PODPIS ZAUFANY
MARCIN DOMINIK
KASZUBA
30.05.2022 14:46:21 [GMT+2]
Dokument podpisany elektronicznie
podpisem zaufanym

AUTOREFERAT

Załącznik nr 3 do wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego

dr inż. Marcin Kaszuba

Politechnika Wrocławska
Wydział Mechaniczny
Katedra Obróbki Plastycznej, Spawalnictwa i Metrologii
ul. Łukasiewicza 7/9, 50-371 Wrocław

Spis treści

1. Dane wnioskodawcy 3

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe 3

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych 4

4. Omówienie osiągnięcia naukowego 4

4.1 Tytuł osiągnięcia naukowego 4

4.2 Cykl publikacji powiązanych tematycznie 4

4.3 Omówienie celu naukowego wyżej wymienionych prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania 9

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej, w szczególności zagranicznej. 54

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę. 59

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej. 63

8. Sumaryczne zestawienie kryteriów osiągnięć wnioskodawcy wg Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 01.09.2011 r. w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego 64

1. Dane wnioskodawcy

Imię i nazwisko:
Marcin Kaszuba
Stopień naukowy: doktor nauk technicznych
Dyscyplina: Budowa i Eksploatacji Maszyn

Miejsce i adres zatrudnienia:
Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny
Katedra Obróbki Plastycznej, Spawalnictwa i Metrologii
ul. Ignacego Łukasiewicza 7/9
50-371 Wrocław
tel. +48 71 320 21 75

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

- **Dyplom doktora nauk technicznych** w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn. 2013 r. Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny.

Tytuł rozprawy doktorskiej: ***Badania możliwości zwiększenia trwałości narzędzi w procesie kucia precyzyjnego.***

Promotor: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Gronostajski

Recenzenci: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Pater

Prof. dr hab. inż. Jerzy Adam Smolik

- **Dyplom magistra inżyniera w zakresie Technologia Maszyn. 2008r.**

Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny. Kierunek studiów: Mechanika i Budowa Maszyn. Tytuł Pracy dyplomowej: ***Analiza procesu kucia obudów przegubów homokinetycznych***

Promotor: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Gronostajski

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

Zatrudnienie w jednostkach naukowych:

01.2010 – 10.2012 r.	Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Stanowisko: starszy referent techniczny
12.2012 – 10.2013 r.	Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Stanowisko: asystent naukowy
10.2013 – obecnie	Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Katedra Obróbki Plastycznej, Spawalnictwa i Metrologii Stanowisko: adiunkt naukowo-dydaktyczny

Pełnione funkcje:

01.2017 – obecnie	Zastępca Kierownika Katedry Obróbki Plastycznej, Spawalnictwa i Metrologii

4. Omówienie osiągnięcia naukowego

4.1 Tytuł osiągnięcia naukowego

Jako osiągnięcie naukowe, uzyskane po otrzymaniu stopnia doktora, stanowiące podstawę do wszczęcia postępowania habilitacyjnego, wynikające z art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 z późn. zm.) wskazuję cykl publikacji powiązanych tematycznie, na który składa się siedemnaście (**17**) artykułów naukowych opublikowanych w latach 2009 – 2020, pt.:

„Metody poprawy trwałości narzędzi kuźniczych"

4.2 Cykl publikacji powiązanych tematycznie

W skład rozważanego cyklu publikacji wchodzą następujące prace:

1. **[H1]** Zbigniew Gronostajski, **Marcin D. Kaszuba**, Marek Hawryluk, Maciej Zwierzchowski: A review of the degradation mechanisms of the hot forging tools. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2014, vol. 14, nr 4, s. 528-539, ISSN: 1644-9665

http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2014.07.002 (IF: **01.793**, MNiSW z 2014: **025**)
Wkład: Mój wkład polegał na merytorycznym przygotowaniu koncepcji artykułu oraz na kompleksowej analizie uzyskanych wyników. Brałem aktywny udział w badaniach doświadczalnych i prowadziłem badania laboratoryjne dotyczące identyfikacji mechanizmów niszczących występujących w narzędziach kuźniczych. Jestem również autorem większości rysunków oraz fotografii przedstawionych w pracy. Ponadto odpowiedzialny byłe za przygotowanie treści artykułu.

2. **[H2]** Zbigniew Gronostajski, **Marcin D. Kaszuba**, Sławomir Polak, Maciej Zwierzchowski, Adam Niechajowicz, Marek Hawryluk: The failure mechanisms of hot forging dies. Materials Science and Engineering. A, Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing. 2016, vol. 657, s. 147-160, ISSN: 0921-5093
http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2016.01.030 (IF: **03.094**, MNiSW z 2016: **035**)
Wkład: Mój wkład polegał na opracowaniu koncepcji artykułu oraz na kompleksowej analizie uzyskanych wyników w aspekcie wpływy wyznaczonych parametrów pracy narzędzia na zjawiska występujące w warstwie wierzchniej. Byłem odpowiedzialny za przeprowadzenie badań i opracowanie wyników dotyczących, skanowania 3D, obserwacji mikroskopowych powierzchni oraz pomiarów mikrotwardości.

3. **[H3]** Marek Hawryluk, Paweł Widomski, **Marcin D. Kaszuba**, Jakub J. Krawczyk: Development of new preheating methods for hot forging tools based on industrial case studies and numerical modeling. Metallurgical and Materials Transactions. A. Physical Metallurgy and Materials Science. 2020, vol. 51, s. 4753-4764, ISSN: 1073-5623; 1543-1940
http://dx.doi.org/10.1007/s11661-020-05893-z (IF: **02.050**, MNiSW z 2019-2020: **200**)
Wkład: Mój wkład polegał na przeprowadzeniu badań i opracowaniu uzyskanych wyników dotyczących pomiaru temperatury narzędzi podczas nagrzewania wstępnego. Byłem również odpowiedzialny za wyznaczenie warunków brzegowych niezbędnych do przeprowadzenia modelowania numerycznego.

4. **[H4]** Joanna Wollmann, Andrzej Dolny, **Marcin D. Kaszuba**, Zbigniew Gronostajski, Maik Gude: Methods for determination of low-cycle properties from monotonic tensile tests of 1.2344 steel applied for hot forging dies. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019, vol. 102, nr 9-12, s. 3357–3367, ISSN: 0268-3768
http://dx.doi.org/10.1007/s00170-019-03349-2 (IF: **02.633**, MNiSW z 2019-2020: **100**)
Wkład: Moim wkładem w przygotowaniu artykułu było opracowanie koncepcji pracy w zakresie korelacji charakterystyk niskocyklowych stali 1.2344 wyznaczonych w warunkach laboratoryjnych z wynikami uzyskanymi w warunkach przemysłowych. Ponadto prowadziłem badania w warunkach przemysłowych oraz analizowałem mechanizmy niszczące występujące w narzędziach kuźniczych.

5. **[H5]** Zbigniew Gronostajski, Paweł Widomski, **Marcin D. Kaszuba**, Maciej Zwierzchowski, Sławomir Polak, Łukasz Piechowicz, Jagoda Kowalska, Marcin Długozima: Influence of the phase structure of nitrides and properties of nitrided layers on the durability of tools applied in hot forging processes. Journal of Manufacturing Processes. 2020, vol. 52, s. 247-262, ISSN: 1526-6125; 2212-4616

https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.037 (IF: **04.086**, MNiSW z 2019-2020: **140**)
Wkład: Mój wkład w przygotowaniu artykułu polegał na opracowanie koncepcji artykułu oraz naukowo-merytorycznym przygotowaniu i opracowaniu wniosków. W zakresie badań przedstawionych w artykule, prowadziłem obserwacje SEM zmian w warstwie wierzchniej narzędzi dla różnych wariantów warstwy azotowanej.

6. **[H6]** Marek Hawryluk, Zbigniew Gronostajski, **Marcin D. Kaszuba**, Sławomir Polak, Paweł Widomski, Jacek Ziemba, Jerzy Smolik: Application of selected surface engineering methods to improve the durability of tools used in precision forging. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017, vol. 93, nr 5-8, s. 2183-2200, ISSN: 0268-3768 http://dx.doi.org/10.1007/s00170-017-0677-3 (IF: **02.601**, MNiSW z 2013-2018: **030**)
Wkład: Moim wkładem było opracowanie koncepcji artykułu w zakresie doboru metodyki badawczej dotyczącej analizy skuteczności w poprawie trwałości stempli poddanych różnym wariantom obróbki powierzchniowej. Zaplanowanie testów eksploatacyjnych oraz realizacja badań laboratoryjnych w zakresie obserwacji strukturalnych, sformułowanie wniosków.

7. **[H7]** Marek Hawryluk, Paweł Widomski, Jerzy Smolik, Marcin D. Kaszuba, Jacek Ziemba, Zbigniew Gronostajski: Laboratory and performance studies of anti-wear coatings deposited on nitrided surfaces of tools used in an industrial hot die forging process. Journal of Materials Engineering and Performance. 2017, vol. 26, nr 6, s. 2798-2813, ISSN: 1059-9495
http://dx.doi.org/10.1007/s11665-017-2700-0 (IF: **01.340**, MNiSW z 2013-2018: **020**)
Wkład: Mój wkład polegał na opracowaniu koncepcji artykułu i metodyki badań w zakresie testów eksploatacyjnych narzędzi kuźniczych z warstwami hybrydowymi. Przeprowadziłem również analizę laboratoryjną narzędzi po testach pozwalającą na ocenę stateczności zastosowanych warstw hybrydowych.

8. **[H8]** Marek Hawryluk, Zbigniew Gronostajski, Paweł Widomski, **Marcin D. Kaszuba**, Jacek Ziemba, Jerzy Smolik: Influence of the application of a PN+Cr/CrN hybrid layer on the improvement of the lifetime of hot forging tools. Journal of Materials Processing Technology. 2018, vol. 258, s. 226-238, ISSN: 0924-0136
https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.03.029 (IF: **04.178**, MNiSW z 2013-2018: **040**)
Wkład: Mój wkład polegał na opracowaniu koncepcji artykułu, metodyki badań oraz interpretacji uzyskanych wyników. W zakresie badań odpowiedzialny byłem za przeprowadzenie badań związanych z wyznaczeniem parametrów pracy analizowanego narzędzia w tym modelowanie MES. Ponadto prowadziłem badania laboratoryjne w zakresie obserwacji SEM i pomiarów mikrotwardość warstwy wierzchniej.

9. **[H9]** Marek Hawryluk, Daniel Dobras, **Marcin D. Kaszuba**, Paweł Widomski, Jacek Ziemba: Influence of the different variants of the surface treatment on the durability of forging dies made of Unimax steel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020, vol. 107, s. 4725-4739, ISSN: 0268-3768; 1433-3015

http://dx.doi.org/10.1007/s00170-020-05357-z (IF: **02.633**, MNiSW z 2019-2020: **100**)
Wkład: mój wkład w przygotowaniu artykułu polegał na opracowaniu koncepcji jego oraz na kompleksowej analizie uzyskanych wyników z testów eksploatacyjnych narzędzi po różnych wariantach obróbki. Ponadto zaplanowałem testy eksploatacyjne oraz byłem wykonawcą badań laboratoryjnych w zakresie obserwacji mikroskopowych SEM i LM.

10. **[H10]** Zbigniew Gronostajski, **Marcin D. Kaszuba**, Marek Hawryluk, Marcin Marciniak, Maciej Zwierzchowski, Adam Mazurkiewicz, Jerzy Smolik: Improving durability of hot forging tools by applying hybrid layers. Metalurgija = Metallurgy. 2015, vol. 54, nr 4, s. 687-690, ISSN: 0543-5846
http://pubweb.carnet.hr/metalurg/arhiva/994 (MNiSW z 2015: **025**)
Wkład: Mój wkład polegał na przygotowaniu metodyki badań przedstawionych w artykule, organizacja badań eksploatacyjnych, badania laboratoryjne oraz analiza i omówienie uzyskanych wyników, przygotowanie i redakcja tekstu. Badania laboratoryjne, które prowadziłem dotyczyło określenia wielkości zużycia narzędzi przy użyciu skanera 3D oraz obserwacji SEM powierzchni roboczych narzędzi.

11. **[H11]** Marek Hawryluk, Zbigniew Gronostajski, **Marcin D. Kaszuba**, Sławomir Polak, Paweł Widomski, Jerzy Smolik, Jacek Ziemba: Analysis of the wear of forging tools surface layer after hybrid surface treatment. International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2017, vol. 114, s. 60-71, ISSN: 0890-6955
http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.12.010 (IF: **05.106**, MNiSW z 2013-2018: **045**)
Wkład: Moim wkładem w pracy było określenie parametrów technologicznych w analizowanego procesu. Prowadziłem również badania dotyczące identyfikacji zmian w warstwie wierzchniej narzędzi po eksploatacji w szczególności obserwacje mikroskopowe, pomiary zużycia oraz pomiary mikrotwardości. Badania te pozwoliły na ocenę skuteczność zastosowanych warstw hybrydowych na trwałość a następnie sformułowanie wniosków.

12. **[H12]** Zbigniew Gronostajski, **Marcin D. Kaszuba**, Paweł Widomski, Jerzy Smolik, Jacek Ziemba, Marek Hawryluk: Analysis of wear mechanisms of hot forging tools protected with hybrid layers performed by nitriding and PVD coatings deposition. Wear. 2019, vol. 420/421, s. 269-280, ISSN: 0043-1648
https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.01.003 (IF: **04.108**, MNiSW z 2019-2020: **200**)
Wkład: Mój wkład polegał na opracowaniu całościowej koncepcji artykułu oraz metodyki badań. Byłem pomysłodawcą przedstawionych w artykule badań, które dotyczyły oceny skuteczności zastosowanych warstw hybrydowych niezależnie od warunków pracy narzędzia. W ramach prac opracowałem i zaprojektowałem przesłonę, która była stosowana przy nanoszeniu powłok PVD. Zorganizowałem testy eksploatacyjne brałem także udział we wszystkich opisanych w artykule badaniach oraz analizie uzyskanych wyników.

13. **[H13]** Zbigniew Gronostajski, Paweł Widomski, **Marcin D. Kaszuba**, Maciej Zwierzchowski, Marek Hawryluk: Influence of both hardfaced and nitrided layers on the durability of hot forging tools. Surface Innovations. 2018, vol. 6, nr 4/5, s. 301-310, ISSN:

2050-6252; 2050-6260
http://dx.doi.org/10.1680/jsuin.18.00021 (IF: **02.333**, MNiSW z 2013-2018: **025**)
Wkład: Artykuł dotyczy możliwości zastosowania warstw hybrydowej nowej generacji łączącej napawanie i azotowanie. Mój wkład w jego przygotowanie polegał na opracowaniu koncepcji artykułu, metodyki badań oraz analizie i interpretacji uzyskanych wyników. Ponadto brałem czynny udział we wszystkich opisanych w artykule badaniach.

14. **[H14] Marcin D. Kaszuba**, Paweł Widomski, Piotr Białucki, Artur Lange, Bożena Boryczko, Mariusz Walczak: Properties of new-generation hybrid layers combining hardfacing and nitriding dedicated to improvement in forging tools' durability. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2020, vol. 20, art. 78, s. 1-12, ISSN: 1644-9665; 2083-3318
http://dx.doi.org/10.1007/s43452-020-00080-8 (IF: **03.672**, MNiSW z 2019-2020: **140**)
Wkład: W artykule przedstawiono wyniki badań zrealizowanych w ramach projektu pt." Opracowanie innowacyjnej metody zwiększenia trwałości narzędzi kuźniczych przez dobór optymalnych parametrów hybrydowego procesu napawania z azotowaniem wspomagany modelowaniem numerycznym warstwy wierzchniej", którego jestem kierownikiem. Mój wkład w przygotowaniu artykułu polegał na opracowaniu całościowej koncepcji artykułu oraz metodyki badań i kompleksowej analizy uzyskanych wyników. Byłem koordynatorem badań przedstawionych w artykule, co ze względu na współpracę z innymi jednostkami (AGH i Politechniką Lubelską) wymagało dodatkowego zaangażowania.

15. **[H15]** Paweł Widomski, Zbigniew Gronostajski, **Marcin D. Kaszuba**, Jagoda Kowalska, Mariusz Pawełczyk: The laboratory tests of hybrid layers combining hardfacing and nitriding dedicated to increase the durability of forging tools in hot forging processes. Welding Technology Review = Przegląd Spawalnictwa. 2019, vol. 91, nr 2, s. 1-6, ISSN: 0033-2364; 2449-7959 http://dx.doi.org/10.26628/wtr.v91i2.1020 (MNiSW: **005**)
Wkład: Moim wkładem w przygotowanie artykułu było opracowanie koncepcji artykułu w zakresie doboru metodyki badawczej dla warstw azotowanych, przeprowadzenie badań, preparatyka oraz analiza mikroskopowa. Opracowanie wniosków w zakresie dotyczących właściwości analizowanych warstw azotowanych w kontekście zastosowania w narzędziach kuźniczych.

16. **[H16] Marcin D. Kaszuba**, Maciej Zwierzchowski, Artur Lange: Napawanie regeneracyjne narzędzi do kucia na gorąco kołnierzy z szyjką = Hardening tools for hot forging flanges with a neck / Marcin Kaszuba, Maciej Zwierzchowski, Artur Lange. Welding Technology Review = Przegląd Spawalnictwa. 2017, vol. 89, nr 7, s. 31-36, ISSN: 2449-7959; 0033-2364
(MNiSW z 2013-2018: **009**)
Wkład: Mój wkład polegał na merytorycznym przygotowaniu koncepcji artykułu oraz na przeprowadzeniu badań doświadczalnych oraz badań laboratoryjnych dotyczących oceny trwałości analizowanego narzędzi po regeneracji przez napawanie a następnie poddanego testom eksploatacyjnym.

17. **[H17] Marcin D. Kaszuba**: The application of a new, innovative, hybrid technology combining hardfacing and nitriding to increase the durability of forging tools. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2020, vol. 20, nr 4, art. 122, s. 1-13, ISSN: 1644-9665; 2083-3318
http://dx.doi.org/10.1007/s43452-020-00122-1 (IF: **03.672**, MNiSW z 2019-2020: **140**)
Wkład: Artykuł jednoautorski.

4.3 Omówienie celu naukowego wyżej wymienionych prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

4.3.1 Wprowadzenie – motywacja do podjętych działań naukowych

Trwałość narzędzi stosowanych w przemysłowych procesach wytwarzania jest jednym głównych czynników decydujących o efektywności danego procesu produkcyjnego. Szczególną grupę procesów wytwarzania cechujących się niską trwałości narzędzi stanowią procesy kształtowania plastycznego w tym procesy kucia matrycowego na gorąco, gdzie stosowane narzędzia zwykle są bardzo skomplikowane przez co drogie w wykonaniu, co sprawia, że w niektórych przypadkach koszty narzędzi stanowią nawet 30% całkowitych kosztów produkcji.

Niska trwałość narzędzi kuźniczych wynika z ciężkich warunków pracy, na jakie narzędzia te są narażone podczas eksploatacji. W procesach kucia matrycowego na gorąco narzędzia są narażone na działanie trzech głównych czynników powodujących ich niszczenie, tj. intensywne szoki cieplne, cyklicznie zmienne obciążenie mechaniczne oraz intensywne tarcie [**H1–H4**]. W efekcie działania wymienionych czynników w trakcie eksploatacji w obszarze warstwy wierzchniej występują zjawiska niszczące. Prowadzone dotychczas badania wskazują, że w warstwie wierzchniej matryc występują następujące mechanizmy zużycia: zużycie ścierne, zmęczenie cieplno-mechaniczne, odkształcenie plastyczne, pękanie zmęczeniowe, zużycie adhezyjne i utlenianie [**H1**].

Trwałość narzędzi stosowanych w procesach kucia stanowi od dawna przedmiot badań wielu ośrodków naukowych. Badania te dotyczą m. in. mechanizmów zużycia niszczących powierzchnię i warstwę wierzchnią narzędzi oraz różnorodnych metod zwiększających odporność na zużycie. W ostatnich latach obserwuje się wyraźny wzrost zainteresowania tą tematyką.

W praktyce przemysłowej stosowanych jest wiele metod poprawy trwałości narzędzi kuźniczych. Działania mające na celu poprawę trwałości narzędzia, prowadzone są najczęściej w trzech głównych kierunkach. W pierwszym brane są pod uwagę aspekty technologiczne i konstrukcyjne procesu kucia. Największe znaczenie ma optymalizacja konstrukcji matryc oraz kształtów wykrojów. Modyfikacje kształtu matryc są ograniczone z uwagi na fakt, że wykrój wykańczający matrycy musi odzwierciedlać gotową odkuwkę, której kształt nie może ulec zmianie bez konsultacji z odbiorcą. Dlatego modyfikacja dotyczy zazwyczaj wykrojów wstępnych oraz pomocniczych, gdzie poprzez zmianę kształtu uzyskuje się równomierne rozłożenie odkształcenia i sił kształtujących pomiędzy poszczególnymi operacjami w celu odciążenia najbardziej narażonych na zużycie narzędzi. Dąży się również do tego, aby zużywanie się wykrojów wstępnych i wykańczających następowało w tym samym czasie, szczególnie, jeśli znajdują się w tej samej, wielowykrojowej matrycy jak ma to miejsce na młotach. Drugi kierunek dotyczy modyfikacji

materiału, z którego wykonane są narzędzia. Stale stosowane do wyrobu wkładek matrycowych na prasy muszą posiadać dużą wytrzymałość, twardość oraz odporność na ścieranie, z równoczesną z odpowiednią odpornością na kruche pękanie w temperaturze pracy. Ponadto niezbędna jest odporność na szoki cieplne, które powodują powstanie na powierzchni siatki pęknięć tzw. zmęczenie cieplne. Wyżej wymienione właściwości można uzyskać przez dobór odpowiedniego składu chemicznego stali. Niewielka zawartość węgla (0,30÷0,55%) zapewnia ciągliwość natomiast pierwiastki stopowe takie jak wolfram, molibden i wanad utrzymują wysoką twardość w podwyższonych temperaturach. Aby uzyskać zakładane właściwości mechaniczne niezbędne jest przeprowadzenie prawidłowej obróbki cieplnej, która zwykle składa się z hartowania i dwukrotnego wysokiego odpuszczania. Trzecim kierunkiem działań zwiększających trwałość są nowoczesne techniki inżynierii powierzchni. Wśród najbardziej rozpowszechnionych można wyróżnić techniki spawalnicze (napawanie), obróbkę cieplno-chemiczną (azotowanie, azotonawęglanie), techniki wiązkowe, metody mechaniczne (kulowanie) oraz warstwy i techniki hybrydowe. Nie ma jednoznacznych kryteriów doboru wymienionych metod poprawy trwałości narzędzi, ponieważ każdy przypadek należy analizować oddzielnie pod kątem warunków występujących podczas procesu kucia.

