Kamila Kustroń*

Politechnika Warszawska

Physicochemical aspects of structural integrity of a sustainable airframe. Development of smart inspectability methods and application of artificial intelligence

Fizyczno-chemiczne aspekty zapewnienia spójności strukturalnej „zrównoważonego" płatowca. Rozwój metod oceny stanu technicznego i zastosowanie metod sztucznej inteligencji

OPEN ACCESS **DOI:** *10.15199/62.2024.12.31*

A review, with 26 refs., concerning the problem of flaws occurrences in structure of airframe material while long-term operated withstand to airworthiness. The role of chem. bonds constituting the structure of a material object and their impact on the airframe operation process in random operating conditions characterized by uncertainty were discussed. The benefits of using a method based on artificial intelligence, including methods based on rough set theory were presented. The course of variability of the damage factor of one type of aircraft in the fleet of an air carrier during operation was presented.

***Keywords**: structural integrity, chemical bonds, airframe, design, operation and maintenance, reliability model, airworthiness, smart inspectability, artificial intelligence*

Przedstawiono problematykę spójności materiałów konstrukcyjnych i ich połączeń w aspekcie zapewnienia zdatności do lotu, zgodnie z obowiązującymi przepisami prawa lotniczego, ze szczególnym uwzględnieniem starzejącego się płatowca. Problematyka ta obejmuje rolę wiązań chemicznych stanowiących strukturę obiektu materialnego i ich wpływ na spójność strukturalną płatowca w losowych warunkach eksploatacji. Warunki eksploatacji charakteryzują się niepewnością. Wyniki badań dotyczące oceny stanu technicznego płatowca w odpowiedzi na warunki eksploatacji, symulowane w eksperymentach, cechują się niepewnością. Tego typu dane uzyskane w badaniach są predestynowane do zastosowania metod sztucznej inteligencji, w tym metod opartych na teorii zbiorów przybliżonych. Przedstawiono zalety wynikające z zastosowania metody opartej na tej teorii w ocenie inteligentnej inspekcji płatowca. Jest to metoda rozwojowa i ma duży potencjał poparty wynikami badań.

Słowa kluczowe: spójność strukturalna, wiązania chemiczne, płatowiec, projektowanie i eksploatacja, model niezawodnościowy, zdatność do lotu, podatność na ocenę stanu technicznego, sztuczna inteligencja

Postęp w inżynierii mechanicznej jest zintegrowany z zastosowaniem nowych lub ulepszonych materiałów konstrukcyjnych o wysokiej integralności ze sobą i spójności materiałowej. Przedstawiono fundamentalną i wyspecjalizowaną wiedzę dla podjętej tematyki, od cząstek elementarnych kształtujących materię po systemowe rozwiązania stosowane w bezpiecznym korzystaniu z wysoce złożonego obiektu materialnego podlegającego wymogom prawno-organizacyjnym.

Lotnictwo cywilne jest ukierunkowane na systemowe rozwiązania w zakresie zapewnienia wysokiego poziomu bezpieczeństwa lotów, spełniające wymagania stawiane obecnie przepisami prawa lotniczego, jak również przyszłościowo w odpowiedzi na oczekiwania zrównoważonego rozwoju transportu[1–3]. W tej systemowości bardzo ważne są aspekty ekonomiczne, ujmujące koszty eksploatacji samolotu przy zapewnieniu wymaganego poziomu bezpieczeństwa i ochrony środowiska oraz spełnieniu wymagań dotyczących zdatności do lotu. Zdatność do lotu nadana w procesach projektowania i wytwarzania stanowi zdatność początkową. Zdatność ta wyrażona jest poprzez potencjał eksploatacyjny, który jest zużywany w procesie użytkowania. Zużyty potencjał musi zostać odtworzony w procesie utrzymania ciągłej zdatności do lotu. Pomiar zużywania potencjału eksploatacyjnego realizowany jest metodami

Dr inż. Kamila KUSTROŃ (ORCID: 0000-0001-7634-5847) w roku 1995 ukończyła studia na kierunku mechanika i budowa maszyn na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. W 2001 r. uzyskała stopień doktora na tym samym wydziale i rozpoczęła pracę jako adiunkt naukowo-badawczy. Specjalność – lotnictwo, projektowanie płatowców przyjaznych w eksploatacji.

