

WIELOWYPUSTOWE WKŁADKI HARTOWNICZE O ZARYSIE EWOLWENTOWYM – ZASTOSOWANIE I ZASADY KONSTRUOWANIA

Marek BEWZIUK¹

STRESZCZENIE

Bardzo istotnym problemem współczesnej obróbki cieplnej są odkształcenia części poddawanych tym procesom. Jednym ze sposobów zapobiegania deformacji elementów maszyn posiadających wewnętrzny wielowypust jest stosowanie specjalnego oprzyrządowania. W artykule przedstawiono zastosowanie, celowość wytwarzania oraz zasady konstruowania wkładek hartowniczych, pozwalających na takie ograniczenie odkształceń części, że zbędna jest ich dalsza (końcowa) obróbka.

1. POŁĄCZENIA WIELOWYPUSTOWE W SILNIKACH LOTNICZYCH

Podstawową funkcją połączenia wielowypustowego jest przeniesienie momentu obrotowego. W połączeniach takich naciski rozkładają się na większej powierzchni niż w połączeniach wpustowych czy klinowych, dlatego stosowane są w konstrukcjach, w których występują duże obciążenia zmienne lub udarowe. Silniki lotnicze należą do najbardziej wyężonych konstrukcji przemysłowych. Dlatego, z uwagi na dużą wytrzymałość statyczną i zmęczeniową, połączenia wielowypustowe o zarysach ewolwentowych znalazły największe zastosowanie właśnie w przemyśle lotniczym.

¹ mgr inż. Marek Bewziuk – Pratt & Whitney Kalisz

Wpusty o ewolwentowym kształcie boków posiadają taki sam zarys jak zęby kół zębatach (są niższe), dlatego wykonuje się je za pomocą tych samych metod i narzędzi. Kolejne zalety tych połączeń to: duża dokładność kształtu oraz dobre centrowanie. Znormalizowane połączenia wielowypustowe (PN-ISO 4145+A1:1999; ANSI B92.1-1970) przewidują cztery klasy dokładności wykonania: 4, 5, 6 i 7 oraz sześć pasowań: H/k; H/js; H/h; H/f; H/e; H/d. Połączenia wielowypustowe ewolwentowe w większości przypadków wykonuje się jako osiowanie na bokach zębów (PN-ISO 4145+A1:1999 przewiduje tylko taki rodzaj osiowania) [2]. W normach brytyjskich i amerykańskich występują także przypadki ustalenia na średnicy wierzchołkowej wałka i średnicy dna wrębów otworu, jednak obróbka wykańczająca powierzchni centrujących po obróbce cieplnej jest bardzo trudna. Dlatego w częściach, gdzie wymagane jest utwardzenie wielowypustu, celowe jest zastosowanie jednego z dwóch wariantów osiowania połączenia:

- na bokach zębów;
- na dodatkowych powierzchniach walcowych.

W przemyśle lotniczym, wszędzie tam, gdzie tylko jest to możliwe, stosuje się tzw. „wielowypusty pilotowane”. W tym przypadku połączenie przenosi moment obrotowy, a sąsiednie elementy prowadzące zapewniają współosiowość oraz przenoszą obciążenia poprzeczne. Ten typ konstrukcji pozwala na zwiększenie tolerancji wykonania uzębienia. Jeżeli konfiguracja części nie pozwala na wprowadzenie dodatkowych elementów prowadzących, funkcję centrowania zapewnia samo uzębienie wielowypustu. Wiąże się to jednak z koniecznością zmniejszenia tolerancji pasowania połączenia, czyli zwiększeniem klasy dokładności wykonania.

