



Wstęp do analizy efektywności wybranych procesów nawęglania elementów lotniczych przekładni zębatych

Introduction to the effectiveness analysis of selected carburising processes of aviation gearbox components

mgr inż. A. MAŁASIŃSKI¹ prof. dr hab. inż. P. KULA², dr inż. R. PIETRASIK², mgr inż. S. PAWĘTA²

1- Pratt&Whitney Kalisz
2- Instytut Inżynierii
Materiałowej Politechniki
Łódzkiej



W KILKU SŁOWACH

Prężnie rozwijający się w ostatnich latach przemysł lotniczy w dużej mierze przyczynił się do rozwoju nowoczesnych technologii obróbki kół zębatych [3,4,6,8]. Powyższy rozwój wynika bezpośrednio z wymagań i oczekiwań klientów odnoszących się do potrzeb ciągłego rozwoju technologicznego silników lotniczych, który to z kolei wynika z: rozwoju (popularyzacji) przemysłu lotniczego, zwiększonych wymagań środowiskowych (strategia europa 2020, flight-path 2050 i icao), zwiększających się kosztów materiałów eksploatacyjnych (paliwa). W świetle powyższych wyzwań producenci elementów przekładni zębatych silników lotniczych bardzo często stają przed dylematem wyboru technologii obróbki cieplnej i cieplnochemicznej. Poniższe opracowanie przedstawia najważniejsze kryteria wyboru procesu nawęglania stali.

Wprowadzenie

W warunkach produkcyjnych części maszyn i urządzeń nieodzownymi elementami konstrukcyjnymi przekładni zębatych silników lotniczych są koła i wałki zębate. Ze względu na charakter pracy powyższych elementów (zużycie ściernie, duże naciski powierzchniowe, doraźne i cykliczne zginanie, zmianę wielkości obciążeń) zastosowany materiał musi odznaczać



SUMMARY

The rapid growth of the aviation industry observed in the recent years has largely contributed to the development of modern technologies for gear wheel treatment [3, 4, 6, 8]. The development has been a direct result of the customers' standards and expectations regarding the need for a continuous technological advancement of aircraft engines, which in turn stems from: the growth (popularisation) of the aviation industry, stricter environmental regulations (Europe 2020 strategy, Flightpath 2050, ICAO), and the increasing cost of consumables (fuel). With these challenges in mind, manufacturers of gearbox components used in aircraft engines are frequently faced with the difficult choice of selecting heat and thermochemical treatment technologies. The following study discusses the most important criteria for choosing a steel carburising process.

się wysoką udarnością, wytrzymałością doraźną i zmęczeniową, plastycznością i twardością powierzchni zębów.

Ze względu na seryjny, masowy i wieloasortymentowy charakter produkcji przemysłu lotniczego najczęściej stosowaną technologią obróbki cieplno-chemicznej jest technologia nawęglania i hartowanie stali niskowęglowej. W wyniku tej obróbki uzyskuje się w warstwie wierzchniej materiału strukturę martenzytyczną



o dużej twardości, odporności na ścieranie i naciski powierzchniowe. Bardziej ciągliwy rdzeń pozwala na przenoszenie obciążeń udarowych, zaś powstałe podczas hartowania naprężenia ściskające w warstwie wierzchniej powodują wysoką wytrzymałość stykową oraz na zginanie i skręcanie [2].

W aplikacjach przemysłowych stosowanych jest kilka technologii nawęglania stali:

- nawęglanie gazowe,
- nawęglanie próżniowe,
- nawęglanie jonowe i fluidalne,
- nawęglanie w kąpielach solnych, proszkach i pastach.

W przemyśle lotniczym najczęściej stosowanymi technologiami są:

- technologia klasycznego nawęglania z wykorzystaniem atmosfery wytworzonej z gazów opałowych,
- technologia nawęglania próżniowego.

W dobie rosnących wyzwań ekologicznych i ekonomicznych, obecni i nowopowstający producenci elementów przekładni zębatych silników lotniczych stają przed dylematem wyboru rodzaju obróbki cieplno-chemicznej jaką należy wdrażać, zatwierdzać i rozwijać. Wybór taki wymaga oczywiście indywidualnej analizy technicznej, organizacyjnej, ekonomicznej i ergonomicznej. Poniżej zostaną przedstawione i opisane kluczowe kryteria wyboru technologii obróbki cieplnochemicznej elementów przekładni zębatych silników lotniczych.