*** Adres do korespondencji:**

Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej, Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejska 24, 00-662 Warszawa, e-mail: kamila.kustron@pw.edu.pl

diagnostyki technicznej. Możliwości metod diagnostycznych są ograniczone poprzez zastosowane technologie.

Samolot pasażerski lub cargo, spełniający specyfikacje certyfikacyjne CS (*certiffication specifications*), EASA CS-25 to złożony system o subiektywnej strukturze niezawodnościowej, z określoną hierarchią, przy podstawowym podziale na płatowiec, zespół napędowy i systemy sterowania. To założenie odnośnie do przedmiotu badań jest zasadne dla zebrania i ugruntowania wiedzy, ze względu na środowisko pracy takich samolotów i wpływ czynników klimatycznych, różnych kultur oraz wypracowanych nawyków dla różnych krajów na świecie. Istnieją różnice w wymaganiach dotyczących certyfikowania „dużych" samolotów dla innych krajów należących do ICAO, np. przepisy wg FAA. Są to niewielkie różnice, ponieważ dąży się do unifikacji wymagań, jednak różnice istnieją, stąd wskazano tutaj założenia, odnośnie do przedmiotu badań.

Płatowiec stanowi strukturę nośną samolotu, absolutnie priorytetową w zapewnieniu bezpieczeństwa lotów, jak również musi spełnić wysokie wymagania niezawodnościowe, w tym i ze względów ekonomicznych. Płatowiec samolotu pasażerskiego lub cargo jest konstrukcją wysokiego ryzyka ze względu na bezpieczeństwo. Konstruktorzy płatowca muszą też uwzględnić czynniki wpływające na trwałość „zrównoważonego" płatowca w zakresie ochrony środowiska. Wymagania te dotykają doboru odpowiednich materiałów konstrukcyjnych, o wysokiej integralności zachowywanej przez dziesiątki lat, odpowiadające charakterystyce trwałości. Płatowiec to obiekt materialny i obiekt techniczny.

Podstawą budowy materii są cząstki elementarne. W budowie materii kluczowe pojęcia to: pojęcie oddziaływania (w fizyce) i pojęcie wiązania (w chemii). Pojęcia te stanowią podstawę budowy materii i przekładają się na właściwości fizyczne i mechaniczne obiektów materialnych oraz ich procesy starzenia. Oddziaływania fizyczno-chemiczne w aspekcie długoletniej eksploatacji wykazują istotne wzajemne korelacje dla starzejącego się płatowca.

Stan wiedzy z zakresu oddziaływań fizyczno-chemicznych oparty jest na budowie materii. Materia zbudowana jest z pierwiastków chemicznych. Obiekt materialny zawdzięcza swoje właściwości wiązaniom chemicznym, które łączą ze sobą atomy pierwiastków wchodzących w skład danej molekuły. Charakter wiązania decyduje także o trwałości połączenia.

Rozpatrując zachowanie materii na różnych szczeblach zorganizowania, stosuje się modele opisujące te zjawiska. Z punktu widzenia inżynierii mechanicznej jest to istotny aspekt, szczególnie obecnie, kiedy uwagę zorganizowania świata skierowano na zrównoważony rozwój. Zabiegi odmładzające stary płatowiec są pożądane, dlatego podjęto dyskusję nad możliwościami uzdatniania starego płatowca do lotu.

Bardzo ważnym aspektem jest zdobycie wiedzy dotyczącej procesów degradacyjnych struktury konstrukcyjnej płatowca. Wiedza ta jest niepełna i niepewna, i zależna od metod diagnostyki technicznej oraz metod przetwarzania wiedzy na wiedzę użyteczną bez utraty jej istotności. Jest to domena sztucznej inteligencji, a metody oparte na teorii zbiorów przybliżonych[4, 5] stanowią najefektywniejsze ze znanych narzędzi.