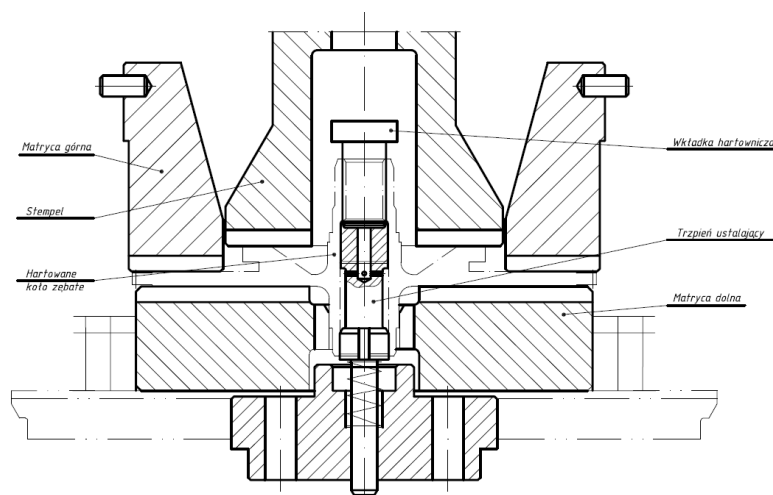
2. ODKSZTAŁCENIA HARTOWNICZE W CZĘŚCIACH PODDAWANYCH OBRÓBCE CIEPLNEJ

Koła zębate napędów lotniczych wytwarzane są zazwyczaj ze stali stopowej niskowęglowej do nawęglania, nazywanej często stalą do nawęglania o dużej wytrzymałości. Stale takie ze względu na dużą zawartość pierwiastków stopowych hartuje się w oleju, co pozwala zmniejszyć odkształcenia części o skomplikowanych kształtach podczas ich hartowania. Typowa obróbka takiej stali: nawęglanie, hartowanie i niskie odpuszczanie, pozwala uzyskać twardą warstwę powierzchniową i ciągliwy rdzeń. W jej wyniku uzyskuje się twardość powierzchni około 60 HRC, a rdzenia około 30 HRC.

Obróbka cieplna stanowi newralgiczną fazę procesu technologicznego kół zębatach. Z doświadczeń przemysłowych wiadomo, że podczas tej obróbki koła silnie się deformują, co następuje zarówno w operacji nawęglania, jak i hartowania.

Operacja nawęglania jest długotrwała i prowadzona w wysokiej temperaturze, dlatego w operacji tej powstają większe odkształcenia niż przy poprawnie przeprowadzonym hartowaniu [3]. Sposobem przeciwdziałania temu zjawisku jest odpowiednie układanie kół zębatach w piecu do nawęglania, nie zapobiega to jednak odkształceniom zarysu ewolwentowego uzębienia i wielowypustu, nasycanego powierzchniowo węglem. Odkształcenia powstające podczas hartowania są trudne do przewidzenia zarówno, co do wielkości jak i kierunku. Na pewno powodują obniżenie dokładności części maszyn, lub też zwiększają koszt produkcji wynikający z dodatkowej obróbki końcowej, o ile części mają być wykonane z większą dokładnością [2].

Dużą rodzinę produkcji komponentów w przemyśle lotniczym stanowią koła zębate, których cechą charakterystyczną jest nawęglany wewnętrzny wielowypust o zarysie ewolwentowym. Ponieważ z reguły wymiary wielowypustów w tego typu częściach są niewielkie, nie ma możliwości technologicznych szlifowania po operacjach obróbki cieplnej. W związku z tym wielowypust jest wykonany „na gotowo” przed hartowaniem. Koła zębate najczęściej hartowane są w specjalnych urządzeniach (prasach hartowniczych), gdzie studzenie odbywa się w przyrządzie pomiędzy matrycami. Przyrządy do hartowania (rys.1) zapewniają utrzymanie wymaganych wartości warunków kształtu: bicia średnicy podziałowej uzębienia i czół wieńca w stosunku do osi wzdłużnej koła oraz warunku płaskości, jednak nie zapobiegają odkształceniom wielowypustu. Stanowi to istotny problem technologiczny procesu wytwarzania kół zębatach i wiąże z potrzebą zastosowania dodatkowego oprzyrządowania specjalistycznego.



Rys. 1. Przyrząd do hartowania koła zębatego [opracowanie własne]

3. WKŁADKI HARTOWNICZE

3.1. Zastosowanie

Celem stosowania wkładek hartowniczych jest utrzymanie wymaganych konstrukcyjnie lub technologicznie tolerancji wymiarowych i kształtu otworów w częściach poddawanych obróbce cieplnej. Jeżeli hartowana część posiada otwór walcowy konstrukcja wkładek nie jest skomplikowana. Ważne jest, aby zapewniała przepływ ośrodka chłodzącego. W tym celu wykonuje się kilka wycięć na obwodzie części cylindrycznej wkładki. Szczególnym przypadkiem wkładki do hartowania jest wkładka wielowypustowa o zarysach ewolwentowych, która jest odwzorowaniem części współpracującej z hartowanym kołem zębatym. Przykład takiej wkładki ilustruje rys. 2.



Rys. 2. Przykład wielowypustowej wkładki hartowniczej [opracowanie własne]

Za potrzebą stosowania tego typu oprzyrządowania technologicznego w obróbce cieplnej przemawia porównanie przedstawionych na rys. 3 wyników pomiarów wielowypustu przykładowej części wykonanych: przed obróbką cieplną (a), po obróbce cieplnej – hartowanie swobodne (b) i po obróbce cieplnej – hartowanie z użyciem wkładki (c).

