



Politechnika Koszalińska

WYDZIAŁ MECHANICZNY

Raławicka 15-17, 75-620 Koszalin, tel. (+48) 94 342-78-81, (+48) 94 347-83-99, fax. (+48) 94 342-67-53, (+48) 94 347-83-92

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Rokosz

Zespół Badawczo-Dydaktyczny Bioinżynierii i Elektrochemii Powierzchni
Katedra Inżynierii Systemów Technicznych i Informatycznych
Wydział Mechaniczny, Politechnika Koszalińska
ul. Raławicka 15-17, PL 75-620 Koszalin
tel. 94 3478 354, e-mail: rokosz@tu.koszalin.pl

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Kamila Dychtonia

**pt. „MODELOWANIE PROCESU NAWĘGLANIA PRÓŻNIOWEGO -
MORFOLOGIA MIKROSTRUKTURY I WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY
WIERZCHNIEJ KÓŁ ZĘBATYCH ZE STALI AISI 9310”**

Podstawę opracowania recenzji stanowi pismo RM-530-02-03/17/2020 od Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Rzeszowskiej dr hab. inż. Macieja Motyki, prof. PRz z dnia 3 listopada 2020. Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pod tytułem „MODELOWANIE PROCESU NAWĘGLANIA PRÓŻNIOWEGO - MORFOLOGIA MIKROSTRUKTURY I WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY WIERZCHNIEJ KÓŁ ZĘBATYCH ZE STALI AISI 9310” przygotowana przez mgr inż. Kamila Dychtonia. Promotorami rozprawy doktorskiej są prof. dr hab. Bartłomiej Wierzbą oraz dr inż. Przemysław Kwolek.

W ramach wstępu należy zaznaczyć, że kształtowanie właściwości elementów konstrukcji maszyn i urządzeń jest bardzo istotnym zagadnieniem we wielu gałęziach przemysłu, wliczając w nie również prężnie rozwijający się przemysł lotniczy. Do jednego z kierunków rozwoju w zakresie lotniczym jest ograniczenie zużycia w eksploatacji kinematycznych par konstrukcyjnych między innymi kół i wałków zębatach w przekładniach

lotniczych. Zwiększenia odporności na zużycie warstwy wierzchniej kół zębatach można osiągnąć między innymi poprzez nawęglanie próżniowe z hartowaniem w gazach obojętnych w warunkach wysokiego ciśnienia. Podczas nawęglania próżniowego jest możliwe uzyskanie dużego potencjału węglowego atmosfery nawęglającej podczas dysocjacji węglowodorów nienasyconych w warunkach obniżonego ciśnienia, jednakże ten proces w warunkach próżni jest niestabilny (brak równowagi termodynamicznej). Z tego względu wymuszony jest podział przebiegu nawęglania na fazę nasycania węglem i fazę wygrzewania dyfuzyjnego. A to prowadzi do konieczności prowadzenia symulacji procesu nawęglania próżniowego warstwy wierzchniej kół zębatach o wymaganym rozkładzie stężenia węgla dla dowolnego gatunku stali, czego podjął się Doktorant.

Przygotowana rozprawa doktorska o objętości 107 stron, zawierająca 86 rysunków, 16 tabel oraz 138 pozycji literaturowych, została podzielona na siedem rozdziałów oraz streszczenie w języku polskim i angielskim. Praca zaczyna się od dwustronicowego rozdziału pierwszego, w którym Autor rozprawy doktorskiej opisuje procesy kształtowania właściwości elementów konstrukcji maszyn i urządzeń z uwypukleniem nawęglania próżniowego. W rozdziale drugim, który stanowi studium literatury, opisano między innymi fizyczne i chemiczne podstawy nawęglania, proces nawęglania próżniowego i obróbkę cieplną po nim następującą, dyfuzję w procesie nawęglania oraz charakterystykę cech geometrycznych i właściwości warstwy nawęglonej kół zębatach przekładni lotniczych. W rozdziale trzecim zaprezentowano tezę, cel i zakres pracy doktorskiej, co oceniam pozytywnie. W kolejnym (czwartym) rozdziale Doktorant skupia się na szczegółowym opisie metodyki, po czym płynnie przechodzi do prezentacji otrzymanych wyników pomiarowych (rozdział 5) komentując je na bieżąco, co pozwala czytelnikowi w pełni zrozumieć tok rozumowania przyjęty przez Autora pracy. W rozdziale szóstym przedstawione są poprawne wnioski, a w siódmym zacytowana w pracy literatura. Na końcu pracy Doktorant zamieszcza również streszczenie po polsku i angielsku.

