

Proces technologiczny wytwarzania wału z wykorzystaniem utwardzania cieplnego

Praca inżynierska została poświęcona opracowaniu procesu technologicznego wytwarzania wału z zastosowaniem obróbki cieplnej, której głównym zadaniem jest poprawa właściwości mechanicznych, trwałości i odporności eksploatacyjnej tego elementu. Wały odgrywają kluczową rolę w budowie maszyn, stanowiąc elementy odpowiedzialne za przenoszenie momentu obrotowego pomiędzy poszczególnymi podzespołami. Z uwagi na charakter swojej pracy podlegają one złożonym obciążeniom: skrętnym, zginającym, osiowym i zmiennym w czasie, a ponadto narażone są na tarcie, zużycie powierzchniowe i zmęczenie materiału. Uszkodzenia wałów w postaci pęknięć zmęczeniowych, deformacji czy zużycia ciernego prowadzą często do awarii całych układów napędowych, dlatego odpowiednia konstrukcja i technologia wytwarzania tego typu elementów jest zagadnieniem niezwykle istotnym z punktu widzenia inżynierii mechanicznej i praktyki przemysłowej.

Celem niniejszej pracy było opracowanie pełnego procesu technologicznego wytwarzania wału wraz z wykorzystaniem utwardzania cieplnego, począwszy od doboru odpowiedniego materiału i półfabrykatu, przez kolejne operacje obróbki skrawaniem, poprzez etap obróbki cieplnej, aż po obróbkę wykańczającą i kontrolę jakości. Istotnym założeniem było przygotowanie procesu, który mógłby zostać wdrożony w rzeczywistych warunkach przemysłowych, a opracowana dokumentacja technologiczna stanowiłaby podstawę do standaryzacji i powtarzalności produkcji.

W ramach pracy przeprowadzono analizę literaturową obejmującą charakterystykę wałów jako części maszyn, ich klasyfikację i typowe warunki pracy. Wskazano, że wały stosowane są zarówno w prostych mechanizmach, jak i w złożonych układach przeniesienia napędu, w tym w przekładniach, pompach, silnikach spalinowych czy turbinach. Ich konstrukcja musi spełniać wysokie wymagania w zakresie dokładności wymiarowej, jakości powierzchni oraz właściwości mechanicznych materiału. Przeanalizowano także problemy związane z eksploatacją wałów, takie jak powstawanie pęknięć zmęczeniowych w strefach karbów, zużycie ciernie czopów współpracujących z łożyskami oraz deformacje sprężysto-plastyczne wynikające z przeciążeń.

W dalszej części pracy omówiono metody wytwarzania wałów stosowane w praktyce przemysłowej. Wskazano na możliwości otrzymywania półfabrykatów w procesach odlewania,

kucia i walcowania oraz przedstawiono ich zalety i ograniczenia. Podkreślono, że odlewy cechują się dużą swobodą kształtowania, lecz mogą zawierać wady wewnętrzne w postaci porowatości czy pęcherzy gazowych. Kucie natomiast pozwala na uzyskanie półfabrykatów o wysokiej gęstości i korzystnej strukturze, co pozytywnie wpływa na właściwości mechaniczne. Walcowanie prętów i wałków jest z kolei metodą ekonomiczną i pozwala uzyskać wyrób o jednorodnej strukturze, stanowiący dogodny materiał wyjściowy dla dalszej obróbki. Szczególną uwagę zwrócono na technologie obróbki skrawaniem, które stanowią nieodzowny etap produkcji wałów, umożliwiające osiągnięcie wymaganej dokładności wymiarowej i jakości powierzchni. Toczenie, frezowanie czy szlifowanie umożliwiają uzyskanie tolerancji pasowań współpracujących z łożyskami i innymi elementami maszyn.

Bardzo istotną częścią przeglądu literaturowego było omówienie obróbki cieplnej, stanowiącej kluczowy etap w procesie nadawania stali pożądanych właściwości mechanicznych. Przedstawiono klasyczne metody hartowania w cieczach chłodzących, hartowania powierzchniowego, odpuszczania wysokiego i niskiego, a także wyżarzania normalizującego i ujednorodniającego. Omówiono mechanizmy przemian strukturalnych zachodzących w stali podczas nagrzewania i chłodzenia, wskazując na rolę dyfuzji węgla i powstawania struktur martenzytycznych. Podkreślono, że właściwy dobór parametrów cieplnych decyduje o ostatecznych właściwościach elementu – zbyt szybkie chłodzenie może powodować powstawanie naprężeń wewnętrznych i pęknięć, natomiast niewystarczająca intensywność chłodzenia skutkuje brakiem oczekiwanej twardości. Wskazano także na rozwój nowoczesnych technologii, takich jak hartowanie indukcyjne i laserowe, które pozwalają na selektywne utwardzanie wybranych powierzchni i znaczne skrócenie czasu procesu.

Na podstawie analizy materiałowej dokonano wyboru stali stopowej 42CrMo4 - 40HM, która charakteryzuje się podwyższoną zawartością chromu i molibdenu. Skład chemiczny tego stopu zapewnia dobrą hartowność, wysoką wytrzymałość na rozciąganie i ściskanie oraz znaczną odporność na obciążenia zmęczeniowe. Stal ta znajduje szerokie zastosowanie w produkcji części maszyn narażonych na duże obciążenia dynamiczne, takich jak wały, osie, elementy przekładni czy korbowody. Jako półfabrykat przyjęto walcowany pręt o średnicy 50 mm i długości 206 mm, co pozwoliło na przeprowadzenie obróbki z odpowiednimi nadaddatkami i uzyskanie wału zgodnego z wymaganiami konstrukcyjnymi.