Kryteria wyboru obróbki cieplno-chemicznej

Wybór właściwej obróbki cieplno-chemicznej dla danego profilu produkcyjnego jest zależny od wielu czynników, do najważniejszych należy zaliczyć:

1. rodzaj materiału i geometria obrabianych części
2. wymagania konstrukcyjne (struktura i właściwości warstwy wierzchniej)
3. dostępność do mediów surowcowych/regulacja, monitorowanie procesów
4. aspekt ekologiczny
5. wielkość ekonomicznego wsadu
6. stopień automatyzacji i robotyzacji procesów produkcyjnych
7. aspekt ekonomiczny

Ad 1. Rodzaj materiału

Najważniejszym aspektem przy wyborze technologii nawęglania jest gatunek stali i geometria obrabianych cieplnie detali. Kształt i wymiary nawęglanych detali, a przede wszystkim hartowność zastosowanej stali wymusza na wykonawcy zapewnienie odpowiedniego stężenia powierzchniowego węgla w warstwie nawęglanej przy jednoczesnym właściwym dla zastosowania części, rozkładzie stężenia węgla w całym przekroju warstwy nawęglanej. Powyższe wymagania wymuszają na producencie części zapewnienie odpowiedniej temperatury procesu, potencjału węglowego i natężenia przepływu atmosfery obróbczej. W mniejszym stopniu rodzaj zastosowanej stali i geometria obrabianych detali warunkuje wybór rodzaju zastosowanej atmosfery nawęglającej (w zależności od zastosowanego rodzaju atmosfery i możliwości regulacji temperatury, uzyskuje się różne czasy nawęglania na tą samą grubość warstwy). Koła i wałki zębate obecnie produkowanych lotniczych przekładni zębatych wykonywane są z niskowęglowej stali do nawęglania, które ze względu na niską hartowność wymagają nawęglania gazowego oraz hartowania w oleju lub polimerach. Zastosowanie stali stopowych o większej hartowności otwiera możliwość zastosowania łagodniejszych ośrodków chłodzących tym samym umożliwia obróbkę cieplną złożonych części (bardziej wrażliwych na deformację).

Ad 2. Wymagania konstrukcyjne

Warunki odbioru jakościowego obróbki cieplno-chemicznej detali typu elementy lotniczej przekładni zębatej wynikają bezpośrednio z wymagań rysunków konstrukcyjnych poszczególnych elementów przekładni, odnoszące się do:

- rozkładu stężenia węgla w warstwie wierzchniej. Rozkład ten powinien zapewnić łagodny spadek stężenia od powierzchni do rdzenia, szczególnie w warstwie przejściowej. Ponadto ze względu na przeznaczenie części niedopuszczalne jest by stężenie powierzchniowe było niższe od stężenia podpowierzchniowego co skutkowałoby powstaniem niedopuszczalnych naprężeń rozciągających po procesie hartowania- obniżających wytrzymałość obrabianych kół.





- max ilości austenitu szczątkowego w warstwie nawęglonej na poziomie 10%. Austenit obniża twardość warstwy nawęglonej i może być przyczyną pęknięć szlifierskich,
- struktury rdzenia która powinna być niskowęglowym martenzytem bez wydzielen ferrytu,
- wielkości ziarna byłego austenitu, która nie powinna przekraczać nr 5,
- wydzielen węglików, które powinny być drobne, rozłożone równomiernie w warstwie nawęglonej. Niedopuszczalne są wydzielenia siatki węglików i grubych skoagulowanych węglików,
- grubości warstwy nawęglonej, która ze względu na charakter pracy kół zębatych (głównie ścieranie i średnie stałe obciążenie) mieści się w zakresie 0,5 - 1,1mm,
- twardości powierzchniowej warstwy nawęglonej na poziomie 60 - 62 HRC,
- twardości rdzenia w przedziale 35 - 45 HRC,
- min. poziom utlenienia warstwy wierzchniej,
- warunków geometrycznych w szczególności powierzchni nie podlegających obróbce mechanicznej po procesie obróbki cieplnej.

W świetle powyższych wymagań poza precyzją regulacji rozkładu węgla w warstwie wierzchniej, istotne są warunki hartowania po nawęglaniu w kontekście min. szybkości chłodzenia.

Ad 3. Dostępność do mediów surowcowych/ regulacja i monitorowanie procesów

Rodzaj atmosfery zależy przede wszystkim od rodzaju pieca jakim dysponujemy.

W odniesieniu do nawęglania gazowego do dyspozycji mamy :

- atmosferę endotermiczną, generatorową z gazów opałowych (gaz ziemny lub propan)
- atmosferę z ciekłych związków organicznych (metanol techniczny z octanem etylu).

Do nawęglania próżniowego stosuje się mieszaniny węglowodorów i wodoru [7].

