

Uszkodzenia eksploatacyjne lotniczych silników turbinowych (LST)

Operation-attributable failures to aircraft turbine engines

Streszczenie

W artykule autorzy zwrócili uwagę na najczęściej spotykane w procesie eksploatacji lotniczych silników turbinowych (LST) przyczyny inicjacji uszkodzeń elementów rur żarowych zasadniczej komory spalania i zespołów turbin. Zostały one zilustrowane licznymi przykładami stwierdzonej podczas wykonywania kontroli endoskopowej postępującej degradacji stanu powierzchni części i podzespołów różnego typu silników lotniczych. Omówiono na przykładzie wyników systematycznej obserwacji proces niszczenia powierzchni łopatek wieńca wirnika turbiny. Zwrócono uwagę na dotychczasowy i nadal obowiązujący sposób oceny przydatności LST do dalszej eksploatacji z uwzględnieniem specyfiki jego użytkowania.

Słowa kluczowe: turbinowy silnik lotniczy, wtrysk paliwa, zasadnicza komora spalania, zespół turbiny, dopalacz, proces niszczenia części i podzespołów

Abstract

The paper has been intended to draw attention to some causes of the initiation of failures to components of flame tubes of the combustion chamber and turbine units, ones most often occurring throughout the process of operating aircraft turbine engines. They have been illustrated with multiple examples of degradation of surfaces of structural components and/or subassemblies, usually found during visual inspections of various types of aircraft engines. With results of systematic observations applied, the process of destruction of surfaces of blades in the turbine rotor blading has been discussed. Attention has also been paid to the way of evaluating the suitability of a given engine for further operation, the method that has hitherto been used and remains in force all the time.

Keywords: aircraft turbine engine, fuel injection, combustion chamber (combustor), turbine unit, afterburner, degradation of structural components and (sub)assemblies

Wstęp

W wojskowych, wysoko manewrowych statkach powietrznych lotnicze silniki turbinowe (LST) są eksploatowane w warunkach częstych zmian obciążeń dynamicznych i cieplnych.

Do szczególnie groźnych dla bezpieczeństwa lotów, stwierdzanych uszkodzeń w LST należą: pęknięcia zmęczeniowe wałów i tarcz nośnych wieńców zespołów wirników ich sprzężarek czy turbin, a zwłaszcza

piór łopatek palisad kierownic czy wirników roboczych, jak i zespołów łożysk.

Uszkodzenia te mają duży wpływ na poziom niezawodności LST, gdyż nie tylko skracają resurs międzyremontowy, ale również zagrażają bezpieczeństwu wykonywanych zadań.

Badania wizualne powierzchni elementów tworzących przestrzenie wewnętrzne maszyn i urządzeń przemysłowych, a zwłaszcza LST z zastosowaniem specjalistycznych sond penetrujących stały się obecnie jedną z podstawowych metod diagnostyki technicznej.

dr inż. Andrzej Szczepankowski, dr inż. Janusz Szymczak – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: assz@op.pl

Doprowadziły do tego trudności w rozpoznawaniu uszkodzeń w ich części przepływowej na podstawie zmian wartości mierzonych i rejestrowanych parametrów termodynamicznych. Było to i jest związane z uzyskaniem właściwej interpretacji symptomów powstających defektów, gdyż te są często identyfikowane jako objawy nieuniknionych i ciągłych procesów ich zużywania się w okresie ich przewidywanej eksploatacji. Gdy już samo to, że mogą być one w takich stanach zbieżne i przez to trudne do jednoznacznego określenia stanowi istotną trudność w interpretacji uzyskiwanych wyników.

W takich wypadkach mogą się okazać pomocne badania nieniszczące, a ściślej endoskopia, ponieważ ta nie wymaga demontażu badanego obiektu na podzespoły i części składowe, a stosowane oprzyrządowanie nie oddziałuje na badany obiekt. Uzyskane w ten sposób wyniki umożliwiają wczesne zlokalizowanie ognisk uszkodzeń, a następnie okresową obserwację postępującej degradacji elementów. Gdyż takie uszkodzenia, jak: pęknięcia zmęczeniowe, odkształcenia mechaniczne i cieplne, przegrzania i przepalenia czy korozja chemiczna i/lub wysokotemperaturowa oraz erozja mechaniczna i gazowa są głównymi przyczynami przedwczesnego wyprowadzania maszyn (LST) z eksploatacji, co przy ich nie wykryciu w odpowiednim okresie czasu może stanowić zagrożenie dla ich użytkowników. I to zapewne zaważyło na tym, że stała się ona jedną z podstawowych metod badań nieniszczących, jakie znalazły zastosowanie w transporcie lotniczym.

