



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej

KATEDRA INFORMATYKI STOSOWANEJ I MODELOWANIA

Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, paw. B4, pok. 206

dr hab. Danuta Szeliga, prof. AGH

tel. +48 12 617 41 92, email: szeliga@agh.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej

„Opracowanie wysokowydajnej technologii wytwarzania zaworu silnikowego ze stali chromowo – niklowej przeznaczonego dla samochodów ciężarowych”

Autor rozprawy: mgr inż. Marta Janik

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Marek Hawryluk, prof. PWr

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Marzena Lachowicz, prof. PWr

Recenzję wykonano na podstawie pisma Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Wrocławskiej, nr W10/RDND07/84/2023, z dnia 27 października 2023 r.

1. Przedmiot rozprawy

Przedmiotem recenzji jest praca doktorska pt. „Opracowanie wysokowydajnej technologii wytwarzania zaworu silnikowego ze stali chromowo – niklowej przeznaczonego dla samochodów ciężarowych”. Praca została zrealizowana jako doktorat wdrożeniowy. Dysertacja ma klasyczny układ: wstęp do problematyki, studium literaturowe, badania własne, opracowanie procedury poprawiającej technologię, weryfikacja przemysłowa zaproponowanego rozwiązania. Pracę kończą: podsumowanie przeprowadzonych prac i wnioski. Do pracy dołączono także streszczenia: w języku polskim i angielskim. Na podkreślenie zasługuje fakt, że Doktorantka jest współautorką 7 publikacji o tematyce związanej bezpośrednio z przedłożoną pracą. W ramach pracy złożono również wniosek patentowy związany z technologią wytwarzania zaworów silnikowych.

W dysertacji przedstawiono główne problemy technologii wytwarzania zaworów silnikowych, które powinny być dostosowane do nowych materiałów dla tych elementów, w związku ze zmieniającymi się normami dotyczącymi emisji spalin i proekologicznymi mieszkankami paliwowymi. Osobną kwestią jest rynek samochodowy. Biorąc pod uwagę produkcję samochodów ciężarowych i osobowych z silnikami spalinowymi w najbliższych 20, 30 latach, to nawet uwzględniając rozwijający się rynek samochodów elektrycznych, zapotrzebowanie na produkcję elementów silników tych pierwszych, w tym zaworów, będzie nadal wzrastało. Stąd istotne jest podniesienie jakości produkcji, z jednoczesnym obniżeniem kosztów poprzez poprawę trwałości narzędzi do wytwarzania tych elementów, bądź modyfikację samej technologii. Synergia wymienionych czynników pozwoli na nowoczesną produkcję w świetle ekologii i ekonomii. Doktorantka skupiła się na wybranym procesie produkcyjnym, obejmującym wyciskanie, a następnie kucie. To właśnie ta technologia

stosowana jest w zakładzie produkcyjnym, z którym związana jest Autorka. Używane obecnie stale do produkcji zaworów muszą charakteryzować się bardzo wysoką żaroodpornością i żarowytrzymałością, dużą odpornością na korozję gazową i utlenianie. Takie cechy posiadają superstopy na bazie niklu. Jednak ich cena jest zbyt wysoka, by mogły być wykorzystywane w masowej produkcji. Tańszym odpowiednikiem, wykorzystywanym do produkcji zaworów w zakładzie, jest stal chromowo-niklowa o rynkowej nazwie Nireva. W pracy podano uzasadnienie wyboru tego stopu. Stal ta ma odpowiednią strukturę austenityczną wzmacniającą ten stop, a zwiększona zawartość Cr i Al podnosi odporność na korozję. Ponadto Al poprawia odporność na utlenianie na gorąco i odporność cieplną, wchodząc w skład fazy międzymetalicznej. Chrom reaguje z tlenem na powierzchni materiału tworząc warstwę tlenków chromu mającą charakter ochronny: jest nieprzepuszczalna dla tlenu i innych gazów oraz płynów z otoczenia, blokując postęp korozji. W materiale występują wydzielenia węglików chromu na granicach ziaren oraz wydzielenia węglikoazotków stopowych równomiernie rozmieszczone w osnowie austenitycznej. Z jednej strony te twarde fazy międzymetaliczne są istotne, ponieważ podnoszą odporność na wysokie temperatury, z drugiej strony ich obecność obniża odkształcalność materiału, co powoduje problemy w procesie wyciskania i kucia, zwiększając zużycie narzędzi. Wymienione trudności w kształtowaniu stopów metali umacnianych wydzieleniowo stanowiły podwalinę badań nad doбором optymalnych parametrów kucia, przy zachowaniu wysokiej trwałości narzędzi wykorzystywanych w produkcji zaworów. Podczas procesu, na trwałość matrycy wpływają duże naciski i znaczne tarcie w trakcie procesu, a także niemałe, cykliczne zmiany temperatury rzutujące na zmienne warunki tribologiczne. Obserwować można różne mechanizmy niszczące: zużycie ściernie, zmęczenie cieplno-mechaniczne, odkształcenie plastyczne, zużycie adhezyjne, utlenianie, czy pękanie zmęczeniowe. Proces kucia powtarzany wielokrotnie, z cyklicznymi obciążeniami termomechanicznymi, i dynamika samego procesu oraz brak stabilności, jest złożony i trudny do analizy. Stąd uzasadnione jest prowadzenie zaawansowanych, szerokich badań, umożliwiających dokładne zrozumienie zjawisk zachodzących podczas procesu technologicznego. Na podstawie ich wyników opracowanie metod podnoszących wydajność narzędzi, co pozwoli na redukcję kosztów wytwarzania zaworów z zachowaniem założeń ekonomicznych i ekologicznych. Opisane zagadnienie jest wciąż aktualnym problemem badawczym. Autorka pracy podjęła się rozwiązania kompleksowego problemu dla procesu technologicznego prowadzonego w zakładzie.

