

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Rokosz
Politechnika Koszalińska
ul. Raclawicka 15-17, PL 75-620 Koszalin
tel. 94 3478 354, e-mail: rokosz@tu.koszalin.pl

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Agnieszki Żyry

pt. "Wpływ zewnętrznego chłodzenia przedmiotu obrabianego na efektywność obróbki elektroerozyjnej w gazie"

Podstawę opracowania recenzji stanowi pismo Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej prof. dr hab. inż. Jerzego A. Śładka z dnia 27 kwietnia 2022. Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pod tytułem "Wpływ zewnętrznego chłodzenia przedmiotu obrabianego na efektywność obróbki elektroerozyjnej w gazie" przygotowana przez mgr inż. Agnieszkę Żyrę. Promotorem rozprawy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Sebastian Skoczypiec oraz promotorem pomocniczym dr inż. Rafał Bogucki

W obecnych czasach trudnoskrawalne stopy na bazie niklu i tytanu są wykorzystywane w gałęziach przemysłu takich jak: lotnictwo, przemysł kosmiczny, medyczny, samochodowy, czy też energetyczny. Jednakże ich własności powodują, że ich konwencjonalna obróbka jest zarówno trudna, jak i kosztochłonna. Z tego względu korzysta się z niekonwencjonalnych metod, których jednym z przedstawicieli jest obróbka elektroerozyjna (EDM). Należy zaznaczyć, że pomimo szeregu zalet obróbki EDM jedną z jej największych wad jest negatywny wpływ na środowisko naturalne przy obróbce w dielektrykach ciekłych, a w szczególności w przypadku stosowania najpowszechniej wykorzystywanych dielektryków

węglowodorowych. Jednakże szansą na ograniczenie negatywnego wpływu obróbki EDM na środowisko naturalne i minimalizację negatywnego wpływu na operatora obrabiarki jest stosowanie dielektryków gazowych. W ocenianej rozprawie doktorskiej podjęto się obróbki elektroerozyjnej w dielektryku gazowym, z przeprowadzeniem badań nad wpływem zewnętrznego chłodzenia przedmiotu obrabianego na efektywność obróbki elektroerozyjnej w gazie.

Przygotowana rozprawa doktorska o objętości 155 stron, zawierająca 104 rysunków i 35 tabel została podzielona na sześć rozdziałów poprzedzonych wykazem ważniejszych skrótów i oznaczeń. Pracę podzielono dodatkowo na część teoretyczną (rozdziały od pierwszego do drugiego) oraz na badawczą (rozdziały od trzeciego do szóstego). Pracę zakończono 117 pozycjami literaturowymi, które zostały poprawnie zacytowane w dysertacji oraz streszczeniem w języku polskim i angielskim.

W rozdziale pierwszym, który jest wprowadzeniem, uzasadniono wybór tematu pracy. Natomiast w rozdziale drugim opisano teoretyczne podstawy obróbki elektroerozyjnej EDM, procesy zachodzące podczas tej obróbki, jak i wpływ użycia tej techniki na środowisko naturalne. Dodatkowo bardzo szczegółowo scharakteryzowano obróbkę elektroerozyjną w gazie oraz zaprezentowano wnioski z analizy literatury środowisko. W rozdziale trzecim określono cel i zakres pracy, a w czwartym przedstawiono metody pomiarowe i narzędzia badawcze oraz stanowiska badawcze użyte w trakcie przygotowywania pracy. W kolejnym czwartym rozdziale przedstawiono opis metod pomiarowych i narzędzi badawczych, stanowisk badawczych oraz parametrów i warunków obróbki stosowanych w poszczególnych etapach badań wstępnych oraz badań właściwych. W ostatnim, szóstym rozdziale Doktorantka przedstawia wnioski poznawcze, użyteczne oraz rozwojowe.

Moim zdaniem treść rozprawy stanowi zamkniętą całość, a postawione cele zostały w pełni zrealizowane. Rozprawa jest napisana poprawnym technicznie

językiem i posiada starannie opracowaną szatę graficzną oraz stojącą na bardzo wysokim poziomie dokumentację z badań własnych. Według mnie przedstawiona rozprawa doktorska jest bardzo wartościowa i na pewno stanowi podstawę do dalszych badań naukowych zarówno dla Doktorantki jak i innych badaczy.

