10 000 Zagreb

## Zaleđivanje zrakoplova – jednostavan fenomen, a velik problem

Zima polako jenjava, a s njom i čest, dosadan, jutarnji zadatak struganja leda s automobilske vjetrobrane. Međutim, za razliku od tla, gdje led uglavnom predstavlja davež, u “zraku” je iznimno velik problem koji se ne može riješiti jednostavnim struganjem. Konkretno, zaleđivanje zrakoplova, odnosno nakupljanje leda na aerodinamičkim površinama, predstavlja znatnu opasnost sa stajališta sigurnosti te teret za ekonomičnost zračnog prijevoza. Do zaleđivanja dolazi sudarom pothlađenih kapi u oblacima s aerodinamičkim površinama zrakoplova, poput trupa, krila, repa te dijelova motora pri temperaturama zraka jednakim ili manjim od 0 °C. Nakupljeni led ponajprije narušava aerodinamička svojstva zrakoplova povećavajući otpor strujanju zraka te posljedično smanjuje uzgon krila, što dovodi do pogoršanja letачkih karakteristika zrakoplova, a u ekstremnim slučajevima i do potpunog gubitka upravljivosti.

Uklanjanje naslaga leda u zrakoplovstvu može se provoditi na tlu ili u zraku ukoliko je zrakoplov opremljen adekvatnim sustavima. Led akumuliran na površinama zrakoplova na tlu može se ukloniti mehanički ili kemijski, prskanjem koncentrirane vodene otopine etilen glikola ili propilen glikola. Radi zaštite od zaleđivanja u letu (engl. *anti-icing*) primjenjuje se viskozna kapljevinna, bazirana također na glikolima, no s dodatkom zgušnjavala, najčešće poliakrilata.<sup>1</sup> Zahvaljujući velikoj viskoznosti fluida, formira se tanak sloj glikola u mreži zgušnjavala, što inhibira zaleđivanje tijekom leta. Međutim, film formiran *anti-icing* sredstvom nije osiguranje od zaleđivanja. Zrakoplovi su često opremljeni gumenim komorama na napadnoj ivici, koje se mogu ciklički napuhivati i ispuhivati, razbijajući pri tome nakupljene formacije leda. Veći putnički zrakoplovi mogu usmjeriti dio vrućeg, komprimiranog zraka iz kompresora mlaznog motora u sustav cijevi ispod kritičnih površina, što dovodi do taljenja nakupina leda. S ekonomskog stajališta, aktivni *anti-icing* tijekom leta povećava potrošnju goriva zrakoplova jer se dio snage motora umjesto za pogon primjenjuje za odleđivanje, što se odražava povećanjem potrošnje goriva. Međutim, navedeni sustavi ponekad nisu u mogućnosti ukloniti nakupljeni led ukoliko se naslage formiraju iznimno brzo. Tako su primjerice naslage leda na upravljačkim površinama izravni uzročnik pada zrakoplova ATR-72 tvrtke American Eagle 1994. godine u okolici Chicaga, a zaleđeni pretvornici brzine (Pitotove cijevi) neposredni su uzročnici pada Airbusa A330 tvrtke Air France nad Atlantikom 2009. godine.<sup>2,3</sup> Stoga ne iznenađuje kako američki NTSB (engl. *National Transportation Safety Board*) navodi zaštitu od zaleđivanja kao jedan od prioriteta za poboljšanje sigurnosti u području zračnog prometa.

Fenomen zaleđivanja može se ponajprije razmotriti sa stajališta energije površine, odnosno kako je potrebno umanjiti energiju



Slika 1 – Nakupine leda na tzv. napadnoj ivici (engl. *leading edge*) krila zrakoplova (izvor:

<https://airfactsjournal.com/2016/03/icing-cold-hard-air-facts/>)

