

# Korozja wysokotemperaturowa w transporcie

**Agnieszka Włodarkiewicz, Krzysztof Rokosz**

Rozwój transportu samochodowego, kolejowego, morskiego jak i lotniczego jest jednym z ważniejszych wyzwań inżynierskich i logistycznych teraźniejszych czasów. Świat stając się "globalną wioską" wymusił rozwój głównie transportu lotniczego, ze względu na możliwość zwiększenia szybkości przewożenia ludzi oraz towarów na bardzo duże odległości, co w istotny sposób wpłynęło również na rozwój produkcji silników odrzutowych. Z tego względu korozja gazowa, która występuje w tych silnikach jest tematem nadal aktualnym zarówno dla przemysłu jak i nauki. W artykule omówiono między innymi zastosowanie silników odrzutowych w transporcie lądowym i powietrznym, materiały używane do ich produkcji, jak i mechanizmy korozji wysokotemperaturowej oraz metody jej zapobiegania.

**Słowa kluczowe:** silnik odrzutowy, turbiny gazowe, korozja wysokotemperaturowa

## Wstęp

Rozwój cywilizacyjny, który się obecnie obserwuje, wymusza modyfikację środków transportu zarówno osobowego jak i towarowego. W dwudziestym wieku transport odbywał się głównie za pomocą kolei, przewozów samochodowych oraz drogą morską. W chwili obecnej oprócz mocnej pozycji tych gałęzi transportu, które również ulegają ciągłemu rozwojowi, coraz bardziej istotną rolę odgrywa również transport lotniczy. Z tego względu wzmocniono badania nad silnikami odrzutowymi. Silniki te są obecnie najczęściej stosowane w samolotach i raketach, ale spotyka się je również w samochodach ponaddźwiękowych (Super Sonic Car) [6]. Jeden z takich samochodów został zaprezentowany na rysunku numer 1.



**Rys. 1.** Samochód ponaddźwiękowy Bloodhound SSC z silnikiem Eurojet EJ200 [6]

Obecnie pracuje się na świecie między innymi nad ponaddźwiękowym bezemisyjnym samolotem ZEHST (Zero Emission High Supersonic Transport), który miałby latać

z prędkością 5000 km/h (cztery razy szybszy od dźwięku) [7]. Planuje się, że najwcześniej wzbije się on w powietrze w 2020 roku. Ma być on następcą concorde'a, który jako jedyny jak dotąd, jako samolot ponaddźwiękowy przewoził ludzi w regularnych rejsach. Kolejnym pojazdem wykorzystującym silnik odrzutowy jest raketoplan SKYLON, który miałby dostarczać astronautów i towary (do piętnastu ton ładunku) na pokład Międzynarodowej Stacji Kosmicznej, krążącej ok. 400 kilometrów ponad Ziemią. Zarówno Brytyjska Agencja Kosmiczna (UKSA), jak i Europejska Agencja Kosmiczna (ESA) poinformowały, że pierwsze loty testowe SKYLON mają odbyć się już w 2020 roku, a jego wejście do użytku ma nastąpić 2 lata później. Oprócz agencji kosmicznych nad projektem pracują firmy z wielu krajów, takich jak Włochy, Wielka Brytania, Belgia, Francja [9, 10].