Przedstawiono najnowsze osiągnięcia w zakresie zastosowania metod diagnostyki inteligentnej w ocenie spójności materiałów konstrukcyjnych stanowiących podstawę oceny stanu technicznego płatowca i podjęto dyskusję wdrożenia takiego systemu dla „starego" płatowca. Spójność strukturalna może być nadwyrężona poprzez oddziaływanie czynników fizyczno-chemicznych. Ten proces jest określany jako starzenie i dotyczy samolotów 20-letnich i starszych. Tematyka pracy dotyczy zapewnienia spójności materiałów konstrukcyjnych i połączeń w czasie eksploatacji, gdzie zmienność warunków następuje w czasie i przestrzeni, w jakiej wykonywany jest lot. Mnogość zagadnień i możliwości zbierania i przetwarzania danych tworzy problem *big data*. Wraz z postępem cyfryzacji możliwe jest rozwiązanie wszystkich postawionych tu problemów z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji. Obecnie sztuczna inteligencja to intensywność wnioskowań, ich schematyzacji i ubierania w modele, których podstawą jest hybrydyzacja wynikająca z połączenia konwergencji i dywergencji aplikowanych w postaci technologii cyfrowych. Komputer w tej technologii stanowi metamedium o szerokich możliwościach tworzenia cyfrowych przestrzeni działania i recepcji, która jest niemal pozbawiona właściwości, co daje technologii obliczeniowej potężny potencjał generatywny[6].

Fig. 1. Flowchart of state-of-the-art synthesis

Rys. 1. Proces przeglądu stanu wiedzy pokrywającej tematykę pracy

Przegląd stanu wiedzy

Procedura badawcza dla opracowania przeglądu stanu wiedzy w zakresie fizyczno-chemicznego obszaru czynnikowego dla efektywnego zarządzania projektem zrównoważonego płatowca

została poprzedzona przeglądem obecnego stanu wiedzy i wyrażona za pomocą schematu blokowego składającego się z 4 kroków (rys. 1). W strukturze konstrukcyjnej płatowca stosowane są materiały konstrukcyjne o wysoce wyspecjalizowanej strukturze chemicznej i przeprowadzanych obróbkach cieplnych i mechanicznych. Należą do nich stopy aluminium, magnezu, tytanu, stali oraz kompozyty[7]. Szczególne zastosowanie znalazły kompozyty o osnowie bazującej na żywicy epoksydowej, zbrojone włóknami węglowymi i szklanymi. W lotnictwie cywilnym dla dużych samolotów kryteria doboru materiałów konstrukcyjnych to lekkość i tolerancja uszkodzeń. Dlatego materiały hybrydowe stanowiące połączenie wszystkich podstawowych grup materiałowych i ich zalet są w szerokim spektrum badań naukowych[8]. Poszukiwane struktury hybrydowe są optymalnym połączeniem wiązań chemicznych: mocnych kowalencyjnych, charakterystycznych dla materiałów ceramicznych; mocnych metalowych, charakterystycznych dla metali i ich stopów, odpowiedzialnych za właściwości wytrzymałościowe i sztywność zbudowanych z nich materiałów, ale nieodpornych na kruche pękanie oraz słabszych oddziaływań siłami Van-der-Waalsa, charakterystycznych dla polimerów i odpowiedzialnych za plastyczność.

Przykładem absolutnie nowatorskiego hybrydowego rozwiązania jest GLARE[9], laminat stanowiący warstwy szklano-epoksydowe oraz cienkie blachy duraluminiowej. To połączenie wykazało dobry kompromis lekkości konstrukcji i odporności na uszkodzenia[10]. Materiał ten został zastosowany w budowie powłoki płatowca Airbus A 380. Duże nadzieje związane są z badaniami prowadzonymi nad wykorzystaniem najlżejszych z metali, litu i magnezu. Ten drugi znalazł zastosowanie w elementach wirnika nośnego śmigłowca, jednak jest on obarczony występowaniem korozji międzykrystalicznej, trudnej do wykrycia metodami badań nieniszczących. Trwają zaawansowane prace nad jego stopami[11]. Koszty jednostkowe tych materiałów są wysokie ze względu na wyrafinowane procesy technologiczne ich wytwarzania, ale wśród kosztów wytworzenia całego samolotu ich udział jest relatywnie mały i kształtuje się na poziomie 3–4%.

Mając na uwadze złożoną strukturę konstrukcyjną płatowca, jako strukturę nośną, czyli system wysokiego ryzyka o wysokim poziomie bezpieczeństwa, należy transformować ją na strukturę niezawodnościową w czasie eksploatacji, czyli w czasie lotu, o założonym profilu lotu i wykorzystaniu potencjału eksploatacyjnego naprzemiennie z odsługiwaniem samolotu w celu przywrócenia zdatności do lotu. Ważny naukowy dorobek wykazali Matyjewski i współpr.[12], badając minimalną liczbę punktów w strukturze.