Reasumując należy zaznaczyć, że do istotnych osiągnięć Doktorantki należą:

- Wykazanie, że zewnętrzne chłodzenie przedmiotu obrabianego wodą dejonizowaną podczas obróbki elektroerozyjnej w dwutlenku węgla umożliwia przeprowadzenie obróbki tytanu Grade 2 z zadanymi wybranymi parametrami wejściowymi, co było niemożliwe bez zewnętrznego chłodzenia, biorąc pod uwagę nieakceptowalnie niską wydajność obróbki, przekładającą się na wzrost kosztów obróbki i nakładu czasu pracy obrabiarki i operatora.
- Wykazanie, że zastosowanie zewnętrznego chłodzenia przedmiotu obrabianego pozwoliło zredukować zużycie elektrody roboczej, chropowatość powierzchni oraz grubość warstwy zmienionej cieplnie, pomimo mniejszej wydajności obróbki niż w przypadku frezowania stopu Inconel 625 w samym gazie.
- Wykazanie, że w wariacie frezowania elektroerozyjnego w gazie kluczowe jest również przewidywanie i kompensacja zużycia elektrody roboczej. Nie było to przedmiotem badań, stąd też w wyniku zużycia elektrody roboczej otrzymano tak bardzo różniące się między sobą kształty rowków.
- Wykazanie, że wielkościami wejściowymi, które mają największy wpływ na wydajność frezowania EDM w analizowanych przypadkach są natężenie prądu, czas impulsu oraz ciśnienie gazu dostarczanego do strefy obróbki.
- Wykazanie, że wraz ze wzrostem natężenia prądu, ciśnienia gazu oraz długości czasu impulsu w przypadku tytanu Grade 2 i skrócenia czasu impulsu w przypadku stopu Inconel 625 wydajność obróbki elektroerozyjnej wzrasta.
- Wykazanie, że natężenie prądu ma istotny wpływ na zużycie elektrody roboczej, wzrost natężenia powoduje większe zużycie elektrody roboczej.

- Wykazanie, że prędkość elektrody roboczej jest uzależniona od natężenia prądu, czasu impulsu oraz ciśnienia gazu dostarczanego do strefy obróbki.
- Wykazanie, że Największy wpływ na parametry chropowatości ma natężenie prądu, wraz ze wzrostem natężenia wzrasta chropowatość powierzchni.
- Wykazanie, że frezowanie EDM w dwutlenku węgla bez zcPO oraz z zcPO przy zachowaniu pracy wysoko wydajnego wyciągu jest przyjazne dla środowiska naturalnego, nie powoduje jego zanieczyszczenia ani nie oddziałuje negatywnie na operatora obrabiarki.
- Wykazanie, że rodzaj poddawanego frezowaniu elektroerozyjnemu w dwutlenku węgla ma bardzo istotne znaczenie dla przebiegu procesu obróbki, uzyskania wydajności obróbki, zużycia elektrody roboczej, prędkości elektrody roboczej, a także chropowatości powierzchni.

Doktorantka sformułowała również wnioski utylitarne, do których zaliczyła:

- Prowadzenie obróbki w dwutlenku węgla z zastosowaniem zewnętrznego chłodzenia przedmiotu obrabianego może przyczynić się do poprawy stabilności frezowania EDM, poprawy jakości, także minimalizować zagrożenia związane z wybuchem.
- Zastosowanie zewnętrznego chłodzenia przedmiotu obrabianego w zastosowaniach przemysłowych pozwoli zminimalizować negatywny wpływ obróbki EDM na środowisko oraz zdrowie operatora oraz pozwoli zredukować koszty zarówno obróbki jak i utylizacji zużytych dielektryków ciekłych, w szczególności węglowodorowych.
- W przypadku frezowania EDM różnych materiałów miedzianą elektrodą roboczą w dwutlenku węgla lub w dwutlenku węgla z zcPO wodą dejonizowaną, istnieje konieczność sprawdzenia biegunowości elektrod, w której obróbka przebiega w sposób wydajny z jednoczesnym zachowaniem pożądanym pozostałych parametrów wielkości wyjściowych (wydajność obróbki, zużycie elektrody roboczej, jakość powierzchni), jako że charakter

powstawania wyładowań i obróbki w tych wariantach różni się znacząco od obróbki EDM w ciekłych dielektrykach.