Obecnie najbardziej popularną metodą poprawy trwałości narzędzi kuźniczych jest azotowanie. Obserwacje wielu przemysłowych procesów kucia, w których zastosowano azotowane narzędzia wykazały, że zabieg ten pozwala nawet na kilkukrotne zwiększenie ich żywotności. Najnowsze metody azotowania dzięki precyzyjnej regulacji składu chemicznego atmosfery azotującej i potencjału azotowego pozwalają otrzymywać warstwy azotowane o dowolnie określonej budowie. Przykładem takiej metody azotowania jest metoda ZeroFlow, która stosowana jest przez firmę Seco Warwick [**H5**]. Metoda ta opiera się na prowadzeniu procesu azotowania z użyciem jednoskładnikowej atmosfery składającej się wyłącznie z ulegającego dysocjacji wewnątrz retorty pieca amoniaku (NH_3), którego stężenie określa wielkość potencjału azotowania. Należy wspomnieć, że od kilku lat prowadzę intensywną współpracę badawczą z firmą Seco Warwick.

Oczekiwania związane z trwałością narzędzi w procesach kucia, gdzie warunki są szczególnie trudne wymagają bardziej zaawansowanych metod poprawy trwałości do których należą niewątpliwie technologie hybrydowe. Polegają one na zastosowaniu dwóch lub więcej technik inżynierii powierzchni łączących w sobie np. azotowanie z technikami PVD lub CVD. Jednoczesne występowanie dwóch wymienionych elementów mikrostruktury, tj. warstwy azotowanej oraz wybranej powłoki PVD lub CVD powoduje wzajemne, synergiczne ich współdziałanie, dając bardzo dobre właściwości eksploatacyjne. Warstwa azotowana zwiększa twardość powierzchniową i odporność podłoża na odkształcenia plastyczne, zabezpieczając w ten sposób powłokę przed utratą spójności wewnętrznej i adhezji do podłoża. Natomiast zastosowana powłoka izoluje azotowane podłoże, ograniczając wpływ czynników zewnętrznych. Korzystny wpływ tego rodzaju warstw na trwałość narzędzi został wykazany w literaturze. Obecnie coraz częściej kuźnie stosują warstwy hybrydowe łączące azotowanie i powłoki PVD. Dzięki przeprowadzaniu wielu prac badawczych zdobyłem duże doświadczenie w tej dziedzinie, zakończone wdrożeniem tego typu rozwiązań w przemysłowych aplikacjach [**H7-H12**].

Inną technologią coraz częściej stosowaną przez kuźnie w celu poprawy trwałości, związaną ze zmianą właściwości warstwy wierzchniej jest napawanie, w szczególności napawanie prewencyjne. Metoda ta polega na zastosowaniu technik spawalniczych do pokrywania narzędzi kuźniczych warstwą metalu przy jednoczesnym topieniu podłoża. Obserwacje procesów, w których

zastosowano napawanie narzędzi kuźniczych wykazały, że metoda ta w niektórych przypadkach pozwala na skuteczne zwiększenie ich trwałości [**H14-H17**]. Istnieje wiele wariantów napawania, które różnią się głównie rodzajem materiału napoiny, który może mieć skład i właściwości zbliżone do stali narzędziowej, lub też cechować się wyższą twardością i odpornością na zużycie. Niekiedy do regeneracji i ulepszania powierzchni matryc stosuje się także metodę natryskiwania płomieniowego lub plazmowego a także obróbkę laserową poprzez napawanie, natryskiwanie lub utwardzanie powierzchni. Ostatnie badania dotyczyły także wykorzystywania topienia proszków wiązką lasera (LBM) do budowy narzędzi kuźniczych w technologiach addytywnych. Należy podkreślić, że w żadnym z tych przypadków dotychczas nie było stosowane azotowanie.

Wobec tego, nowym zagadnieniem, któremu dotąd nie poświęcono zbyt wiele uwagi w literaturze przedmiotu jest poprawa trwałości narzędzi kuźniczych przez zastosowanie nowych warstw hybrydowych łączących napawanie i azotowanie, do których opracowania bezpośrednio się przyczyniłem.

4.3.2 Cel naukowy

Mając na uwadze powyżej opisany stan zagadnienia, sformułowano **główny cel pracy**, polegający na **opracowaniu skutecznej metody poprawy trwałości narzędzi stosowanych w przemysłowych procesach kucia matrycowego na gorąco przez zastosowanie warstw hybrydowych łączących napawanie i azotowanie.** Osiągnięcie tego celu wiązało się z realizacją innych głównych celów ściśle związanych z zagadnieniem trwałości narzędzi kuźniczych. **Drugim, również ważnym celem** prowadzonych badań była **identyfikacja i opis mechanizmów niszczących występujących w narzędziach kuźniczych**. Cel ten ma szczególne znaczenie, gdyż jak wykazały dotychczasowe badania, nie ma jednoznacznych kryteriów doboru metody poprawy trwałości narzędzi kuźniczych. W związku, z czym, aby skutecznie poprawić trwałość narzędzi należy zidentyfikować mechanizmy niszczące występujące w danym narzędziu. Realizacja tego celu obejmowała analizę kilkudziesięciu narzędzi kuźniczych stosowanych w różnych procesach kucia matrycowego o zróżnicowanym czasie i warunkach eksploatacji. **Trzeci, cel** powadzonych przeze mnie badań naukowych zaprezentowany szczegółowo w pracach **[H5-H17]**, dotyczy **przeglądu i oceny skuteczności obecnie stosowanych metod poprawy trwałości narzędzi kuźniczych stosowanych w przemysłowych procesach kucia matrycowego.** Badania w tym obszarze obejmowały szeroki zakres stosowanych rozwiązań dotyczących głównie modyfikacji warstwy wierzchniej takich jak: zastosowanie obróbki cieplno-chemicznej, napawania oraz innych nowoczesnych technik inżynierii powierzchni. Skuteczność wymienionych metod została przeze mnie zweryfikowana badaniach laboratoryjnych oraz w badaniach eksploatacyjnych prowadzonych w warunkach przemysłowych, gdzie wykazano wpływ analizowanych metod na trwałość narzędzi kuźniczych.

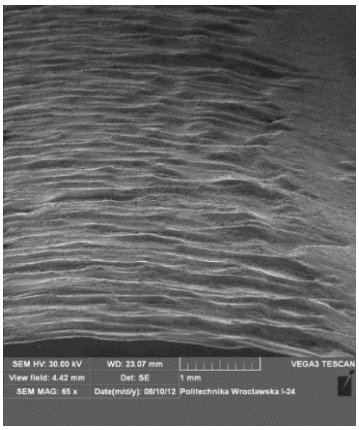
4.3.3 Wyniki badań i opis

Trwałość narzędzi kuźniczych zależy głównie od warunków, w jakich przebiega proces kucia oraz od sposobu zaprojektowania i wykonania narzędzi w tym ze szczególnym uwzględnieniem warstwy wierzchniej. Podczas projektowania narzędzi czynniki związane z

warunkami eksploatacyjnymi dla opracowanego już procesu technologicznego przeważnie są z góry określone i pozostają na ogół stałe. Ewentualne zmiany mogą dotyczyć jedynie warunków technologicznych związanych z narzędziem. W związku z powyższym w swoich badaniach skoncentrowałem się na poszukiwaniu i opracowaniu metody związanej z przygotowaniem narzędzia, która pozwoli na skuteczne zwiększenie trwałości.

Aby móc skutecznie dobrać metodę poprawy trwałości narzędzi kuźniczych, niezbędne jest pozyskanie wiedzy o warunkach pracy danych narzędzi oraz o mechanizmach niszczących w nich występujących. W przeglądowej pracy [**H1**] i [**H2**] kompleksowo przedstawiłem opis mechanizmów niszczących, jakie występują w narzędziach stosowanych w procesach kucia na gorąco. Na podstawie badań własnych przedstawiłem przykłady poszczególnych mechanizmów niszczących oraz opisałem relacje pomiędzy nimi. Przedstawione w pracy wyniki badań wykazały, że mechanizmy niszczące narzędzia kuźnicze w procesach kucia na gorąco dotyczą przede wszystkim warstwy wierzchniej narzędzi, gdzie zidentyfikowano następujące mechanizmy zużycia: zużycie ścierne, zmęczenie cieplno-mechaniczne, odkształcenie plastyczne, pękanie zmęczeniowe, zużycie adhezyjne i utlenianie.

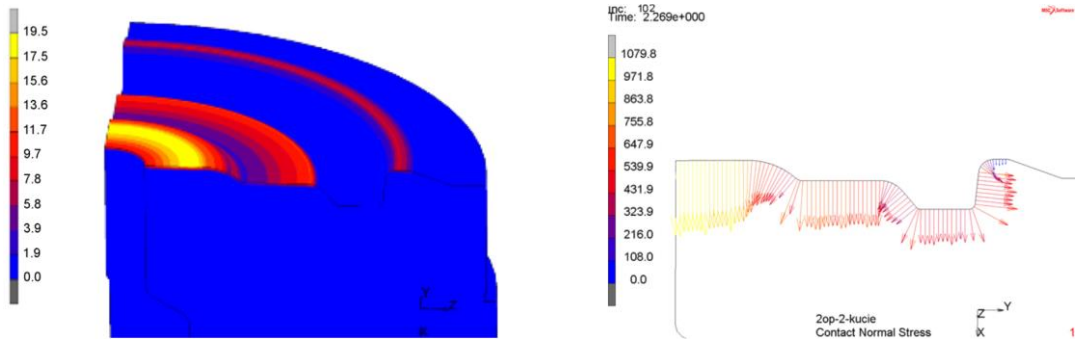
Zużycie ścierne jest wynikiem ubytku materiału głównie poprzez oddzielenie się cząstek materiału z powierzchni. Taki proces występuje, gdy w obszarach współpracujących elementów znajdują się luźne lub utwierdzone cząstki ścierniwa albo wystające nierówności twardszego materiału. Cząstkami intensyfikującymi zużycie ścierne mogą być twarde tlenki powstałe w procesie wysokotemperaturowego utleniania, zarówno powierzchni odkuwki jak i samej matrycy. W efekcie działania tego mechanizmu na powierzchni narzędzia, wzdłuż kierunku przesuwania się kształtowanego materiału, tworzą się rowki. Powstałe w ten sposób wypukłości „grzbiety rowków" (Rys. 1) szybko zostają usunięte z powierzchni narzędzia w czasie jego dalszej eksploatacji, co objawia się ubytkiem materiału i zmianą geometrii narzędzia [**H1**].



Rys. 1 Przykład typowego zużycia ściernego matrycy kuźniczej w obszarze przejścia [**H1**]

Szczególnie na ten rodzaj zużycia narażone są miejsca, w których występuje największa droga tarcia kształtowanego materiału, najczęściej są to miejsca przejścia wykroju w mostek matrycy. Jak wykazały wyniki modelowania numerycznego dla wybranego procesu kucia na gorąco, które zostały dokładnie opisane w pracy [**H2**], w jednym cyklu kucia droga tarcia kształtowanego materiału na powierzchni roboczej narzędzi w wybranych obszarach może wynosić nawet 20 mm. Duża wartość drogi tarcia w połączeniu z dużymi naciskami w kontakcie, które w analizowanym przypadku przekraczają 1000 MPa może prowadzić do intensywnego zużycia ściernego. Ponadto

symulacje numeryczne innych procesów kucia ujawniły występowanie podczas kucia, cyklicznie zmiennych nacisków o znaczeni większej wartości przekraczającej lokalnie nawet 2000 MPa [**H2**].



Rys. 2 Wyniki modelowania numerycznego wybranego procesu kucia matrycowego na gorąco: a) droga tarcia na powierzchni w mm, b) naciski normalne w kontakcie[**H2**].

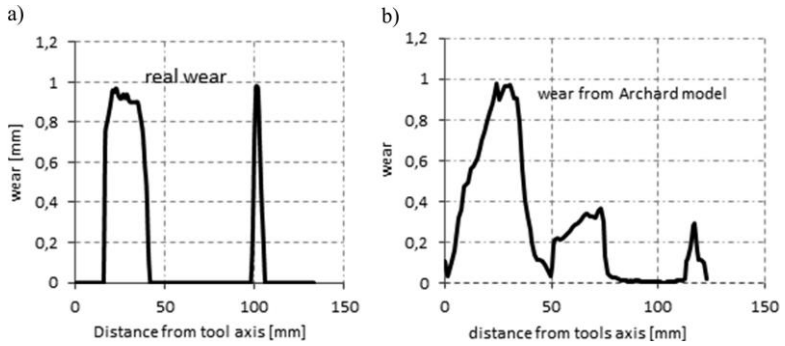
Najbardziej powszechnym modelem mechanizmu zużycia ściernego, będącym podstawą większości używanych równań jest model Archarda (Równanie 1). Większość prowadzonych przeze mnie badań związanych z modelowaniem mechanizmu zużycia ściernego koncentruje się na wykorzystaniu tego modelu [**H2**].

Równanie 1

$$w(c) = \sum_{1}^{c} \int_{0}^{t} \frac{k}{H} \sigma V_{rel} dt$$

gdzie:
W – zużycie [mm]
K – współczynnik zużycia,
σ – nacisk normalny [MPa],
Vrel – prędkośc poślizgu w contakcie [mm/s],
H – twardość materiału [MPa]

Model Archarda zakłada, że zużycie danego elementu jest wprost proporcjonalne do nacisku i drogi poślizgu, a odwrotnie proporcjonalne do twardości materiału z jakiego wykonany jest element. Bezwymiarowy współczynnik K jest wielkością wyznaczaną eksperymentalnie, charakterystyczną dla każdego z materiałów. Przeprowadzone modelowanie, zweryfikowane rzeczywistymi pomiarami zużycia potwierdziło poprawność zastosowanego modelu (Rys. 3), gdzie największe zużycie ścierne wyznaczono w miejscach w których występuje największy nacisk i droga tarcia (Rys. 2).



Rys. 3 Średnie zużycie analizowanego narzędzi: a) pomiar rzeczywisty, b) modelowanie z zastosowaniem modelu Archarda [**H2**]

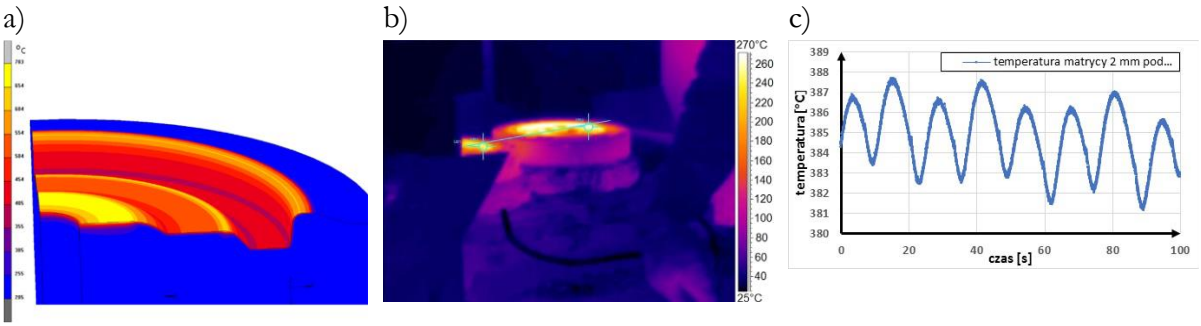
Innym mechanizmem utożsamianym często ze zużyciem ściernym, jest zużycie adhezyjne, które występuje w mikroobszarach plastycznego odkształcenia warstwy wierzchniej, a zwłaszcza na nierównościach powierzchni. Zjawisko to najczęściej występuje przy dużych naciskach i stosunkowo niskich prędkościach przy kontakcie materiałów jednoimiennych lub powinowatych chemicznie, co ma miejsce w procesach kucia. W wyniku przesuwania przy dużych naciskach kształtowanego materiału po powierzchni narzędzia dochodzi do zerwania warstwy tlenków z powierzchni odkuwki oraz narzędzia. Wówczas zostają odsłonięte czyste powierzchnie, co dzieje się głównie w mikro występach nierówności powierzchni, jakimi są np. najwyższe wierzchołki chropowatości. Zrywaniu połączeń adhezyjnych towarzyszy odrywanie cząstek metalu, które mogą później tworzyć bruzdy i skrawać lokalnie powierzchnię lub mogą zostać rozmazywane na powierzchniach tarcia. W pracy [**H1**] wykazałem, że zjawisko to częściej występuje w procesach kucia na półgoraco, gdzie temperatura kształtowanego materiału wynosi około 900°C, czyli w znacznie niższych temp. niż w typowych procesach kucia na gorąco. Najczęściej widoczną formą zużycia adhezyjnego jest naklejanie i rozmazywanie się materiału po powierzchni narzędzia.

Innymi mechanizmem związanym z występowaniem podczas kucia cyklicznie zmiennych, dużych obciążeń mechanicznych jest pękanie zmęczeniowe. Ten rodzaj zniszczenia występuje w wyniku sumowania się odkształceń w warstwie wierzchniej wywołanych oddziaływaniem cyklicznych naprężeń od obciążeń zewnętrznych jakie powstają podczas kształtowania odkuwki. W efekcie tego, w miejscach ich spiętrzenia tworzą się mikropęknięcia zmęczeniowe, rozwijające się w czasie dalszej eksploatacji. Zależność odporności na pękanie od amplitudy odkształceń opisuje równanie zaproponowane przez Coffina-Mansona [**H1**]. W pracy [**H4**] przedstawiłem wybrane metody wyznaczenia trwałości zmęczeniowej w ujęciu odkształceniowym opisanej zależnością Mansona-Coffina-Basquina (MCB) bazując na wynikach prób statycznego rozciągania. Uzyskane wyniki posłużyły do wyznaczenia charakterystyk niskocyklowych dla stali narzędziowej 1.2344, która jest powszechnie stosowana na narzędziach do kucia w wysokich temperaturach.

Poza czynnikami związanymi z obciążeniami mechanicznymi i zjawiskami tribologicznymi będącymi główną przyczyną wyżej wymienionych mechanizmów, narzędzia kuźnicze podczas pracy narażone są również na destrukcyjne oddziaływanie obciążeń cieplnych.

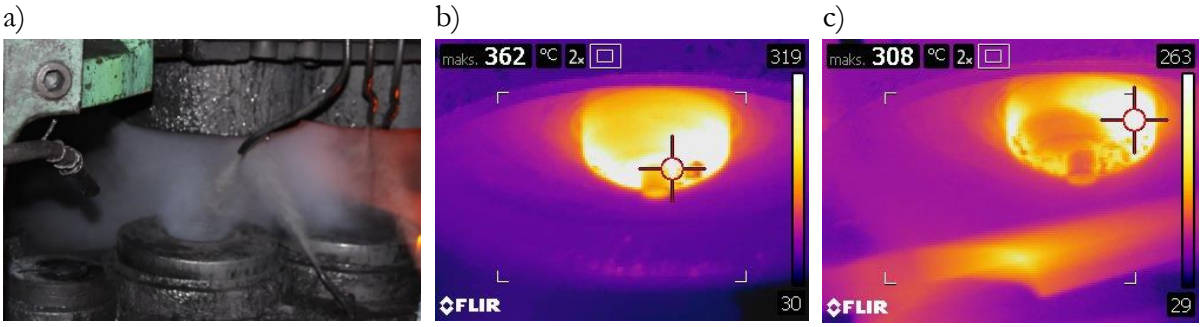
Materiał wsadowy (stal) w procesach kucia na gorąco najczęściej nagrzewany jest do temperatury 900÷1200ºC, co sprawia, że temperatura narzędzia w obszarze warstwy wierzchniej w momencie odkształcania materiału może osiągać wartość nawet 800ºC [**H2**] (Rys. 4a), po czym dochodzi do intensywnego schłodzenia (Rys. 4b). Przedstawione w pracy [**H3**] badania dotyczyły wyznaczenia

temperatury w narzędziu przy użyciu termopary umieszczonej w specjalnym otworze doprowadzającym termoparę na odległość 2 mm od powierzchni roboczej narzędzia (Rys. 4).



Rys. 4 Temperatura narzędzia podczas cyklu pracy: a) rozkład temperatury (wartość maksymalna) na powierzchni wyznaczony w MES [**H2**], b) termogram zarejestrowany po schłodzeniu [**H2**], c) wartość temperatury w kolejnych cyklach 2 mm pod powierzchnią [**H3**]

Wyznaczenie temperatury na powierzchni narzędzi w czasie kontaktu jest bardzo trudne, dlatego w badaniach wykorzystałem pomiary przy użyciu termopary, pomiary termowizyjne oraz modelowanie numeryczne. Przeprowadzone badania wykazały, że w wyniki intensywnego chłodzenia temperatura na powierzchni roboczej gwałtowanie spada o kilkaset stopni narażając powierzchnię roboczą na szoki cieplne. Natomiast pomiary 2 mm pod powierzchnią wykazały, że na płaszczyźnie przekroju poprzecznego narzędzia temperatura na powierzchni od temperatury obszaru przypowierzchniowego może się różnić o kilkaset stopni. W ten sposób narzędzie dodatkowo narażone jest na wysokie gradienty temperatury.

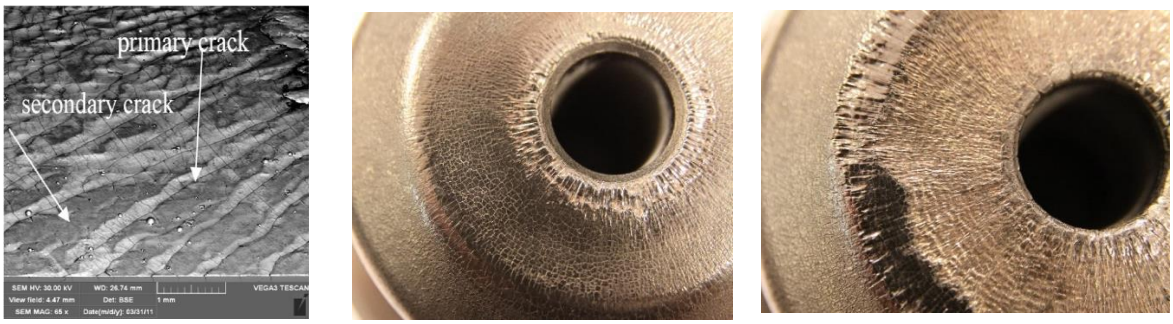


Rys. 5 a) Sposób chłodzenia i smarowania narzędzi podczas eksploatacja , b) termogram wykonany bezpośrednio po odkuciu odkuwki, c) termogram wykonany bezpośrednio po natrysku cieczą smarująco chłodzącą [**H4**].

