

Częstochowa, 07.01.2024 r.

dr hab. inż. Piotr Szota, prof. P.Cz.

piotr.szota@pcz.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Marty Janik

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

opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej prof. dr hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego z dnia 27 października 2023 r.

Postęp w technologii silników spalinowych oraz stałe poszukiwania ekologicznych paliw, które umożliwiają ograniczenie emisji szkodliwych substancji do środowiska, sprawiają że warunki pracy elementów komory spalania stają się coraz bardziej wymagające. To zjawisko wynika głównie z rosnącego ciśnienia i podwyższonej temperatury podczas spalania paliw, a także z pogarszających się warunków smarowania. Elementy silników spalinowych związane z komorą spalania, takie jak zawory ssące i wydechowe, są eksploatowane w trudnych warunkach. Aby sprostać rosnącym wymaganiom, konieczne jest nieustanne poszukiwanie nowych materiałów i technologii do produkcji tych elementów.

1. Wybór tematu rozprawy doktorskiej

Recenzowana praca Pani mgr inż. Marty Janik skupia się na procesie produkcji zaworów do silników spalinowych samochodów ciężarowych, wykorzystując dwuetapowy proces formowania podczas wyciskania i kucia matrycowego. Zawory silników spalinowych są wytwarzane z stopów stalowych chromowo-niklowych, cechujących się wysoką żarowytrzymałością, odpornością na wysokie temperatury oraz korozję gazową. Stopy te charakteryzują się strukturą austenityczną z fazą γ' oraz γ'' pełniącą rolę wzmacniającą stop przy udziale faz międzymetalicznych. Złożona struktura tych stopów umożliwia uzyskanie materiału, który może sprostać trudnym warunkom pracy. Zastosowanie tych stopów na zawory znacznie utrudnia procesy przeróbki plastycznej na gorąco, co prowadzi do szybszego zużycia narzędzi kuźniczych.

Doktorantka w swojej rozprawie podjęła się rozwiązania trudnego zadania związanego z analizą przyczyn występowania znacznego zużycia narzędzi oraz określenia zjawisk i mechanizmów degradujących powierzchnie robocze narzędzi. Mnogość zjawisk i czynników wpływających na proces przeróbki plastycznej zaworów sprawia, że analiza jest niezwykle trudna a dobór korzystnych materiałów na narzędzia i warunków kształtowania wymaga szerokich kompleksowych badań. Przedłożona do recenzji praca doktorska wpisuje się więc, swoją tematyką w interesujące i bardzo aktualne obszary badań i jednocześnie daje podstawy aplikacyjne w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Praca została przygotowana pod kierunkiem Pana dr hab. inż. Marka Hawryluka, prof. PWR, który jest promotorem recenzowanej rozprawy, a Pani dr hab. inż. Marzena Lachowicz, prof. PWR, pełni rolę promotora pomocniczego.

Rozprawa doktorska została wykonana w ramach programu "Doktorat wdrożeniowy" finansowany przez Ministerstwo Edukacji i Nauki, edycja III, grant nr DWD/3/36/2019".

2. Charakterystyka dysertacji

Praca przedłożona do recenzji składa się z sześciu głównych rozdziałów. Wstęp zawiera wprowadzenie do głównych aspektów związanych z technologią kształtowania zaworów. Kolejne części obejmują przegląd literatury, sformułowanie celu i tezy pracy wraz z opisem metodyki badań, prezentację wyników badań własnych, a zakończenie zawiera podsumowanie i wnioski oraz odwołania do literatury.

Praca posiada klasyczny układ, w którym wyraźnie widoczny jest podział na część teoretyczną związaną z przeglądem literatury i część badawczą zawierającą badania własne. Dość nietypowo Doktorantka, streszczenie w języku polskim i angielskim zamieściła na końcu dysertacji. Praca doktorska zawiera się na 130 stronach maszynopisu a przyjęta struktura pracy jest właściwa. Badania własne i ich analiza stanowią ponad 63% całej objętości pracy. Cytowana literatura stanowi 126 pozycji naukowych a sam dobór literatury jest adekwatny do tematyki rozprawy i potwierdza aktualność tematyki badawczej podjętej przez Doktorantkę. Bibliografia w głównej mierze składa się z pozycji światowej literatury, które zostały opublikowane w cenionych czasopismach w okresie ostatnich 15 lat. W siedmiu pozycjach Doktorantka występuje jako współautor w wysoko punktowanych czasopismach publikowanych w ostatnich 6-ciu latach.