2. Ocena pracy doktorskiej

Pierwsza część pracy (rozdział I) jest krótkim wstępem do zagadnienia produkcji zaworów silnikowych. Opisano w niej najważniejsze aspekty technologiczne i materiałowe, zwracając szczególną uwagę na trwałość narzędzi.

Druga część jest przeglądem literatury (rozdział II), nawiązującym bezpośrednio do problematyki pracy. W studium literatury szeroko została omówiona charakterystyka zaworów silników spalinowych, zarówno pod kątem używanych materiałów do ich produkcji, jak i technologii wytwarzania. Przedstawiono dokładnie mechanizmy odpowiedzialne za zużycie narzędzi wykorzystywanych w procesie kucia, który jest częścią technologii produkcji. W dalszej części omówiono metody poprawy trwałości narzędzi kuźniczych, obejmujące szerokie spektrum możliwości: od doboru materiału, z którego wykonane są narzędzia, poprzez ich kształt, wykorzystywane metody inżynierii powierzchni, kończąc na optymalizacji pracy narzędzi. Literatura wykorzystana w studium obejmuje najnowsze trendy i opracowania związane z tematyką pracy. Dobrana jest adekwatnie i wyczerpująco omawia zagadnienie.

Biorąc pod uwagę technologię wytwarzania stosowaną w zakładzie oraz materiał, z którego wykonane są zawory, i na podstawie wiedzy dotyczącej mechanizmów zużycia narzędzi

kuźniczych, a także metod poprawy trwałości tych narzędzi, oraz po analizie obecnego stanu wiedzy dotyczącego produkcji zaworów silnikowych, sformułowano cel i tezę pracy. Przedstawiono je w części trzeciej pracy (rozdział III). Celem pracy jest opracowanie rozwiązań usprawniających dotychczas stosowaną technologię wytwarzania zaworów silnikowych w zakładzie, poprzez zwiększenie trwałości wybranych narzędzi w procesie kucia: matrycy w I operacji i stempla w II operacji. Cel pracy wyjaśnia tym samym słowa o „wysokowydajnej technologii” użyte w tytule pracy, które związane są z wydłużeniem czasu pracy narzędzi do produkcji zaworów silnikowych. Opracowanie modyfikacji stosowanej technologii okazało się koniecznością. Przeprowadzone badania pokazały, że trwałość narzędzi przy produkcji zaworów ze stali stopowych stanowi tylko 25% trwałości tych samych narzędzi do produkcji zaworów ze stali niestopowych. Na podstawie studium literatury, analizy technologii w zakładzie i wstępnych badań, Doktorantka sformułowala tezę pracy: „poprzez zastosowanie wybranych metod poprawy trwałości, takich jak: zwiększenie grubości warstwy azotowanej na matrycy wstępnej, wstępne kształtowanie kaloty i chłodzenie stempla w drugiej operacji, a także wydłużenie czasu nagrzewania materiału wsadowego można znacząco zwiększyć trwałość narzędzi kuźniczych, co przyczyni się do udoskonalenia obecnej technologii oraz zwiększenia wydajności procesu kucia zaworów wykonanych ze stali chromowo – niklowej”. Realizacja celu i udowodnienie tezy pracy wymagało zdefiniowania planu badawczego, obejmującego analizę dotychczasowej technologii, wybór narzędzi, dla których opracowane zostaną nowe rozwiązania oraz opracowanie usprawnień i modyfikacji tych narzędzi, weryfikację przyjętych rozwiązań w praktyce przemysłowej. Metody, których użyto do wykonania przyjętego planu to badania makroskopowe stopnia zużycia/nadmiaru powierzchni roboczych narzędzi z wykorzystaniem metod skanowania i porównaniem do modeli CAD narzędzi, badania mikrostruktury z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej i skaningowej, pomiary mikrotwardości, badania dylatometryczne, modelowanie numeryczne procesu metodą elementów skończonych. Zarówno teza pracy, jak i cel, zostały sformułowane prawidłowo, a wybrane metody badawcze umożliwiły realizację celu i udowodnienie tezy pracy.