W ramach pracy opracowano kompletny proces technologiczny, który rozpoczynał się od przygotowania półfabrykatu poprzez cięcie na wymiar i planowanie czół. Następnie przewidziano operacje toczenia zgrubnego w celu nadania wstępnej geometrii oraz toczenia

kształtującego pozwalającego na uzyskanie zarysu wału. W kolejnym etapie wykonano rowki wpustowe metodą frezowania, a następnie przeprowadzono obróbkę cieplną polegającą na hartowaniu w piecu elektrycznym i chłodzeniu w oleju hartowniczym, a także odpuszczaniu w temperaturze 220°C. Tak zaprojektowany proces cieplny pozwolił na uzyskanie twardej i odpornej warstwy powierzchniowej oraz plastycznego, wytrzymałego rdzenia, co stanowi optymalne połączenie właściwości dla wałów poddawanych obciążeniom zmiennym. Kolejne operacje obejmowały szlifowanie czopów wału do wymiarów tolerowanych $\varnothing 25$ k5 i $\varnothing 40$ k5, umożliwiające uzyskanie bardzo wysokiej jakości powierzchni o chropowatości Ra 0,4. Całość procesu zakończono kontrolą wymiarową i geometryczną, przeprowadzoną za pomocą mikrometru cyfrowego i suwmiarki, a wyniki zapisano w karcie pomiarowej.

Opracowana dokumentacja technologiczna obejmowała kartę półfabrykatu, kartę procesu technologicznego, instrukcje operacyjne dla poszczególnych operacji, zestawienie narzędzi i oprzyrządowania oraz kartę kontroli wymiarów. Dokumentacja ta została przygotowana zgodnie z wymaganiami stosowanymi w przemyśle maszynowym i stanowi kompletny wzorzec, który może być wykorzystany jako podstawa do wdrożenia procesu w warunkach produkcyjnych. Ważnym elementem były również obliczenia technologiczne obejmujące wyznaczenie parametrów skrawania, sił i mocy niezbędnych do realizacji operacji, co umożliwiło weryfikację poprawności przyjętych założeń i dopasowanie ich do możliwości obrabiarek.

Kompletna dokumentacja technologiczna wytworzenia wału z wykorzystaniem utwardzania cieplnego składała się z poniższych części:

- rysunek wykonawczy wału,
- rysunek półfabrykatu,
- karta półfabrykatu,
- karta technologiczna,
- karta instrukcyjna 1 – przecinanie,
- karta instrukcyjna 2 – planowanie czół i nakiełkowanie,
- karta instrukcyjna 3 – toczenie zgrubne,
- karta instrukcyjna 4 – toczenie kształtujące,
- karta instrukcyjna 5 – frezowanie rowków wpustowych,
- karta instrukcyjna 6 – hartowanie,
- karta instrukcyjna 7 – odpuszczanie,
- karta instrukcyjna 8 – szlifowanie średnic $\varnothing 25$ k5 i $\varnothing 40$ k5,

- karta kontroli jakości wymiarów.

Wyniki przeprowadzonych prac wskazują, że zaprojektowany proces technologiczny umożliwia uzyskanie wału o wysokiej jakości wymiarowej i geometrycznej, spełniającego wymagania w zakresie trwałości i odporności eksploatacyjnej. Zastosowanie obróbki cieplnej w postaci hartowania i odpuszczania pozwoliło na uzyskanie korzystnej struktury stali o wysokiej twardości powierzchniowej i jednoczesnej odporności na obciążenia zmęczeniowe. Opracowany proces potwierdził także znaczenie dokładności operacji wykańczających, takich jak szlifowanie, które decydują o współpracy wału z innymi elementami maszyn, przede wszystkim z łożyskami.

Podsumowanie

Opracowany proces technologiczny wytwarzania wału z zastosowaniem utwardzania cieplnego stanowi harmonijne połączenie wiedzy teoretycznej i praktycznej, obejmując zarówno szczegółowe zagadnienia związane z obróbką cieplną, jak i gotowe rozwiązanie technologiczne wraz z pełną dokumentacją. Dzięki starannie dobranym metodom hartowania i odpuszczania wał uzyskuje zwiększoną trwałość, odporność na przeciążenia mechaniczne oraz poprawioną niezawodność w maszynach, w których jest wykorzystywany, co czyni opracowany proces wartościowym narzędziem dla przemysłu. Proponowane rozwiązania nie tylko integrują wiedzę inżynierską z praktyką przemysłową, ale również oferują cenne wskazówki dla projektantów i producentów wałów, pokazując, jak nowoczesne technologie obróbki cieplnej i maksymalne wykorzystanie ramowych procesów technologicznych mogą zwiększać efektywność produkcji, optymalizować koszty i jednocześnie podnosić bezpieczeństwo eksploatacji maszyn. W perspektywie dalszych badań istotne jest rozwijanie metod hartowania i odpuszczania oraz poszukiwanie innowacyjnych rozwiązań, które pozwolą uzyskać jeszcze lepsze właściwości użytkowe komponentów, wydłużyć ich żywotność i podnieść standardy jakości w nowoczesnym przemyśle maszynowym. Całość pracy ukazuje, że zintegrowane podejście łączące teorię z praktyką pozwala nie tylko na stworzenie trwałych i niezawodnych wałów, ale także wskazuje kierunki rozwoju technologii obróbki cieplnej, podkreślając znaczenie inżynierii materiałowej i procesowej w projektowaniu nowoczesnych komponentów przemysłowych, które sprostają wymaganiom współczesnej produkcji i będą mogły znaleźć zastosowanie w najbardziej wymagających maszynach i urządzeniach.