Należy podkreślić, że recenzowana praca została przygotowana z należytą starannością i dbałością o jakość prezentowanych wyników.

3. Merytoryczna ocena rozprawy

Przed postawieniem tezy pracy, w przeglądzie literatury, Doktorantka szczegółowo opisała zagadnienia związane z technologią kształtowania zaworów począwszy od charakterystyki wytwarzania zaworów, stali stosowanych na zawory, warunków pracy i eksploatacji narzędzi, mechanizmów zużycia oraz metod poprawy trwałości narzędzi.

Ta część pracy doktorskiej stanowi wyczerpującą podbudowę merytoryczną opisującą problemy związane z technologią wytwarzania zaworów oraz wskazuje możliwości ich rozwiązania. Przeprowadzony przegląd literatury jest adekwatny do tematyki oraz stanowi potwierdzenie, że Doktorantka posiada odpowiednią wiedzę i przygotowanie teoretyczne do prowadzenia badań.

Teza i cel pracy

Na podstawie przeglądu literatury Autorka sformułowała tezę pracy, w której stwierdza, że: „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”.

Postawiona teza jest w pełni uzasadniona w kontekście przeprowadzonych badań, jednakże jest ona skoncentrowana na konkretnych zabiegach mających na celu zwiększenie trwałości narzędzi. Warto jednak zauważyć, że w ramach pracy rozważono również inne metody, takie jak inżynieria powierzchni czy zastosowanie wkładek z węglików spiekanych.

Główny celem pracy jest: „...opracowanie technologii wytwarzania zaworu silnikowego ze stali chromowo – niklowej przeznaczonego dla samochodów ciężarowych, poprzez usprawnienie aktualnie realizowanej technologii dla zastosowanego materiału wsadowego, w celu zwiększenia trwałości matrycy wstępnej I operacji oraz stempla II operacji”. Celem naukowym pracy jest wyjaśnienie mechanizmów i zjawisk prowadzących do zużycia narzędzi kuźniczych. Przyjęta przez Doktorantkę metodyka i zakres prowadzonych badań jednoznacznie są ukierunkowane na zrealizowanie założonego celu pracy.

Część badawcza pracy obejmuje rozdział IV, który składa się z siedmiu podrozdziałów dotyczących badań własnych. Doktorantka przedstawiła szeroki zakres prowadzonych badań, mających na celu osiągnięcie głównego celu i potwierdzenie tezy. W ramach pracy zrealizowała badania, obejmujące:

- analizę obecnie realizowanej technologii wytwarzania zaworów do silników samochodów ciężarowych;
- wytypowanie narzędzi do wyciskania i kucia o obniżonej trwałości,
- określenie czynników wpływających na trwałość wskazanych narzędzi;
- analizę mechanizmów zużycia narzędzi kuźniczych;
- modelowanie numeryczne procesu kucia dla I i II operacji;
- badanie sposobów zwiększenia trwałości dla wytypowanych narzędzi;
- implementację docelowych metod poprawy trwałości w gnieździe produkcyjnym
- analizę i ocenę zastosowanych rozwiązań.

W ramach badań własnych Doktorantka dokonała analizy procesu wyciskania i kucia matrycowego zaworu silnika spalinowego składającego się z dwóch materiałów połączonych z wykorzystaniem zgrzewania tarcowego. Przyjęła, że głowa zaworu (talerzyk) wykonana jest z żaroodpornej stali austenitycznej NCF 3015, natomiast trzon zaworu ze stali ferrytyczno - martenzytycznej X45CrSi9-3. Badania własne Doktorantki obejmują wyłącznie technologię kształtowania głowy zaworu.