Na innym przykładzie, opisanym w pracy [**H4**] przedstawiłem termogramy (Rys. 5 b, c), gdzie zaobserwowałem gwałtowny spadek temperatury na powierzchni, w wyniku intensywnego chłodzenia temperatura spada z 360˚C lokalnie nawet do 100˚C. Ze względu na ograniczoną przewodność cieplną materiału występują różnice temperatur miedzy rdzeniem a powierzchnią, prowadzące do powstawania dużych wartości naprężeń, w szczególności w warstwie wierzchniej. Cykliczne zmiany temperatury powodują, że materiał jest naprzemiennie rozciągany oraz ściskany przez co powstają naprężenia, powodujące powstawanie siatki mikropęknięć (Rys. 6a). Ta forma zniszczenia określana jest, jako zmęczenie cieplne [**H4**]. Oprócz zmęczenia cieplnego dodatkowo, obecność cyklicznie zmiennych obciążeń mechanicznych powoduje występowanie procesów mechanicznego zmęczenia w warstwie wierzchniej, których intensywność wzrasta wskutek

zmęczenia cieplnego, tworząc makropęknięcia (Rys. 6b). Współzależność mechanizmów zmęczenia cieplnego oraz zmęczenia mechanicznego powoduje, że oba te mechanizmy traktuje się razem, jako zmęczenie cieplno-mechaniczne.

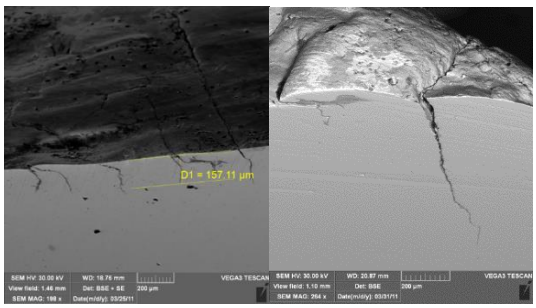
a) b) c)



Rys. 6 a) Siatka pęknięć cieplno-mechanicznych [**H1**], b) widok powierzchni stempla po odkuciu 1000 szt. odkuwek, c) Widok powierzchni stempla po odkuciu 4000szt. odkuwek [**H4**]

W czasie eksploatacji narzędzi, wraz ze wzrostem liczby wykonanych odkuwek, siatka pęknięć cieplno-mechanicznych rozwija się, powstaje wówczas wtórna siatka pęknięć (Rys. 6a), która następnie ulega wykruszaniu potęgując przy tym procesy zużycia ściernego. W konsekwencji prowadzi to do całkowitego zniszczenia narzędzia [Rys. 6 c].

W wyniku występowania wysokiej temperatury w warstwie wierzchniej dochodzi do obniżenia granicy plastyczności, co w połączeniu z oddziaływaniami mechanicznymi może prowadzić do odkształcenia plastycznego wykroju matrycy w szczególnie narażonych obszarach. Wartość naprężenia uplastyczniającego typowych stali narzędziowych do pracy na gorąco w temperaturze 600 °C, wynosi średnio 550 MPa. Natomiast jak wykazały symulacje lokalne wartości nacisku odkuwki na narzędzie przekraczają często 1000 MPa, co wskazuje na duże prawdopodobieństwo wystąpienia odkształceń plastycznych w matrycach [**H1**]. Tę formę zniszczenia obserwować można w postaci „zakrzywionych" pęknięć w obszarze warstwy wierzchniej (Rys. 7).

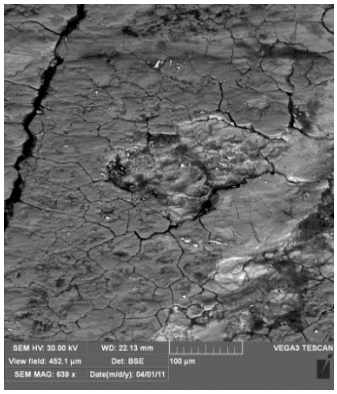


Rys. 7 Odkształcenie plastyczne w warstwie wierzchniej [**H1**]

Długotrwałe działanie wysokiej temperatury w wyniku kontaktu z nagrzanym materiałem, wiąże się z ryzykiem odpuszczenia warstwy wierzchniej [**H1**].

Z działaniem wysokiej temperatury wiąże się również zjawisko utleniania warstwy wierzchniej, które polega na niszczeniu warstwy wierzchniej elementów metalowych, wskutek oddzielenia cienkich warstw tlenków, powstałych w wyniku absorpcji tlenu. Dyfuzja tlenu następuje w mikro-objętościach metalu, odkształconych sprężyście i plastycznie z jednoczesnym tworzeniem warstw roztworów stałych. Za zużycie przez utlenianie uważa się przypadek kiedy intensywność tworzenia

cienkich warstw tlenków jest większa od intensywności niszczenia powierzchni i ich usuwania przez ścieranie (Rys. 8) [**H1**].

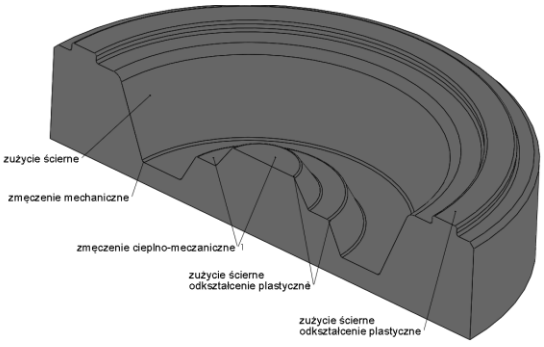


Rys. 8 Wykruszenia warstwy tlenków na powierzchni matrycy kuźniczej [**H1**]

W pracy [**H1**] wykazałem, że powstałe w procesie wysokotemperaturowego utleniania tlenki działają jak materiał ścierny na powierzchnię narzędzi intensyfikując zużycie ścierne oraz wpływają na szybkość powstawania pęknięć. Powstające na powierzchni pęknięcia zostają wypełnione tlenkami, które działają jak klin w szczelinie i przyspieszają ich rozwój (Rys. 9).

Rys. 9 Pęknięcie wypełnione tlenkami [**H1**]

Ponadto w pracy [**H1**] wskazano, że na intensywność występowania poszczególnych mechanizmów niszczących ma wpływ również kształt wykroju roboczego narzędzia, co determinuje czas kontaktu, naciski, drogę tarcia oraz zmiany temperatury.



Rys. 10 Miejsca występowania dominujących rodzajów zużycia w narzędziu kuźniczym [**H1**]

W obszarach płaskich, gdzie czas kontaktu narzędzia z gorącym kształtowanym materiałem jest najdłuższy oraz występują największe naciski, dominującym mechanizmem niszczącym jest zmęczenie cieplno-mechaniczne. Wewnętrzne promienie zaokrągleń są miejscem, gdzie może dochodzić do koncentracji cyklicznych naprężeń rozciągających pochodzących od obciążeń zewnętrznych, jakie powstają podczas kształtowania odkuwki. W efekcie tego w miejscach tych tworzą się mikropęknięcia zmęczeniowe, rozwijające się w czasie dalszej eksploatacji narzędzia tworząc duże pęknięcia. Promienie zewnętrzne w wykroju matrycy oraz obszary przejścia wykroju w mostek wypływki są obszarami gdzie w wyniku osłabienia materiału spowodowanego wysokimi temperaturami, dochodzi do obniżenia granicy plastyczności materiału, co w efekcie prowadzi do odkształcenia plastycznego. Intensywne płynięcie kształtowanego materiału w tych obszarach powoduje również zużycie ścierne, które jest dodatkowo intensyfikowane obecnością twardych tlenków pełniących rolę ścierniwa, powstałych w procesie wysokotemperaturowego utleniania powierzchni narzędzia oraz odkuwki [**H1**].

Identyfikacja miejsc, w których dominują poszczególne mechanizmy została wykorzystana w dalszych moich badaniach poświęconych analizie wpływu metod poprawy trwałości na rzeczywistą trwałość narzędzi kuźniczych.

Zidentyfikowane mechanizmy niszczące dotyczą przede wszystkim warstwy wierzchniej narzędzi. Wobec powyższego, moje badania koncentrowały się głównie na modyfikowaniu właściwości warstwy wierzchniej narzędzi kuźniczych w celu poprawy ich trwałości.

Analizowane metody poprawy trwałości

Azotowanie

Jak już wspomniałem we wprowadzeniu, pomimo rozwoju wielu różnych metod inżynierii powierzchni, w przypadku narzędzi kuźniczych najbardziej popularną metodą poprawy ich trwałości jest azotowanie. Azotowanie zwiększa odporność narzędzi na ścieranie, poprawia wytrzymałość zmęczeniową oraz podnosi odporność na korozję. Obserwacje wielu przemysłowych procesów kucia, w których zastosowano azotowane narzędzia wykazały, że zabieg ten pozwala nawet na kilkukrotne zwiększenie ich trwałości.

W swoich badaniach przedstawionych w pracy [**H5**] wykazałem, że aby warstwa azotowana skutecznie mogła poprawić trwałość narzędzia musi posiadać jednolitą i określoną budowę. Okazuje się natomiast, że ta technologia pomimo tego, iż od dawna jest powszechnie stosowana w przemyśle nie została dobrze opanowana. Bardzo często też procesy azotowania gazowego realizowane są niestarannie i na urządzeniach, w których kontrola parametrów azotowania jest trudna. Błędy w procesach azotowania spowodowane są również tym, że bardzo często w jednym procesie przy tych samych parametrach obrabiane są elementy o różnych rozmiarach i wykonane z różnych materiałów, w związku z czym bardzo trudno jest uzyskać jednolitą, pożądaną budowę warstwy azotowanej, co ma decydujący wpływ na trwałość narzędzia. Prowadzone badania wykazały, że skuteczność w poprawie trwałości narzędzi kuźniczych w dużym stopniu zależy od struktury i budowy uzyskanej warstwy azotowanej.

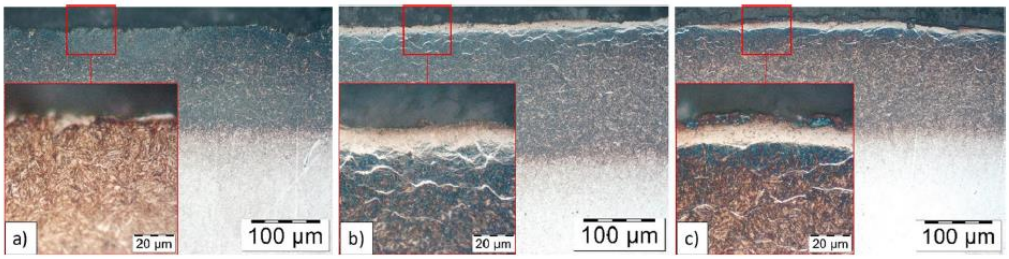
Opisane w pracy [**H5**] badania obejmował badania laboratoryjne różnych wariantów warstw azotowanych na próbkach i testy eksploatacyjne narzędzi azotowanych. Azotowane narzędzia oraz próbki wykonano ze stali do pracy na gorąco Unimax (odpowiednik X40CrMoV5-1 wg normy

EN). Próbki i narzędzia poddano uprzednio obróbce cieplnej przez hartowanie i odpuszczanie w temperaturze 600°C. W celu oceny i porównania wpływu zastosowanych warstw azotowanych oraz po to, aby zweryfikować korzyści płynące ze stosowania obróbki azotowaniem, badania prowadzono również dla próbek i narzędzi nieazotowanych.

Głównym założeniem opisanych w artykule [**H5**] badań było uzyskanie warstw azotowanych o podobnej głębokości, ale zróżnicowanej strukturze. Dlatego też ustalono stały czas, jako że czas procesu azotowania ma głównie wpływ na grubość warstwy dyfuzyjnej. Założono, że będzie się dążyć do uzyskania warstwy dyfuzyjnej o grubości efektywnej 0,13-0,15mm, która jest typową grubością warstw azotowanych stosowanych w przypadku narzędzi kuźniczych. Drugim istotnym parametrem wziętym pod uwagę był potencjał azotowania, który został dobrany na podstawie układu Lehrera i jego późniejszych modyfikacji dokonanych przez prof. Małdzińskiego. Przyjęto potencjał taki, aby w każdym z analizowanych wariantów uzyskać wyraźnie inną budowę: warstwę dyfuzyjną α, warstwę dyfuzyjną α z wydzieleniami fazy γ' w strefie przypowierzchniowej oraz warstwę dyfuzyjną α z wydzieleniami faz ε+γ' w strefie przypowierzchniowej. Wartości potencjału zostały przyjęte z górnej części zakresu dla każdej z faz, z uwagi na to, że podatność stali narzędziowych na dyfuzję azotu jest niższa niż zwykłej stali węglowej, dla której sporządzono wspomniany wykres Lehrera.

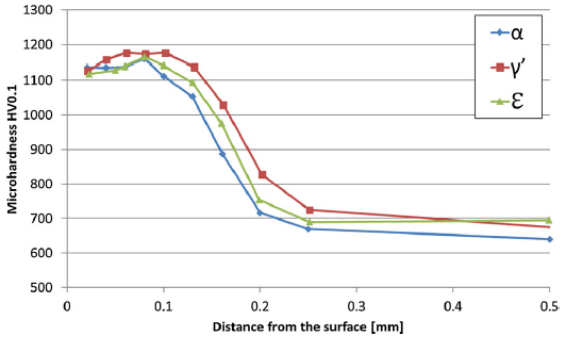
Uzyskanie różnych wariantów warstw azotowanych o określonej budowie było możliwe dzięki zastosowaniu azotowania metodą ZeroFlow, umożliwiającej precyzyjną regulację składu chemicznego atmosfery azotującej i potencjału azotowego. Jak już wspomniałem we wstępie, w 2015 roku nawiązałem współpracę z firmą Seco Warwick. Należy podkreślić, że współpraca ta do tej pory nie wiązała się z realizacją żadnych projektów badawczych, dotyczyła natomiast wymiany doświadczeń związanych z wpływem azotowania na trwałość narzędzi kuźniczych. Efekty wspólnych badań zostały opublikowane między innymi w [**H5**].

Na Rys. 11 przedstawiono mikrostruktury analizowanych wariantów warstw azotowanych uzyskane w procesie kontrolowanego azotowania metoda ZeroFlow. Pierwsza z uzyskanych warstw azotowanych składała się ze strefy dyfuzyjnej α z bardzo cienką warstwą wydzieleń azotków γ' na powierzchni (Rys. 11a). W kolejnym wariancie obróbki uzyskana struktura warstwy azotowanej składa się z warstwy dyfuzyjnej z wydzieleniami fazy γ', widocznymi szczególnie w strefie przypowierzchniowej oraz białą warstwą azotków typu γ' na powierzchni (Rys. 11b). Trzeci wariant obróbki pozwolił na uzyskanie warstwy azotowanej, w której w strefie dyfuzyjnej widoczne są liczne, duże wydzielenia fazy γ', natomiast przy powierzchni widoczna jest gruba warstwa γ' oraz nieciągła cienka warstwa azotków żelaza ε (Rys. 11c).



Rys. 11 Widok mikrostruktury warstwy azotowanej: a) warstwa azotowana dyfuzyjna α, b) warstwa dyfuzyjna z wydzieleniami fazy γ' w strefie przypowierzchniowej, c) warstwa dyfuzyjna z wydzieleniami faz ε+γ' w strefie przypowierzchniowej [**H5**]

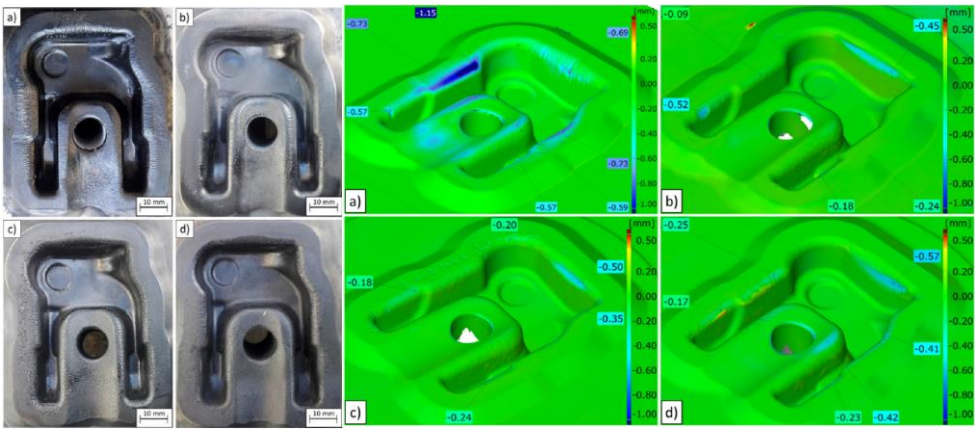
Uzyskane warstwy azotowane zgodnie z założeniami miały podobną grubość warstwy dyfuzyjnej (ok. 160-180 μm) [**H5**]. Jak wykazały pomiary twardości, wyznaczone rozkłady mają podobny przebieg pomimo różnic w strukturze uzyskanych warstw azotowanych, co przejawia się różnymi właściwościami i odpornością na mechanizmy niszczące działające w procesie kucia.



Rys. 12 Mikrotwardość analizowanych warstw azotowanych [**H5**]

Badania eksploatacyjne przedstawione w pracy [**H5**] prowadzone były w warunkach przemysłowych gdzie przy użyciu narzędzi z różnymi wariantami warstw azotowanych oraz dla porównania narzędzia nieazotowanego, wykonano taką samą ilość odkuwek.

Obserwacje makroskopowe ujawniły obecność licznych bruzd – śladów zużycia ściernego na mostku narzędzia nieazotowanego. Zapewne z powodu niższej twardości było ono bardziej podatne na ścieranie, podczas gdy narzędzia azotowane zużywały się w inny sposób. Na ich powierzchni można zaobserwować liczne wykruszenia, czyli lokalne ubytki materiału. Ubytki te są zlokalizowane głównie w obszarze mostka, czyli tam, gdzie modelowanie numeryczne wykazało największe naciski połączone z największą drogą tarcia [**H5**], co powoduje zużycie ścierne oraz wyrywanie fragmentów materiału z powierzchni. Przy wyjściu na mostek na zaokrąglonej krawędzi w miejscu tworzenia się wypływki obserwuje się liczne bruzdy ścierne, które największe są na narzędziu z warstwą wydzieleniami faz ε+γ' w strefie przypowierzchniowej a najmniejsze są na narzędziu z warstwą dyfuzyjną α (Rys. 13).



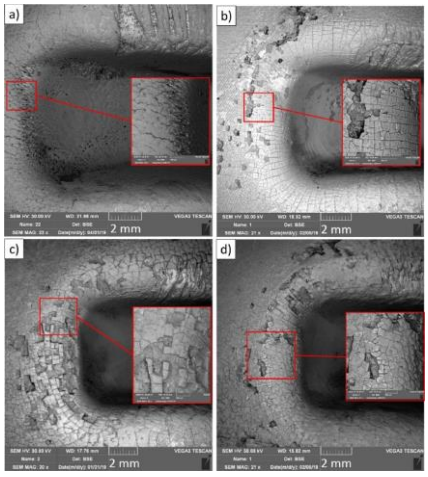
Rys. 13 Widok makro i wynik analizy geometrycznej zużycia narzędzi na powierzchni roboczej po odkuciu 16 000 sztuk odkuwek: a) narzędzie nieazotowane, b) warstwa azotowana dyfuzyjna α, c) warstwa dyfuzyjna z wydzieleniami fazy γ' w strefie przypowierzchniowej, d) warstwa dyfuzyjna z wydzieleniami faz ε+γ' w strefie przypowierzchniowej [**H5**]

Badania przedstawione w pracy [**H5**] obejmowały również szczegółową analizę zmian na powierzchni przy użyciu mikroskopu skaningowego w wybranych obszarach. Na Rys. 14 przedstawiono wyniki analizy SEM z reprezentatywnego obszaru, gdzie widać wyraźnie różnice w charakterze zmian na powierzchni roboczej po odkuciu 16 000 szt. odkuwek. Na powierzchni mostka narzędzia nieazotowanego widoczne są głębokie bruzdy oraz ślady nieregularnej siatki pęknięć, podczas gdy w pozostałej części powierzchnia jest gładka ze śladami siatki pęknięć, przy czym pęknięcia te są słabo widoczne (Rys. 14a).

Na powierzchni narzędzia z warstwą dyfuzyjną α można zaobserwować regularną siatkę pęknięć z lokalnymi wykruszeniami (Rys. 14b). Wykruszenia te są niewielkie i występują głównie na krawędzi na styku mostka matrycy i reszty wykroju roboczego. Natomiast w części płaskiej, czyli na mostku widoczną są ślady po obróbce, co świadczy o braku zużycia. Ponadto można zaobserwować początek tworzenia się bruzd, charakterystycznych dla zużycia ściernego w tym samym miejscu, co w przypadku matrycy nieazotowanej.

Na całej powierzchni narzędzia z warstwą azotowaną wydzieleniami fazy γ' widoczna jest gęsta, regularna siatka pęknięć z licznymi wykruszeniami (Rys. 14c). Analiza geometryczna w tym obszarze nie wykazała zużycia, jednak można przypuszczać, że w kolejnych cyklach byłoby ono zintensyfikowane na skutek wykruszonych twardych cząstek z powierzchni matrycy, które działają jak ścierniwo.

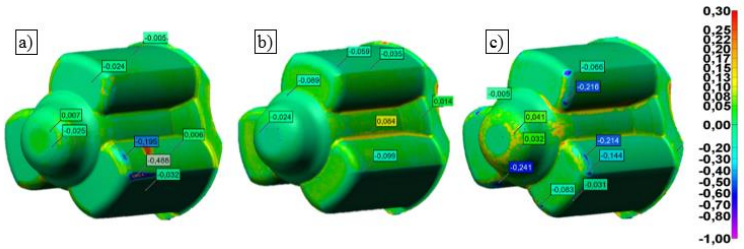
W przypadku narzędzia z warstwą azotowaną wydzieleniami faz ε+γ' również widoczna jest intensywna siatka pęknięć z wykruszeniami, przy czym obserwowane pęknięcia są nieregularne a wykruszenia są niewielkie i jest ich znacznie mniej niż w przypadku matrycy z warstwą azotowaną wydzieleniami fazy γ' w strefie przypowierzchniowej (Rys. 14d).