Diagnostyka inteligentna to bardzo prężnie rozwijająca się dziedzina wiedzy[13–21]. W diagnostyce inteligentnej wykorzystuje się wytworniki fal zaliczanych do fal akustycznych oraz fal elektromagnetycznych, które przechodząc przez materiał do odbiornika fali, stają się nośnikiem informacji o strukturze materiałowej. W ten sposób wykrywane są pęknięcia, delaminacje i pustki powstałe w procesach technologicznych. Sensory mogą również być umieszczane w strukturze jako układy pasywne i odpowiadające wygenerowaniem fali podczas np. uderzenia przez ptaka, grad lub inne ciało obce. W lotnictwie szczególne zastosowanie znalazły zestawy czujnikowe oparte na piezoelementach i światłowodowych siatkach Bragga, które wbudowane w strukturę materiałową współczesnego płatowca lub naklejane na nią stanowią zespół wrażliwości struktury, na wzór układu nerwowego człowieka. Dodatkowo czujniki wymagają zasilania i mogą być autonomiczne dzięki nowatorskim możliwościom pozyskiwania energii z energii drgań płatowca[22].

Obecnie prowadzone są intensywne badania wdrożeniowe metod diagnostyki inteligentnej w celu oceny stanu technicznego płatowca podczas lotu. Ma to podwójną zaletę, ponieważ informacja może być przesyłana już w czasie lotu i nagłe obsługi mogą być koordynowane, co stanowi zminimalizowanie czasu postoju samolotu na ziemi, a także szybkie zorganizowanie właściwej obsługi w celu odnowy potencjału eksploatacyjnego. Jest to możliwe dzięki wprowadzanej technologii bliźniaczej, czyli wirtualny bliźniak lub klon samolotu na ziemi może zostać przetestowany pod kątem efektywnego wykonania obsługi. Druga zaleta to zbieranie informacji o stanie technicznym podczas pracy płatowca, czyli w warunkach rzeczywistych, kiedy mogą być inicjowane uszkodzenia. W przedstawionym pokrótce zagadnieniu zalet diagnostyki inteligentnej jest ogrom zagadnień do rozwiązania i zastosowania metod sztucznej inteligencji. To samo zagadnienie przeprowadzone metodą zbiorów przybliżonych pokrywa wyniki i dodatkowo skraca czas dotarcia do konkluzji. Praca Matyjewskiego i współpr.[12] jest walidacją modelu oceny określenia miejsc oczujnikowania płatowca samolotu w optymalny sposób będący odzwierciedleniem pracy całej struktury, a miejsca o największym ryzyku uszkodzenia stanowią punkty krytyczne dla dolnego brzegu zbioru przybliżonego, zachowując wymagany wysoki poziom bezpieczeństwa.

Studium starzejącego się płatowca

Badaniom poddano flotę jednego typu samolotów pod kątem oceny wskaźnika intensywności uszkodzeń w procesie eksploatacji. Przykład przedstawiony na rys. 2[23] jest prosty, studyjny i ilustruje problem starzenia struktury konstrukcyjnej w odpowiedzi na czynniki fizyczno-chemiczne oddziałujące na samolot. Przewoźnik lotniczy średniej wielkości zakupił 7 samolotów jednego typu i rozpoczął ich eksploatację wg przyjętej, powszechnie stosowanej metodyki eksploatacji skierowanej na analizę niezawodności. Na rys. 2 przedstawiono przebieg w czasie eksploatacji parametru intensywności uszkodzeń, skumulowanego dla całej struktury samolotu. Dla lotnictwa komercyjnego obserwacja tego parametru wskazuje na koszty eksploatacji konkretnego samolotu w grupie samolotów i umożliwia