W rozdziale IV.1 Autorka skoncentrowała się na opisie poszczególnych etapów procesu wytwarzania zaworu, dotyczącego przygotowanie wsadu, związanego z metodami nagrzewania, wymaganiami mikrostrukturalnymi, operacjami przeróbki plastycznej, starzeniem, śrutowaniem, a także zgrzewaniem tarcowym i obróbką cieplną. W tej części brakuje jednak kluczowych informacji, takich jak wymiary stosowanego wsadu, charakterystyczne wymiary zaworu, prędkość narzędzi podczas wyciskania i kucia matrycowego, oraz czas pomiędzy poszczególnymi operacjami.

W rozdziale IV.2 Autorka przedstawiła wyniki badań statystycznych dotyczących zużycia narzędzi tzn. w procesie wyciskania - zużycie matrycy a w procesie kucia matrycowego - zużycie stempla z kalotą.

Kolejny rozdział IV.3 dotyczy analizy matrycy wstępnej do wyciskania wykorzystywanej w I operacji. Doktorantka w tym rozdziale przedstawia ciekawe wyniki pomiarów zużycia wykonane za pomocą skanera 3D dotyczące zmiany geometrii matrycy na skutek eksploatacji narzędzia po 1 szt. i po wykonaniu 2350 szt. Bardzo cenne wyniki zamieszczone zostały na rys. 53 i 54 pokazujące miejsca największego zużycia narzędzi a także przebieg zużycia na kolejnych etapach eksploatacji matrycy. Na podstawie otrzymanych wyników, przeprowadzonej analizy mikrostruktury i pomiarów twardości Doktorantka właściwie oceniła zjawiska powodujące degradację powierzchni matrycy i czynniki utrudniające prawidłowy przebieg procesu kształtowania.

W rozdziale IV.4 Autorka przeprowadziła podobne badania dla stempla wykonanego ze stali 32CrMoV12-28, skupiając się na analizie zmiany wysokości kaloty w trakcie procesu kucia matrycowego. Podczas analizy mechanizmów powodujących zużywanie się kaloty Autorka zwróciła uwagę na możliwość powstawania „białej warstwy” cechującej się wysoką twardością dochodzącą do 1000HV. Warunki podczas kucia mogą sprzyjać powstaniu cenniejszej zaustenitowanej warstwy i jej przemianie w nanokrystaliczny martenzyt określanej jako „biała warstwa”. Szkoda, że doktorantka nie potwierdziła badaniami występowania tego mechanizmu degradacji powierzchni.

Kolejne dwa rozdziały IV.5 i IV.6 zawierają analizę procesu wyciskania i kucia matrycowego z wykorzystaniem modelowania numerycznego opartego o MES. Symulacje komputerowe wykonano w programie Forge NxT 3.0. Już na początku rozdziału pojawia się wątpliwość w jaki sposób został zdefiniowany model materiałowy. Autorka stwierdziła, że w bazie materiałowej programu Forge NxT 3.0 nie występuje stal Nireva, stąd została przyjęta podobna stal (X5NiCrAlTi31-20) o zbliżonym składzie chemicznym, a następnie Autorka opisuje badania plastometryczne z wykorzystaniem symulatora fizycznego Gleeble 3800. Do określenia naprężenia uplastyczniającego Autorka wykorzystowała 9-cio parametrowe równanie Hansel'a-Spittel'a ale nie zostały podane wartości współczynników funkcji (2) jak również nie został zamieszczony model matematyczny programu Forge. Natomiast na podkreślenie zasługuje zastosowana metodyka wyznaczenia współczynnika tarcia z wykorzystaniem siatki koordynacyjnej w rzeczywistych próbkach poddanych wyciskaniu i porównaniu jej do siatki koordynacyjnej odkształconej w symulacji komputerowej.

Analogiczne badania z wykorzystaniem numerycznego modelowania przeprowadzono dla II operacji – kucia matrycowego. Przedstawione wyniki są poprawne natomiast brak jest analizy zużycia stempla z kalotą. Dlaczego dla tej operacji nie analizowano zużycia stempla? Przeprowadzone przez Autorkę symulacje komputerowe dostarczają szeregu wartościowych informacji o procesie wyciskania i kucia matrycowego, które Autorka wykorzystwała podczas identyfikacji przyczyn nadmiernego zużycia narzędzi.