3.2. Zasady konstruowania

Analizę konstrukcji wielowypustowych wkładek hartowniczych przeprowadzono na przykładzie najbardziej typowego dla tej produkcji wielowypustu o zarysie ewolwentowym: module $m = 1,27$ i liczbie zębów $z = 12$. Jego parametry przedstawiono w tabeli 1. Koła zębate, dla których projektowano przykładową wkładkę hartowniczą wykonywane są ze stali AMS 6265. Jest to stal konstrukcyjna stopowa przeznaczona do nawęglania, której skład chemiczny jest następujący: C–0,08÷0,13%, Si–0,15÷0,35%, Mn–0,45÷0,65%, Cr–1,00 ÷ 1,40%, Mo–0,08÷0,15%, Ni–3,00÷3,50%, P–0,025% max, S–0,025% max.

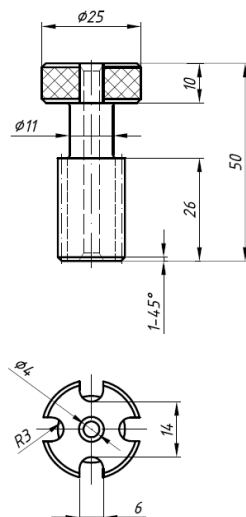
Obróbka cieplna kół zębatach wytwarzanych z tej stali przebiega następująco: nawęglanie w temperaturze 910÷930°C w czasie 240 minut, studzenie w powietrzu; hartowanie – wygrzewanie w temperaturze 820÷840°C w czasie 90 minut, studzenie w oleju; obróbka podzerowa w temperaturze –80 ÷ –90°C w czasie 120 minut; niskie odpuszczanie w temperaturze 150÷170°C w czasie 180 minut, studzenie w powietrzu. W przypadku, gdy koła zębate nie są wytwarzane z odkuwki, lecz z pręta proces technologiczny zawiera wstępną obróbkę cieplną własnościową – ulepszenie cieplne. Jeżeli zabieg studzenia, jak w omawianym przykładzie, nie jest prowadzony w atmosferze obojętnej, części w całości pokrywane są warstwą miedzi o niewielkiej grubości. Celem tego miedziowania jest zapobieganie powstawaniu odwęgleń warstwy nawęglonej i rdzenia, oraz utlenianiu się zewnętrznych powierzchni przedmiotu. Grubość warstwy miedzi (z reguły 5÷10 μm) ma istotne znaczenie dla rozpatrywanego zagadnienia.

Tabela 1. Parametry wielowypustu [opracowanie własne]

Lp.	Parametry wielowypustu		
1.	Liczba zębów	z	12
2.	Moduł	m	1,27
3.	Kąt zarysu	α	30°
4.	Średnica podziałowa	d_p	15,24
5.	Średnica wierzchołkowa	d_w	14,00
6.	Średnica stóp	d_s	17,7
7.	Średnica zasadnicza	d_z	13,198
8.	Średnica czynnego zarysu	d_{cz}	16,86
9.	Szerokość wrębu mierzona po cięciwie na d_p - efektywna	$S_{v\text{ ef.}}$	1,993÷2,059
10.	Szerokość wrębu mierzona po cięciwie na d_p - rzeczywista	$S_{rzecz.}$	2,025÷2,050

Konstrukcję tej wkładki przedstawiono na rys. 4 i tabeli 2. Materiał: stal narzędziowa stopowa do pracy na gorąco: WCL; twardość: 50÷55 HRC. Stal tą charakteryzuje bardzo dobra hartowność, duża odporność na odpuszczanie przy

wysokiej temperaturze, mała skłonność do powstawania powierzchniowej siatki pęknięć oraz niezbyt duża wrażliwość na gwałtowne zmiany temperatury.



Rys. 4. Rysunek wykonawczy wkładki hartowniczej [opracowanie własne]

Tabela 2. Parametry wielowypustu wkładki hartowniczej [opracowanie własne]

Lp.	Parametry wielowypustu		
1.	Liczba zębów	z	12
2.	Moduł	m	1,27
3.	Kąt zarysu	α	30°
4.	Średnica podziałowa	d_p	15,24
5.	Średnica wierzchołkowa	d_w	16,9 _{-0,02}
6.	Średnica stóp	d_s	12,04
7.	Średnica zasadnicza	d_z	13,198
8.	Średnica czynnego zarysu	d_{cz}	13,8
9.	Grubość zęba mierzona po cięciu na d_p	g	1,996 _{± 0,005}
10.	Wielkość pomiarowa mierzona przez wałki Ø 2,54	M_p	19,240 _{-0,015}

Kluczową rolę w tej konstrukcji odgrywa parametr grubości zęba wielowypustu. Przeprowadzono szeregi prób hartowania przy użyciu wkładek o różnej grubości zęba oraz części z wielowypustem o różnej szerokości wrębu.

Technologicznie zawężono tolerancję wykonania szerokości wrębu wielowypustu i prowadzono próby z użyciem części z wielowypustami wykonanymi w różnych częściach pola tolerancji całkowitej.