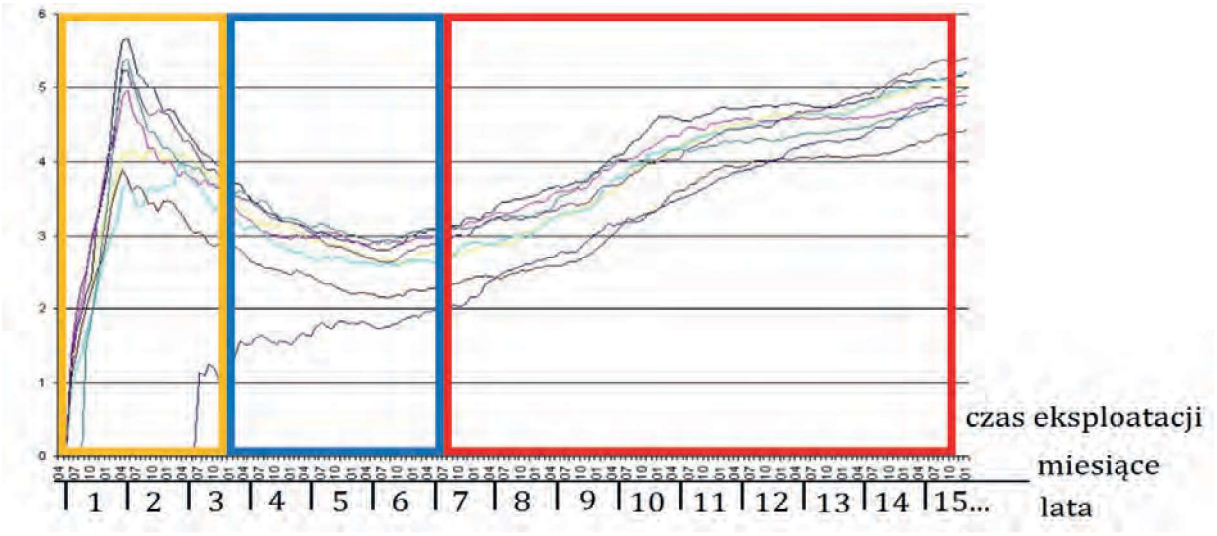

Fig. 2. Intensity of failure rate for one type of air operator's aircraft

Rys. 2. Przebieg zmienności współczynnika uszkodzeń samolotów jednego typu floty operatora lotniczego w czasie eksploatacji

wytypowanie egzemplarza do modernizacji lub wymiany. Obszar zaznaczony żółtą ramką wskazuje etap tzw. noworodkowy lub etap „docierania" skuteczności obsług samolotów we flocie poprzez uchwycenie elementów najbardziej awaryjnych i ich modyfikacji lub wymiany. W drugim obszarze (zaznaczonym niebieską ramką) do eksploatacji zakupiono dodatkowo jeden nowy samolot tego samego typu, już po okresie noworodkowym dla tego typu samolotów producenta. Samolot ten charakteryzuje się wyraźnie najmniejszą intensywnością uszkodzeń do końca rozpatrywanego okresu eksploatacji z grupy 8 samolotów jednego typu. Ostatnia część wykresu (zaznaczona czerwoną ramką) to istota tematyki tego artykułu. W tym okresie zaczynają się naprawy strukturalne i narastają w czasie dla wieku płatowców ponad 10-letnich. Istotny udział napraw starzeniowych w literaturze podawany jest dla płatowców ponad 20-letnich. Dlatego płatowce o 20-letnim okresie eksploatacji i większym w nomenklaturze lotniczej określa się starzejącymi (*aging*).

Długotrwałe badania starzenia elementu kompozytowej struktury płatowca samolotu Boeing 737[24] wykazały istotny wpływ czynników chemicznych i fizycznych na właściwości mechaniczne po 20 latach eksploatacji. Badania te były walidacją modelu przyjętego podczas projektowania tego elementu kompozytowego z zastosowaniem wyników badań przyspieszonych. Badania wykazały molekularne zmiany w strukturze konstrukcyjnej podobne do zmian po zastosowaniu czynników starzeniowych poprzez narażenie struktury na podwyższoną temperaturę przez 3000 h. Materiały eksploatowane w komercyjnym samolocie przez 20 lat wykazywały dwie zmiany chemiczne nieobserwowane wcześniej, czyli wzrost liczby cząsteczek węglowodorów alifatycznych (substancji chemicznej będącej w paliwie) oraz molekuły zawierające SO_2. Przykład ten wskazuje na potrzebę oceny czynników fizyczno-chemicznych dla materiałów konstrukcyjnych płatowca.