**Rys. 2.** Wizualizacja ponaddźwiękowego i bezemisyjnego samolotu ZEHST [7]

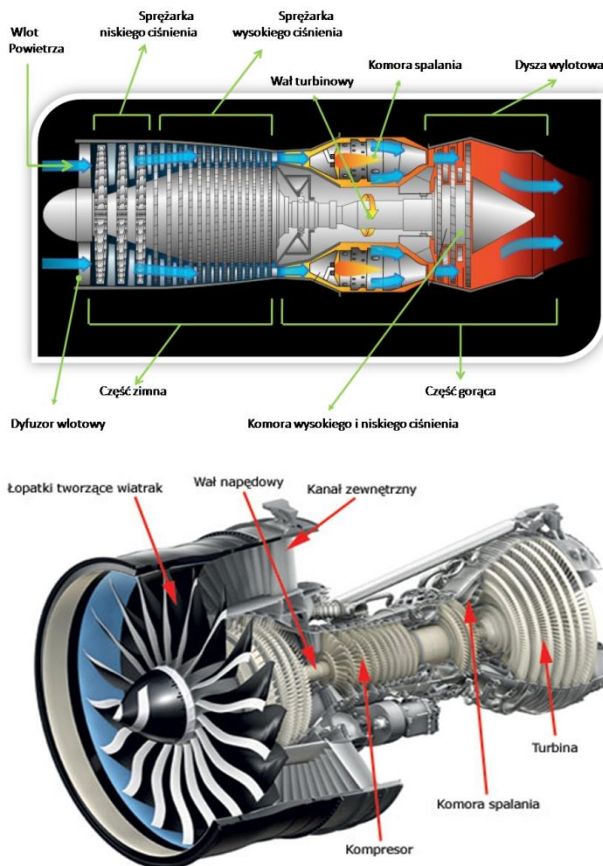


**Rys. 3.** Wizualizacja bezałogowego samolotu orbitalnego SKYLON [9, 10]

Jednym z wielu problemów, które muszą być pokonane przy konstruowaniu powyżej przedstawionych pojazdów (samoloty, samochody) z napędem odrzutowym jest korozja wysokotemperaturowa występująca w ich silnikach. Z tego względu, może to być jeden z kluczowych problemów związany bezpośrednio z ich bezawaryjnością [1].

## 1. Budowa i działanie silnika odrzutowego

Budowa silnika odrzutowego (turbiny gazowej) opiera się na kanale, w którym kolejno po sobie ułożone są sprężarka niskiego i wysokiego ciśnienia, komora lub komory spalania, turbina oraz dysza wylotowa (dyfuzor), co zaprezentowano na rysunku 4. Sprężarka zasysa powietrze z atmosfery i spręża je do 15-20 barów. Składa się ona z szeregu rzędów łopatek zamontowanych na wale, który jest połączony z turbiną główną. W komorach spalania następuje spalanie paliwa w obecności sprężonego powietrza. Powstałe w ten sposób gorące gazy wydostające się z komory spalania, które uzyskują wysoki poziom energii, wprowadzają w ruch turbinę, której zadaniem jest napędzanie sprężarki. Ostatnim elementem jest dysza wylotowa, która jest odpowiedzialna za zjawisko odrzutu wywołane gazami opuszczającymi silnik o temperaturze około 550°C [1, 2, 10].



Rys. 4. Budowa silnika odrzutowego [10]

Ze względu na rodzaj używanego utleniacza silniki odrzutowe można podzielić na: silniki raketowe (utleniacz niezbędny do

procesu spalania jest przewożony wraz z paliwem) i silniki odrzutowe przelotowe (utleniaczem jest zasysane z zewnątrz powietrze). Wśród silników odrzutowych przelotowych możemy jeszcze wyróżnić bezsprężarkowe (silnik strumieniowy, silnik pulsacyjny) i sprężarkowe (motorjet, silnik turboodrzutowy). Wśród silników turboodrzutowych można jeszcze wyróżnić silniki ze sprężarką odśrodkową, ze sprężarką osiową i silniki turboodrzutowe duwuprzepływowe (przypadek szczególnie do silnik turbowentylatorowy) [14].

## 2. Korozja wysokotemperaturowa

Zjawisko korozji wysokotemperaturowej (ang. high-temperature corrosion) jest odnotowywane dla temperatur wyższych lub równych 850°C. Dla rozróżnienia korozji gazowej (ang. hot corrosion) od wysokotemperaturowej należy podać, że zachodzi ona w zakresie temperatur od 670°C do 750°C. Warto jednak zaznaczyć, że zakresy temperatur są umowne i w znacznym stopniu zależą od składu stopu.