Reasumując należy zaznaczyć, że do istotnych osiągnięć Doktoranta należą:

- opracowanie modelu matematycznego opartego na prawie zachowania masy uzupełnionego warunkami początkowym i brzegowym, który umożliwia zastosowanie procesu symulacji numerycznej dla wyznaczenia rozkładu stężenia węgla w warstwie nawęglonej na podłożu stali AISI 9310,

- ustalenie wartości równowagowych stężenia węgla, współczynnika przenoszenia węgla i współczynnika dyfuzji węgla w funkcji stężenia węgla dla stali AISI 9310 dla temperatury nawęglania 925°C,
- zauważanie, że głębokość warstwy nawęglonej dla stężenia węgla 0,214% mas. wyznacza efektywną głębokość nawęglania w obszarze średnicy podziałowej dla przyjętej temperatury nawęglania 925°C i określonych warunków obróbki cieplnej (hartowanie w oleju z temperatury 830°C, wymrażanie w temperaturze -75°C i odpuszczanie w temperaturze 150°C),
- zauważanie, że wartość różnicy efektywnej głębokości nawęglania pomiędzy obszarami: średnicy podziałowej i dna wrębu zęba zwiększa się z wydłużeniem czasu procesu nawęglania, z wartości 0,12 mm do wartości 0,24 mm, przy zastosowaniu określonych warunków obróbki cieplnej (hartowanie w oleju z temperatury 830°C, wymrażanie w temperaturze -75°C i odpuszczanie w temperaturze 150°C),
- zauważanie, że stężenie węgla w zakresie od 0,74% mas. do 1,0% mas. w odległości 0,075–0,125 mm od powierzchni warstwy nawęglonej umożliwia uzyskanie wymaganej twardości powierzchniowej w zakresie 81–85 HRA dla kół zębatach ze stali AISI 9310, przy zastosowaniu określonych warunków obróbki cieplnej (hartowanie w oleju z temperatury 830°C, wymrażanie w temperaturze -75°C i odpuszczanie w temperaturze 150°C),
- zauważanie, że stężenie węgla $C > 0,85\%$ mas. w strefie przypowierzchniowej warstwy nawęglonej podłoża prowadzi do tworzenia się węglików w obszarze średnicy podziałowej zębów koła zębatego przekładni lotniczej, przy zastosowaniu określonych warunków obróbki cieplnej (hartowanie w oleju z temperatury 830°C, wymrażanie w temperaturze -75°C i odpuszczanie w temperaturze 150°C),
- zaobserwowanie, że austenit szczątkowy jest składnikiem fazowym mikrostruktury warstwy nawęglonej dla wszystkich opracowanych warunków procesu nawęglania próżniowego,
- zaobserwowanie, że objętość względna austenitu szczątkowego zwiększa się ze wzrostem stężenia węgla w strefie przypowierzchniowej warstwy nawęglonej,

- wywnioskowano, że warunki procesu nawęglania próżniowego określone z uwzględnieniem funkcji parabolicznej umożliwiają wyznaczenie efektywnej głębokości nawęglania,
- wywnioskowano, że warunki procesu nawęglania próżniowego określone z uwzględnieniem funkcji parabolicznej prowadzą do wzrostu stężenia węgla na powierzchni od 0,776% mas. do 0,874% mas. oraz zwiększenia wartości efektywnej głębokości nawęglania od 1,02 mm do 1,33 mm (obszar średnicy podziałowej zęba) oraz od 0,86 mm do 1,09 mm (obszar dna wrębu zęba),
- ustalono, że przyjęte kryterium dla warstwy nawęglonej zapewniające spełnienie warunków pracy wymaganych dla kół zębatych w przekładniach lotniczych można osiągnąć dla przyjętych warunków procesów nawęglania: czas 275 min, liczba cykli 20 oraz z czas 347 min., liczba cykli 13, przy zastosowaniu obróbki cieplnej: hartowanie w oleju z temperatury 830°C, wymrażanie w temperaturze -75°C i odpuszczanie w temperaturze 150°C.