privlačnih sila između površine i kristalića leda, čime bi se spriječila akumulacija. Primjerice mikro/nano-strukturirane superhidrofobne površine mogu drastično umanjiti kontaktnu površinu između kapljice vode i materijala. Zrak zarobljen između pothlađene kapljice i hladne površine krila djeluje kao toplinski izolator, pri čemu je potrebno dulje vrijeme kontakta za stvaranje leda, uslijed većeg otpora prijenosu topline.<sup>4</sup> Doduše, sposobnost superhidrofobne površine za inhibiranje formacije leda znatno se smanjuje povećanjem vlažnosti zraka pri temperaturama neznatno ispod nule. Nedostatak takvih materijala nedovoljna je mehanička postojanost mikro-strukturiranih površina, odnosno nastali led ili uklanjanje samoga leda uzrokuje oštećenja površine, što s vremenom dovodi do povećanja kontaktne površine i negativnog učinka na hidrofobna svojstva takve površine.<sup>5,6</sup> Postavlja se i pitanje utjecaja takvih mikro/nano-strukturiranih površina na otpor strujanju zraka. Naizgled, čini se kako bi takva hrapava površina imala negativan učinak na aerodinamički koeficijent otpora. Međutim, samočisteća priroda superhidrofobnih površina drastično reducira akumulaciju nečistoća, poput kukaca, što se pozitivno odražava na koeficijent otpora i u konačnici rezultira boljom ekonomičnošću.<sup>7,8</sup>

Wang i sur.<sup>9</sup> inspirirani tropskim vrčevcom, pripremili su sklisku mikro-strukturiranu površinu s uklopljenim kapljevina, odnosno *slippery liquid-infused porous surface* (SLIP) od silaniranih, hidrofobnih SiO<sub>2</sub> nanočestica i polietilena iznimno velike molekulske mase (engl. *ultra high molecular weight polyethylene*,

\* Dr. sc. Marin Kovačić  
e-pošta: [mkovacic1@fkit.hr](mailto:mkovacic1@fkit.hr)

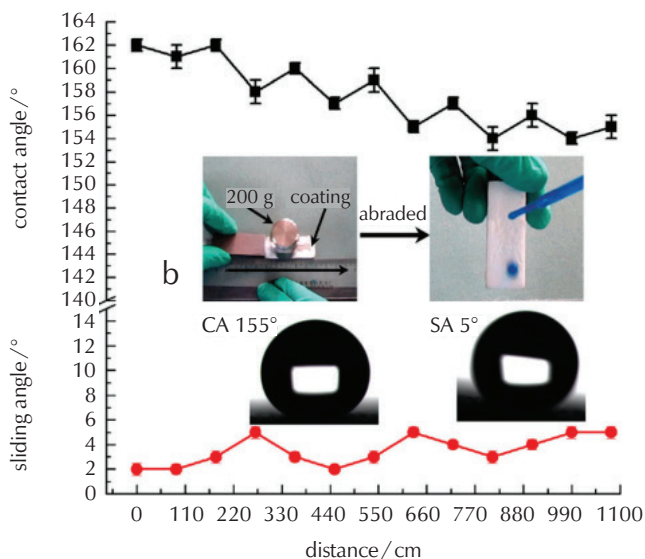


Slika 2 – Odležavanje zrakoplova u Međunarodnoj zračnoj luci Zagreb

UHMWPE). Najčešće uklopljene kapljevine u SLIP-u su ulja. Pripremljena površina pokazala je dobru mehaničku otpornost na abraziju, pri čemu je morfologija površine neznatno promijenjena, a zadržana su hidrofobna svojstva.

Međutim, kapljevina SLIP-a se eventualno iscrpi, što uzrokuje drastično smanjenje hidrofobnosti površine. *Colovin i sur.*<sup>10</sup> razvili su polimerni elastomerni premaz s ciljanom malom energijom adhezije leda,  $\tau_{led}$ . Hidrofobne, odnosno "ledofobne" površine obično ostvaruju  $\tau_{led} < 100$  kPa, no ako se energija smanji ispod 20 kPa, led se pasivno uklanja smičnim naprezanjem uslijed strujanja zraka preko krila zrakoplova. Željena svojstva premaza postigli su smanjenjem stupnja umreženja elastomera te su, analogno SLIP-u, umiješali silikonsko ulje u polimer s ciljem povećanja skliskosti međufazne površine. Međutim, pažljivo je kontrolirana mješljivost ulja i elastomera, pri čemu je dobivena homogena razdioba ulja po presjeku materijala, što nije slučaj kod većine konvencionalnih SLIP materijala.

*Irajizad i sur.*<sup>11</sup> razvili su novi fizikalni koncept za odležavanje tzv. *stress localization*. Na međufaznoj granici led-viskoelastičan materijal, javljaju se smična naprezanja koja rezultiraju stvaranjem



Slika 3 – Utjecaj mehaničke abrazije na hidrofobne značajke površine od silanizirane silike te UHMWPE<sup>9</sup>

pukotina te odvajanjem leda. Materijal se prema ispitivanjima autora pokazao mehanički postojanim te ponovljiva djelovanja u slijednim ciklusima nakon djelovanja abrazivnog sredstva.