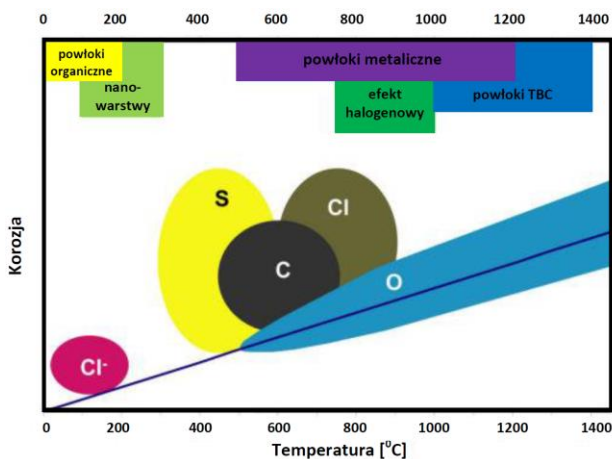
W czasie pracy silnika odrzutowego temperatura wewnątrz komory spalania przekracza 2700°C przy ciśnieniu 6-12 MPa. Głowica cylindra oraz niektóre miejsca tłoka rozgrzewają się do 350°C, natomiast zawór wylotowy osiąga temperaturę rzędu 900°C. Ze względu na powyżej przedstawione temperatury pracy elementów silnika odrzutowego, należy uznać je za najbardziej narażone na korozję wysokotemperaturową [1, 2, 3, 10].

Oprócz temperatury o korozji decyduje również atmosfera gazów powstających ze spalania ropy lotniczej zwanej również kerozyną (Jet A). Na podstawie kart charakterystyk wiodących firma rafineryjnych, takich jak PKN Orlen, Total Polska, Grupa LOTOS S.A., SWISH POLSKA Sp. z o.o., jej skład w uproszczeniu odpowiada szeregowi homologicznemu alkenów ( $C_nH_{2n}$ ). Przy założeniu, że paliwo ulega pełnemu utlenieniu można przyjąć, że dla jednej cząsteczki zastępczej o "n" atomach węgla powstaje "n" cząsteczek dwutlenku węgla i taka sama ilość, czyli "n" cząsteczek, pary wodnej, która będzie kondensować. Para wodna kondensuje tym szybciej, im niższa jest temperatura otoczenia i im większe jest nasycenie nią środowiska, w którym zachodzi opisany proces. Przyjmując skład powietrza jako mieszaninę gazów: tlenu (21 % obj.) i azotu (78 % obj.) należy zauważyć, że na dziesięć cząsteczek tlenu przypada 37 cząsteczek azotu. Z tego wynika, że do komory spalania silnika odrzutowego dostaje się duża ilość azotu, który może zaburzać proces spalania węglowodorów, a w konsekwencji rozcieńczać tlen azotem. Dodatkowo w przypadku obecności niewielkich ilości siarki w paliwie lotniczym w produktach spalania będą się pojawiać niewielkie ilości niedopalonych węglowodorów ( $H_nC_m$ ), sadzy (C), tlenku węgla (CO), tlenku i dwutlenku siarki (SO oraz  $SO_2$ ) i tlenków azotu (NO oraz  $NO_2$ ). Należy jednak pamiętać, że proces całkowitego spalania jest jedynie założeniem, a w praktyce zachodzi również proces niekompletnego spalania paliwa.

Korozja wysokotemperaturowa rozpoczyna się od kondensacji stopionych soli metali alkalicznych na powierzchni korodowanego elementu. W silnikach odrzutowych zjawisko korozji wysokotemperaturowej ulega przyspieszeniu ze względu na obecność zanieczyszczeń stałych.  $Na_2SO_4$  stanowi główną przyczynę korozji silników odrzutowych.