Mimo, że praca jest na bardzo wysokim poziomie mam do Doktoranta następujące pytania odnośnie zrealizowanej rozprawy doktorskiej:

1. Proszę wyjaśnić dlaczego proces nawęglania z czasem nawęglania 275 minut i liczbą cykli 20 (proces 275-20) nie spełnia równania parabolicznego określonego równaniem $0,512+0,81+0,4$ (ostatni punkt nie leży na paraboli).
2. Dlaczego dla wyznaczenia wartości twardości powierzchniowej w warstwie przyjął Pan pomiar w obszarze 0,075-0,125 mm od krawędzi warstwy metodą Vickersa a potem przeliczył Pan uzyskaną wartość twardości na twardość w skali HRA. Czy nie prościej byłoby wyznaczyć wartość twardości powierzchniowej warstwy metodą HRA, co odzwierciedlałoby bardziej właściwości warstwy uzyskane na powierzchni dla procesów nawęglania o różnych parametrach nawęglania.
3. Proszę wyjaśnić dlaczego w badaniach objętości względnej austenitu szczątkowego metodą dyfrakcji rentgenowskiej przyjął Pan linie dyfrakcyjne od martenzytu – {200} i {211} a dla austenitu – {220} i {200}.

Na wyróżnienie zasługuje osiągnięcie, którym jest współautorstwo **21** publikacji naukowych, zaprezentowanych poniżej, co jest wynikiem wyróżniającym i ponadprzeciętnym.

1. A. Nowotnik, J. Sieniawski, M. Góral, M. Pytel, K. Dychtoń: Microstructure and kinetic growth of aluminide coatings deposited by the CVD method on Re 80 superalloy. Archives of Materials Science and Engineering 55 (2012) 2, 22-28.
2. A. Nowotnik, M. Góral, M. Pytel, K. Dychtoń: Influence of coatings deposition parameters on microstructure of aluminide coatings by CVD method on in-superalloys. Solid State Phenomena 197 (2013) 95-100.
3. B. Wierzbą, K. Tkacz-Śmiech, A. Nowotnik, K. Dychtoń: Aluminizing of nickel alloys by CVD. The effect of HCl flow. Chemical Vapor Deposition 20 (2014) 1-3, 80-90.
4. M. Zajusz, K. Tkacz-Śmiech, K. Dychtoń, M. Danielewski: Pulse carburization of steel – Model of the process. Defect and Diffusion Forum 354 (2014) 145-152.
5. M. Góral, S. Kotowski, K. Dychtoń, M. Drajewicz, T. Kubaszek: Influence of low pressure plasma spaying parameters on MCrAlY bond and its microstructure. Key Engineering Materials. 592-593 (2014), 421-424.
6. K. Dychtoń, R. Przeliorz, M. Góral, J. Sieniawski: Thermal analysis of halide activator used in aluminizing of TiAl intermetallics. Key Engineering Materials. 592-593 (2014), 473-476.
7. K. Dychtoń, P. Rokicki, A. Nowotnik, M. Drajewicz, J. Sieniawski: Process temperature effect on Surface layer of vacuum carburized low alloy steel gears. Solid State Phenomena 227 (2015) 425-428.
8. M. Drajewicz, K. Dychtoń, M. Góral: Thermal properties of YSZ powders for plasma spaying. Solid State Phenomena 227 (2015) 413-416.
9. P. Kwolek, A. Kamiński, K. Dychtoń, M. Drajewicz, J. Sieniawski: The corrosion rate of aluminium in the orthophosphoric acid solutions in the presence of sodium molybdate. Corrosion Science – Article in Press.
10. P. Kwolek, P. Górecka, A. Oblój, U. Kwolek, K. Dychtoń, M. Drajewicz, J. Sieniawski: The Teflon impregnation of anodic coating onto aluminium substrate. Chemik 70 (2016) 365-368.
11. P. Pędrak, M. Góral, K. Dychtoń, T. Kubaszek, A. Nowotnik, K. Kubiak: The influence of Ar/N₂ plasma gases on microstructure of ceramic coatings produced by PS-PVD method. Materials Science Forum 844 (2016) 187-192.