Najlepsze rezultaty uzyskuje się stosując wkładkę o grubości zęba zbliżonej do grubości zęba sprawdzianu przechodniego, służącego do kontroli minimalnej efektywnej szerokości wrębu, przy jednoczesnym wykonywaniu wielowypustu w górnej części pola tolerancji szerokości wrębu. Można to wytłumaczyć faktem, że podczas gwałtownego oziębienia przedmiot zaciska się na wkładce (świadczy o tym niemożność wysunięcia wkładki z hartowanej części; trzeba stosować do tego celu dodatkowe oprzyrządowanie do wyciskania wkładki). Jednakże powstały zacisk powoduje ułożenie się linii zębów wielowypustu dokładnie jak na wkładce. Analiza zagadnienia oraz opracowanie wyników prób pozwoliły na wyrażenie zależności grubości zęba wkładki hartowniczej (g_z) poniższym wzorem empirycznym:

$$g_z = s_{v \min} + 0,01 \cdot m - 2 \cdot w \quad [\text{opracowanie własne}]$$

gdzie: $s_{v \min}$ – minimalna efektywna szerokość wrębu wielowypustu hartowanej części,
 m – moduł nominalny,
 w – grubość warstwy pokrycia miedzią.

Takie zaprojektowanie procesu technologicznego koła zębatego wiąże się z koniecznością zwiększenia klasy dokładności wykonania wielowypustu przed obróbką cieplną (wykonanie w górnej części pola tolerancji). Uzyskane jednak w obróbce cieplnej efekty zdecydowanie przewyższają nakłady poniesione na zwiększenie dokładności operacji przeciągania lub dłutowania. Zastosowanie wkładek hartowniczych w ~90% przypadków pozwala na uzyskanie pozytywnych rezultatów, już podczas hartowania pierwszych sztuk części nowo uruchamianej produkcji (bez konieczności dokonywania zmian konstrukcyjnych w oprzyrządowaniu, czy modernizacji procesu technologicznego).

Pewnym problemem procesu studzenia jest zjawisko zaciskania się hartowanej części na wkładce, co z punktu widzenia zapewnienia tolerancji wymiarowych i kształtu, jest zjawiskiem korzystnym. Często usunięcie wkładki wymaga użycia dużej siły, dlatego wydział hartowni powinien być wyposażony prasę przeznaczoną do wyciskania wkładek. Problem ten powoduje także konieczność przewidzenia na etapie konstruowania możliwości usuwania wkładki z zahartowanej części. Jeżeli część posiada przelotowy otwór, wówczas wkładkę wyciska się poprzez ten otwór. W przypadku, gdy otwór w części jest nieprzelotowy, projektuje się wkładkę z przelotowym otworem i wyciskanie odbywa się przez ten otwór przy użyciu trzpienia, z podparciem części na specjalnej tulei.

4. PODSUMOWANIE

Analiza omawianego zagadnienia pozwala stwierdzić, że pomimo ogromnych zmian zachodzących we współczesnej produkcji (skrócenie cyklu

życia wyrobu, malejące koszty produkcji, krótki czas dostawy wyrobu na rynek) wiążących się ze znaczącym ograniczeniem stosowania oprzyrządowania, zupełne jego wyeliminowanie jest niemożliwe. Istnieją, bowiem obszary technologii maszyn, gdzie pomimo znaczącego postępu, np. w inżynierii materiałowej (materiały kompozytowe, tworzywa sztuczne, itp.), czy obróbce skrawaniem (HSC, MHM, obróbka kompletna) wytwarzanie oprzyrządowania specjalnego jest niezbędne z punktu widzenia zapewnienia prawidłowości procesu technologicznego [1]. Takimi właśnie obszarami są, między innymi, procesy obróbki cieplnej uzębionych elementów maszyn.

LITERATURA

- [1] *Bewziuk M.*: Analiza konstrukcyjno-technologiczna oprzyrządowania do obróbki cieplnej i galwanicznej, Praca dyplomowa. Politechnika Poznańska, Poznań, 2003.
- [2] *Ochęduszek K.*: Koła zębate. Wykonanie i montaż, WNT, Warszawa, 1976.
- [3] *Skoć A.; Spatek J.*: Podstawy konstrukcji maszyn, Tom 1, WNT, Warszawa, 2006.

SPLINED HARDENING INSERTS WITH INVOLUTE CONTOUR – THE USE AND DESIGN PRINCIPLES

ABSTRACT

An essential problem of modern heat treatment is deformations of parts subject to these processes. One of the ways to prevent deformation of machine elements with internal spline is the use of a special tooling. The article presents the use, usefulness and design principles of hardening inserts which help to limit parts deformations, so that their further (final) machining is unnecessary.