Tworzy on mieszaniny eutektyczne z innymi substancjami. Przykładowo temperatura topnienia  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  wynosi  $884^\circ\text{C}$ , a po dodaniu  $\text{NaCl}$   $620^\circ\text{C}$ , co w efekcie obniża temperaturę zapoczątkowania procesu korozji wysokotemperaturowej. Głównie substancjami zanieczyszczającymi mogą być  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  i  $\text{NaCl}$  w postaci aerozolu,  $\text{V}_2\text{O}_5$  (zanieczyszczenia z paliwa). Dodatkowo można wyróżnić przemysłowe zanieczyszczenia atmosfery i okresowo występujące pyły wulkaniczne zawierające szereg związków fosforu, krzemu, ołowiu i inne [3, 5].

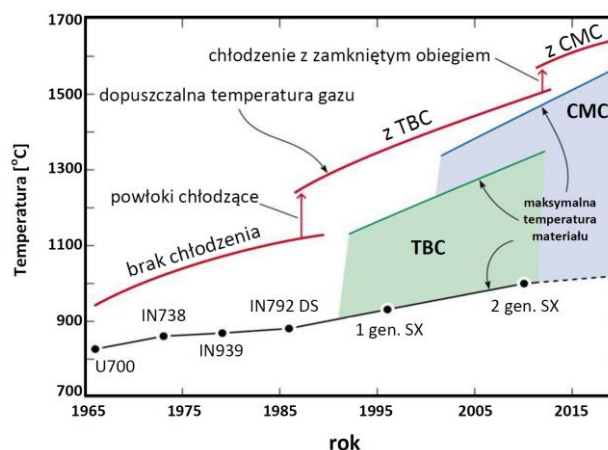


**Rys. 5.** Metody zapobiegania korozji zachodzącej przy różnych zakresach temperatur i w różnych środowiskach [13]

W przypadku stopów zawierających chrom w pierwszym etapie koroduje wierzchnia warstwa tlenków, co jest obserwowane do momentu wyczerpania chromu, wraz z utratą którego utlenianie materiału gwałtownie przyspiesza. W wyniku tych reakcji powstaje zgorzelina (produkt korozji), która tworzy zwartą warstwę na powierzchni skorodowanego elementu. Warstwa ta powstaje na nagrzanej powierzchni w postaci powłoki lub łusek [4].

Do budowy komory spalania, łopatek w turbinie a także dyszy w silniku odrzutowym wykorzystuje się głównie nadstopy o wysokiej żaroodporności. Materiały te charakteryzują się również wytrzymałością na pełzanie (powolna zmiana kształtu wskutek działania długotrwałych, mniejszych od granicy sprężystości materiału obciążeń) w wysokich temperaturach. W składzie nadstopów znajdują się takie metale jak: wolfram, molibden, niob, tantal, żelazo, nikiel, kobalt. Superstopy uzyskują swoją wytrzymałość wysokotemperaturową między innymi dzięki procesowi TBC (Thermal Barrier Coating). Proces ten polega na utlenieniu warstwy powierzchniowej. Efekty uzyskane w ten sposób są wynikiem zastosowania w stopie dodatku aluminium lub chromu. Dzięki tym zabiegom materiał jest w stanie wytrzymać temperaturę nawet o  $200^\circ\text{C}$  większą niż jego nominalna temperatura topnienia. Osiągnięcia te nie zaspokajają jednak oczekiwań wobec materiałów jakie są wykorzystywane przy produkcji silników odrzutowych. Ciągły rozwój wymusza zapotrzebowanie na materiały o jeszcze większej wytrzymałości termicznej. Odpowiedzią na to zapotrzebowanie są prace zmierzające do opracowania elementów turbin z materiałów ceramicznych, które zdecydowanie podniosą maksymalne temperatury użytkowania. Badania koncentrują się na