Dorobek naukowy autora w zakresie badania oceny rozwoju delaminacji[25] w strukturze kompozytowej płatowca przełożył się na poszukiwanie metod sztucznej inteligencji dla mnogości zagadnień adekwatnych do pracy mózgu człowieka. Z praktycznego punktu widzenia teoria zbiorów przybliżonych jako metoda analizy danych w sposób najbardziej efektywny sprawdziła się w szukaniu zależności między danymi, zmniejszania ilości danych bez utraty istotności informacji, w określaniu wagi danych i przede wszystkim w generowaniu reguł decyzyjnych z danych dla wnioskowania o stanie technicznym płatowca[26]. Zaletą metod opartych na teorii zbiorów przybliżonych jest przede wszystkim to, że nie wymaga ona założeń odnośnie do danych, w tym prawdopodobieństwa i rozmytości, a w dodatku umożliwia tworzenie szybkich algorytmów analizy danych oraz łatwość interpretacji wyników poprzez prostotę matematyczną.

Podsumowanie i kierunki badań rozwojowych

Przedstawiony przypadek studyjny i badania literaturowe wskazują kierunki wyzwań dla przemysłu chemicznego. Procesy starzenia stanowią bardzo istotny czynnik doboru materiałów konstrukcyjnych i ich połączeń. Zauważalne są różnice w kosztach eksploatacji tego samego typu samolotu w zależności od częstotliwości lotów oraz stref geograficznych, w jakich są wykonywane. Prowadzone przez autora pracy badania w tym zakresie wskazały na istotne różnice dla różnych przewoźników lotniczych. Korelacja czynników fizycznych i chemicznych wpływa na intensywność zużywania potencjału eksploatacyjnego, przez co generuje koszty uzdatnienia starych płatowców. Prewencyjne działania mają za zadanie uprzedzać występowanie uszkodzeń wymagających obsługi nieplanowanej lub łagodzić następstwa występowania takich niepożądanych zdarzeń. Prewencyjne działania są możliwe dzięki

zastosowaniu efektywnych metod diagnostyki inteligentnej, zintegrowanej ze strukturą płatowca i z systemem zarządzania ciągłą zdatnością do lotu. Jest to rozwojowy kierunek badań. W literaturze przedmiotu postawiono nawet śmiałą tezę, że aplikacje diagnostyki inteligentnej wyeliminują obsługi nieplanowane.

Rozwojowe kierunki badań stawiają ogromne możliwości dla przemysłu chemicznego w poszukiwaniu mieszanin substancji materialnych, z których w zaawansowanych procesach obróbki cieplnej, chemicznej i mechanicznej powstaną materiały hybrydowe o dużej odkształcalności kierunkowej przy zachowaniu spójności materiałowej i odporności warstwy wierzchniej, odporne na agresywne działanie środowiska, poprzez wnikanie w strukturę powodujące korozję lub erozję i ich odmiany intensyfikowane powstawaniem nośników elektrycznych i elektro-chemicznych. Ważne jest poszukiwanie pokryć elastycznych odbierających uszkodzenia od uderzeń zewnętrznych, odpornych na mikropęknięcia, np. ciecze z reopeksją. Te wszystkie badania muszą mieć na uwadze mały ciężar właściwy substancji chemicznych jako produktów dla przyszłościowego płatowca ze względu na podstawowy parametr lekkości w doborze materiałów konstrukcyjnych płatowca. Dodatkowo w literaturze przedmiotu badań są opracowania dotyczące potrzeby rozszerzenia modeli do fizyczno-chemiczno-socjologicznych.

Otrzymano: 16-10-2024 *Zrecenzowano: 28-11-2024*
Zaakceptowano: 09-12-2024 *Opublikowano: 20-12-2024*