- Grubość szczeliny roboczej podczas frezowania EDM ma znaczący wpływ na przebieg wyładowań elektrycznych. Kontrola i dostosowywanie grubości szczeliny roboczej do rodzaju obrabianego materiału, rodzaju elektrody roboczej i pozostałych parametrów wielkości wejściowych procesu, będzie miało znaczący wpływ na wielkości parametrów wyjściowych (różnice w wielkości, kształcie i lokalizacji powstających kraterów podczas wyładowania).
- Wydajność badanego procesu jest bardzo niska, więc determinuje to obszar zastosowania (mikroobróbka). W tym zastosowaniu korzyści wynikające z zastosowania chłodzenia, czyli: lepsze właściwości warstwy wierzchniej (chropowatość, mniejsze zmiany cieplne) i niższe zużycie elektrody roboczej przekładają się na ułatwienie procesu projektowania obróbki (występujące mniejsze zużycie elektrody roboczej jest łatwiej kompensować) oraz determinują obszar zastosowania (lepsze właściwości warstwy wierzchniej).

Na wyróżnienie zasługuje również osiągnięcie, którym jest współautorstwo osiemnastu publikacji naukowych, które są opublikowane w renomowanych czasopismach naukowych oraz piętnastu wystąpieniach konferencyjnych zaprezentowanych poniżej co jest wynikiem wyróżniającym i ponadprzeciętnym.

1. **Agnieszka Żyra**, Sebastian Skoczypiec, Primary research on influence of workpiece cooling on efficiency of Inconel's 625 alloy electrodischarge milling in carbon dioxide, *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2235, 1-8; Mat. konf.: The 12th Asia Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ACMAE 2021), konferencja online, 29-31.12.2021. – doi: 10.1088/1742-6596/2235/1/012040. – ISSN 1742-6596.
2. **Agnieszka Żyra**, Sebastian Skoczypiec, Badania wstępne obróbki elektroerozyjnej w gazie z zastosowaniem dodatkowego chłodzenia przedmiotu obrabianego, *Zarządzanie Przedsiębiorstwem*, 2019, Vol. 22(1), 25-32; doi: 10.25961/ent.manag.22.01.04. – ISSN 1643-4773.
3. **Agnieszka Żyra**, Sebastian Skoczypiec, Effects of machining conditions on the accuracy of electro-discharge milling in carbon-based dielectric, *Proceedings of the 22nd International ESAFORM Conference on Material Forming*, 8-10 May

- 2019, Vitoria-Gasteiz, Spain / eds. Lander Galdos [et al.]. - [Melville] : AIP Publishing, 2019. - (AIP Conference Proceedings, ISSN 1551-7616 ; 2113), 1-6. - doi: 10.1063/1.5112655. - ISBN 978-0-7354-1847-9.
4. **Agnieszka Żyra**, Wojciech Bizoń, Sebastian Skoczypiec, Primary research on dry electrodischarge machining with additional workpiece cooling, XIII International Conference Electromachining, Bydgoszcz, Poland, 9-11 May 2018 / eds. Tomasz Paczkowski, Robert Polasik. - Melville : AIP Publishing, 2018. - (AIP Conference Proceedings, ISSN 1551-7616 ; 2017). - S. 020034-1-020034-8. - doi: 10.1063/1.5056297. - ISBN 978-0-7354-1735-9.
 5. **Agnieszka Żyra**, Rafał Bogucki, Sebastian Skoczypiec, Austenitic steel surface integrity after EDM in different dielectric liquids = Stan powierzchni stali austenitycznej po obróbce EDM w różnych ciekłych dielektrykach, Technical Transactions, 2017, 114(12), 231-242; doi:10.4467/2353737XCT.17.222.7765. - ISSN 0011-4561.
 6. **Agnieszka Żyra**, Elektroerozyjne drażnienie żarowytrzymałych stopów niklu, Zarządzanie Przedsiębiorstwem, 2016, 2, 40-46; ISSN 1643-4773.
 7. **Agnieszka Żyra**, Sebastian Skoczypiec. Badania obróbki elektroerozyjnej żarowytrzymałych stopów niklu Inconel 718 oraz Inconel 625, Stal, Metale & Nowe Technologie, 2016, 3-4, 46-50; ISSN 1895-6408.
 8. **Agnieszka Żyra**, Sebastian Skoczypiec, Wpływ dielektryka na cechy strukturalne i morfologiczne stali austenitycznej po obróbce elektroerozyjnej, Mechanik, 2016, 1, 26-28; doi: 10.17814/mechanik.2016.1.2. - ISSN 0025-6552.
 9. **Agnieszka Żyra**, Rafał Bogucki, Anna Podolak-Lejtas, Sebastian Skoczypiec, Research on influence of heat treatment scheme of Ti10V2Fe3Al alloy on technological surface integrity after electrodischarge machining, Journal of Manufacturing Processes, 2021, 62, 47-57; doi: 10.1016/j.jmapro.2020.12.038. - ISSN 1526-6125.
 10. Sebastian Skoczypiec, **Agnieszka Żyra**, Spark erosion based manufacturing of biomedical components, Spark Erosion Machining. MEMS to Aerospace / eds. Neelesh Kumar Jain, Kapil Gupta. - Boca Raton [etc.] : CRC Press Taylor & Francis Group, 2020. - S. 53-75. - ISBN 978-149-878-793-2.
 11. Joanna Krajewska-Śpiwak, **Agnieszka Żyra**, An overview of potential application of acoustic emission in machining processes, 10th International Conference on Engineering, Project, and Production Management [online] / eds. Kriengsak Panuwatwanich, Chien-Ho Ko. - Singapore : Springer, 2020. - (Lecture Notes in Mechanical Engineering : LNME, ISSN 2195-4364), 633-643. - doi: 10.1007/978-981-15-1910-9_52. - ISBN 978-981-15-1910-9.
 12. **Agnieszka Żyra**, Rafał Bogucki, Sebastian Skoczypiec, An influence of titanium alloy Ti10V2Fe3Al microstructure on the electrodischarge process, Archives of Metallurgy and Materials, 2019, 64(3), 1005-1010. - doi: 10.24425/amm.2019.129487. - ISSN 2300-1909.