przygotowaniu odpowiedniej kompozytowej osnowy ceramicznej CMC (Ceramic Matrix Composites) wzmocnionej włóknami. Najbardziej obiecujące obiekty CMC są oparte na tkaninach włókien aluminiowych zawartych w matrycach z tlenku glinu lub z SiC pokrytych azotkiem boru [7]. Na rysunku 6 przedstawione zostały zmiany temperatury gazu dostającego się do turbiny (z komory spalania) jakie zaszły w wyniku pracy nad nowymi metodami zabezpieczającymi turbinę. Jak widać możliwości temperaturowe materiałów znacznie się poprawiają wraz z pojawianiem się nowych metod wykorzystywanych do ochrony elementów narażonych na korozję wysokotemperaturową [12].



**Rys. 6.** Evolucja dopuszczalnej temperatury gazu na wejściu do turbiny gazowej na tle rozwoju metod jej ochrony [12]

Wysokie wymogi techniczno-technologiczne zmuszają konstruktorów do stosowania ogromnego nadmiaru powietrza ponad ilość wymaganą do kompletnego utlenienia składników zawartych w paliwie, a dodatkowo surowe kryteria ekonomiczne narzucają wymóg minimalizacji zużycia paliwa i kompletnego spalania. Spaliny u wylotu z dyszy napędu lotniczego są już wymieszane z powietrzem chłodzącym, a następnie ulegają dalszemu rozcieńczeniu powietrzem chłodnego strumienia przyspieszonego pracą turbowentylatora. To wszystko powoduje, że silniki odrzutowe mają stosunkowo małą emisję zanieczyszczeń, a ich stosowanie jest wysoce korzystne z punktu widzenia ochrony środowiska.

## Podsumowanie

Eksplatacyjne możliwości materiałów konwencjonalnych zostały już wyczerpane. Jak widać przemysł oczekuje materiałów o lepszych właściwościach fizycznych, które będą nadawały się do pracy w wyższych temperaturach i środowiskach mniej przyjaznych. Znajomość mechanizmu korozji wysokotemperaturowej daje możliwość tworzenia nowych materiałów, które będą na nią bardziej odporne, a tym samym odpowiedzą na zapotrzebowanie rynku. W efekcie turbiny gazowe staną się mniej awaryjne, a samoloty tańsze w eksploatacji, co za tym idzie transport lotniczy znacznie obniży swoje koszty. Wszystkie te działania prowadzące do unowocześnienia silników turbinowych (minimalizacja zużycia paliwa, zwiększanie trwałości podzespołów,

odpowiednie systemy diagnozowania) są, nie tylko działaniami o charakterze ekonomicznym, ale również działaniami proekologicznymi. Prowadzą one do ograniczenia emisji hałasu i szkodliwych składników spalin oraz wydłużają żywotność projektowanych silników. W obecnych czasach bardzo ważne jest minimalizowanie energii potrzebnej do wytworzenia, eksploatacji, a potem utylizacji każdego urządzenia. Kryteria oceny opłacalności wszelkich urządzeń technicznych to nie tylko poniesione koszty produkcji i ewentualne oszczędności użytkowania, ale również stopień obciążenia środowiska naturalnego (np. ilość wytwarzanego dwutlenku węgla od momentu rozpoczęcia produkcji, aż po proces utylizacji). Rozpatrując silniki odrzutowe w takich kategoriach nie da się ukryć, że wypadają one bardzo korzystnie w stosunku do silników stosowanych na przykład w samochodach.