Rys. 14 Widok SEM powierzchni analizowanych narzędzi w wybranym obszarze: a) warstwa azotowana dyfuzyjna α, b) warstwa dyfuzyjna z wydzieleniami fazy γ' w strefie przypowierzchniowej, c) warstwa dyfuzyjna z wydzieleniami faz ε+γ' w strefie przypowierzchniowej [**H5**]

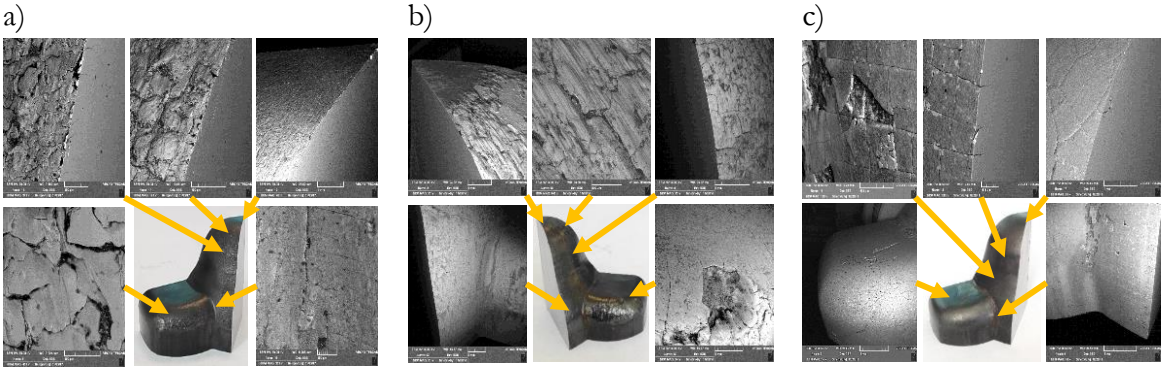
W swoich badaniach wykazałem również, że nieprawidłowy dobór struktury warstwy azotowanej do warunków pracy danego narzędzi spowodował obniżenie jego trwałości. W pracy [**H6**] przedstawiłem wyniki badań eksploatacyjnych stempla stosowanego w procesie kucia obudowy przegubu homokinetycznego, gdzie analizowany były wpływ różnych wariantów obróbki

powierzchniowej na trwałość, w tym również wpływ różnych wariantów azotowania. Analizowano dwa przypadki azotowania. Pierwszy przypadek dotyczył procesu azotowania z niskim potencjałem, gdzie uzyskano warstwę dyfuzyjną α. Drugi natomiast procesu azotowania z wysokim potencjałem, w którym uzyskano warstwą azotowaną z wydzieleniami fazy γ' w strefie przypowierzchniowej. Dla porównania analizie poddano również stempel, który nie został poddany azotowaniu. W tym procesie kucia jakość wytwarzanych odkuwek jest szczególnie istotna, dlatego po wystąpieniu pierwszych śladów zużycia narzędzia są wycofywane z dalszej eksploatacji. Przy użyciu analizowanych narzędzi wykonano następującą ilość odkuwek: stempel bez warstwy azotowanej - 4372 szt., stempel z warstwą dyfuzyjną α – 6249 szt. oraz stempel z warstwą azotowaną z wydzieleniami fazy γ' w strefie przypowierzchniowej – 1412 szt. Analiza geometryczna wielkości zużycia wykazała liczne lokalne ślady zużycia (Rys. 15) wskazujące na lokalne wykruszenia, co potwierdziły również obserwacje SEM powierzchni stempli.



Rys. 15 Wyniki analizy geometrycznej stempli: a) stempel bez warstwy azotowanej po odkuciu 4372 szt., b) stempel z warstwą dyfuzyjną α po odkuciu 6249 szt. c) stempel z warstwą azotowaną z wydzieleniami fazy γ' w strefie przypowierzchniowej po odkuciu 1412 szt. [**H6**]

Na całej powierzchni stempla z warstwą azotowaną z wydzieleniami fazy γ' w strefie przypowierzchniowej widoczna jest regularna siatka pęknięć. Przy czym w niektórych obszarach fragmenty siatki ulegają wykruszeniu, podczas gdy pozostałe fragmenty, bezpośrednio sąsiadujące z fragmentami wykruszonymi są nienaruszone. W narożach stempla zjawisko to można tłumaczyć odkształceniami sprężystymi, na skutek dużych obciążeń mechanicznych w efekcie czego dochodzi do wykruszenia fragmentów twardej warstwy. Natomiast na pozostałych powierzchniach wykruszenia spowodowane są dużymi naprężeniami stycznymi powstającymi na skutek tarcia kształtowanego materiału o te powierzchnię. Zjawisko to nie występuje w pozostałych analizowanych stemplach.



Rys. 16 Widok SEM powierzchni stempli: a) stempel bez warstwy azotowanej po odkuciu 4372 szt., b) stempel z warstwą dyfuzyjną α po odkuciu 6249 szt. c) stempel z warstwą azotowaną z wydzieleniami fazy γ' w strefie przypowierzchniowej po odkuciu 1412 szt. [**H6**]

Zastosowane warstwy azotowane różniły się budową, co jak się okazuje istotnie wpłynęło na sposób zużycia tych stempli. W przypadku zastosowania warstwy azotowanej o budowie dyfuzyjnej bez wydzieleń γ' uzyskano poprawę odporności warstwy wierzchniej stempla na odkształcenie plastyczne i zużycie ścierne, podczas gdy zastosowanie warstwy azotowanej z wydzieleniami fazy γ' w strefie przypowierzchniowej spowodowało obniżenie trwałości.

Podsumowując moje badania związane z możliwościami poprawy trwałości narzędzi przez zastosowanie azotowania okazuje się, że warstwy azotowane z powierzchniową strefą fazy ε, ogólnie cechują się gorszymi właściwościami użytkowymi głównie dlatego, że odznaczają się małą ciągliwością wykazując przy tym podwyższoną odporność na ścieranie, w związku z czym są przydatne do pracy w warunkach, gdzie nie występują obciążenia dynamiczne np. w procesach wyciskania. Z kolei warstwa zbudowana z węglikoazotków i azotków γ' przyczynia się do podwyższenia odporności na ścieranie i zatarcie oraz zwiększa odporność na korozję. Natomiast warstwy azotowane bez strefy związków charakteryzują się bardzo dobrą wytrzymałością zmęczeniową, mają mniejszą skłonność do pękania w wyniku zmęczenia cieplnego w związku z czym nadają się do pracy w warunkach dużych obciążeń dynamicznych, jakie występują przy kuciu na gorąco.

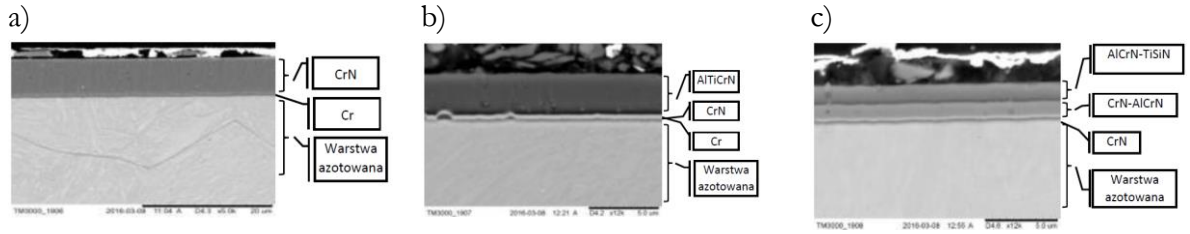
Powłoki PVD

Rozwój kuźnictwa sprawia, że coraz częściej są stosowane zaawansowane procesy kucia, w których oczekiwania związane z trwałością narzędzi są większe. Aby zapewnić wymaganą trwałość stosuje się bardziej zaawansowane metody poprawy trwałości, do których należą niewątpliwie technologie hybrydowe polegające na zastosowaniu dwóch lub więcej technik inżynierii powierzchni jednocześnie. Dzięki połączeniu i wzajemnemu oddziaływaniu różnych technologii można uzyskać właściwości warstwy wierzchniej nieosiągalne przy zastosowaniu tych technik oddzielnie. Przykładem takiej technologii hybrydowej są warstwy hybrydowe typu warstwa azotowana/powłoka PVD lub CVD. Materiałowym efektem ich stosowania są układy wielowarstwowe, których jedną część stanowi odpowiednio przygotowane podłoże – warstwa azotowana, drugą natomiast odpowiednio dobrana, wytworzona na powierzchni podłoża, powłoka. Jednoczesne występowanie dwóch wymienionych elementów mikrostruktury, tj. warstwy azotowanej oraz wybranej powłoki PVD lub CVD powoduje wzajemne, synergiczne ich współdziałanie, dając bardzo dobre właściwości eksploatacyjne. Warstwa azotowana zwiększa twardość powierzchniową i odporność podłoża na odkształcenia plastyczne, zabezpieczając w ten sposób powłokę przed utratą spójności wewnętrznej i adhezji do podłoża. Natomiast zastosowana powłoka izoluje azotowane podłoże, ograniczając wpływ czynników zewnętrznych

Moje badania dotyczące możliwości zastosowania tego rodzaju warstw hybrydowych w celu poprawy trwałości narzędzi kuźniczych przedstawione w pracach [**H6-H12**] związane były głównie z realizacją projektu badawczego w ramach Programu Badań Stosowanych pt. „Zastosowanie zaawansowanych warstw hybrydowych typu PN+PVD dedykowanych do zwiększenia trwałości narzędzi w procesach kucia". Projekt ten realizowany był przez konsorcjum złożone z Politechniki Wrocławskiej, Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu (obecnie Sieć Badawcza Łukasiewicz) oraz Kuźni Jawor. Należy podkreślić, że byłem jedną z głównych osób odpowiedzialnych za przygotowanie wniosku o dofinansowanie projektu oraz po uzyskaniu dofinansowania jednym z głównych wykonawców badań.

Badania, które prowadziłem w ramach projektu dotyczyły warstw hybrydowych z następującymi powłokami: monolityczną powłoką Cr/CrN złożoną z azotku chromu z przejściową strefą chromu poprawiającą adhezję powłoki do podłoża, wielowarstwową powłoką Cr/CrN/AlCrTiN o większej twardości i wielomateriałowym składzie oraz najbardziej złożoną powłoką CrN/CrN-AlCrN/ AlCrN-TiSiN, która zawiera najtwardsze związki azotków tytanu i krzemu.

Wyniki badań wyżej wymienionych warstw kompleksowo przedstawiłem w pracy [**H7**], gdzie opisałem wyniki badań laboratoryjnych dotyczących wytworzonych powłok przeciwzużyciowych oraz wyniki testów eksploatacyjnych warstw hybrydowych typu PN+PVD z zastosowanie tych powłok w warunkach przemysłowych na narzędziach kuźniczych stosowanych w procesie kucia na gorąco odkuwki typu pokrywa. Przeprowadzone badania laboratoryjne pozwoliły między innymi pozwoliły na analizę ich morfologii powierzchni metodą SEM (Rys. 17)



Rys. 17 Przekrój warstwy hybrydowej obserwowanej pod mikroskopem SEM Hitachi TM3000: a) warstwa hybrydowa z powłoką CrN, b) warstwa hybrydowa z powłoką AlTiCrN, c) warstwa hybrydowa z powłoką AlTiCrSiN [**H7**]

Obserwacje SEM warstw hybrydowych wykazały, że zastosowane powłoki są równomiernie nałożone. Powłoka AlCrTiN jest zbudowana na podłożu cienkiej warstwy chromu (g=0,1 μm) i warstwy azotku chromu o twardości 2100±140 HV i grubości 0,6 μm stanowiących warstwę przejściową, pośredniczącą między podłożem o stosunkowo niskiej twardości (ok. 1100 HV) a powłoką AlCrTiN o twardości sięgającej 3250±315 HV. Przedstawiona na Rys. 17c powłoka jest wielowarstwowa, a zatem zaliczana do powłok typu multi. Posiada bardzo cienkie podłoże azotku chromu (g=0,1 μm), na którym osadzona jest kolejna warstwa pośrednicząca AlCrN (g=1,4 μm) o dominującej zawartości chromu i tym samym o średniej twardości. Na wierzchu widoczna jest kolejna warstwa AlCrTiSiN o dominującej zawartości Ti, która swoją wysoką twardość, kruchość i charakterystyczną barwę „złotą" zawdzięcza zawartości krzemu. Całkowita grubość powłoki wyniosła ok. 3,0 μm.

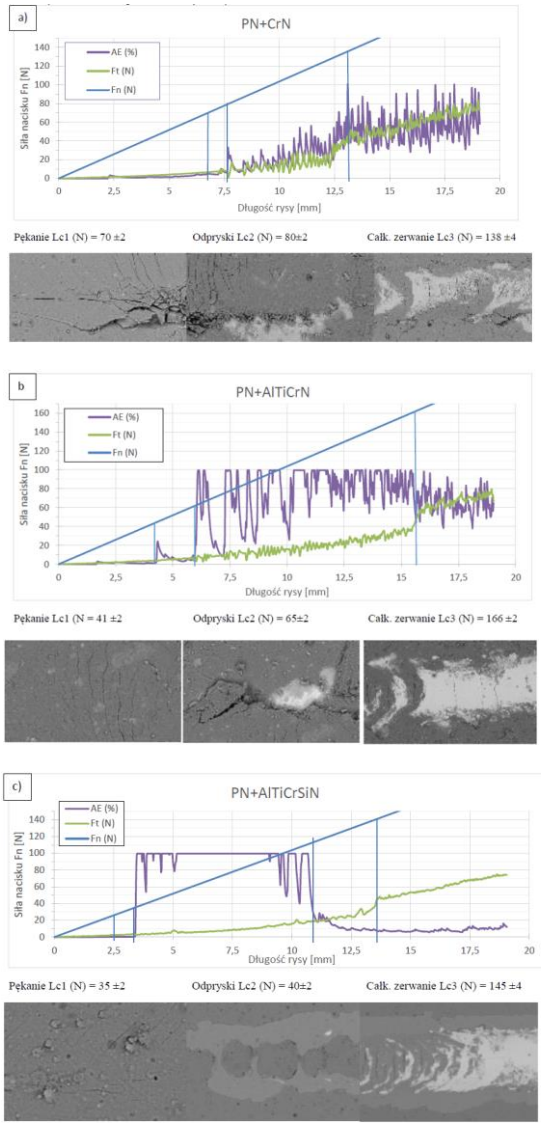
W tabeli przedstawiono wyniki pomiary twardości analizowanych powłok PVD. Pomiary twardości wytypowanych powłok przeprowadzono na twardościomierzu NHT CSM, stosując tryb ograniczonego, maksymalnego zagłębienia wgłębnika Berkovich'a nieprzekraczającego 15% grubości powłoki. Uzyskane wyniki przedstawiono w Tabela 1.

Tabela 1 Wyniki badań twardości i modułu Younga powłok [H7]

Rodzaj powłoki	Twardość Vickersa [HV]	Moduł Younga [GPa]
Cr/CrN	2100±140	215±25
AlCrTiN	3250±315	360±25
AlCrTiSiN	3240±430	380±60

Wyniki badań twardości wykazują wyraźną różnicę, między powłoką Cr/CrN a pozostałymi powłokami, której twardość wynosi jedynie 2100±140 HV. Niższa twardość oraz wytrzymałość tej powłoki nie decyduje o jej gorszej przydatności, ponieważ mimo to jest to dwukrotnie wyższa twardość niż tradycyjnie stosowanej warstwy azotowanej, a mniejsza różnica twardości między warstwą azotowaną a powłoką ułatwia zachowanie spójności podczas pracy narzędzia.

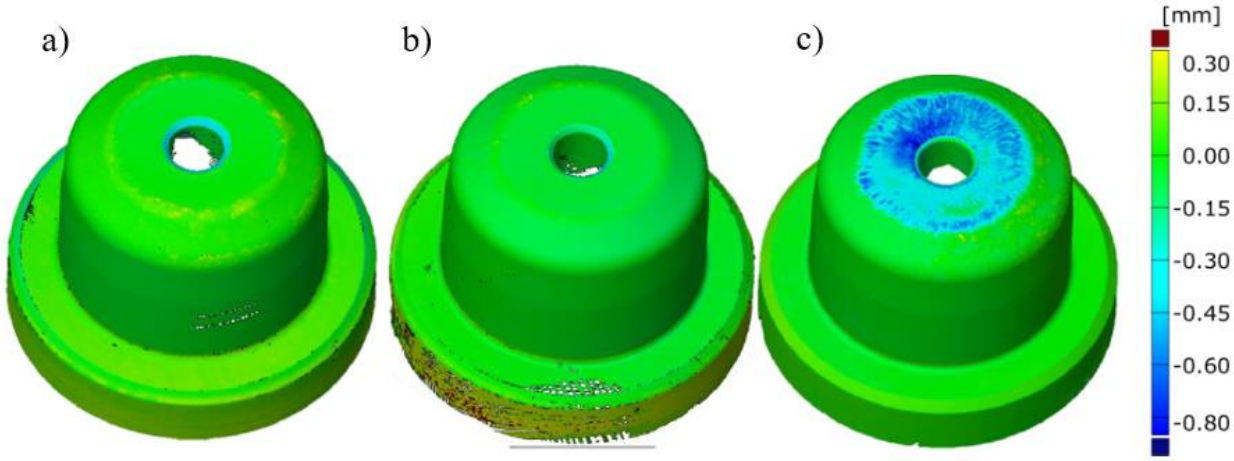
Innym ważnym parametrem decydującym o przydatności danej powłoki jest jej adhezja do podłoża. Przedstawione w pracy [H7] badania adhezji powłok wykonano za pomocą testów liniowych scratch polegających na zarysowaniu powierzchni poruszającym się wzdłuż linii z prędkością 10 mm/min wgłębnikiem Rockwella, który jest obciążony siłą narastającą od 0,05N do 200N. Wskutek coraz większych nacisków dochodzi stopniowo do pękania, odprysków i ostatecznie do zerwania powłoki, co jest typowym mechanizmem jej zniszczenia również w warunkach eksploatacyjnych.



Rys. 18 Wyniki pomiarów adhezji testem liniowym scratch dla wytypowanych powłok: a) CrN, b) AlTiCrN oraz c) AlCrTiSiN [**H7**]

Przedstawione na Rys. 18 wyniki wskazują na zróżnicowaną przyczepność do podłoża poszczególnych powłok. Najbardziej odporną na pękanie i odpryski przy wzrastającym nacisku jest powłoka CrN, która wykazała niemal dwukrotnie większą odporność od pozostałych powłok (Lc2 = 80N) pozostając w spójności i nie ulegając uszkodzeniu, natomiast, jako pierwsza uległa ostatecznemu zniszczeniu i oderwaniu od podłoża. Wskazuje to zatem, że powłoka CrN cechuje się silną adhezją, ale mniejszą odpornością na uszkodzenia mechaniczne. Kolejna powłoka AlCrTiN wykazuje skłonność do przyspieszonego pękania (Lc1 = 41N), a także przeciętną przyczepność do podłoża (Lc2 = 65N), natomiast długo pozostaje w częściowym kontakcie z podłożem ulegając całkowitemu zerwaniu dopiero przy Lc3 = 166N. Trzecia powłoka AlCrTiSiN okazała się najbardziej podatna na pękanie (Lc1 = 35N), oraz wykruszenia (Lc2 = 40N). Badanie wykazało również, że w pierwszej kolejności została uszkodzona (Lc1, Lc2) i usunięta (Fn = 108N) powłoka zewnętrzna zawierająca krzem, a następnie doszło do zerwania powłoki pozostającej pod spodem (Lc3 =145N). Z tego wynika, że powłoka dolna wykazała większą adhezję do podłoża niż siły wzajemnego przylegania zastosowanych powłok. Badanie ujawniło tym samym skłonność do rozwarstwienia i różnice we właściwościach mechanicznych poszczególnych podpowłok.

Kolejnym etapem badań przedstawionych w pracy [**H7**] były testy eksploatacyjne w warunkach przemysłowych w Kuźni Jawor S.A., gdzie przy użyciu każdego ze stempli odkuto taką samą ilość odkuwek tj. 4000 szt. Następnie narzędzia poddano wnikliwej analizie, która obejmowała skanowanie, pomiary mikrotwardości oraz obserwacje mikroskopowe.

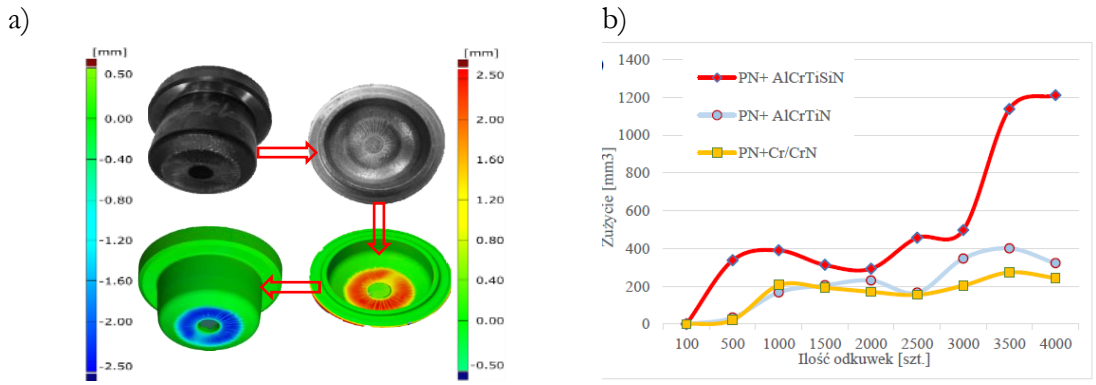


Rys. 19 Wyniki analizy geometrycznej narzędzi po odkuciu 4000 szt. odkuwek: a) Cr/CrN, b) AlCrTiN, c) AlCrTiSiN [**H7**]

Na podstawie wyników skanowania określono wielkość zużycia na poziomie max 0.9 mm dla narzędzia w powłoką AlCrTiSiN (Rys. 19a), które zlokalizowane jest na powierzchni czołowej. W przypadku pozostałych narzędzi zużycie w tym miejscu jest niewielkie i nie przekracza 0,1 mm. Oznacza to, że narzędzie z powłoką AlCrTiSiN uległo zużyciu, natomiast pozostałe narzędzia zostały ochronione przed postępem zużycia dzięki zastosowanym warstwom hybrydowym. Widoczne w kilku miejscach naddatki, świadczą o lokalnym przyklejeniu zgorzeliny do powierzchni narzędzia.