LITERATURA

[1] ICAO, 2024. Aviation safety's contributions to the sustainable development goals (SDGS), https://www.icao.int/about-icao/aviation-development/SDGFR/SAF.pdf, dostęp 17.07.2024 r.
[2] ICAO, 2022, Environmental Report, Innovation for a Green Transition, https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ICAO%20ENV%20Report%202022%20F4.pdf, dostęp 01.02.2024 r.
[3] IATA, 2023. Aircraft Technology Roadmap to 2050, https://www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/Technology-roadmap-2050.pdf, dostęp 02.04.2023 r.
[4] Z. Pawlak, *Int. J. Computer Infor. Sci.* 1992, **11**, 341, https://doi.org/10.1007/BF01001956.
[5] Z. Pawlak, *Osiągnięcia nauki i techniki. Kierunki rozwoju i metody*, Konwersatorium Politechniki Warszawskiej, 2004, nr 5, 1, na podstawie odczytu: oai:bcpw.bg.pw.edu.pl:1949, dostęp 03.09.2024 r.
[6] M. Składanek, *Przegl. Kulturoznawczy* 2011, nr 1(9), 37.
[7] Z. Xuesong, C. Yongjun, H. Junling, *Progr. Aerosp. Sci.* 2018, **97**, 22, https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.01.001.
[8] R. Dronskowski, *Chemical bonding. From plane waves via atomic orbitals*, De Gruyter, Berlin, Boston 2023, https://doi.org/10.1515/9783111167213.
[9] A. Vlot, *Glare: history of the development of a new aircraft material*, Springer, 2001, doi: 10.1007/0-306-48398-X.
[10] L. Gao, Z. Li, S. Jiang, B. Xie, *Compos. Struct.* 2023, **323**, 117449, https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117449.
[11] B. Jingying, Y. Yan, W. Chen, C. Jing, Z. Gang, J. Bin, P. Xiaodong, P. Fusheng, *J. Magnes. Alloys* 2023, **11**, 3609, https://doi.org/10.1016/j.jma.2023.09.015.
[12] M. Woch, M. Kurdelski, M. Matyjewski, *Eksploat. Niezawodn.* 2015, **17**, nr 3, 457, http://dx.doi.org/10.17531/ein.2015.3.18.
[13] A. Hamdan i in., *J. Adv. Mech. Eng. Appl.* 2020, **2**, nr 1, 1, doi.org/10.30880/jamea.2020.02.01.001.
[14] A. Güemes, A. Fernandez-Lopez, A.R. Pozo, J. Sierra-Pérez, *J. Compos. Sci.* 2020, **4**, 13, doi: 10.3390/jcs4010013.
[15] V.R. Gharehbaghi i in., *Archiv. Comput. Methods Eng.* 2021, **29**, nr 4, 2209, doi.org/10.1007/s11831-021-09665-9.
[16] H. Rocha i in., *Eng. Struct.* 2021, **237**, 112231, doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112231.
[17] V. Cusati, S. Corcione, V. Memmolo, *Sensors* 2021, **21**, 6938, doi.org/10.3390/s21206938.
[18] V. Cusati, S. Corcione, V. Memmolo, *Sensors* 2022, **22**, 7316, doi.org/10.3390/s22197316.
[19] D.M.G. Preethichandra, T.G. Suntharavadivel, P. Kalutara, P.L. Piyathilaka, U. Izhar, *Sensors* (Basel) 2023, **23**, nr 19, 8279, doi: 10.3390/s23198279.
[20] K. Ranasinghe i in., *Prog. Aerosp. Sci.* 2022, **128**, 100758, doi.org/10.1016/j.paerosci.2021.100758.
[21] S. Khalid, J. Song, M.M. Azad, M.U. Elahi, J. Lee, S.-H. Jo, H.S. Kim, *Mathematics* 2023, **11**, 3837, https://doi.org/10.3390/math11183837.
[22] L. Yan, J. Rodriguez, K. Billon i in., *J. Intel. Mater. Syst. Struct.* 2023, **34**, nr 7, 825, doi:10.1177/1045389X221121902.
[23] J. Lewitowicz, K. Kustroń, *J. KONBiN* 2014, **30**, nr 2, 47, doi: 10.2478/jok-2014-0014.
[24] W. Tian, J.H. Hodgkin, *J. Appl. Polym. Sci.* 2010, **115**, nr 5, 2981, https://doi.org/10.1002/app.31394.
[25] K. Kustroń, *Polish Maritime Res.* 2015, **22**, nr 3, 75, doi:10.1515/pomr-2015-0059.
[26] K. Kustroń, [w:] *Structural health monitoring 2021. Enabling next-generation SHM for cyber-physical systems* (red. S. Farhangdoust, A. Guemes, F.-K. Chang), DEStech Publications, Inc. 2022, https://doi.org/10.12783/shm2021/36354.