12. P. Kwolek, K. Dychtoń, J. Szydełko, A. Gradzik, M. Drajewicz, J. Sieniawski: The influence of sodium molybdate on the rate of corrosion of aluminium in phosphoric(V) acid. *Materials Science Forum* 844 (2016) 31-37.
13. P. Pędrak, M. Drajewicz, K. Dychtoń, A. Nowotnik: Microstructure and thermal characteristics of SiC–Al₂O₃–Ni composite for high-temperature application. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 125 (2016) 3, 1353-1356.
14. K. Dychtoń, P. Kocurek, P. Rokicki, B. Wierzba, M. Drajewicz, J. Sieniawski: Microstructure and residual stress in AMS 6308 steel after vacuum carburizing and gas quenching. *Acta Physica Polonica A* 130 (2016) 953-955.
15. K. Dychtoń, M. Drajewicz, M. Pytel, P. Rokicki, A. Nowotnik: Yttria-stabilized zirconia-alumina composite sintering temperature effect on thermal diffusivity. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 126 (2016) 1.
16. Z. Duriagina, T. Kovbasyuk, M. Zagula-Yavorska, S. Bepalov, M. Drajewicz, K. Dychton, M. Kindrachuk: Comparative Estimation of the Structure and Electrical Properties of Functional Layers Based on PbO–ZnO–B₂O₃ Glass–Ceramic Sealant. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 55 (2017) 9-10, 580-584.
17. K. Dychtoń, P. Kwolek: The replacement of chromate by molybdate in phosphoric acid-based etch solutions for aluminium alloys. *Corrosion Engineering Science and Technology*, 53 (2018) 3, 234-240.
18. S. Prymon, A. Bukowska, W. Bukowski, K. Bester, K. Hus, K. Dychtoń, Z. Opiekun: Effect of Fe₃O₄ particles on multi-hollow morphology of poly(HEMA-divinylbenzene-styrene) microspheres prepared by Pickering suspension polymerization. *Express Polymer Letters*, 12 (2018) 12, 1026-1038.
19. P. Kwolek, K. Dychtoń, M. Pytel: Orthophosphoric acid solutions of sodium orthovanadate, sodium tungstate, and sodium molybdate as potential corrosion inhibitors of the Al₂Cu intermetallic phase. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 23 (2019) 11, 3019-3029.
20. M. Drajewicz, M. Pytel, K. Dychtoń: The new idea for modification of the surface area of silicate glass. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 138 (2019) 6, 4223-4228.
21. Ł. Kolek, M. Massalska-Arodź, K. Adrjanowicz, T. Rozwadowski, K. Dychtoń, M. Drajewicz, P. Kula: Molecular dynamics and cold crystallization process in a liquid-crystalline substance with para-, ferro- and antiferro-electric phases as studied by dielectric spectroscopy and scanning calorimetry. *Journal of Molecular Liquids*, 297 (2020).

Istotnym jest również fakt, że Doktorant brał udział w sześciu konferencjach: 1th Conference on Calorimetry and Thermal Analysis (2012), Modern Steels and Iron Alloys Conference (2016), 7th Kurt-Schwabe-Symposium (2016), 2nd ALD Symposium on Technologies and Equipment for Aircraft Engine Components (2016), Modern Steels and Iron Alloys Conference (2018), 13th Conference on Calorimetry and Thermal Analysis of the Polish Society of Calorimetry and Thermal Analysis (2018).

Moim zdaniem treść rozprawy stanowi zamkniętą całość, a postawione cele zostały w pełni zrealizowane. Rozprawa jest napisana poprawnym językiem i posiada starannie opracowaną szatę graficzną oraz stojącą na bardzo wysokim poziomie dokumentację z badań własnych. Czasopisma naukowe, w których zostały opublikowane poszczególne części pracy są tematycznie zgodne z zagadnieniami prezentowanymi w doktoracie. Należy zaznaczyć, że prace opublikowane w w/w czasopismach zostały już recenzowane i ocenione pozytywnie. Po zapoznaniu się z tym pracami również oceniam je jako bardzo dobre. Według mnie przedstawiona rozprawa doktorska jest bardzo wartościowa i na pewno stanowi podstawę do dalszych badań naukowych zarówno dla Doktoranta jak i innych badaczy.

Podsumowując stwierdzam, że przedłożona do recenzji praca doktorska „MODELOWANIE PROCESU NAWĘGLANIA PRÓŻNIOWEGO - MORFOLOGIA MIKROSTRUKTURY I WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY WIERZCHNIEJ KÓŁ ZĘBATYCH ZE STALI AISI 9310” przygotowana przez mgr inż. Kamila Dychtonia pod opieką prof. dr hab. Bartłomieja Wierzyby oraz dr inż. Przemysława Kwołka spełnia w mojej opinii wymogi ustawy "o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki", w związku z czym wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Inżynierii Materiałowej Politechniki Rzeszowskiej. Chciałbym jednocześnie zaznaczyć, że złożoność rozwiązane problemu naukowego, szeroki, dobrze zaplanowany zakres badań, rzetelność w jego realizacji oraz liczący się dorobek naukowy są podstawą do wyróżnienia tej pracy.

Koszalin, 05.01.2021

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Rokosz

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY
75-620 Koszalin, ul. Raclawicka 15-17
tel. 94 347 84 38, fax 94 342 67 53

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamila Dychtonia