Upotreba superhidrofobnih materijala s ciljem smanjenja akumulacije leda nije ograničena samo na zrakoplovni prijevoz već takvi materijali mogu naći primjenu u nizu drugih područja. Važnu primjenu mogu pronaći u distribuciji električne energije, gdje nakupljeni led uzrokuje pucanje električnih vodova, rashladnoj i klimatizacijskoj opremi, gdje naslage leda smanjuju koeficijent prijenosa topline i smanjuju učinkovitost sustava.<sup>12,13</sup> Analogno redukciji nakupina kukaca na zrakoplovima, superhidrofobna svojstva poželjna su i kod samočistećih premaza, gdje je kiša dovoljna za ispiranje akumuliranih nečistoća.<sup>14</sup>

## Literatura

1. Y. Wang, R. A. Pethrick, N. E. Hudson, C. J. Schaschke, Electrolyte effects on polyacrylic acid-polyvinylpyrrolidone aqueous glycol mixtures for use as de-icing fluids, *Ind. Chem.* **2** (2016), doi: <https://doi.org/10.4172/2469-9764.1000115>.
2. URL: <https://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Pages/AAR9601.aspx> (28. 1. 2019.).
3. URL: <https://www.bea.aero/docsp/2009/f-cp090601.en/pdf/f-cp090601.en.pdf> (28. 1. 2019.).
4. P. Tourkine, M. L. Merrer, D. Quéré, Delayed freezing on water repellent materials. *Langmuir* **25** (2009) 7214–7216, doi: <https://doi.org/10.1021/la900929u>.
5. S. A. Kulinich, S. Farhadi, K. Nose, X. W. Du, Superhydrophobic surfaces: are they really ice-repellent? *Langmuir* **27** (2011) 25–29, doi: <https://doi.org/10.1021/la104277q>.
6. S. Farhadi, M. Farzaneh, S. A. Kulinich, Anti-icing performance of superhydrophobic surfaces, *Appl. Surf. Sci.* **257** (2011) 6264–6269, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.02.057>.
7. URL: <https://cen.acs.org/articles/93/i26/Airplane-Coatings-Help-Recoup-Fuel.html> (29. 1. 2019.).
8. K. G. Krishnan, A. Milionis, E. Loth, T. E. Farrell, J. D. Crouch, D. H. Berry, Influence of hydrophobic and superhydrophobic surfaces on reducing aerodynamic insect residues, *Appl. Surf. Sci.* **392** (2017) 723–731, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.09.096>.
9. N. Wang, D. Xiong, S. Pan, K. Wang, Y. Shi, Y. Deng, Robust superhydrophobic coating and the anti-icing properties of its lubricants-infused composite surface under condensing condition, *New J. Chem.* **41** (2017) 1846, doi: <https://doi.org/10.1039/C6NJ02824A>.
10. K. Golovin, S. P. R. Kobaku, D. H. Lee, E. T. DiLoreto, J. M. Mabry, A. Tuteja, Designing durable icephobic surfaces, *Surf. Chem.* **2** (2016) e1501496, doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501496>.
11. P. Irajizad, A. Al-Bayati, B. Eslami, T. Shafquat, M. Nazari, P. Jahari, V. Kashyap, A. Masoudi, D. Araya, H. Chasemi, Stress-localized icephobic surfaces, *Mater. Horizon.* (2019), doi: <https://doi.org/10.1039/C8MH01291A>.
12. R. Bernardo, J. Cardoso, R. Catalão, L. Ilharco, Anti-ice and snow coating for EDP Distribuição's overhead lines, *CIREĐ – Open Access Proc. J.* **1** (2017) 33–36 doi: <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.0279>.
13. F. Wang, C. Liang, Y. Zhang, X. Zhang, Defrosting performance of superhydrophobic fin-tube heat exchanger, *Appl. Therm. Eng.* **113** (2017) 229–237, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.028>.
14. J. Drelich, A. Marmur, Physics and applications of superhydrophobic and superhydrophilic surfaces and coatings, *Surf. Innovations* **2** (2014) 211–227, doi: <https://doi.org/10.1680/si.13.00017>.