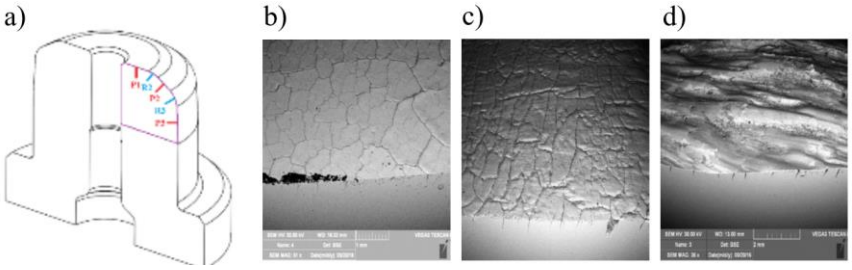
Przydatnym narzędziem w ocenie i interpretacji zużycia narzędzi jest przedstawiona w pracy [**H7**] „metoda odwrotna". Istota tej metody oceny zużycia narzędzi polega na wykorzystaniu do

pomiarów zużycia zmiany kształtu odkuwek, które powstają w kolejnych cyklach kucia. W tym celu wykorzystano zaobserwowane podobieństwo (odwzorowania) powierzchni roboczej stempla na wybranych powierzchniach odkuwki, w których ubytek materiału narzędzia równy jest przyrostowi materiału na odkuwce. Sposób odwzorowania zużycia narzędzia na powierzchni odkuwki zilustrowano na rys. 20a.



Rys. 20 a) Schemat zastosowanej metody odwrotnej wyznaczania zużycia, b) ubytek materiału narzędzia (zużycie) wyznaczony metodą odwrotną na podstawie skanów odkuwek [**H7**]

Na wyznaczonych krzywych zużycia (Rys. 20 b) w początkowej fazie eksploatacji widoczny jest nieznaczny ubytek postępujący na wszystkich narzędziach, który można zinterpretować jako zużycie ścierne na zaokrąglonych krawędziach, wobec braku zużycia na powierzchni czołowej. W przypadku narzędzia z powłoką AlCrTiSiN zużycie utrzymywało się na podobnym poziomie (około 350 mm^3), aż do osiągnięcia ok. 3000÷3500 szt., kiedy nagle ubytek materiału wzrósł trzykrotnie (około 1150 mm^3). Oznacza to moment zniszczenia powłoki i jej usunięcia w sposób nagły z całej powierzchni czołowej narzędzia. Taki sposób dwuetapowego zużycia jest charakterystyczny dla narzędzi z warstwami hybrydowymi, które po osiągnięciu określonej liczby odkuwek odpowiadającej zniszczeniu warstwy ulegają wykruszeniu, wytarciu i dalej zużycie postępuje znacznie szybciej. Na tym etapie badań zauważono, że zastosowanie warstwy hybrydowej zapewnia powstrzymanie postępu zużycia narzędzi na minimalnym poziomie do pewnej liczby odkuwek odpowiadającej trwałości tej warstwy [**H7**].

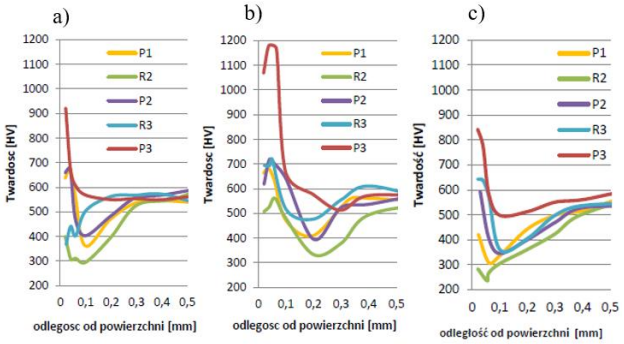


Rys. 21 a) Przekrój narzędzia z zaznaczonymi analizowanymi podobszarami oznaczonymi, jako powierzchnie (P1, P2 i P3) i promienie (R2 i R3), b) widok SEM powierzchni P1 narzędzia z powłoką Cr/CrN, c) widok SEM powierzni P1 narzędzia z powłoką AlCrTiN, d) widok SEM powierzni P1 narzędzia z powłoką AlCrTiSiN [**H7**]

Na podstawie obserwacji mikrostruktury oraz powierzchni w mikroskopii SEM można stwierdzić, że w przypadku narzędzia z powłoką Cr/CrN po 4000 odkuwek, warstwa hybrydowa pozostała na niemal całej powierzchni badanego narzędzia (Rys. 21 a). Powierzchnia narzędzia z powłoką

AlCrTiN stosunkowo dobrze zachowała swoje właściwości podczas eksploatacji na całej powierzchni utworzyła się dość drobna siatka pęknięć cieplno- mechanicznych (Rys. 21 c). Na powierzchni narzędzia z powłoką AlCrTiSiN wskutek działania mechanizmów niszczących doszło do całkowitego wytarcia warstwy hybrydowej oraz do deformacji plastycznej, o czym świadczą odkształcone pęknięcia zakrzywione w kierunku płynięcia materiału i głębokie wygładzone bruzdy (Rys. 21 d).

W celu pełniejszej analizy przeprowadzono także badania mikrotwardości mierząc twardość w funkcji odległości od powierzchni. Mikrotwardość badano metodą Vickersa przy obciążeniu 100g za pomocą twardościomierza LECO LM-100AT. Rozkłady mikrotwardości wyznaczono w miejscach przedstawionych na (Rys. 21a)



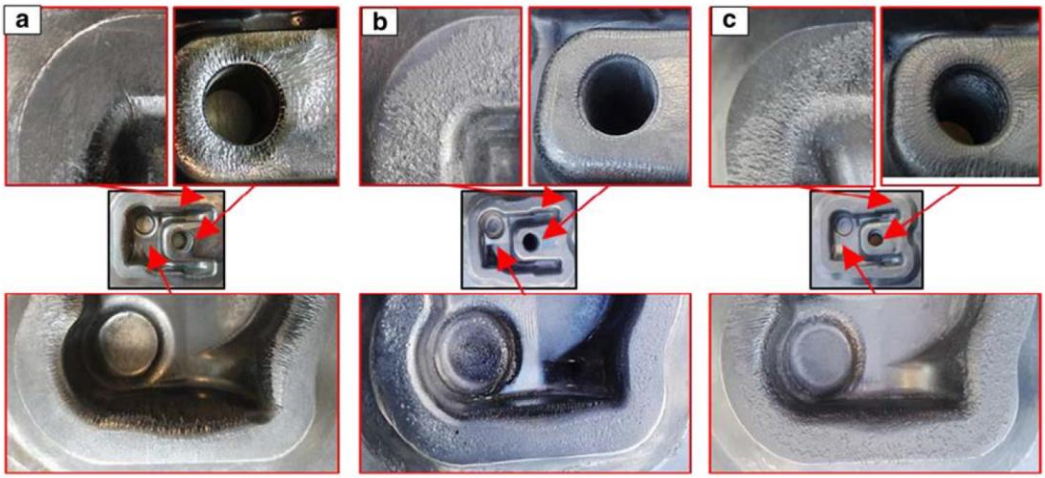
Rys. 22 Rozkład mikrotwardości HV na przekroju narzędzia: a) z warstwą PN+CrN, b) z warstwą PN+AlCrTiN, c) z warstwą AlCrTiSiN, w wybranych obszarach [**H7**]

Z wykresów przedstawionych na Rys. 22 wynika, że badane narzędzia podczas eksploatacji częściowo zachowały efekt podwyższonej twardości spowodowany obecnością warstwy azotowanej. Pomiary mikrotwardości wykazały, że na powierzchniach P1, P2 i P3 warstwa hybrydowa zachowuje swoje właściwości lepiej niż na krawędziach R1 i R2. Na narzędziu z powłoką AlCrTiSiN (Rys. 22c) doszło do utraty twardości na powierzchni P1 i promieniach R2 i R3, gdzie jak wykazały poprzednie wyniki doszło do całkowitego usunięcia warstwy hybrydowej. Na powierzchniach P1 i P2 widoczny jest niewielki spadek twardości na głębokości ok. 0,1mm, który oznacza przypowierzchniowe odpuszczenie materiału. Obserwowany przy powierzchni większa twardość potwierdza ochronną rolę powłoki PVD wobec warstwy azotowanej, która zabezpiecza ją przed zużyciem ściernym i tworzy barierę przeciwko szokom cieplnym. Nie jest to jednak pełna ochrona i podczas eksploatacji narzędzia z warstwą hybrydową w wybranych miejscach dochodzi do obniżenia twardości warstwy azotowanej na skutek kontaktu z gorącym materiałem oraz widoczny jest również spadek twardości pod warstwą azotowaną.

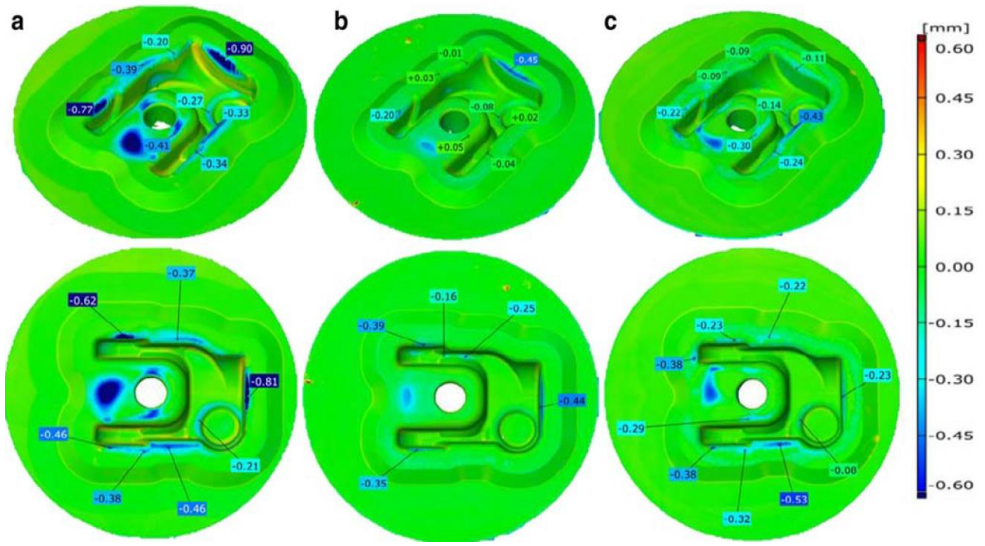
Badania dotyczące wpływu zastosowania warstw hybrydowych na trwałość narzędzi analizowałem również w innych procesach kucia. Wyniki tych badań zostały opisane w pracach [**H8-H12**].

W ostatnim czasie nawiązałem również wartościową współpracę z czeską firmą SHM, zajmującą są osadzaniem powłok PVD. Firma ta do tej pory stosowała powłoki PVD na narzędziach skrawających, nie posiadała natomiast doświadczenia w zastosowaniu połok PVD na narzędziach kuźniczych. Nawiązana współpraca zaowocowała wspólnymi badaniami opublikowanymi w pracy [H9], gdzie analizowano wpływ zastosowania warstwy hybrydowej z powłoką CrAlSiN o handlowej nazwie ALWIN na trwałość narzędzi w przemysłowym procesie kucia odkuwki

rozwidlonej. Badania przedstawione w pracy [**H9**] dla porównania obejmowały również narzędzia, na których nie zastosowano żadnej z metod poprawy trwałości oraz narzędzie po azotowaniu. Takie podejście pozwoliło bezpośrednio wykazać wpływ zastosowanej powłoki PVD. W tej pracy wszystkie analizowane narzędzia wykonane były ze stali UNIMAX.



Rys. 23 Widok makro narzędzi: a) narzędzi ze stali UNIMAX po odkuciu 16000 szt. odkuwek, b) narzędzie z warstwą azotowaną po odkuciu 16000 szt. odkuwek, c) narzędzie z warstwą hybrydową z powłoką PVD po odkuciu 26000 szt. odkuwek [**H9**]



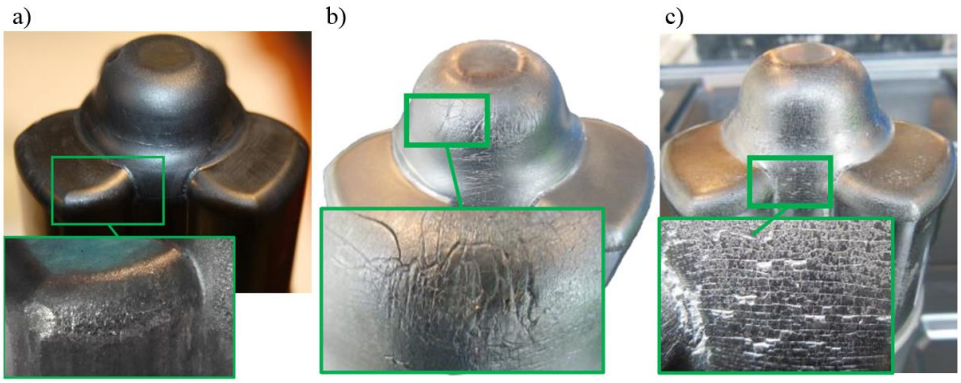
Rys. 24 Wyniki analizy geometrycznej: a) narzędzie ze stali UNIMAX po odkuciu 16000 szt. odkuwek, b) narzędzie z warstwą azotowaną po odkuciu 16000 szt. odkuwek, c) narzędzie z warstwą hybrydową z powłoką PVD po odkuciu 26000 szt. odkuwek [**H9**]

Potwierdzeniem uzyskanego efektu poprawy trwałości jest skan narzędzi przedstawiony na Rys. 24, gdzie pomimo większej ilości odkutych sztuk widać, że zużycie narzędzi z zastosowaną warstwą hybrydową jest na niższym poziomie niż narzędzi bez warstwy hybrydowej.

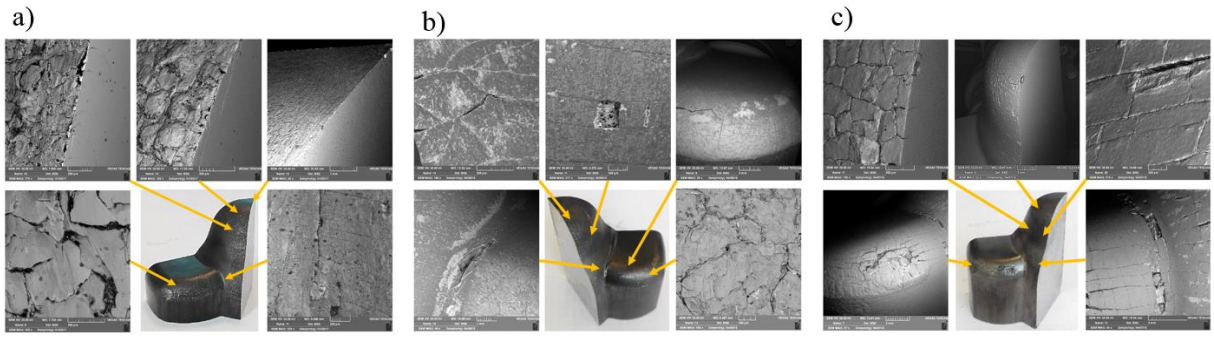
Badania mające na celu wykazanie i weryfikację możliwości zastosowania warstw hybrydowych prowadzonych przeze mnie zostały również przedstawione i opisane w innych pracach, między

innymi [10] i [11], gdzie w warunkach przemysłowych były testowane narzędzia z zastosowanymi warstwami hybrydowymi.

Obok wielu pozytywnych rezultatów niekiedy zastosowanie warstw hybrydowych z powłokami PVD lub CVD przynosi negatywne efekty. Twarde powłoki mogą powodować wcześniejsze pękanie i powstawanie uszkodzeń na powierzchni matryc, a czasami wręcz intensyfikują zużycie. Zaobserwowano także zmiany w sposobie zużycia, które utrudniały jego interpretację i prognozowanie zużycia narzędzi. W efekcie zamiast oczekiwanego zwiększenia trwałości obserwowano zaobserwowano jej zmniejszenie. Przykładem badań, które wykazały negatywny wpływ zastosowanych warstw hybrydowych na trwałość narzędzi kuźniczych są badania przedstawione w pracy [H6], gdzie analizowana była trwałość stempli stosowanych w procesie kucia precyzyjnego obudowy przegubów homokinetycznych. Na Rys. 25 przedstawiono widok makro analizowanych stempli, na którym wyraźnie widać liczne pęknięcia oraz wykruszenia całych fragmentów z warstwy wierzchniej stempli z zastosowanymi warstwami hybrydowymi. Uszkodzenia te są zlokalizowane głównie na powierzchni bocznej stempla oraz u nasady, na styku powierzchni bocznej i powierzchni poziomej, gdzie panuje niekorzystny stan naprężeń.



Rys. 25 Widok makro stempli: a) stempel bez dodatkowych metod modyfikacji warstwy wierzchniej po odkuciu 4372 szt., b) stempel z warstwą hybrydową PN+AlCrTiN po odkuciu 1850 szt., c) stempel z warstwą hybrydową PN+CrN po odkuciu 2000 szt. [**H6**]



Rys. 26 Widok SEM powierzchni stempli: a) stempel bez dodatkowych metod modyfikacji warstwy wierzchniej po odkuciu 4372 szt., b) stempel z warstwą hybrydową PN+AlCrTiN po odkuciu 1850 szt., c) stempel z warstwą hybrydową PN+CrN po odkuciu 2000 szt. [**H6**]

Na powierzchni stempla wykonanego ze stali UNIMAX bez dodatkowych metod modyfikacji warstwy wierzchniej po odkuciu 4372 sztuk tworzy się siatka pęknięć cieplno-mechanicznych. Dodatkowo na promieniu w obszarze czoła stempla warstwa wierzchnia odkształca się plastycznie,

o czym świadczą zakrzywione pęknięcia widoczne na przekroju. Odkształcenia plastyczne występują również na mniejszym promieniu a widoczna w tym miejscu odkształcona siatka pęknięć wyglądem przypomina „łuski" (Rys. 26a).

Widok powierzchni stempla z zastosowaną warstwą hybrydową PN+AlCrTiN po odkuciu 1850 odkuwek różni się od wcześniej stempla bez warstwy hybrydowej. Różnice jakie można zaobserwować polegają na sposobie pękania i dotyczą głównie kształtu siatki pęknięć, które nie jest regularna oraz głębokości pęknięć, które lokalnie rozszerzają się tworząc bardzo głębokie szczeliny (Rys. 26b). Ze względu na te pęknięcia oraz lokalne wykruszenia narzędzie również zostało wycofane z eksploatacji znacznie szybciej.

W przypadku stempla z warstwą hybrydową PN+CrN po odkuciu 2000 odkuwek na powierzchni widoczna jest regularna siatka głębokich pęknięć cieplno-mechanicznych, przy czym obserwacja pęknięć na przekroju próbki nie wykazała występowania odkształceń plastycznych warstwy wierzchniej. Niezależnie od tego podobnie jak poprzednich przypadkach widoczne są liczne wykruszenia fragmentów warstwy otoczonych pęknięciami. Postać tych wykruszeń i odkształcenia całych „oczek siatki" pęknięć wyraźnie wskazują na działanie nadmiernych naprężeń stycznych (Rys. 26c). W związku z tym pomimo niskiej wartości ogólnego geometrycznego ubytku taka forma zużycia jest bardzo niekorzystna, ponieważ nawet najmniejsze uszkodzenia na powierzchni narzędzia powodują znaczące obniżenie jakości wytwarzanych odkuwek, co w przypadku kucia precyzyjnego jest niedopuszczalne.

Wyniki uzyskane dla zastosowanych warstw hybrydowych PN+CrN (2000 odkuwek) oraz PN+AlCrTiN (1850), w porównaniu dla wyników stempla bez warstwy ochronnej (ponad 4300 odkuwek) poddają w wątpliwość zasadność stosowania warstw hybrydowych w tego typu procesach, gdzie ze względu na występujące duże obciążenia mechaniczne warstwy hybrydowe szybko ulegają uszkodzeniu.

Moje doświadczenie w analizie trwałości narzędzi kuźniczych wskazuje, że najlepszym sposobem na ocenę skuteczności zastosowanych metod poprawy trwałości danego narzędzia jest analiza mechanizmów zużycia jakie w nim występują. Porównanie uzyskanych wyników w postaci liczby wykonanych cykli kucia lub sztuk uzyskanych odkuwek nie zawsze jednak jest miarodajne zwłaszcza w procesach kucia na gorąco, gdzie występują niestabilne, zmienne warunki pracy narzędzi. Zmienność procesu kucia może mieć szczególny wpływ na ocenę wpływu powłok na trwałość mimo przetestowania wielu narzędzi eksploatowanych kolejno w tym samym procesie kucia. Porównanie narzędzi, które pracowały w nieco innych warunkach zawsze będzie obarczone dużym błędem. Aby wyeliminować wszelkie błędy wynikające z niestabilności i zmienności procesu kucia zaproponowałem narzędzie testowe, które w jednym procesie (w tym samym czasie) umożliwia test kilku powłok przeciwzużyciowych. Badania te zostały opisane w pracy [**H12**].

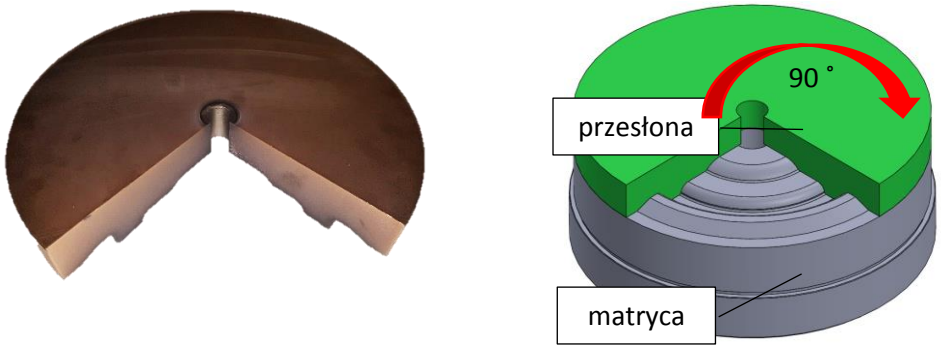
Powierzchnię roboczą matrycy testowej podzielono na 4 obszary, na których zastosowano trzy różne warianty warstwy hybrydowej oraz samą warstwę azotowaną, którą zastosowaną jako obróbkę będącą punktem odniesienia przy ocenie warstw hybrydowych. Natomiast zastosowane warstwy hybrydowe różniły się powłoką PVD, którymi były: powłoka AlTiCrN, powłoka CrN oraz powłoka AlCrTiSiN.

Do przygotowania matrycy testowej została zaprojektowana i wykonana specjalna przesłona (Rys. 27a), która była wykorzystywana w procesie nakładania powłok PVD. Dolna powierzchnia

przekładki była odwzorowaniem wykroju roboczego matrycy, dzięki czemu dokładnie przylegała do jej powierzchni. Przesłona przed procesem osadzania każdej kolejnej powłoki PVD była obracana o 90°, dzięki czemu nakładana powłoka osadzała się tylko w odsłoniętym aktualnie miejscu narzędzia (Rys. 27b).