Wieloletni udział w badaniach metodą wizualną (endoskopową) i związana z nimi analiza stanu technicznego podzespołów LST umożliwia autorom dokonanie pewnych uogólnień, w tym dotyczących inicjacji ich uszkodzeń.

Przyczyny uszkodzeń

Do zapłonu mieszanki paliwowo-powietrznej dochodzi skutek oddziaływania na nią zewnętrznego źródła wysokiej temperatury. Iskry świecy zapłonowej lub wytworzonej w komorze zapłonika żagwi płomienia rozruchowego. A, więc inicjatora lokalnego płomienia rozruchowego i to już na tyle podgrzewającego mieszankę, że zaczyna się w niej rozwijać egzotermiczna reakcja utleniania (spalania). I, jeżeli wydzielane przy tym ciepło wystarcza do podgrzania stale dopływającej mieszanki do temperatury przekraczającej wartość jej zapłonu, to proces ten zaczyna przebiegać samorzutnie, a źródło płomienia rozruchowego jest automatycznie odłączane.

Stanowi to jednak tylko zakończenie wstępnego etapu rozruchu LST, ponieważ później należy zapewnić mu podtrzymanie już zainicjowanego procesu spalania. Wymaga to jednak, między innymi: wstępnego ogrzania powietrza i paliwa, doprowadzenia

do zasadniczej komory spalania niezbędnej ilości utleniacza, prawidłowego rozpylenia paliwa i to tak, aby zwiększyć jego powierzchnię parowania i kontakt z zawartym w powietrzu tlenem, szybkiego i dokładnego mieszania się par paliwa z utleniaczem, jak i intensywnego mieszania się czynnika w płomieniu poprzez turbulizację i zawirowanie, utrzymania w całej strefie spalania odpowiedniego i jednakowego współczynnika nadmiaru powietrza oraz zastosowania stabilizatorów zapłonu, a w tym na przykład komór wstępnych (zapłonników rozruchowych) czy zawirowywaczy [1÷5].

Jednakże wskutek mogących zaistnieć zaburzeń w napływie do komory spalania strumienia powietrza z za sprężarki czy pulsacji ciśnienia doprowadzanego do niej paliwa, może dochodzić w strefie mieszania do lokalnego, nadmiernego wzbogacenia mieszanki.

Wielkość wprowadzanych w przestrzeń rury żarowej komory kropel paliwa jest wprost proporcjonalna do natężenia przepływu przez dyszę, a w tym do pola jej przekroju poprzecznego i odwrotnie proporcjonalna do pierwiastka trzeciego stopnia różnicy ciśnienia paliwa znajdującego się w przewodzie rurowym przed wtryskiwaczem i ciśnienia w rurze żarowej dla każdego typu wtryskiwacza. Wynika stąd, że im większe będzie natężenie masowe przepływu, a zatem i bezwzględnie większe wymiary wypływającej strugi tym trudniej ulega ona deformacji pod wpływem sił bezwładności, lepkości i wywołujących pulsacje ciśnienia oporów przepływu przez dyszę.

Sprzyja to powstawaniu w komorze obszarów o nadmiernie wysokiej temperaturze, jak i wydzielaniu się produktów niepełnego spalania [1÷5]. Tym bardziej, że paliwo lotnicze, charakteryzujące się dużą zawartością procentową żywic i aromatów (do około 28%), staje się, w przypadku niepełnego spalania, źródłem wydzielania się drobnokrystalicznej odmiany grafitu (sadzy) i koksu.

Podczas tworzenia się i spalania mieszanki może również dochodzić do procesu rozszczepiania się wielkich cząstek węglowodorów na te o mniejszej liczbie atomów węgla (krakowania węglowodorów) i obecności towarzyszących temu procesowi nie do końca spalonych cząstek w postaci żywic, koksu i popiołu (nagaru).

Sprzyja temu też podwyższona zawartość siarki w paliwie, a to, że powstający wtedy produkt cechuje się zwiększoną twardością powoduje, że odrywanie się od na przykład elementów zespołów wtryskiwaczy nawet niezbyt dużych jego fragmentów, a następnie unoszenie ich przez przepływające strugi spalin nie tylko staje się źródłem stopniowej erozji, a następnie korozji powierzchni elementów rury ogniowej zasadniczej komory spalania, ale i zespołu turbiny LST.