Rozdział IV.6, najbardziej obszerny, poświęcony został badaniom nad doborem materiału dla matrycy w I operacji i stempla w II operacji, oraz możliwości wykorzystania wkładek z węgliku spiekanego, wykorzystania technik inżynierii do poprawy trwałości matrycy. Ponadto w rozdziale tym Doktorantka analizowała również sposób nagrzewania, wpływ kształtu matrycy wstępnej na ich trwałość, zmianę sposobu kształtowania kaloty, a także chłodzenie stempla. Wszystkie badania zrealizowane przez Doktorantkę ukierunkowane były na zwiększenie trwałości matrycy i stempla. Doktorantka wykorzystwała w tych badaniach

szeroki warsztat badawczy, do którego można zaliczyć: modelowanie numeryczne, badania doświadczalne przy zastosowaniu różnych gatunków stali narzędziowych i węglików spiekanych, pomiary geometrii i odchyłek wymiarowych, analizę mikrostruktury, pomiary mikrotwardości. Przeprowadzone badania są starannie opisane a przeprowadzona analiza wyników poprawna. W posumowaniu rozdziału Autorka scharakteryzowała wszystkie zbadane metody pod względem możliwości ich wykorzystania do poprawy trwałości narzędzi a także wskazała możliwe kierunki rozwoju technologii bazujące na przeprowadzonych badaniach.

Na podstawie przeprowadzonych badań w rozdziale IV.6 Doktorantka zaproponowała własne rozwiązania pozwalające na zwiększenie trwałości narzędzi, które zostały potwierdzone doświadczalnie:

- 1) opracowanie konstrukcji oprawy dla wkładki z węglika spiekane eliminując pęknięcia na krawędziach wkładki,
- 2) zastosowanie dłuższego induktora do nagrzewania wsadu dającego możliwość rozpuszczenia faz międzymetalicznych występujących na granicach ziaren,
- 3) wprowadzenie kaloty na stemplu I operacji, w celu rozłożenia odkształcenia na dwie operacje i zmniejszeniu przez to deformacji kaloty stempla II operacji. Rozwiązanie to zostało zgłoszone w Urzędzie Patentowym.
- 4) zastosowanie dodatkowego chłodzenia natryskiem stempla z kalotą w celu ograniczenia odpuszczenia stempla, co doprowadziło do poprawy jego trwałości. Przeprowadzone badania doświadczalne z zastosowaniem natrysku potwierdziły zwiększenie trwałości tego narzędzia.

Praca zakończona jest podsumowaniem i wnioskami. W rozdziale tym w syntetyczny sposób mgr inż. Marta Janik przedstawiła i potwierdziła nowość otrzymanych wyników badań i ich poznawczy charakter określając możliwości i ograniczenia metod poprawy trwałości narzędzi kuźniczych. Wnioski sformułowany przez doktorantkę są trafne i mają potwierdzenie w przeprowadzonych badaniach. Na uznanie zasługuje szeroki zakres badań, który Doktorantka wykonała.

4. Uwagi do pracy:

Praca została przygotowana bardzo starannie, poprawnie pod względem redakcyjnym i językowym, jednakże Autorka nie ustrzegła się pewnych nieścisłości, a niektóre zagadnienia nie zostały wyjaśnione w sposób wyczerpujący:

- 4.1. Uwagi o charakterze dyskusyjnym:

- 1) Rys. 53 przedstawia zużycie matrycy a) oraz geometrię elementu wyciśniętego b), porównując te dwa rysunki widoczny jest brak zmiany średnicy części cylindrycznej przy wyjściu ze stożka roboczego natomiast na odkutym elemencie widoczny jest wzrost średnicy trzpienia o 0,46 mm. *Z czego wynikają te rozbieżności i jak należy interpretować takie wyniki?*
 - 2) rozdział IV.5, *W jaki sposób zdefiniowano model materiałowy stali Nireva wykorzystany w modelowaniu numerycznym?*
 - 3) *Dlaczego Autorka nie wykorzystwała krzywych plastometrycznych otrzymanych na podstawie badań doświadczalnych w postaci tabelarycznej do stworzenia modelu materiałowego, co znacznie zwiększa dokładność obliczeń?*
 - 4) Na rys. 75b został pokazany czas kontaktu materiału z matrycą, który występuje w małym obszarze matrycy. *Dlaczego obszar kontaktu jest tak mały pomiędzy materiałem a matrycą?*
 - 5) Na rysunku 76b Autorka pokazała zużycie ścierna matrycy obliczone wg modelu Archarda, które wyniosło 0,14. *W rozdziale II.2.1 zgodnie ze wzorem (1) należy rozumieć, że zużycie to wynosi 0,14 m³? W tym miejscu nasuwa się również pytanie: Jaka była wartość współczynnika zużycia przyjęta do obliczeń?*
 - 6) Według Autorki na rysunku 85a powierzchnia matrycy uległa odwęgleniu z licznymi nieciągłościami powierzchni natomiast na rysunku 88 w obszarze 1 dla stali QRO90 widoczna jest wysoka twardość 1000HV w odległości 0,02 mm od powierzchni matrycy. *Co jest powodem tak wysokiej twardości w tym obszarze?*
 - 7) Rozdział IV.6.4 zawiera badania dotyczące możliwością zastosowania laserowego kulkowanie udarowego (LSP) z powłoką Alvin oraz azotowania gazowego z wytworzeniem azotku typu epsilon zwiększenia trwałości matryc wstępnych ze stali QRO90 i W360. Na podstawie przeprowadzonych badań Autorka stwierdziła, że każde z trzech wprowadzonych narzędzi uległo zatarciu po wyciśnięciu 1 sztuki, wyjaśniając to zjawisko nadmierną adhezją powierzchni. *Czy w tym przypadku smarowanie podczas procesu kształtowania ma znaczenie i może poprawić warunki kształtowania?*
- 4.2. Uwagi o charakterze szczegółowym:
- 1) str. 9: „...że zawory ssące mają nie mniej poważne problemy ze zużyciem gniazd...” -styl;
 - 2) tabela 1: brak w składzie Fe;
 - 3) rys. 10: brak opisu a) i b);

- 4) wzór (1): p – naprężenie normalne [MPa], s – prędkość poślizgu [mm/s];
- 5) rys. 11 – brak opisu a) i b);
- 6) str. 22: „...która odbija się na zmianie kształtu odkuwki...” - styl;
- 7) str. 24 i 25: „...skrócić żywotność narzędzi...” powinno być trwałość;
- 8) str. 35: „...podczas procesu forowania na gorąco...” formowania;
- 9) wzór (3): ε – odkształcenie rzeczywiste; $\dot{\varepsilon}$ - intensywność prędkości odkształcenia;
- 10) str. 71: stal X0CrMoV5-1/1.2344 – powinno być stal X40CrMoV5-1/1.2344;
- 11) str.107: „Do 1000 szt. stempel obniża wysokość o około 0,05 mm” – styl;

5. Wnioski końcowe

Biorąc pod uwagę aktualność doboru tematu, który ma bardzo istotne znaczenie poznawcze i praktyczne, właściwą i wartościową tezę rozprawy, która została w pełni udowodniona, a także umiejętności Doktorantki, która wykazała bardzo dobre opanowanie warsztatu naukowego w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, a także, co jest szczególnie istotne w dyscyplinach pokrewnych – inżynieria materiałowa, pracę doktorską Pani mgr. inż. Marty Janik oceniam pozytywnie.

W związku z powyższym stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca doktorska pt.: „*Opracowanie wysokowydajnej technologii wytwarzania zaworu silnikowego ze stali chromowo – niklowej przeznaczonego dla samochodów ciężarowych*” spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce w dyscyplinie inżynieria mechaniczna i wnoszę o przyjęcie rozprawy doktorskiej oraz dopuszczenie Pani mgr inż. Marty Janik do publicznej obrony.

dr. hab. inż. Piotr Szota, prof. P.Cz.
Częstochowa, 07.01.2024 r.