Rodzaj stosowanej atmosfery wymaga odpowiedniej regulacji i kontroli kinetyki wzrostu warstwy nawęglanej. Wielkość tego parametru w przypadku nawęglania gazowego można regulować, monitorować i archiwizować.

Atmosfery z ciekłych związków organicznych mają ograniczone możliwości regulacji potencjału węglowego (w czasie procesu) przez co są rzadziej stosowane w technice lotniczej. Na-

tomiast w atmosferach do nawęglania próżniowego - kinetyka wzrostu warstwy nawęglanej symulowana jest przez precyzyjne programy eksperckie.

Ad 4. Aspekt ekologiczny

Wybór technologii nawęglania jest uwarunkowany również aspektami ekologicznymi, a w szczególności ilością i rodzajem gazów surowcowych jak również gazów poprocesowych emitowanych do atmosfery. W układzie klasycznego nawęglania gazowego ilość gazów surowcowych i w konsekwencji gazów poprocesowych jest kilkukrotnie większa niż w procesach nawęglania próżniowego.

Pamiętając, że nieodzownym procesem technologii nawęglania gazowego ale już i także nawęglania próżniowego jest hartowanie z wykorzystaniem oleju, który jest „wynoszony” przez zahartowane detale, co z kolei wymaga jego usuwania w urządzeniach myjących generujących powstanie uciążliwych dla środowiska odpadów.

Ad 5. Wielkość wsadu

Wielkość ekonomicznego wsadu jest niezmiernie istotnym czynnikiem decydującym o wyborze technologii nawęglania i pieca do jego realizacji. W przypadku wielkoseryjnej produkcji wielkość ekonomicznego wsadu jest na tyle duża że najlepszym rozwiązaniem jest nawęglanie ciągłe z wykorzystaniem pieca przepychowego [5b]. Produkcja elementów lotniczej przekładni zębatej charakteryzuje się wielkoseryjną i wieloasortymentową produkcją, stąd też wielkość ekonomicznego wsadu jest na poziomie 150-200kg i należy ją traktować jako produkcję średnioseryjną. Wstępna analiza efektywności procesów nawęglania wykazuje, że dla produkcji elementów przekładni lotniczych najlepszym rozwiązaniem, są piece komorowe wykorzystujące atmosferę z gazów opałowych (nawęglanie klasyczne) jak również piece próżniowe. Szczególnie pozytywne wyniki uzyskujemy w przypadku produkcji zapewniającej obciążenie dla 2 - 3 pieców ustawionych w układzie gniazd lub linii produkcyjnej. Przy poziomie produkcji zapewniającym obciążenie wyłącznie 1 pieca optymalnym rozwiązaniem jest zastosowanie pieca próżniowego lub pieca gazowego



wykorzystującego atmosferę wytworzoną z ciekłych związków organicznych (wykluczenie generatora endotermicznego) [5a].

Ad 6. Automatyzacja i robotyzacja procesu.

W procesach produkcyjnych elementów lotniczych przekładni zębatych bardzo ważnym aspektem jest stopień automatyzacji i robotyzacji procesu wytwórczego w tym również procesów obróbki cieplnej / cieplno- chemicznej. Zwiększenie stopnia automatyzacji i robotyzacji zapewnia zmniejszenie udziału człowieka w procesie wytwórczym dzięki czemu uzyskujemy poprawę jakości, zwiększenie powtarzalności wyników oraz skrócenie cyklu produkcyjnego. Za wysoki stopień automatyzacji i robotyzacji procesu obróbki cieplnej kół i wałków zębatych uznaje się proces wykorzystujący automatyczne nawęglanie, hartowanie, mycie, obróbkę podzerową i niskie odpuszczanie.

Ad7. Aspekt ekonomiczny

Kalkulację kosztów obróbki cieplnej / cieplno-chemicznej należy odnieść do poniższych pozycji kalkulacyjnych:

- materiały bezpośrednie,
- materiały / koszty pośrednio produkcyjne ,
- koszty specjalne (usługa obca, działalność badawczo- rozwojowa),
- koszty sprzedaży,
- straty na produkcji nie jakościowej,
- płace bezpośrednie,
- koszty wydziałowe,
- koszty ogólnozakładowe.

Wybór technologii obróbki cieplno- chemicznej uwarunkowany jest głównie wielkością kosztów materiałów bezpośrednich i pośrednio produkcyjnych zestawionych w tabeli 3.1. ale i także kosztem inwestycji w urządzenie podstawowe który to później odzwierciedla kwota amortyzacji.