Zastosowanie na jednym narzędzi różnych wariantów obróbki powierzchniowej pozwoliło na przetestowanie skuteczności czterech warstw w zwiększaniu trwałości dokładnie w tych samych warunkach pracy narzędzia. Dzięki temu wyeliminowany został wpływ dodatkowych czynników związanych między innymi niestabilnością samego procesu produkcyjnego, co determinuje różne warunki pracy narzędzi. Uniknięto również różnic wynikających z samego przygotowania narzędzi testowych i ich obróbki cieplnej. Czynniki te mogą w znaczący sposób wpłynąć na wyniki i ocenę skuteczności analizowanej metody poprawy trwałości narzędzi.

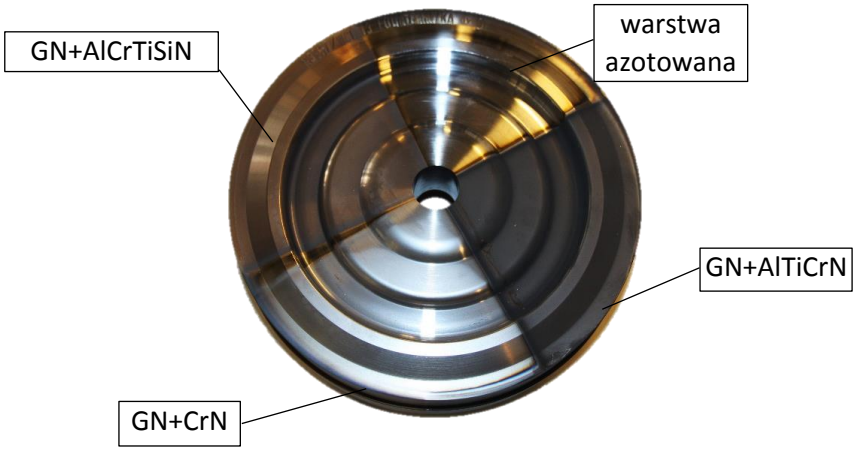
a) b)



Rys. 27 a) Przesłona stosowana przy nakładaniu powłok PVD, b) Model analizowanej matrycy testowej z przekładką [**H12**]

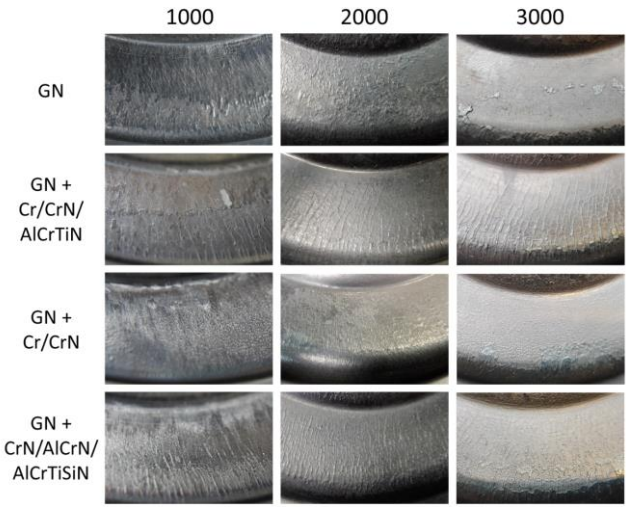
Warstwy hybrydowe wytworzono w Zakładzie Inżynierii Powierzchni Instytutu Technologii Eksploatacji Państwowego Instytutu Badawczego w Radomiu (obecnie Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji). Proces wielostopniowej obróbki hybrydowej analizowanej matrycy przeprowadzono w następujących etapach:

- etap I - próżniowa obróbka cieplna podłoża stalowego: (cała powierzchnia robocza),
- etap II – operacja wytworzenia warstwy azotowanej metodą azotowania gazowego: (cała powierzchnia robocza),
- etap III – procesy osadzenia wybranych powłoki Cr/CrN: (1/4 powierzchni roboczej)
- etap IV – procesy osadzenia wybranych powłoki AlTiCrN: (1/4 powierzchni roboczej)
- etap V – procesy osadzenia wybranych powłoki AlCrTiSiN: (1/4 powierzchni roboczej)



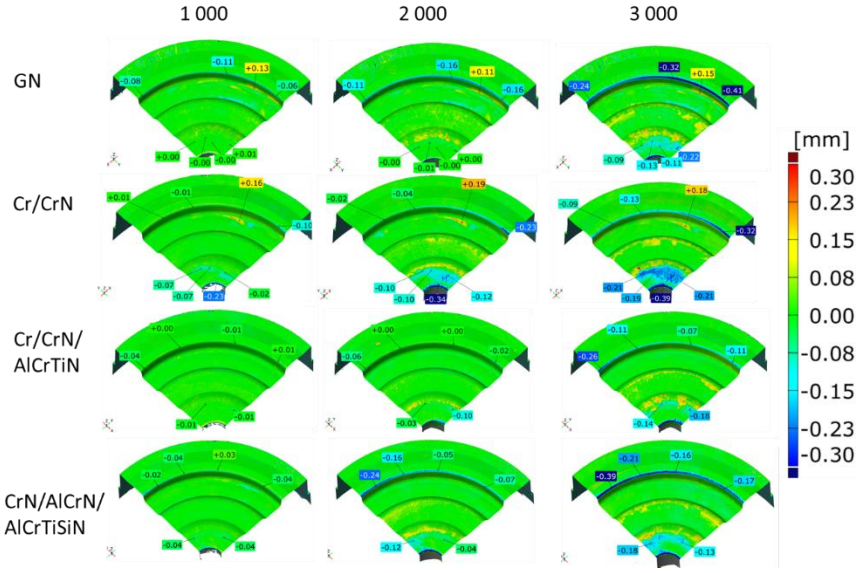
Rys. 28 Matryca testowa[**H12**]

Tak przygotowana matryca testowa (Rys. 28) została poddana testom eksploatacyjnym w warunkach przemysłowych. Testy eksploatacyjne podzielone były na trzy etapy, w każdym z etapów przy użyciu matrycy odkuto po 1000 szt. odkuwek, następnie matryca była poddawana wstępnej analizie (analiza makroskopowa oraz pomiarowi zużycia przy pomocy skanera laserowego). Natomiast szczegółowe badania mechanizmów zużycia dla tych matryc przeprowadzono po łącznym odkuciu 3000 odkuwek. Przykładowe wyniki obserwacji makroskopowych dla wybranego obszaru przedstawiono na Rys. 29. Obserwacje makroskopowe wykazały ślady występowania mechanizmów zużycia, takich jak pękanie zmęczeniowe i utlenianie, które wystąpiły z różną intensywnością dla poszczególnych warstw. W miejscu, w którym była zastosowana warstwa azotowana (GN) zaobserwowano ślady naklejania się materiału odkuwki, słabo widoczna jest również dość drobna siatka pęknięć. Na powierzchni obszaru z warstwą GN+Cr/CrN/AlCrTiN występuje wyraźna siatka pęknięć, rozchodzących się w kierunku promieniowym. Pęknięcia są ukierunkowane i mają wyraźną tendencję do rozszerzania się. Podobnie, choć w mniejszym stopniu pękaniu ulega powłoka CrN/AlCrN/AlCrTiSiN, dla której widoczne są pęknięcia rozchodzące się zarówno w kierunku promieniowym jaki i obwodowym. W przypadku warstwy GN+Cr/CrN zaobserwowano bardzo drobną sieć pęknięć, które nie wykazują tendencji do poszerzania, nie są ukierunkowane ani nie wykazują regularnego kształtu.



Rys. 29 Widok makro wybranego obszaru narzędzia z podziałem na 4 strefy z zastosowanymi warstwami hybrydowymi po odkuciu 1000, 2000 i 3000 szt. odkuwek [**H12**]

Wyniki pomiarów geometrycznego zużycia przedstawiono na Rys. 30. Pomiary wykazały w części środkowej znaczne ślady zużycia dla wszystkich badanych warstwach w postaci lokalnych ubytków ok. 0,1-0,2 mm, które miały największą wartość w warstwie z powłoką Cr / CrN. Tak znaczące zużycie obserwowane już po 2-3 tys. cykli kucia jest zastanawiające i świadczy o wystąpieniu zbyt silnych obciążeń cieplnych mechanicznych mechanicznych, które doprowadziły do nagłego uszkodzenia warstw hybrydowych. W obszarze płaskim, który przedstawiono na Rys. 29, wszystkie warstwy wykazywały dobrą odporność na zużycie, pomiary nie ujawniły w tym obszarze ubytku materiału w całym analizowanym obszarze. Największe geometryczne ślady zużycia występują w obszarze mostka matrycy, w obszarze z warstwa azotowaną (GN) (0,3-0,4 mm). Niewiele mniejsze ubytek (0,16-0,20 mm) zaobserwowano również dla warstwy z powłoką CrN/AlCrN/AlCrTiSiN. Na tej podstawie można wyciągnąć wniosek o zwiększonej odporności powłok Cr/CrN i Cr/CrN/AlCrTiN na zużycie ścierne.



Rys. 30 Porównanie skanów narzędzia przed i po kuciu dla testowanych warstw po 1000, 2000 i 3000 cykli kucia [**H12**]

Przedstawione badania wykazały korzystny wpływ zastosowania warstw hybrydowych typu warstwa azotowana i powłoka PVD na efekt poprawy trwałości narzędzi kuźniczych. Przy czym bardzo istotny jest ich poprawny dobór zastosowanej warstwy. Niepoprawny dobór powłoki PVD może przyczynić się do obniżenia trwałości.

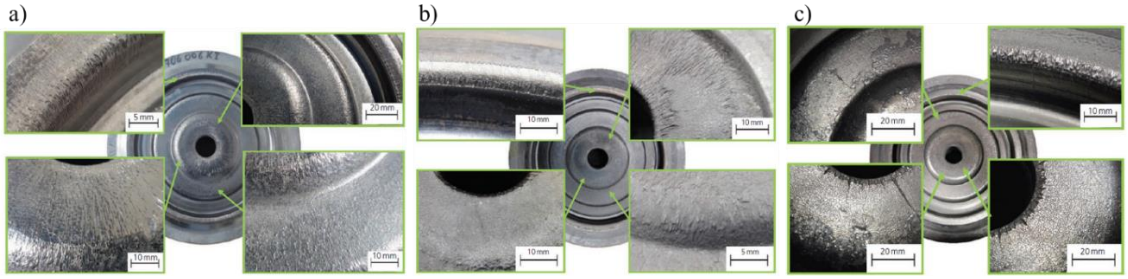
Napawanie

Kolejnym kierunkiem prowadzonych przeze mnie badań była możliwość zastosowania technik spawalniczych do regeneracji zużytych narzędzi kuźniczych. Badania te realizowałem w ramach projektu badawczego dla Młodych Naukowców finansowanego ze środków własnych Politechniki Wrocławskiej pt. „Analiza możliwości regeneracji narzędzi kuźniczych przez napawanie", którego byłem kierownikiem. Narzędzie wytypowane do badań poddane było dwukrotnie regeneracji przez napawanie. Następnie przeprowadzona analiza wykazała, że metoda ta pozwala na skuteczne regenerowanie narzędzi kuźniczych, dzięki czemu możliwe jest kilkukrotne wykorzystanie tego samego narzędzia, którego wykonanie jest kilkukrotnie droższe od jego regeneracji przez napawanie [**H16**].

Ponadto stwierdzono zdecydowanie mniejsze zużycie narzędzia po napawaniu w porównaniu z narzędziami „nowymi", wykonanymi w dotychczas stosowanej technologii, oceniane po odkuciu podobnej liczby odkuwek.

Po uzyskaniu zaskakująco pozytywnych wyników trwałości narzędzi napawanych zdecydowałem się na zaproponowanie warstwy hybrydowej łączącej napawanie i azotowanie. Wyniki badań pilotażowych dotyczących tych warstw zostały opublikowane w pracy [**H13**], gdzie analizowano wpływ nowej warstwy hybrydowej na trwałość wybranego narzędzia kuźniczego. W celu porównania i oceny zastosowanej technologii hybrydowej analizie poddano również narzędzie poddane tylko procesowi napawania oraz matrycę dla której zastosowano jedynie azotowanie. Do napawania wykorzystano spoiwo o handlowej nazwie Welding Alloys – Robotool 46 natomiast warstwę azotowaną uzyskano w procesie azotowania gazowego. Narzędzia po obróbce powierzchniowej zostały poddane testom eksploatacyjnym, w których przy użyciu każdego z nich odkuto około 7000 szt. odkuwek. Następnie narzędzia te po pracy zostały poddane wnikliwej analizie.

Obserwacje napawanego narzędzia (Rys. 31 a) wykazały występowanie intensywnego zużycia ściernego w okolicy mostka w miejscu tworzenia się wypływki. Podobnie w centralnie położonej czołowej części narzędzia doszło do zużycia w postaci promieniowo rozchodzących się bruzd charakterystycznych dla zużycia ściernego. Pozostałą powierzchnię narzędzia pokrywają liczne, drobne pęknięcia typowe dla zmęczenia cieplno-mechanicznego.

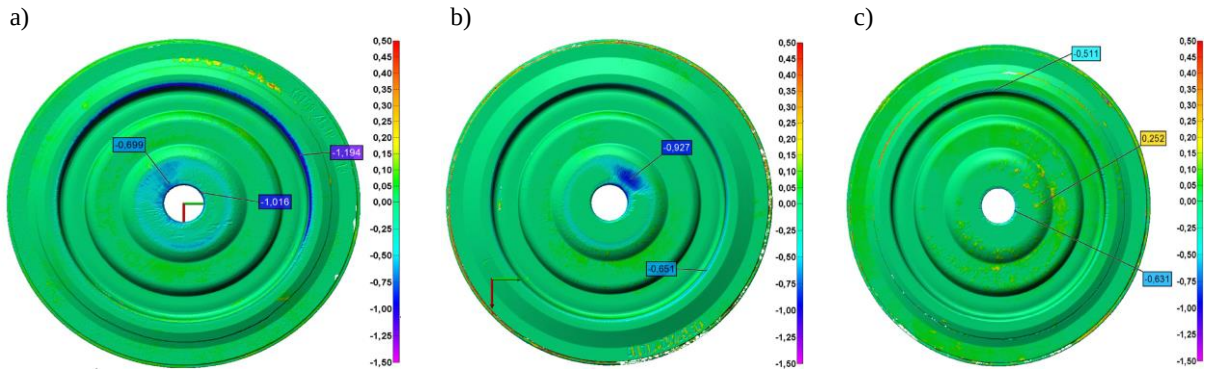


Rys. 31 Widok makro powierzchni analizowanych narzędzi: a) narzędzie po napawaniu, b) narzędzie z warstwą azotowaną, c) narzędzie po obróbce hybrydowej łączącej napawanie i azotowanie [**H13**]

W przypadku narzędzia azotowanego (Rys. 31 b) na jego powierzchni występuje twarda warstwa azotków. Po eksploatacji widoczne są liczne pęknięcia w postaci gęstej siatki pęknięć, które występują zwłaszcza na centralnej części narzędzia, gdzie warstwa wierzchnia popękała oraz lokalnie uległa usunięciu poprzez wykruszenie. W miejscach tych utworzyły się bruzdy typowe dla zużycia ściernego. W okolicy mostka narzędzie to również uległo intensywnemu zużyciu ściernemu, natomiast dodatkowo, w pozostałych obszarach widoczne są lokalne naddatki, które prawdopodobnie tworzą tlenki żelaza powstające na skutek utleniania powierzchni roboczej w wysokich temperaturach jej eksploatacji.

Narzędzie z hybrydową warstwą wierzchnią łączącą napawanie i azotowanie wykazało widocznie najmniejsze ślady zużycia, które jedynie lokalnie w okolicy mostka przyjmuje charakter zużycia ściernego, aczkolwiek jego intensywność i zakres występowania są znacznie mniejsze niż w przypadku pozostałych narzędzi. Na czołowej powierzchni obecne są liczne pęknięcia zmęczeniowe, świadczące o zmęczeniu cieplno-mechanicznym. W tym rejonie widoczne są także

nieliczne pęknięcia rozchodzące się promieniowo od środka narzędzia, które mogą stanowić początek ubytku ściernego w dalszej eksploatacji.



Rys. 32 Wyniki analizy geometrycznej: a) narzędzie po napawaniu, b) narzędzie z warstwą azotowaną, c) narzędzie po obróbce hybrydowej łączącej napawanie i azotowanie [**H13**]

Analiza geometryczna wykazała brak ubytku ściernego materiału na powierzchni narzędzia z warstwą hybrydową łączącą napawanie i azotowanie w części środkowej w odróżnieniu od pozostałych narzędzi. W obszarze mostka zaobserwowano niewielki ubytek w przedziale (0-0,5mm) nierównomiernie rozmieszczony na obwodzie narzędzia. Dodatkowo zaobserwowano naddatki materiału na pozostałych powierzchniach o wartości do 0,25mm, które można zinterpretować jako tlenki powstałe na powierzchni rozgrzanej matrycy. Niemniej jednak zużycie tej matrycy jest wyraźnie najmniejsze i świadczy o wyjątkowej trwałości tego rodzaju narzędzi.

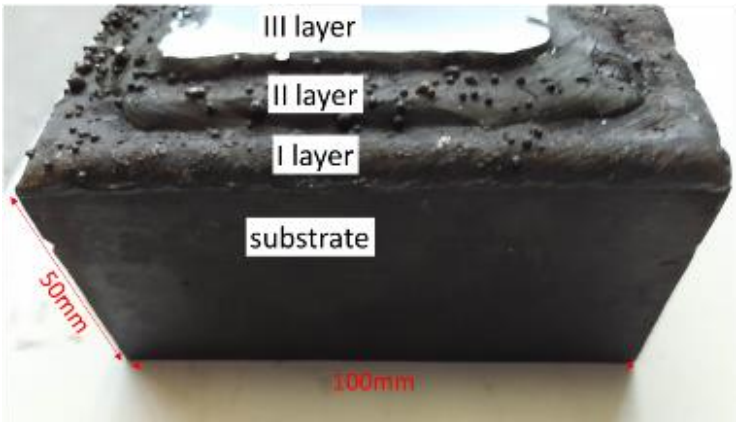
Po wykazaniu znacznego efektu poprawy trwałości narzędzi w porównaniu z dotychczas stosowanymi metodami, przed opublikowaniem wyżej przedstawionych wyników [**H13 i H15**] zdecydowano się na zgłoszenie rozwiązania do ochrony patentowej pod nazwą "Sposób poprawy trwałości narzędzia kuźniczego przez modyfikację jego warstwy wierzchniej"(zgłoszenie nr P.424624), na które przyznano ochronę patentową w 2019 roku.

Uzyskane wyniki skłoniły mnie również do szczegółowego przeanalizowania tego typu nowych warstw hybrydowych. Szczególnie, że opracowanie i wdrożenie takich warstw stanowi znaczne wyzwanie naukowe z uwagi na szeroki zakres dostępnych materiałów dedykowanych do napawania narzędzi kuźniczych oraz metod i rodzajów azotowania umożliwiających uzyskanie warstw azotowanych o różnej budowie.

W związku z tym w 2019 roku przygotowałem projekt pt. „Opracowanie innowacyjnej metody zwiększenia trwałości narzędzi kuźniczych przez dobór optymalnych parametrów hybrydowego procesu napawania z azotowaniem wspomagany modelowaniem numerycznym warstwy wierzchniej”, w ramach konkursu LIDER, na który uzyskałem dofinansowanie od Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.

Celem projektu jest opracowanie technologicznej, hybrydowej warstwy wierzchniej łączącej napawanie i azotowanie. Dobór parametrów hybrydowej warstwy wierzchniej będzie indywidualnie dopasowany do warunków pracy danego narzędzia kuźniczego, co będzie możliwe dzięki wnikliwej analizie warunków pracy oraz zastosowaniu specjalnie opracowanego modelu numerycznego warstwy wierzchniej.

Dotychczasowe badania prowadzone w ramach projektu obejmowały określenie właściwości warstw napawanych oraz warstw hybrydowych łączących napawanie i azotowanie. Wyniki badań zostały przedstawione w pracy [**H14**]. Badania prowadzono na próbkach, które przygotowano tak, by były reprezentatywne względem procesu wytwarzania narzędzi kuźniczych. Część bazową każdej próbki stanowiła kostka o wymiarach 100x100x50mm (Rys. 33) wykonana ze stali X37CrMoV5-1 obrobionej cieplnie przez hartowanie i wysokie odpuszczanie do twardości ok. 450-500 HV0.1, co odpowiada typowej obróbce cieplnej narzędzi kuźniczych stosowanych w procesach kucia matrycowego na gorąco. Na tym podłożu naniesiono 3 warstwy napawane wykonane metodą FCAW-S (drutem proszkowym samoosłonowym). Jako materiał napoiny zastosowano dwa druty proszkowe produkcji Welding Alloys – Robotool 46G oraz Hardface VMolc.

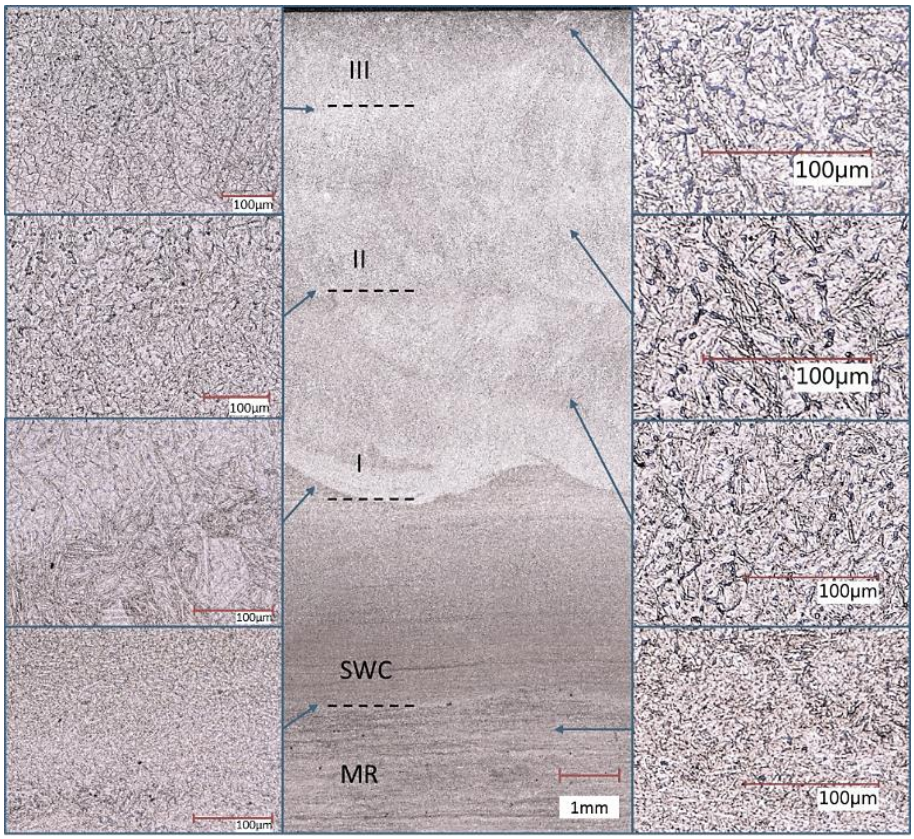


Rys. 33 Widok próbki napawanej po obróbce mechanicznej [**H14**]

Przeszlifowane próbki po napawaniu podzielono na dwie części, w celu poddania jednej z części procesowi azotowania gazowego metodą ZeroFlow z niskim potencjałem tak, aby uzyskać warstwę dyfuzyjną, bez strefy ciągłych azotków na powierzchni. Moje badania dotyczące azotowania narzędzi kuźniczych wykazały, że ten wariant obróbki jest najbardziej odpowiedni na narzędziach kuźniczych co zostało potwierdzone i opisane w [**H5**]. Proces azotowania prowadzono w temperaturze 550°C, w czasie ok. 13h.