13. Rafał Bogucki, Marcin Basiaga, **Agnieszka Żyra**, The evaluation of resistance to cracking of Ti10V2Fe3Al alloy characterized by different morphology and volume fraction of α -phase precipitates, Archives of Metallurgy and Materials, 2019, 64(2), 759-764; doi: 10.24425/amm.2019.127610. – ISSN 2300-1909.
14. Sebastian Skoczypiec, Wojciech Bizoń, **Agnieszka Żyra**, Research on electrodischarge drilling of polycrystalline diamond with increased gap voltage, Proceedings of the 21st International ESAFORM Conference on Material Forming, 23-25 April 2018, Palermo, Italy] / eds. Livan Fratini [et al.]. – Melville : AIP Publishing, 2018. – (AIP Conference Proceedings, ISSN 1551-7616 ; 1960), 100015-1-100015-6; doi: 10.1063/1.5034955. – ISBN 978-0-7354-1663-5.
15. **Agnieszka Żyra**, Sebastian Skoczypiec, Wybrane zagadnienia obróbki elektroerozyjnej stopów tytanu, Stal, Metale & Nowe Technologie, 2018, 3-4. 81-84; ISSN 1895-6408.
16. **Agnieszka Żyra**, Ocena możliwości wykorzystania sygnału emisji akustycznej w obróbce elektroerozyjnej, V Warsztaty Naukowe dla doktorantów w dyscyplinie Inżynieria Produkcji [USB] / red. Michał Pałęga, Marcin Kwapisz. Częstochowa : Wydaw. Wydziału Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów Politechniki Częstochowskiej, 2017. (Monografie-Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów, ISSN 2391-632X;72), 156-165; ISBN 978-83-63989-56-9.
17. **Agnieszka Żyra**, Ocena możliwości obróbki szafiru wyładowaniami elektrycznymi w elektrolicie (ECDM) = Investigation of the possibility of sapphire electrochemical discharge machining (ECDM, Episteme, 2016, 33, 173-187; ISSN 1895-4421.
18. **Agnieszka Żyra**, Ocena możliwości zastosowania obróbki elektroerozyjnej do kształtowania implantów ortopedycznych i narzędzi medycznych, Technologie – Bezpieczeństwo – Środowisko : innowacje w procesach technologicznych : monografia / red. nauk. Wioletta M. Bajdur ; Politechnika Częstochowska. Wydział Zarządzania. – Częstochowa, Wydaw. Wydziału Zarządzania Politechniki Częstochowskiej, 2016. 113-126; ISBN 978-83-65179-72-2.
19. **Agnieszka Żyra**, przedstawienie posteru pt. Electrodischarge machining of nickel based superalloys na konferencji International Scientific Conference Development in Machining DIM'2016, Kraków 2016.
20. **Agnieszka Żyra**, wystąpienie na konferencji naukowej "Nauka i przemysł 2016, referat pt. Ocena możliwości obróbki szafiru wyładowaniami elektrycznymi w elektrolicie, grudzień 2016.
21. **Agnieszka Żyra**, wystąpienie na konferencji IV Warsztaty Naukowe dla Doktorantów w dyscyplinie Inżynieria Produkcji 23-24 czerwca 2016, temat wystąpienia: Elektroerozyjne drażnienie żarowytrzymałych stopów niklu.
22. **Agnieszka Żyra**, wystąpienie na konferencji International Workshop on Surface Engineering, Ostrava 27-29.06.2016, temat wystąpienia : The effect of the