Kolejnym źródłem uszkodzeń mogą być zbyt intensywne zawirowania w strefach mieszania i spalania, gdyż te nie tylko przyczyniają się do powiększenia się strat przepływu, ale i do zwiększenia się masy odkładanego na powierzchniach ścian nagaru, a ten z kolei

do nierównomiernego rozkładu temperatury i związanego z tym niebezpieczeństwa lokalnych przegrzań powierzchni czy wypaleń materiału. Natomiast osadzenie się tego produktu na powierzchni czołowej wtryskacza nie tylko powoduje zmianę warunków jego pracy w postaci zmiany kąta rozpylania i gradacji rozpylanych kropeł paliwa, ale może również doprowadzić do jego trwałego uszkodzenia.

Może również temu towarzyszyć wywołujące niestacjonarny rozkład pola temperatury wydłużanie się strefy spalania, jak i dopalanie się par czy wręcz kropeł paliwa w przestrzeni zespołu turbiny. Doprowadzając przez to do między innymi wypalania się uszczelnień i przegrzewania jej podzespołów, przy braku wyraźnych symptomów przekraczania warunków technicznych eksploatacji, ponieważ stała czasowa tego zjawiska jest wielokrotnie mniejsza niż stała czasowa klasycznego układu do pomiaru temperatury [1÷5].

Strefowe wypalenia powierzchni, pęknięcia i ubytki materiału, jak i inne defekty stwierdza się w każdym rodzaju LST i to niezależnie od tego czy do rozplamienia się w nich mieszanki dochodzi od wytworzonego w zapłonniku płomienia rozruchowego czy od iskry świecy zapłonowej.

Podobne w skutkach uszkodzenia może również spowodować nieprawidłowa praca wtryskiwacza paliwa wywołana jego nieszczelnością, rozkalibrowaniem dyszy czy innym uszkodzeniem mechanicznym, jak i jego niewspółosiowość względem zawirowywanca [1÷5].

Dochodzi też do uszkodzeń, których źródeł należałoby się doszukiwać w nieprawidłowej organizacji procesu spalania. Wówczas, gdy dochodzi do lokalnego, krótkotrwałego wydłużania się strefy spalania mieszanki i przemieszczania się jej w kierunku dalszych sekcji rury żarowej (ogniowej) doprowadzając, zwłaszcza podczas jego rozruchu, do dopalania się par paliwa w przestrzeni palisady kierownic i wirnika turbiny. A świadectwem tego w jak istotny sposób proces ten ulegał okresowemu zakłóceniu są stwierdzane w tych miejscach zmiany stanu powierzchni.

Może także do tego dochodzić skutek opóźnionej, w stosunku do chwili, kiedy rozpoczyna się wprowadzanie paliwa, inicjacji zapłonu po włączeniu się źródła wysokiej temperatury, co może z kolei wskazywać, na przykładowo uszkodzenia elektrod świec zapłonowych lub zbyt płytkie osadzenie ich w gniazdach mocowania. W tym czasie dochodzi jednak do wprowadzenia w przestrzeń rury ogniowej nadmiernej ilości niezapalnego paliwa i jeżeli już będzie tam to, które po wyłączeniu LST przedostało się w tę przestrzeń wskutek nieszczelności (niedomykania się) zaworów odcinających jego dopływ lub pozostało tam wskutek niecałkowitego otwierania się zaworów zlewowych (drenażowych) to może to doprowadzić po jego zapłonie do lokalnego, nadmiernego wydłużenia się strefy jego spalania aż po tylną część

rury ogniowej czy wręcz w przestrzeń zespołu turbiny. I jeżeli nawet jest to krótkotrwały proces to i tak po pewnym okresie czasu pracy dochodzi tam w tych warunkach do inicjacji, a następnie postępującego procesu degradacji stanu technicznego jej części czy podzespołów.

Nie zapobiegnie temu pobierane z przestrzeni sprężarki, mające wytwarzać odpowiednio ukształtowaną na zewnątrz barierę cieplną czy przepływające w ich wnętrzu powietrze chłodzące. Ponieważ obliczeniowa intensywność chłodzenia, a tym samym wymiana ciepła pomiędzy materiałem poszczególnego pióra łopatki a czynnikiem obniżającym jego temperaturę ma temu skutecznie przeciwdziałać, ale w przypadku, gdy proces ten przebiega w sposób prawidłowy. Ale nie wówczas, kiedy oddziałuje na elementy agresywny chemicznie czynnik o temperaturze znacznie przekraczającej wartość dopuszczalną.