Najistotniejszym w pracy jest rozdział IV, w którym zostały szczegółowo i wyczerpująco opisane badania własne. Na początku przedstawiono i przeanalizowano obecnie stosowaną technologię wytwarzania zaworów, i na podstawie przeprowadzonych badań i analizy statystycznej wybrano elementy narzędzi, dla których opracowano nowe rozwiązania. Badania te obejmowały skanowanie 3D, badania mikroskopowe dla wytypowanych, na podstawie skanów, obszarów najbardziej narażonych na zużycie oraz pomiary twardości. Prócz badań eksperymentalnych przeprowadzono obliczenia numeryczne MES z wykorzystaniem komercyjnego oprogramowania i analizowano naprężenia, odkształcenia plastyczne, zużycie ściernie. Modelowanie numeryczne pozwoliło na wytypowanie obszarów narzędzi najbardziej narażonych na zużycie i było uzupełnieniem badań doświadczalnych. W celu modyfikacji dotychczas stosowanej technologii i podniesienia trwałości narzędzi przetestowano szereg rozwiązań: dobór stali do pracy na gorąco dla matrycy wstępnej i stempla, wkładkę węglkową dla stempla, zastosowanie warstw powierzchniowych wytwarzanych w technologii laserowego umacniania udarowego i azotowania gazowego dla matrycy wstępnej. Dla każdego z wymienionych rozwiązań wykonano szereg badań mikrostruktury, zidentyfikowano mechanizmy pęknięcia, wykonano pomiary mikrotwardości. Wyniki zostały przeanalizowane pod kątem modyfikacji istniejącej technologii. Spośród zaproponowanych rozwiązań tylko zmiana materiału dla matrycy wstępnej na stal do pracy na gorąco o handlowej nazwie QRO90 Supreme o grubości warstwy azotowej 0,2 mm przyniosła oczekiwany wzrost trwałości narzędzia. Jeżeli chodzi o wkładkę węglkową, to problemem okazał się jej montaż w sposób, który utrzymywałby wkładkę w prawidłowym miejscu. Kolejnym krokiem była analiza mikrostruktury materiału wsadowego po nagrzewaniu, dla którego także wykonano badania mikrostruktury i twardości. Stwierdzono duży rozrzut wartości, a wzięwszy pod uwagę wyniki

badan dylatometrycznych dla wyznaczenia zakresu temperatur rozpuszczania faz międzymetalicznych, zdecydowano o modyfikacji technologii poprzez dodatkową strefę grzejącą. Dzięki temu struktura materiału wsadowego będzie zawierała znacznie mniej niekorzystnych węglików występujących na granicy ziaren austenitu. Badania laboratoryjne potwierdziły zasadność tej modyfikacji. W dalszej kolejności modyfikacja technologii obejmowała zmianę kształtu matrycy wstępnej. Wytypowano 4 dodatkowe kształty i przeprowadzono symulacje numeryczne pod kątem zużycia ściernego. Jednak te modyfikacje nie podniosły trwałości narzędzia. Modyfikacje kształtu stempla zaproponowano również dla narzędzia II operacji, służącego do wytwarzania kaloty na powierzchni czołowej zaworu. Zaproponowane rozwiązanie przyniosło spodziewaną poprawę trwałości stempla i zostało objęte zgłoszeniem patentowym. Kolejną modyfikacją było dodatkowe chłodzenie stempla z użyciem rozpylanej wody. Ta zmiana skutkowała wzrostem trwałości stempla, co potwierdziły skany 3D i ich porównanie do modelu CAD, badania mikrostruktury, analiza EDS/SEM i pomiary mikrotwardości.