Jednostką kalkulacyjną obróbki cieplno-chemicznej przemysłu lotniczego jest zazwyczaj kilogram lub sztuka. Jednostki te odnosi się do grup asortymentowych składających się z różnych elementów zbliżonych pod względem podobieństwa nagrzewania i wygrzewania (np. maksymalny przekrój, pole powierzchni nawęglanej, grubość warstwy nawęglanej) oraz związanych operacji technologicznych.

W dobie współczesnej techniki wybrane za-

danie produkcyjne można wykonać różnymi metodami, które realizuje się na urządzeniach produkcyjnych znacznie różniących się między sobą. Wybór ekonomiczny wariantu obróbki cieplnej / cieplno- chemicznej wymaga rozważań technologicznych, organizacyjnych i czysto ekonomicznych. Najczęściej wybór wariantu technologicznego wynika z zasady gospodarności - wybrany wariant zapewnia dany stopień realizacji celu przy minimalnych nakładach środków - zasada najmniejszego nakładu środków.

Grupa materiału	Nazwa materiału	Uwagi
Bezpośrednie - środki chłodzące	Środki do chłodzenia wsadu, środki do chłodzenia pieca (płaszcz, mieszarka)	Woda, olej, polimery, gazy
Bezpośrednie - ośrodki grzejne	Substancje ciekłe, proszki, atmosfery regulowane, sole	
Bezpośrednie - środki zabezpieczające powierzchnie wsadu	Powłoki galwaniczne (miedź), Pasty antydyfuzyjne	
Bezpośrednie - oprzyrządowanie technologiczne	Koszki, palety Koszki, wieszaki, kratownice	Odlewy Siatki i kształtowniki żaroodporne
Bezpośrednie - środki myjące, czyszczące	Roztwory środków myjących, Ścierniwo	Śrut, piasek cyrkonowy
Pośrednie - energia elektryczna	Energia grzejna Napęd mechanizmów transportujących, Mieszadła	Transport wsadu, Mieszarka atmosfery, Mieszarka środka chłodzącego
Pośrednie - paliwa	Gazy surowcowe, gazy grzejne	

Tabela 3.1. Wybrane pozycje kalkulacyjne

III. Podsumowanie

Niniejszy artykuł ma charakter wstępu do szczegółowej analizy, która jest obecnie prowadzona we współpracy firmy Prat&Whitney Kalisz oraz Instytutu Inżynierii Materiałowej Politechniki Łódzkiej w ramach realizacji doktoratu oraz projektu badawczego.

Staranne wyselekcjonowanie kryteriów poddanych analizie pozwoli porównać wiodące obecnie rozwiązania oraz wskazać dalszy kierunki wyboru technologii nawęglania i zmian w procesie produkcyjnym. Należy przy tym pamiętać że przy szczegółowej analizie i szerokiej grupie czynników ocena poszczególnych rozwiązań jest złożona i powoduje trudności w osiągnięciu konsensusu pomiędzy aspektami technologicznymi, ekonomicznymi oraz ekologicznymi.

IV Dyskusja wyników
 [1] Dawes C., Cooksey R. J.: Surface Treatment of Engineering Components. Metal Heat Treatment Conference, Birmingham, 1965, s.77.
 [2] Gawroński Z.: Technologiczna warstwa wierzchnia w kołach zębatych i mechanizmach krzywkowych, Monografia, Łódź, 2005, s. 75-78.
 [3] Gräfen W., Edenhofer B.: Acetylene Low-pressure Carburizing- a Novel and Superior Carburizing Technology. Heat Treatment of Metals. 4. 1999, s. 79-85.
 [4] Herring D. H., Houghton R. L.: The Influence of Process Variables on Vacuum Carburizing. Proc. Of the Sec. Intern. Conf. „Carburizing and Nitriding with atmospheres” Cleveland, 1995, s. 103-108.
 [5a] Małdziński Leszek, Kruszczyk Magda, Korecki Maciej. : „Analiza efektywności wybranych procesów nawęglania gazowego I nawęglania próżniowego”- materiały szkoleniowe „Nowoczesne trendy w obróbce cieplnej”- X Seminarium grupy Seco/Warwick, 14-15 wrzesień 2006, Hotel Bukowy Dworek k/Łagowa
 [5b] Moszczyński A.: „Nawęglanie gazowe” Wydawnictwa Naukowo- Techniczne 1983
 [6] Preisser F., Seemann W., Zenker R.: Vacuum Carburizing with High Pressure Gas Quenching - The Process. Proc. Of the 1st International Automotive Heat Treating Conference. Puerto Vallarta. Mexico 1998, s. 135-148.
 [7] Materiały promocyjne Seco/Warwick 1(15)2005 „Nawęglanie próżniowe Fi-nCarb®”, s. 1.