Następnie przeprowadzono badania laboratoryjne uzyskanych warstw wierzchnich, które obejmowały obserwacje mikrostruktury, pomiary mikrotwardości w funkcji odległości od powierzchni, pomiar naprężeń w warstwie wierzchniej metodą dyfrakcji rentgenowskiej, testy tribologiczne.

Próbki przygotowano poprzez cięcie, szlifowanie i polerowanie oraz trawienie następującymi odczynnikami Nital 5% oraz Vilella's. Obraz analizowano w całym przekroju zwracając uwagę na mikrostrukturę poszczególnych warstw oraz na strefy przejściowe.



Rys. 34 Mikrostruktura 3 warstwowej napoiny napawanej materiałem Robotool 46 [**H14**]

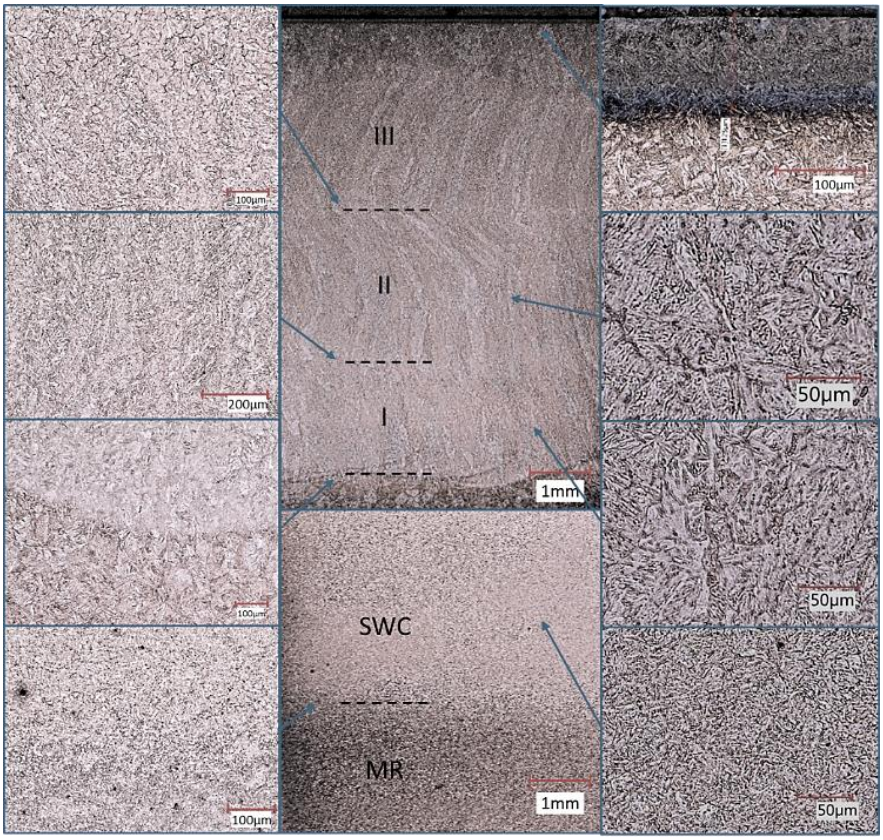
Strukturę warstwy napawanej materiałem Robotool 46 przedstawiono na Rys. 34. Napoina wykonana została w 3 warstwach co widać na środkowym zdjęciu przedstawiającym złożenie całej powierzchni próbki (powstało ze zdjęć o powiększeniu 200x w systemie 3D HDR) od wierzchniej warstwy, aż do materiału rodzimego (MR). Na podstawie obserwacji można stwierdzić, że sposób wykonania poszczególnych warstw charakteryzuje się wysoką jakością, nie zaobserwowano niezgodności spawalniczych. Dobrze widoczne są poszczególne ściegi napoiny o budowie komórkowo-dendrytycznej i szeroka strefa SWC w materiale rodzimym.

W strukturze materiału rodzimego (MR) występuje drobnoziarnista mikrostruktura martenzytu odpuszczania stali z obecnością niewielkiej ilości austenitu szczątkowego. Strukturę materiału rodzimego cechuje pasmowość z wydzieleniami węglików. W wyższej części próbki widoczna jest szeroka SWC, w której nastąpiła wyraźna zmiana struktury stali. Nastąpiło rozdrobnienie ziaren i zmniejszenie jej pasmowości. Struktura tego obszaru stali ma charakter sorbitu odpuszczania. Głębokość wtopienia pierwszej warstwy wynosi ok. 1 mm, a struktura warstwy przy linii wtopienia wykazuje niejednorodność. Tego typu struktura powstaje w przypadku różnicy składu chemicznego stopiwa i materiału podłoża.

Tuż pod linią wtopienia występuje gruboziarnista struktura bainityczno-martenzytyczna o zmiennej szerokości do ok. 1 mm. Struktury poszczególnych warstw są podobne i mają budowę komórkowo-dendrytyczną, składającą się z drobnoziarnistej niskoodpuszczonej struktury banitycznej z dużą ilością węglików występujących na granicach ziaren (najprawdopodobniej węgliki chromu) oraz z pewną ilością węglików wstępujących wewnątrz ziaren. Widoczna jest też niewielka ilość austenitu szczątkowego.

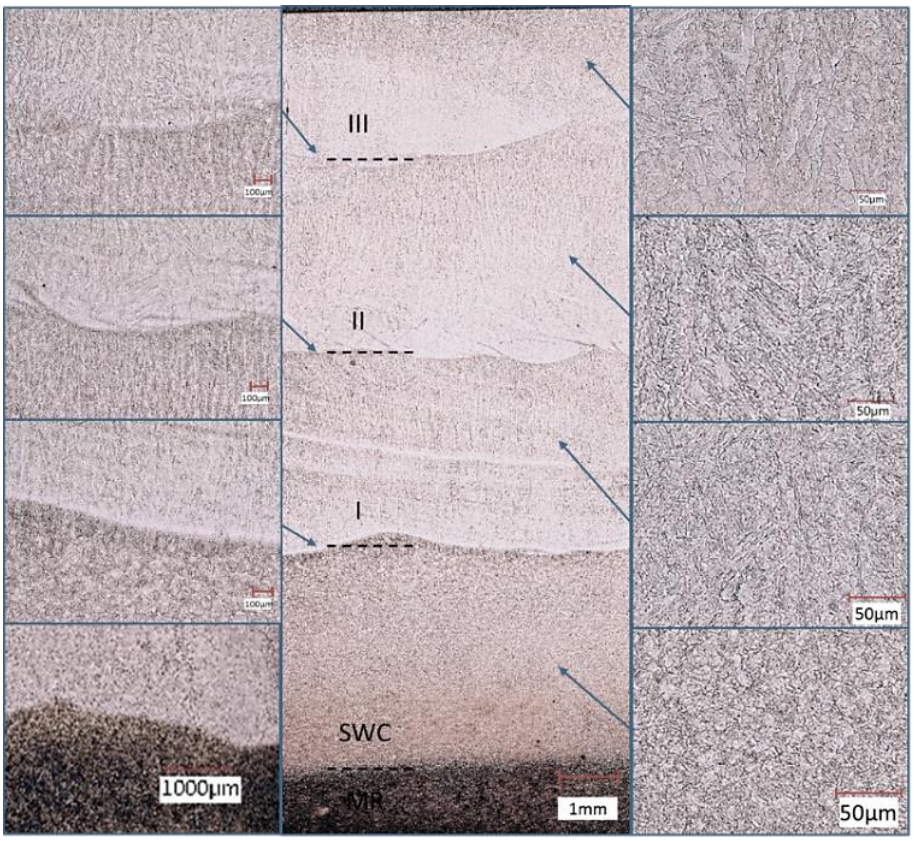
W obszarze wtopienia między poszczególnymi warstwami wystąpiło rozdrobnienie ziaren i zwiększona ilość węglików w strukturze pod wpływem ciepła dostarczanego podczas nakładania

następnej warstwy. Ostatnia warstwa napoiny, a w szczególności część wierzchnia składa się z martenzytu niskoodpuszczonego.



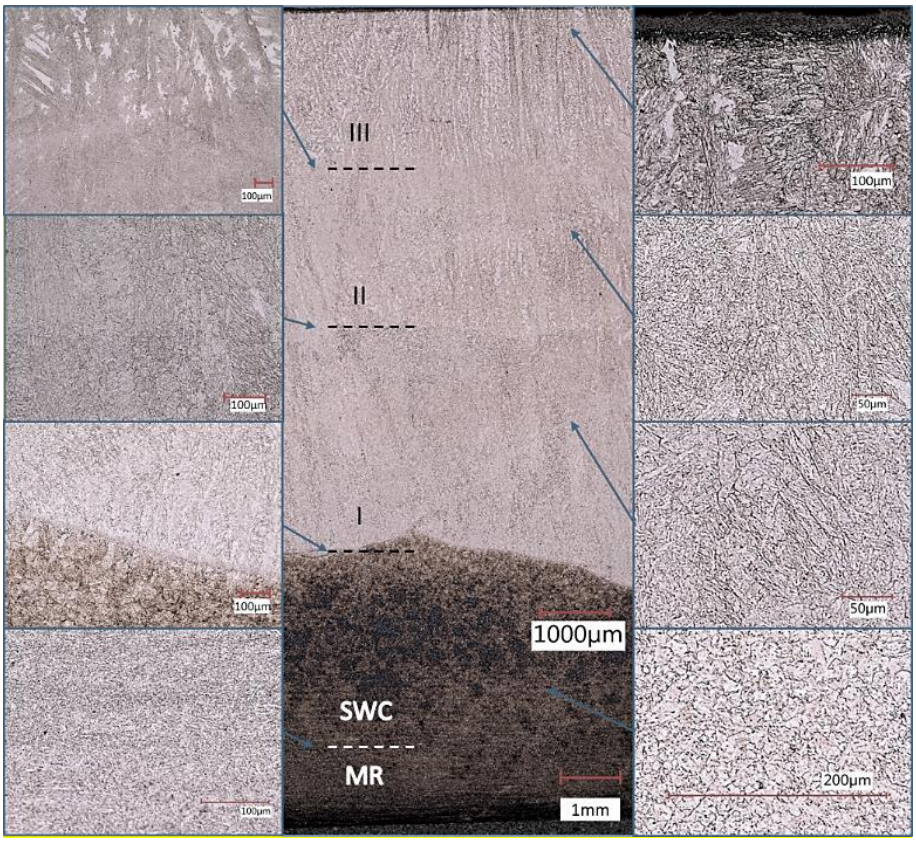
Rys. 35 Mikrostruktura warstwy hybrydowej łączącej napawanie materiałem Robotool 46 oraz azotowanie [**H14**]

Strukturę próbki poddanej obróbce hybrydowej łączącej napawanie materiałem Robotool 46 i azotowanie przedstawiono na Rys. 35. Podobnie jak w przypadku próbki po napawaniu dobrze widoczne są poszczególne ściegi napoiny i szeroka strefa SWC. Struktura tego obszaru stali ma charakter sorbitu odpuszczania. Struktura pomiędzy poszczególnymi warstwami wykazuje zmiany na granicy wtopienia ze względu na ciepło dostarczane w wyniku nakłania warstwy następnej ze zwiększoną ilością węglików w strukturze. Sama budowa poszczególnych warstw jest podobna i składa się z drobnoziarnistej wysoko odpuszczonej struktury banitycznej z dużą ilością, większą niż w przypadku próbki nie poddanej procesowi azotowania, węglików występujących na granicach ziaren (najprawdopodobniej węgliki chromu) oraz z pewną ilością węglików występujących wewnątrz ziaren. Na granicach ziaren widoczna jest niewielka ilość austenitu szczątkowego. Uzyskana warstwa azotowana składała się ze strefy dyfuzyjnej α.



Rys. 36 Mikrostruktura 3 warstwowej napoiny napawanej materiałem Hardface V Molc [**H14**]

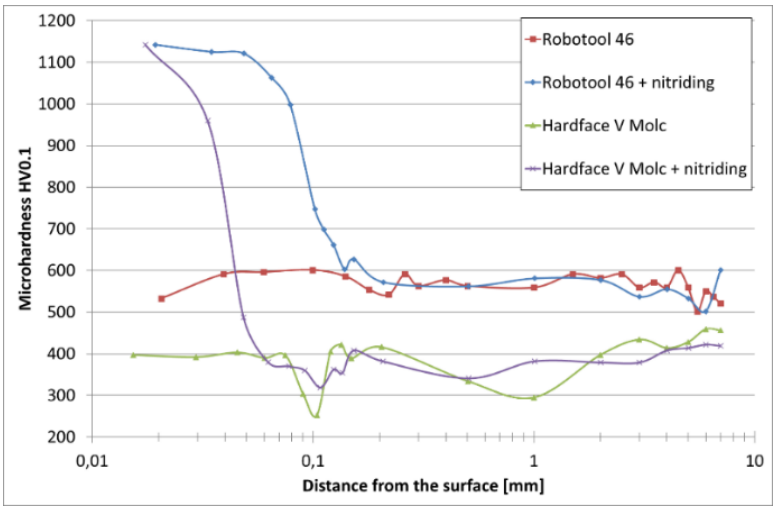
Na Rys. 36, widoczna jest napoina wykonana w 3 warstwach materiałem Hardface V Molc. Podobnie jak w poprzednim przypadku próbka charakteryzuje się wysoką jakością, nie zaobserwowano niezgodności spawalniczych. Dobrze widoczne są poszczególne ściegi napoiny o budowie komórkowo-dendrytycznej i szeroka strefa SWC w materiale rodzimym. W strukturze materiału rodzimego (MR) występuje drobnoziarnista struktura martenzytu odpuszczania stali podobna w swojej budowie do struktury przedstawionej. W wyższej części próbki widoczna jest szeroka SWC, w której nastąpiła wyraźna zmiana struktury stali. Nastąpiło rozdrobnienie ziaren i zmniejszenie jej pasmowości. Struktura tego obszaru stali ma charakter sorbitu odpuszczania. Głębokość wtopienia pierwszej warstwy wynosi ok. 1 mm, a struktura warstwy przy linii wtopienia wykazuje strefę odwęglenia. Taka struktura powstaje w przypadku różnicy składu chemicznego stopiwa i materiału podłoża szczególnie gdy występuje duża różnica w zawartości Cr i C pod wpływem ciepła dostarczanego podczas nakładania następnej warstwy. Powoduje to wystąpienie obszaru występowania czystego ferrytu stopowego, może to też być powodem zwiększonej kruchości powstałej w wyniku dyfuzji reaktywnej oraz zwiększonej skłonności do pękania gorącego. Struktury poszczególnych warstw są podobne i mają budowę komórkowo-dendrytyczną, składającą się z ferrytu stopowego z bainitem przy czym w warstwie zewnętrznej występuje struktura o większej gruboziarnistości niż w warstwach poprzednich. W warstwach napoiny nie ma wyraźnych wydzieleń węglików na granicach ziaren natomiast jak było to widoczne w napoinach wykonanych z drutu Robotool 46 (Rys. 34 i Rys. 35), natomiast występują bardzo drobne wydzielenia węglików wewnątrz ziaren dendrytycznych struktury ferrytyczno-bainitycznej. Przy linii wtopienia od strony strefy SWC występuje struktura odpuszczonego martenzytu.



Rys. 37 Mikrostruktura warstwy hybrydowej łączącej napawanie materiałem Hardface V Molc oraz azotowanie [**H14**]

Na Rys. 37 przedstawiono zdjęcia mikrostruktury dla warstwy napawanej materiałem Hardface VMolc po obróbce azotowaniem. Na powierzchni napoiny występuje cienka warstwa azotowana o grubości ok. 50 µm. Struktura poszczególnych obszarów napoiny i stali jest podobna do tej przed azotowaniem za wyjątkiem większej ilości drobnych wydzieleń węglików wewnątrz ziaren napoiny i w strefie SWC.

W procesach, którym towarzyszy zużycie do których należą procesy kucia kluczowe znaczenie ma twardość warstwy wierzchniej narzędzi. W tym celu zmierzono mikrotwardość badanych warstw w odległości od 0,01 do 7 mm wykonując po 3 pomiary dla każdej z próbek. Na wykresie (Rys. 38) przedstawiono zależność mikrotwardości w funkcji odległości od powierzchni w skali logarytmicznej, którą przyjęto aby podkreślić twardość warstwy azotowanej w zakresie 0,01-0,1mm a jednocześnie wskazać wahania twardości na całym przekroju napoiny i strefy wpływu ciepła.



Rys. 38 Mikrotwardość w funkcji odległości od powierzchni próbki dla 4 badanych wariantów (odległość od powierzchni w skali logarytmicznej [**H14**]

Przedstawione na Rys. 38 wyniki w pierwszej kolejności pokazują efekt napawania próbek materiałami Robotool 46 oraz Hardface VMolc. Drut proszkowy Robotool 46 pozwolił na uzyskanie niemal jednolitej napoiny o twardości ok. 550HV przy powierzchni oraz 550-600HV na głębokości do 7 mm. Widoczne na wykresie lokalne obniżenia twardości na głębokości ok. 0,2mm oraz 3-5mm są odzwierciedleniem stref przejściowych pomiędzy kolejnymi warstwami, co także zostało potwierdzone w badaniach mikrostruktury. Podobnie napoina na bazie drutu Hardface VMolc cechuje się twardością na poziomie 400 HV z lokalnymi spadkami na głębokości ok. 0,1mm oraz 1 mm odpowiadającymi strefom przetopu na granicy poszczególnych warstw.

Wyniki pomiaru twardości pozwoliły również na ocenę profilu i głębokości utworzonych warstw azotowanych. W przypadku napoiny na bazie drutu Robotool 46 ujawniona została warstwa o zwiększonej twardości sięgającej 1150HV przy powierzchni, która cechuje się grubością efektywną o wartości ok. 140µm (zgodnie z przyjętym kryterium +50). Warstwa azotowana cechuje się twardością podobną do warstw uzyskiwanych w procesach azotowania stali narzędziowych przeznaczonych do pracy na gorąco. W przypadku napoiny na bazie drutu Hardface VMolc azotowanej w tym samym procesie azotowania zaobserwowano znacznie mniej głęboką warstwę azotków o mniejszej twardości niż dla materiału Robotool 46. Jest to warstwa o grubości efektywnej o wartości ok. 50µm (zgodnie z przyjętym kryterium +50). Na tej podstawie można wnioskować o mniejszej podatności na dyfuzję azotu w napoinach na bazie drutu Hardface VMolc, która wynika z większej zawartości chromu i niklu.

Wyniki badań zużycia ściernego

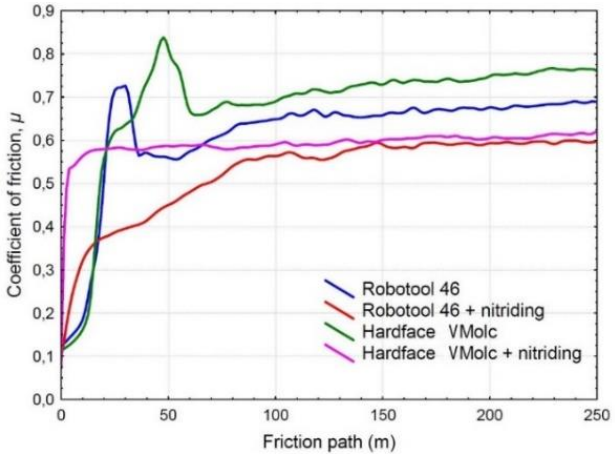
Badania zużycia ściernego przeprowadzono na powierzchni próbek. Testy zużycia zrealizowano na tribotesterze typu „ball-on-disc" firmy CSM Instruments, w warunkach tarcia technicznie suchego w temperaturze pokojowej 22 °C. Jako przeciwpróbki (ball) użyto kulek (kalibrowanych firmy CSM Instruments) o średnicy 6 mm wykonanych z węglika wolframu. Badania realizowano pod obciążeniem 10N z prędkością liniową 10 cm/s na promieniu 3 mm. Całkowita droga testu wynosiła 250 m, podczas której rejestrowano zmianę współczynnika tarcia. Przyjęta miarą zużycia był ubytek objętościowy próbki powstały jako ślad wytarcia w wyniku współpracy próbki i przeciwpróbki. Podczas pomiaru rejestrowano wartość współczynnika tarcia. Wartości zarejestrowanych w teście zużycia średnich współczynników tarcia zamieszczono w

Tabela *2* . Analiza porównawcza wykazała, że najniższy współczynnik tarcia (μ = 0,551) uzyskano dla próbki Robotool 46 + nitriding, natomiast największy współczynnik tarcia zarejestrowano dla próbki napawanej Hardface VMolc, który wynosi μ = 0,689.

Tabela 2 Zestawienie średnich wartości współczynnika tarcia

Nazwa próbki	**Średni współczynnik tarcia**	**Odchylenie standardowe**
Robotool 46	0,635	0,138
Robotool 46 + nitriding	0,551	0,112
Hardface VMolc	0,689	0,153
Hardface VMolc + nitriding	0,619	0,060

Na Rys. 39 przedstawiono wykres zarejestrowanych wartości współczynników tarcia w funkcji drogi.