Zmiany, w wyniku których nastąpiła poprawa trwałości narzędzi: nowy materiał dla matrycy wstępnej w operacji I i modyfikacja kształtu stempla dla operacji II, zostały włączone w praktykę przemysłową. Wyniki produkcji charakteryzujące się mniejszą częstotliwością zmian zmodyfikowanych narzędzi oraz wzrostem wskaźnika jakościowego produktów, związany z obniżeniem liczby produktów wadliwych, wskazują na potwierdzenie postawionej tezy pracy i zrealizowanie założonego celu. W dalszej perspektywie w zakładzie planowane jest również włączenie do technologii dodatkowej nagrzewnicy dla wsadu.

Pracę kończy rozdział V, w którym zawarto podsumowanie i wnioski.

Całość pracy jest spójna, logiczna, w poszczególnych rozdziałach badania opisane są poprawnie i z wystarczającą szczegółowością. Do wyników dołączona jest analiza i możliwość ich wykorzystania do poprawy modyfikowanej technologii wytwarzania zaworów. Praca jest napisana starannie i z należytą dbałością pod względem edycyjnym.

3. Uwagi szczegółowe

Podczas lektury pracy nasuwają się uwagi/pytania o charakterze szczegółowym. Najważniejsze z nich zebrano poniżej.

1. Str. 22, rys. 13. Czy jest to źródło własne, czy nie podano źródła przedstawionych informacji?
2. Str. 34, zdanie „Metoda elementów skończonych pozwala przewidzieć przemysłowy proces obróbki plastycznej, a także ocenić jego warunki lub parametry.” wydaje się zbyt dużym uogólnieniem i nie jest do końca zrozumiałe. Stwierdzenie wymaga doprecyzowania.
3. Str. 50, stwierdzono „Niestety w przypadku aktualnie realizowanego procesu na długości induktora 680 mm oraz w czasie cyklu 5,3 s mikrostruktura wałeczków podczas procesu grzania jest różna.” Skąd wynikają te różnice w nagrzewaniu, czego wynikiem są różne mikrostruktury materiału wsadowego widoczne na rys. 39?
4. Str. 57, rys. 49 i 50, zdanie „Jak widać, praca obu narzędzi jest bardzo niestabilna, ...”. Policzenie odchylenia standardowego pozwoliłoby ocenić ilościowo niestabilność.
5. Na zdjęciach mikrostruktur w rozdziale IV, nr 56-59, 65, 82-84, 91, 107, 109, 114, 116, 131, nie można odczytać wszystkich parametrów pomiarów, nawet przy powiększeniu rysunku, choć, co najważniejsze, nie wpływa to na analizę samego obrazu.
6. Str. 67, rys. 65 i 66 b i c. Na zdjęciach zastosowano różne skale, co wynika najprawdopodobniej z rozmiaru pęknięć, które chciano pokazać. Niemniej dodatkowe zdjęcie w tej samej skali obu powierzchni pozwoliłoby na ich lepsze porównanie.
7. Str. 69, rys. 69, str. 106, rys. 133, str. 109, rys. 139. Pomiary twardości pokazano dla dwóch wybranych punktów, na „szczycie” i „obok” zgodnie z rys. 65 i 66. Wydaje się, że

oznaczenie tych punktów np. jako A i B, wprowadziłoby pewien formalizm i byłoby precyzyjniejsze niż użyte określenia.

8. Str. 70/71, równanie (2). Symbol $\dot{\epsilon}$ opisano jako „tensor prędkości odkształcenia”. Czy jest to prawidłowe określenie tej wielkości? Dla wszystkich symboli równania dobrze byłoby podać jednostki.
9. Str. 71, rys. 71 c). Skala uniemożliwia odczyty wartości temperatury.
10. Str. 89, rys. 102. Rysunek jest nieczytelny i trudno zanalizować przedstawione na nim wyniki analizy EDS.

W pracy nie uniknięto błędów edytorskich, drobnych przejęczy, kolokwializmów bądź skrótów myślowych, błędów wynikających prawdopodobnie z automatycznej korekty, czy związanych ze stylistyką. Jest ich niewiele, w żaden sposób nie wpływają na wartość merytoryczną pracy, stąd w recenzji nie zostały wyszczególnione.

4. Uwagi dyskusyjne

Po przeczytaniu rozprawy nasuwają się także uwagi dyskusyjne, które zebrano poniżej.

1. W pracy, w rozdziale II.2 dokładnie opisano mechanizmy zużycia, ale tylko dla zużycia ściernego podano równanie. Dla pozostałych mechanizmów również istnieją modele matematyczne, które można byłoby w pracy przytoczyć. Tym bardziej, że wszystkie opisane mechanizmy zostały zaobserwowane w analizowanych w dysertacji narzędziach.

Dalsze uwagi dotyczą rozdziału IV.5.