Przykład

Podczas okresowego przeglądu stanu technicznego elementów przestrzeni wewnętrznej stwierdza się liczne uszkodzenia powierzchni piór w wieńcach łopatek wirników turbin jednostek napędowych wysokomanewrowych statków powietrznych. Mogą je powodować unoszone strugą przepływających spalin i uderzające w ich powierzchnie ciała obce, jak i rozwarstwiający się, i wykruszający się czy erozyjnie wymywany w strefach ich krawędzi natarcia (KN) i odparowywany z nich materiał warstwy ochronnej.

Podczas okresowego przeglądu stanu technicznego jednego z LST stwierdzono miejscowe ubytki warstwy wierzchniej KN dwóch, nienastępujących po sobie w wieńcu piór łopatek wirnika turbiny (rys. 1a1 i 1b1) [6]. Z uwagi na obowiązujące dla danego typu LST wymagania techniczne i postępującą degradację, zmniejszono horyzont czasowy pomiędzy kolejnymi kontrolami wizualnymi stanu technicznego diagnozowanego podzespołu z 50 do 25 ± 5 godzin czasu jego pracy. Nadzór nad stanem tych elementów rozpoczęto, gdy silnik ten już przepracował około 170 godzin i kontynuowano do chwili, kiedy wyczerpał łącznie około 90% przewidywanego rezerwu międzyremontowego.

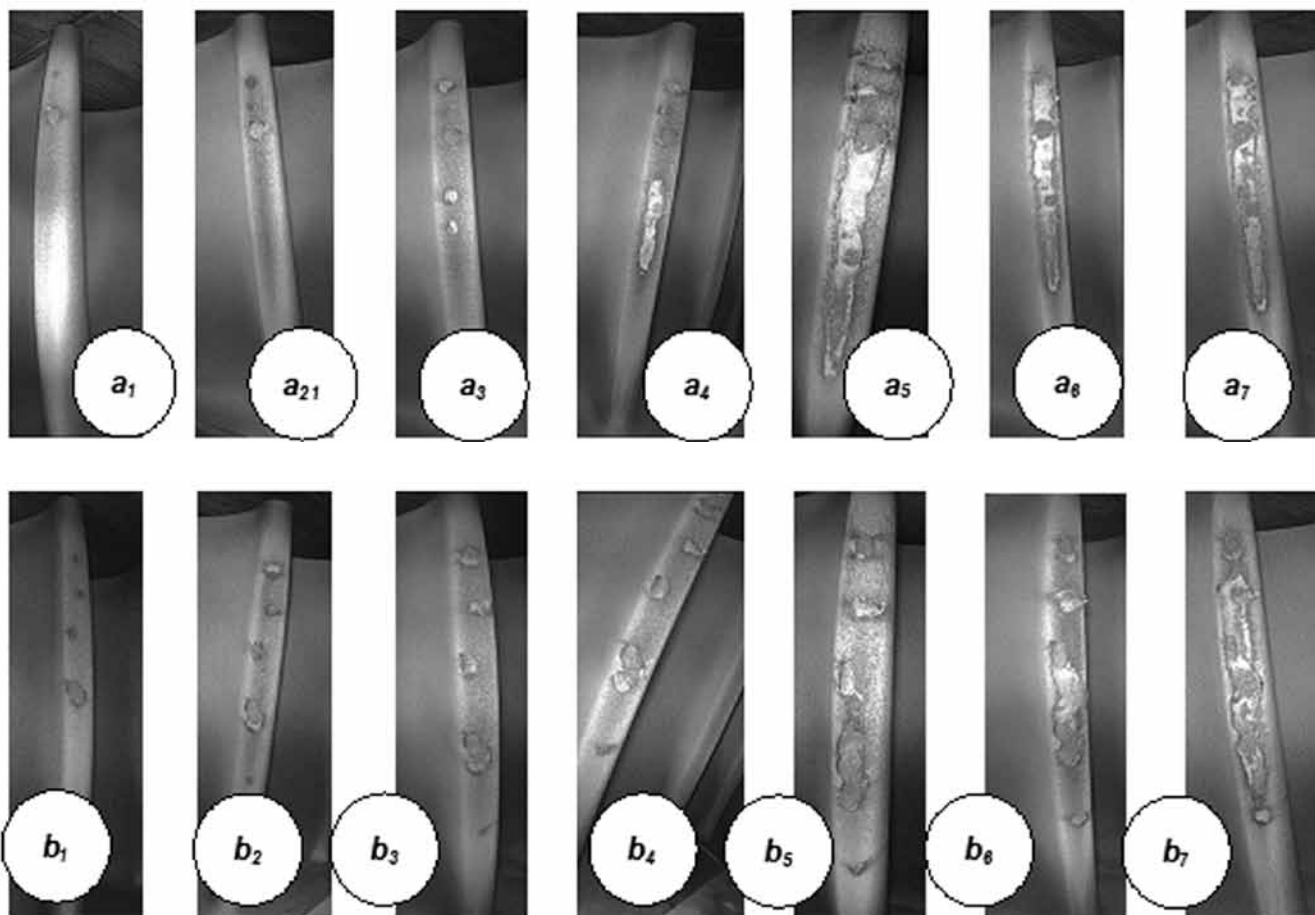
W wspomnianym okresie obserwowano w strefie ich KN stopniowo postępujący proces degradacji stanu technicznego i to nie tylko w postaci zwiększania się powierzchni uszkodzeń - wykruszania się, odparowywania i wymywania materiału warstwy izolacyjno-ochronnej (rys. 1a1÷a2 i 1b1÷b2), ale i materiału rodzimego (rys. 1a3÷1a7 i 1b3÷1b7) [6]. Natomiast w końcowym okresie pracy pod nadzorem stwierdzono również powstawanie wżerów (rys. 1a5÷a7 i 1b5÷b7) [6], co z kolei nie tylko już zaczęło zagrażać dalszym ubytkiem materiału rodzimego (i tworzeniem się „blizn”), ale jego perforacją i pęknięciami.