- dielectric liquid type on the surface layer properties of the austenitic steel after electrodischarge machining.
23. **Agnieszka Żyra**, wystąpienie na konferencji V Warsztaty Naukowe dla Doktorantów w dyscyplinie Inżynieria Produkcji 29-30 czerwca 2017, temat wystąpienia: Ocena możliwości wykorzystania sygnału emisji akustycznej w obróbce elektroerozyjnej.
 24. **Agnieszka Żyra**, wystąpienie podczas Szkoły Naukowej Obróbek Erozyjnych, Warszawa 12 grudnia 2017, Wydział WIP Politechniki Warszawskiej, temat wystąpienia: Wykorzystanie sygnału emisji akustycznej w obróbce elektroerozyjnej.
 25. **Agnieszka Żyra**, wystąpienie na międzynarodowej Konferencji Electromachining EM\ '2018 9-11 maja 2018 w Bydgoszczy, temat wystąpienia: Primary research on dry electrodischarge machining with additional workpiece cooling.
 26. **Agnieszka Żyra**, wystąpienie na konferencji International Workshop on Surface Engineering, Komarno 19-22.06.2018, temat wystąpienia : Potential applications of acoustic's emission signal in the electrodischarge machining technology.
 27. **Agnieszka Żyra**, wystąpienie na konferencji VI Warsztaty Naukowe dla Doktorantów w dyscyplinie Inżynieria Produkcji, Łągów 28-29 czerwca 2018, temat wystąpienia: Badania wstępne obróbki elektroerozyjnej w gazie z zastosowaniem dodatkowego chłodzenia przedmiotu obrabianego.
 28. **Agnieszka Żyra**, wystąpienie podczas konferencji Metale lekkie 2018, 17-19.10.2018 r., temat wystąpienia: An influence of titanium alloy Ti10V2Fe3Al microstructure on the electrodischarge process efficiency.
 29. **Agnieszka Żyra**, wystąpienie podczas Szkoły Naukowej Obróbek Erozyjnych, Kraków 28 listopada 2018, Wydział Mechaniczny Politechniki Krakowskiej, temat wystąpienia: Wpływ mikrostruktury stopu tytanu Ti10V2Fe3Al na efektywność procesu obróbki elektroerozyjnej.
 30. **Agnieszka Żyra**, udział z referatem i publikacją w konferencji 22nd International Conference on Material Forming (ESAFORM) 2019, która odbyła się w dniach 8-10 maja 2019 roku w Vitoria - Gasteiz (Hiszpania) - w ramach programu PROM, temat wystąpienia Effects of machining conditions on the accuracy of electrodischarge milling in carbon-based dielectric.
 31. **Agnieszka Żyra**, primary research on influence of workpiece cooling on efficiency of Inconel's 625 alloy electrodischarge milling in carbon dioxide, Best Presentation Award in Session 2: Metal Processing and Manufacturing Technology 2021 8th International Conference on Mechanical, Materials and Manufacturing 2021, 3rd International Conference on Trends in Mechanical and Aerospace September 25-27, 2021 | Virtual Conference.

32. **Agnieszka Żyra**, Selected Apects of Inconel Alloy Green EDM Machining Development, 11th International Conference on Engineering, Project, and Production Management EPPM 2021, 19-21 wrzesień 2021.
33. **Agnieszka Żyra**, Selected aspects of surface integrity of Inconel 625 alloy after dry EDM in carbon dioxide, ESAFORM 2022 Conference Braga, 27-29 kwietnia 2022.

Podsumowując stwierdzam, że przedłożona do recenzji praca doktorska "Wpływ zewnętrznego chłodzenia przedmiotu obrabianego na efektywność obróbki elektroerozyjnej w gazie" przygotowana przez mgr inż. Agnieszkę Żyrę 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 Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej. Chciałbym jednocześnie zaznaczyć, że złożoność rozwiązanego problemu naukowego, szeroki, dobrze zaplanowany zakres badań, rzetelność w jego realizacji oraz liczący się dorobek naukowy są podstawą do wyróżnienia tej pracy.

Rokosz K.

Koszalin, 21.06.2022

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Rokosz