## Bibliografia

1. Kosieniak E., Biesiada K., Kaczorowski J., Innocenti M.: *Corrosion in Gas Turbine Hot Components*, Journal of Failure Analysis and Prevention, 2012, s. 330-337.
2. Conde J. F. G., Erdors E., Rahmel A.: Mechanism of hot corrosion. In: *Proceeding of High Temperature Alloys for Gas Turbines*, 1982, s. 99-111.
3. DeCrescente M. A., Bornstein N. S.: Formation and Reactivity Thermodynamics of Sodium Sulfate with Gas Turbine Alloys, *Corrosion* 24, 1968, s. 127-133.
4. Eliaz N., Shemesh G., Latanision R. M.,: Hot Corrosion in gas turbine components, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 9, 2002, s. 31-43.
5. Drexler J. M., Gledhill A. D., Shinoda K., Vasiliev A. L., Reddy K. M., Sampath S., Padture N. P.: Jet engine coatings for resisting volcanic ash damage, *Advanced Materials*, Vol. 23, 2011, s. 2419-2424.
6. [www.autogen.pl/news-3878-bloodhound-ssc-trzysta-dni.html](http://www.autogen.pl/news-3878-bloodhound-ssc-trzysta-dni.html) [dostęp: 20.03.2017]
7. [ec.europa.eu/research/innovation-union/ic2014/index\\_en.cfm?pg=showcase10](http://ec.europa.eu/research/innovation-union/ic2014/index_en.cfm?pg=showcase10) [dostęp: 20.03.2017]
8. [www.airbusgroup.com/int/en/news-media/media-item=jcr%3AAbdb8fd6c-acf6-41fa-adc3-f049cd70d458~.html](http://www.airbusgroup.com/int/en/news-media/media-item=jcr%3AAbdb8fd6c-acf6-41fa-adc3-f049cd70d458~.html) [dostęp: 20.03.2017]
9. [www.geekweek.pl/aktualnosci/29455/skylon-odmieni-europejski-przemysl-kosmiczny](http://www.geekweek.pl/aktualnosci/29455/skylon-odmieni-europejski-przemysl-kosmiczny) [dostęp: 20.03.2017]
10. [www.pinterest.com/planecrazy2152/skylon-space-plane](http://www.pinterest.com/planecrazy2152/skylon-space-plane)
11. [silniki.blogspot.co.at](http://silniki.blogspot.co.at) [dostęp: 15.03.2017]
12. [www.virginia.edu/ms/research/wadley/high-temp.html](http://www.virginia.edu/ms/research/wadley/high-temp.html) [dostęp: 15.03.2017]
13. [efcweb.org/ppf.html](http://efcweb.org/ppf.html)
14. [silnikiodrzutowe.blogspot.com/p/rodzaje-silnikow-odrzutowych.html](http://silnikiodrzutowe.blogspot.com/p/rodzaje-silnikow-odrzutowych.html) [dostęp: 15.03.2017]

## Autorzy:

**Agnieszka Włodarkiewicz** - Akademia Pomorska w Słupsku, ul. Arciszewskiego 22A, 76-200 Słupsk; Katedra Inżynierii Systemów Technicznych i Informatycznych, Politechnika Koszalińska, ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin, e-mail: [agnieszka.wlodarkiewicz@apsl.edu.pl](mailto:agnieszka.wlodarkiewicz@apsl.edu.pl)

**Krzysztof Rokosz** - Katedra Inżynierii Systemów Technicznych i Informatycznych, Politechnika Koszalińska, ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin, e-mail: [rokosz@tu.koszalin.pl](mailto:rokosz@tu.koszalin.pl)

## High-temperature corrosion in transport

*The development of car, rail, maritime and air transport are among the most important engineering and logistical challenges of modern times. The world's "global village" reality is accelerating the development of mainly air transport in the pursuit of developing high speed transfer of people and goods over very long distances, and this in turn has significantly contributed to the development of jet engines. Therefore, the gas corrosion that occurs in jet engines is a topic that is still relevant for both industry and science. In this paper, among other things, the use of jet engines in land and air transport, the materials used to produce them, as well as the mechanisms of high temperature corrosion and methods of preventing it, are discussed.*

**Key words:** jet engine, gas turbine, high-temperature corrosion