W chwili podejmowania decyzji, co do sposobu dalszej eksploatacji badany LST był uruchamiany 226, a w chwili jej zakończenia 382 razy. A, jak wynika z treści jego dokumentacji techniczno-ruchowej to podczas każdego, kolejnych 25 ± 5 godzin pracy był on uruchamiany od 21 do 24 razy.

Przystępując do okresowej analizy i oceny podzespołów diagnozowanego obiektu nie tylko bierze się pod uwagę jego zastany (bieżący) stan techniczny i odnosi się go do wcześniejszych, zarchiwizowanych zobrazowań, ale również się uwzględnia zarejestrowany i przechowywany przez komórki tak zwanej obiektywnej kontroli lotu użytkownika zapisy z przebiegu jego eksploatacji, a w tym rodzaj i czas wystąpienia zaistniałych podczas poszczególnych wylotów tego statku powietrznego, którego jednostkę napędową on stanowi, przekroczeń parametrów jej pracy. Rodzaj i zakres przeprowadzonych czynności obsługowych i stwierdzanych, ewentualnych jego usterek, a następnie sposób ich usunięcia. Ważną jest też sumaryczna liczba przepracowanych przez niego godzin od chwili wprowadzenia go do użytkowania, jak i po ostatnim remoncie głównym. I jest to jeden z tych czynników, który decyduje, jak dotychczas,

o dalszym użytkowaniu zużywającego się obiektu. Należałoby jednak zadać sobie pytanie czy tylko godziny pracy? Przynajmniej w świetle stwierdzanych i zobrazowanych powyżej uszkodzeń. Tym bardziej, że również jest eksploatowany przez polskie lotnictwo wojskowe taki typ LST, w którym zapłon paliwa wprowadzanego w strefę jego komory dopalacza jest dokonywany przez rozplamioną w zasadniczej komorze spalania i przemieszczającą się wraz ze strumieniem gazów na i za jego zespoły turbin żagiew płonącego paliwa rozruchowego.

Czy ten sposób zapłonu nie sprzyja inicjacji zobrazowanych powyżej uszkodzeń i nie skraca żywotności części i podzespołów turbin? Tym bardziej, że podczas każdego, kolejnych 25 ± 5 godzin pracy układ ten był uruchamiany średnio od 50 do 60 razy (306 razy w okresie 143 godzin pracy pod nadzorem). Dlatego decydując o dalszym użytkowaniu LST należałoby, naszym zdaniem, nie tylko brać pod uwagę sumaryczną liczbę przepracowanych przez niego godzin, ale i powinna też o tym decydować liczba jego uruchomień (cykli pracy liczonych od chwili jego uruchomienia do wyłączenia), jak i liczba uruchomień jego układu dopalania.