2. Na stronie 70 stwierdzono, że: „Materiał odkuwki, z którego wykonywane są zawory do silników samochodów ciężarowych to Nireva, a ponieważ baza materiałowa programu Forge nie zawiera tej stali, został dobrany bardzo podobny gatunek stali X5NiCrAlTi31-20/1.4958, dla którego zostały przyjęte dane materiałowe ...”. Analizując składy chemiczne obu materiałów można zaobserwować, że ilości pierwiastków stopowych, takich jak Si, Mn, Cr, Al, czy Ti są znacząco różne. Dalej napisano, że „Do warunków brzegowych, niezbędnych przy wykonywaniu symulacji numerycznej, zaliczają się własności wytrzymałościowe, które dla stali Nireva zostały eksperymentalnie wyznaczone w uniwersalnym symulatorze procesów metalurgicznych – urządzeniu Gleeble 3800. W zakresie odkształceń 0 – 1 dla prędkości odkształcenia: 0,1; 1; 10; 40 [1/s] oraz w 4 temperaturach: 850; 950; 1050; 1100 [°C], zostały wyznaczone krzywe zależności naprężeń uplastyczniających w funkcji odkształcenia dla materiału Nireva (rys. 70)”. Jakie dane materiałowe zostały przyjęte do symulacji dla stali X5NiCrAlTi31-20/1.4958 i jakie własności wytrzymałościowe wyznaczono? Z podanego opisu nie wynika to jasno.
3. Dla równania (2) na str. 70 nie podano zidentyfikowanych wartości parametrów A i $m_1 - m_9$.
4. Jakie dokładnie przyjęto modele ciał dla matrycy i odkuwki? Jakie wartości miały dane materiałowe dla materiału przyjętego dla matrycy?
5. Dla modelu MES: jaka była/jak wyglądała siatka, z jakich elementów się składała? Nie podano informacji z tym związanych.
6. Jaki był czas pojedynczej symulacji i całego cyklu?
7. Na wyniki symulacji wpływa znacząco wartość współczynnika tarcia, który został wyznaczony metodą opisaną na str. 72. W jaki sposób ustalono odstępstwa dla linii o wartości 5 mm? Czy sprawdzono, przynajmniej w symulacji, jak zmieni się rozkład linii, gdy zmieni się wartość współczynnika tarcia nieznacznie? Jakiej użyto metody do wyznaczenia wartości 0,3?
8. W symulacjach wzięto pod uwagę wyłącznie zużycie ściernie liczone wg modelu ‘Archarda. Jaka była wartość parametru C dla tego modelu? W jaki sposób tę wartość wyznaczono?

Badania doświadczalne pokazały, że mechanizm zużycia jest złożony. W jaki sposób przekłada się analiza doświadczalna na wyniki symulacji, w której liczone jest wyłącznie zużycie ściernie? W jaki sposób wykorzystano wyniki symulacji dla matrycy w dalszej części badań?

Rozdział IV.6.

9. Dla redukcji zużycia ściernego matrycy wstępnej zaproponowano zmianę kształtu matrycy. Przeanalizowano dodatkowo cztery różne warianty. W jaki sposób je dobrano? I dlaczego wybrano właśnie te kształty?
10. Czy dla wprowadzonych zmian technologii dotyczących dodatkowego nagrzewania materiału wsadowego i chłodzenia stempla przeanalizowano dodatkowe koszty związane ze zużyciem energii?

Rozdział V.

11. W jednym z wniosków, nr 7, napisano, że „Na podstawie przeprowadzonych symulacji numerycznych wykazano, iż materiał rdzenia jest na granicy minimalnej temperatury niezbędnej do rozpuszczenia faz międzymetalicznych po granicach ziaren, ...”. Czy w pracy podano ten rozkład temperatury?

5. Podsumowanie

Recenzowaną rozprawę doktorską można uznać za wartościową pozycję naukową. Problematyka badawcza związana z opracowaniem wysokowydajnej technologii wytwarzania zaworów ze stali chromowo-niklowej do silników spalinowych samochodów ciężarowych jest aktualna w świetle utrzymania wysokiej jakości produktów, eliminacji produktów wadliwych, przy jednoczesnym obniżaniu kosztów produkcji i wzrastających wymaganiach związanych z ekologią. Zarówno uwagi dyskusyjne, jak i szczegółowe, nie obniżają oceny merytorycznej pracy, podobnie jak nieliczne błędy edytorskie.

Uważam, że opiniowana rozprawa doktorska spełnia warunki określone w obowiązującej ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym. Wnioskuje zatem do Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Wrocławskiej o dopuszczenie Pani mgr inż. Marty Janik do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Danuta Leleja

Kraków, 31.12.2023 r.