Rys. 1. Łopatkę a i b stopnia wirnika turbiny LST. Postępująca degradacja stanu technicznego (a1+a7 i b1+b7) w strefie KN piór wieńca [6]
Fig. 1. The blades A and B of the turbine rotor LST. The progressive degradation of the technical condition (a1+a7 and b1+b7) are KN feather ring

Wnioski

W procesie eksploatacji wojskowych statków powietrznych zespoły turbin omawianego powyżej typu LST są co najmniej dwukrotnie narażone (w każdym cyklu lotnym) na bezpo-średnie oddziaływanie ekstremalnych temperatur spalin czy wręcz płomienia nie spalanej mieszanki paliwowo-powietrznej.

Po raz pierwszy podczas ich rozruchu i kolejny podczas włączania układu dopalania. A przecież podczas niektórych wylotów układ ten może być

(i jest) kilkakrotnie uruchamiany, co bez wątpienia ma bezpośredni wpływ na trwałość nadzorowanych elementów turbin (i długość resursu użytkowanego LST).

Dlatego kontrolę stanu technicznego podzespołów LST jest w stanie umożliwić systema-tyczna, endoskopowa penetracja przestrzeni wewnętrznej. A porównanie zastanego, bieżącego obrazu z poprzednim, zarchiwizowanym, ułatwia podjęcie diagnozy.

Literatura

- [1] Szczepankowski A., Szymczak J., Spychała J.: Operating Degradations Of Air Turbine Scoops Of Turbo - Engines. Solid State Phenomena, Vols. 147-147, doi: 10.4028/3-908454-04-2.524, Trans Tech Publications, Switzerland, Zurich 2009/Jan/06. (B-10 p.).
- [2] Szczepankowski A., Szymczak J., Bagiński A., Kułuszka A.: The diagnosing of turbines of turbomachinery with non-destructive method, IX Międzynarodowa Konferencja Diagnostyka Samolotów i Śmigłowców AIRDIAG'2011, 5-7.10., Warszawa 2011, materiały w: Safety and reliability systems - Journal of KONBiN nr 1(17) 2011.
- [3] Szczepankowski A., Szymczak J.: Identification of Operational Damages of Air-Turbine Engines Using Visual Diagnostics. VIII International Conference Mechatronic Systems And Materials - SM 2012, Białystok 2012.
- [4] Szczepankowski A., Szymczak J.: Identyfikacja uszkodzeń eksploatacyjnych lotniczych silników turbinowych z wykorzystaniem diagnostyki wizualnej (w:) Problemy badań i eksploatacji techniki lotniczej, T. VIII, Warszawa 2012.
- [5] Szczepankowski A., Szymczak J.: Identification of Operational Damages of Air-Turbine Engines Using Visual Diagnostics. Solid State Phenomena, Vols. 199, p. 33-42. doi:10.4028/3-908454-04-2.524, Trans Tech Publications, Switzerland, Zurich 2013.
- [6] Baza danych Zakładu Silników Lotniczych ITWL (niepubl.).

PLANY SPAWANIA - TEORIA I PRAKTYKA – JACEK SŁANIA

Cena

1 egzemplarz książki Jacka Ślania:
Plany spawania – teoria i praktyka wynosi:
80 zł (w tym 5% VAT)

**W celu zamówienia książki
w Redakcji należy wypełnić formularz
zamieszczony obok i przesłać go
w formie faksu, skanu lub listu na adres:**

REDAKCJA – Przegląd Spawalnictwa AW SIMP

ul. Świętokrzyska 14a, 00-050 Warszawa
tel.: 22 827 25 42, faks: 22 336 14 79
e-mail: redakcja@pspaw.pl

Wpłaty należy dokonać na rachunek bankowy:

Bank BPH S.A. Oddział w Warszawie
45 1060 0076 0000 3200 0043 1836

Zamawiam książkę *Plany spawania – teoria i praktyka*
w Redakcji Przegląd Spawalnictwa w liczbie egz.

Imię i nazwisko

Firma

Adres

NIP

Kontakt do osoby zamawiającej:

Oświadczam, że jestem podatnikiem VAT i upoważniam firmę do wystawienia faktury bez podpisu

Podpis