Rys. 39 Przebieg zmiany średnich wartości współczynników tarcia (linia trendu) w funkcji drogi [**H14**]

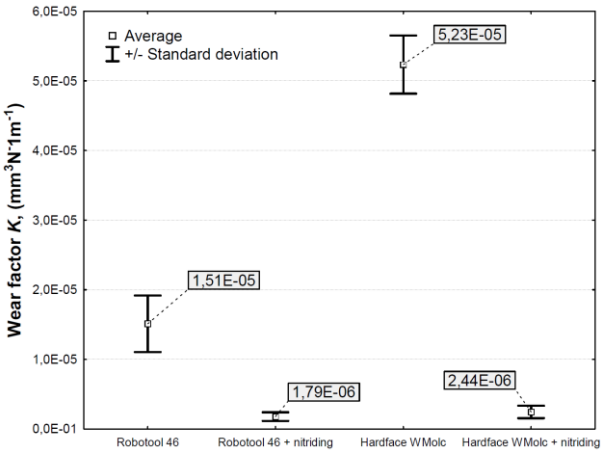
Zakłócenia zarejestrowane w początkowej fazie testu związane są z docieraniem się par trących, gdzie w pierwszej kolejności następuje ścinanie wierzchołków profili chropowatości i związana z tym zmiana pola powierzchni kontaktu, po czym następuje ustabilizowanie pracy pary ciernej. Można zauważyć że w okresie docierania zmiana współczynnika tarcia miała wyraźnie łagodniejszy przebieg dla próbek azotowanych, przy czym najszybciej, bo już po kilku metrach drogi ustabilizował się przebieg dla próbki napawanej Hardface VMolc + nitriding, w pozostałych przypadkach okresy docierania był zbliżony i wynosił średnio około 75 m. Na Rys. 39 również widać, że niezależnie od materiału napoiny zdecydowanie niższą wartość współczynnika tarcia w czasie trwania całego testu zarejestrowano dla próbek po azotowaniu.

Porównawczą miara zużycia uwzględniającą kluczowe parametry testu, takie jak obciążenie i droga tarcia jest współczynnik zużycia [K], który wyznaczono z równania przedstawionego poniżej.

$$K = \frac{Zużycie\ objętościowe}{Siła\ obciążająca\ \times droga\ testu\ (dystans)}\ [mm^3N^{-1}m^{-1}]$$

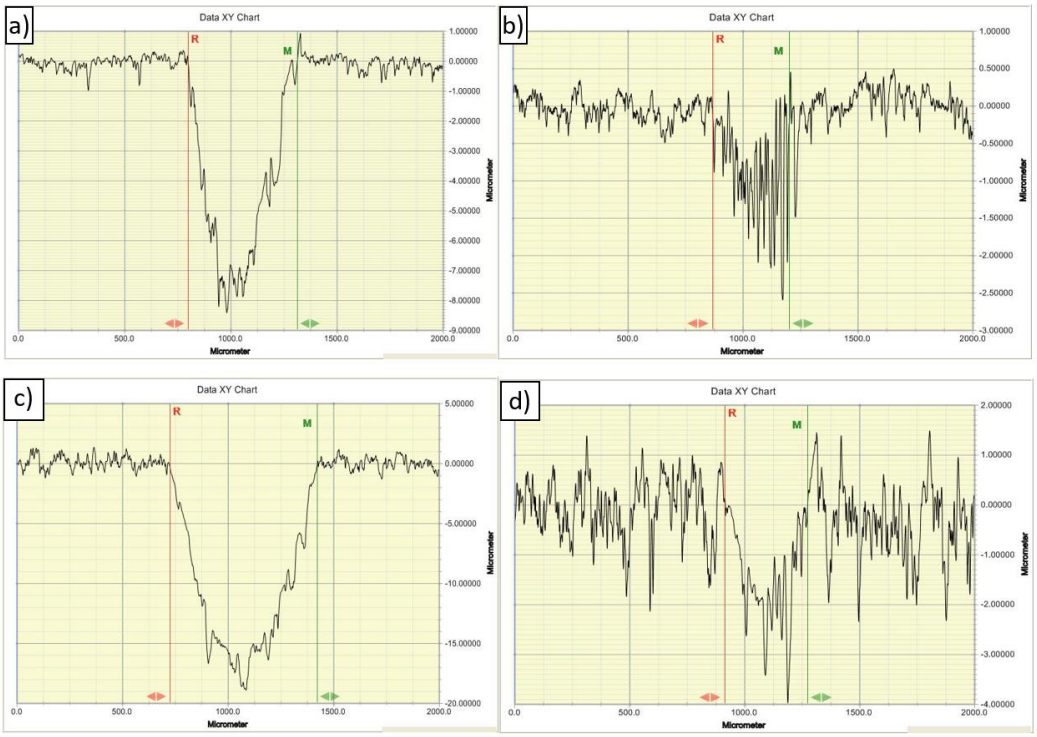
Zużycie objętościowe wyznaczono, jako iloczyn obwodu koła śladu wytarcia powstałego w teście ball-on-disc i średniej wartości pola wytarcia próbki. Pole profilu wytarcia próbki mierzono po

obwodzie w 14 miejscach za pomocą profilometru stykowego Dektak 150, przykładowe profile przedstawiono na Rys. 41. Wartości wyznaczonych współczynników w formie graficznej przedstawiono na Rys. 40.



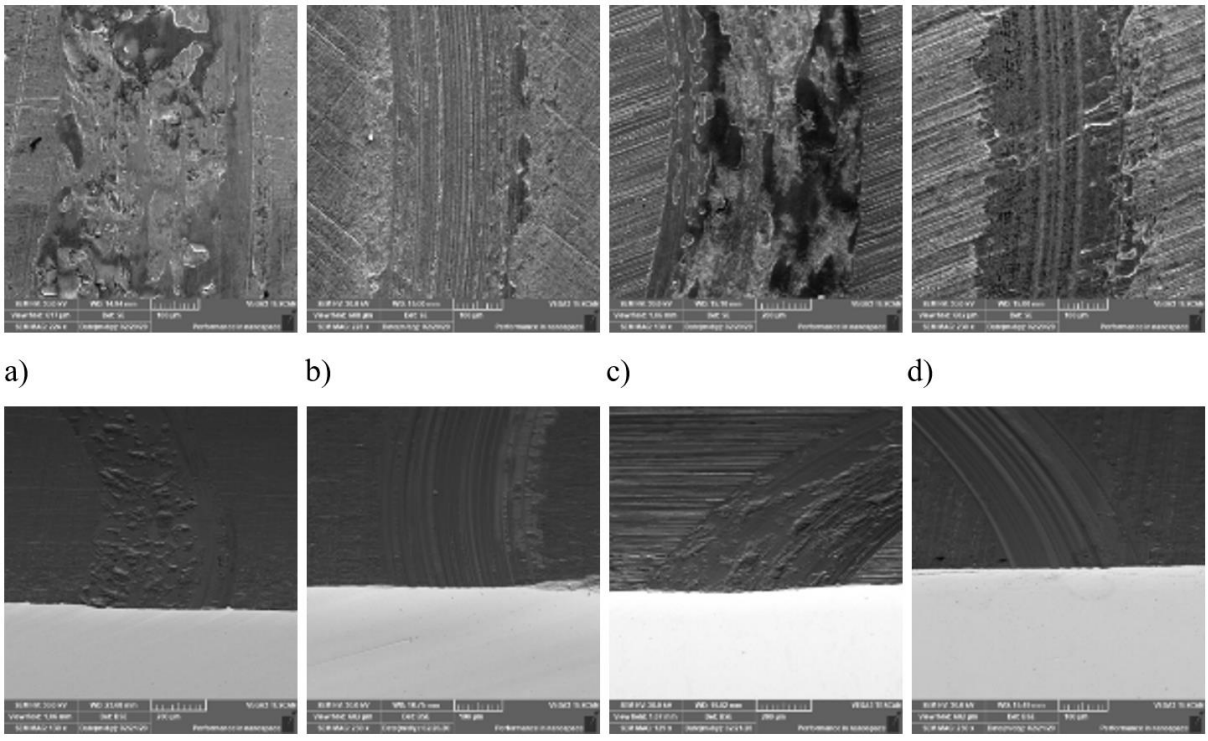
Rys. 40 Zestawienie graficzne wyznaczonych wartości współczynników zużycia K (tzw. wear factor) [**H14**]

Wyznaczone wartości współczynników zużycia wskazują, że największą odporność na zużycie wykazała próbka z napoiną Robotool 46 + nitriding. Natomiast największe zużycie wyznaczono dla próbki z napoiną Hardface VMolc. Podobnie jak w przypadku współczynnika tarcia, na podstawie wyznaczonych wartości współczynników zużycia dla badanych próbek można stwierdzić że azotowanie zdecydowanie wpływa na poprawę odporności na zużycie tribologiczne.



Rys. 41 Profil przekroju ścieżki wytartej podczas testu: a) Robotool 46, b) Robotool 46 + nitriding, c) Hardface VMolc, d) Hardface VMolc + nitriding [**H14**]

Analiza profili (Rys. 41) oraz obserwacje uzyskanych powierzchni torów wykazały, że w przypadku próbek nieazotowanych zużycie ma charakter adhezyjny. W mikroobszarach odkształcenia warstwy wierzchniej, szczególnie w miejscach najwyższych wierzchołków chropowatości dochodzi do lokalnych sczepień metalicznych powierzchni trących, które następnie są rozrywane. Charakterystyczne dla tego rodzaju mechanizmu zużycia są wyrwania widoczne na zużytych powierzchniach (Rys. 42 a i c) w efekcie czego wyrwane cząstki, jeśli nie zostaną usunięte z obszaru kontaktu pary trącej, z upływem czasu ulegają plastycznemu zaprasowaniu (wgniataniu) w dolinie toru zużycia, co szczególnie widać na Rys. 42 c. Analizowane tory dla próbek nieazotowanych mają głębokość odpowiednio dla próbki z napoiną Robotool 46 - 8 μm i dla próbki napawanej Hardface VMolc około 20 μm. Tory uzyskane dla próbek azotowanych mają zdecydowanie mniejszą głębokość, która wynosi odpowiednio dla próbki z napoiną Robotool 46 około 1μm a dla próbki napawanej Hardface VMolc - 2 μm (Rys. 42 b i d). Obserwacje powierzchni torów próbek azotowanych wykazały że w obu przypadkach dominującym mechanizmem zużycia jest zużycie ścierne. Zużycie to jest intensyfikowane przez twarde cząstki, które są azotowanymi wierzchołkami chropowatości wyrwanymi w początkowej fazie testu. Cząstki te przetaczając się w obszarze pary trącej pełnią role ścierniwa tworząc na powierzchni próbki charakterystyczne dla zużycia ściernego bruzdy.



Rys. 42 Widok ścieżki wytartej podczas testu z góry (u góry) i w przekroju (u dołu): a) Robotool 46, b) Robotool 46 + nitriding, c) Hardface VMolc, d) Hardface VMolc + nitriding [**H14**]

Uzyskane wyniki potwierdziły dotychczasowe obserwacje i wykazały, że azotowanie przyczynia się do zwiększenia trwałości warstw napawanych. Dzieje się tak ponieważ podczas azotowania napoina ulega wygrzaniu i zachodzi proces drobnodyspersyjnego wydzielenia węglików wewnątrz ziaren, zostają wprowadzone korzystne naprężenia ściskające wewnątrz warstwy wierzchniej, dochodzi do utwardzenia powierzchni i warstwy wierzchniej a dzięki temu wzrasta odporność na zużycie ścierne. Zastosowane stopiwo z drutu o handlowej nazwie Robotool 46 ma strukturę martenzytu

wysokostopowego ze złożonymi węglikami Fe, Cr, Mo, V, o twardości od 45-60 HRC zależnie od obróbki cieplnej napoin. Uzyskane napoiny z tego drutu mają właściwości stali narzędziowej do pracy na gorąco zbliżonych do stali gat. X37CrMoV5-1. Dodatkowo jak wykazałem w badaniach materiał ten jest podatny na dyfuzję azotu.

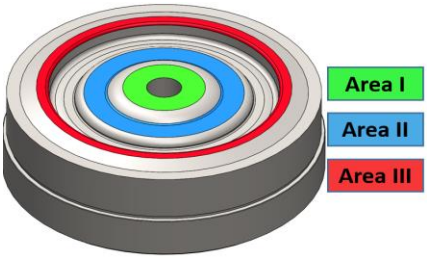
Kolejnym krokiem moich badań było określenie wpływu budowy zastosowanych warstw azotowanych, warstwy napawanej materiałem Robotool 46 oraz warstwy hybrydowej łączącej napawanie i azotowanie na odporność na czynniki niszczące występujące podczas kucia na gorąco. Tak przygotowane matryce zostały poddane testom eksploatacyjnym. Każde z analizowanych narzędzi było eksploatowane do momentu stwierdzenia przez technologa prowadzącego testy, że narzędzie należy wycofać z eksploatacji z powodu zużycia. Badania te przedstawiłem w pracy [**H17**].

W Tabela 3 podano ilość odkuwek odkutych przy użyciu każdego z narzędzi, co odpowiada uzyskanej trwałości.

Tabela 3 Zastosowanie warianty obróbki matryc w celu zwiększenia ich trwałości

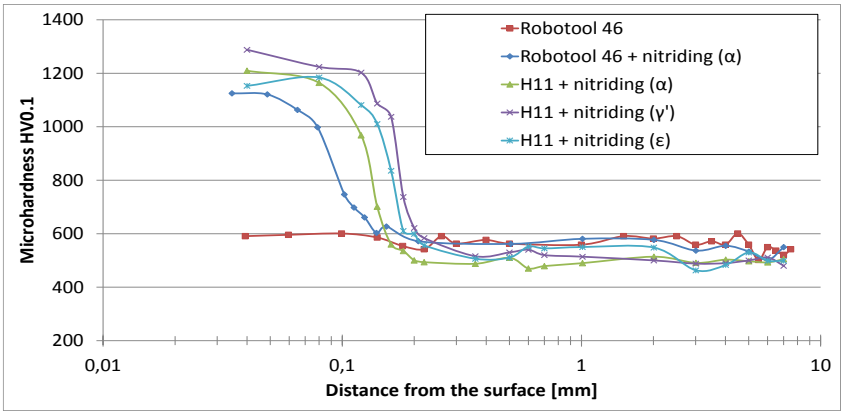
Nr matrycy	**Zastosowana obróbka**	**Uzyskana trwałość [szt.]**
1	obróbka cieplna + azotowanie na warstwę dyfuzyjną α	10 000
2	obróbka cieplna + azotowanie na warstwę z wydzieleniami fazy γ' w strefie przypowierzchniowej	7500
3	obróbka cieplna + azotowanie na warstwę z wydzieleniami faz ε+γ' w strefie przypowierzchniowej	6500
4	obróbka cieplna + napawanie materiałem Robotool 46	6900
5	obróbka cieplna + napawanie materiałem Robotool 46 + azotowanie na warstwę dyfuzyjną α	25 000

Narzędzia po eksploatacji zostały poddane wnikliwej analizie, która tak jak już opisywano wcześniej obejmowała obserwacje makroskopowe, obserwacje mikroskopowe przy użyciu mikroskopu skaningowego powierzchni roboczej w wybranych obszarach oraz pomiary mikrotwardości. Przy czym w tym eksperymencie obserwacje prowadzono w trzech charakterystycznych obszarach , w których ze względu na kształt występowały odmienne warunki pracy, które określono i zidentyfikowano w innych moich pracach między innymi [**H2**], [**H3**].



Rys. 43 Analizowana matryca kuźnicza z zaznaczonymi obszarami wytypowanymi do badań [**H17**]

Badania prowadzono również na próbkach, które przygotowano tak, by były reprezentatywne względem analizowanych przypadków narzędzi. Badania na próbkach obejmowały między innymi wyznaczenie rozkładów mikrotwardości (Rys. 44).



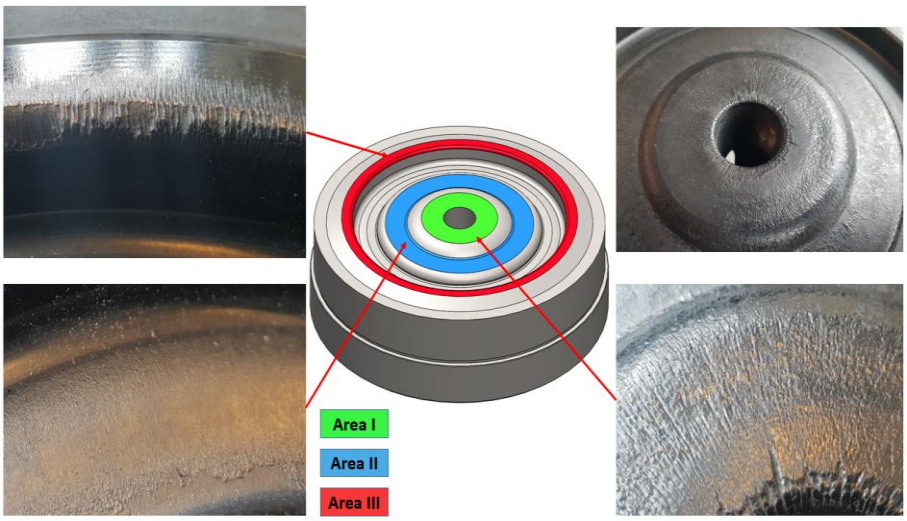
Rys. 44 Wyjściowe rozkłady mikrotwardości w funkcji odległości od powierzchni wyznaczone na próbkach [**H17**]

Uzyskane rozkłady mikrotwardości przedstawiono na wykresie w funkcji odległości od powierzchni w skali logarytmicznej, którą przyjęto aby podkreślić zmiany widoczne w zakresie 0,01-0,1mm oraz co istotne w przypadku warstw napawanych jednocześnie wskazać ewentualne zmiany na całym przekroju napoiny na głębokości aż do 10 mm (Rys. 44) [**H17**].

Założeniem zastosowanego procesu azotowania próbek i narzędzi było dążenie do uzyskania warstwy dyfuzyjnej o grubości efektywnej (zgodnie z kryterium HV50+) 0,13-0,15mm. Wyznaczone rozkłady mikrotwardości wskazały zróżnicowanie grubości warstwy azotowanej uzyskanej na badanych próbkach. Najmniejszą grubość efektywną warstwy dyfuzyjnej uzyskano przy azotowaniu próbki napawanej, która wynosiła około 0,12 mm. Natomiast największą głębokość warstwy dyfuzyjnej uzyskano w procesie azotowania na warstwę z wydzieleniami faz ε+γ' w strefie przypowierzchniowej, o łącznej grubości efektywnej wynoszącej ok. 0,18mm. Tłumaczyć to można tym, że pierwiastki stopowe zawarte w materiale napoiny powodują obniżenie aktywności azotu oraz zwiększenie rozpuszczalności azotu w żelazie, co wpływa to na zmniejszenie grubości warstwy dyfuzyjnej.

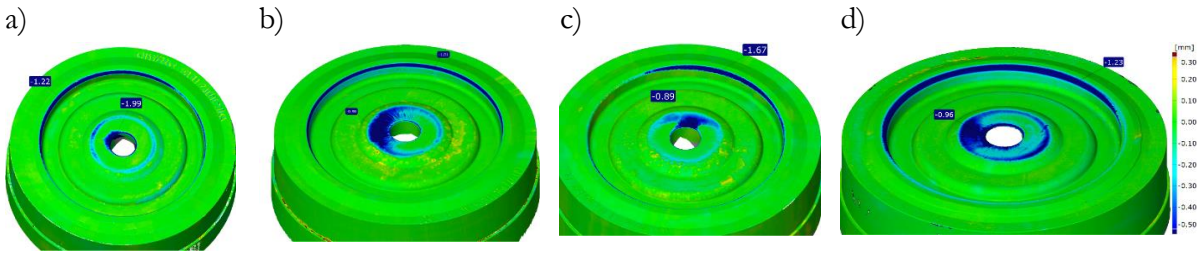
Przeprowadzone obserwacje makroskopowe analizowanych narzędzi po pracy wykazały ślady występowania różnych mechanizmów zużycia, takich jak zużycie ścierne, pękanie zmęczeniowe i utlenianie, które wystąpiły w poszczególnych obszarach z różną intensywnością.

Na Rys. 45 przedstawiłem widok makro powierzchni matrycy po obróbce hybrydowej łączącej napawanie i azotowanie, która, pomimo najdłuższego czasu eksploatacji, wykazała widocznie najmniejsze ślady zużycia, które jedynie lokalnie w obszarze III ma charakter zużycia ściernego, przy czym jego intensywność i zakres występowania są znacznie mniejsze niż w przypadku pozostałych narzędzi. Na czołowej powierzchni matrycy obecne są liczne pęknięcia zmęczeniowe, świadczące o zmęczeniu cieplno-mechanicznym. W tym rejonie widoczne są także nieliczne pęknięcia rozchodzące się promieniowo od środka matrycy, które mogą stanowić początek ubytku ściernego, który może pojawić się w dalszej eksploatacji.



Rys. 45 Widok makro powierzchni matrycy po obróbce hybrydowej łączącej napawanie i azotowanie po odkuciu 25000 szt. [**H17**]

Analiza geometrycznej wielkości zużycia wykazała, że w przypadku matrycy nr 1 , zużycie występuje na całym obwodzie w obszarze III i wynosi około 1,2 mm. Zaobserwowano również ślady ubytku w obszarze I, które zlokalizowane są głównie w okolicy otworu wypychacza (Rys. 46 a).

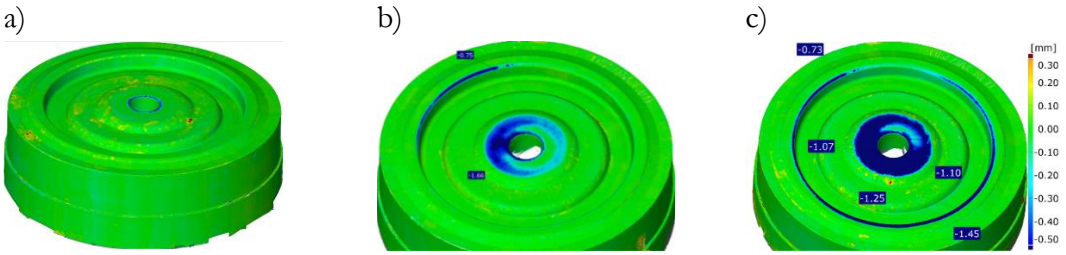


Rys. 46 Analiza geometryczna zużycia narzędzia: a) z warstwą dyfuzyjną α po 10 000 szt. odkuwek, b) z warstwą z wydzieleniami fazy γ' w strefie przypowierzchniowej po 7500 szt. odkuwek, c) z warstwą azotowaną z wydzieleniami faz ε+γ' w strefie przypowierzchniowej po 6500 szt. odkuwek, d) napawanego materiałem Robotool 46 po odkuciu 6900 szt. odkuwek [**H17**]

W przypadku matrycy nr 2, z warstwą azotowaną z wydzieleniami fazy γ' w strefie przypowierzchniowej po odkuciu 7500 odkuwek pomiary wykazały znaczny ubytek geometryczny w analizowanym obszarze I i obszarze III, który wynosił około 1 mm (Rys. 46 b), przy czym zużycie w obszarze III było równomierne na całym obwodzie matrycy. Analiza zużycia matrycy z warstwą azotowaną z wydzieleniami faz ε+γ', wykazała duże lokalne ubytki w obszarze I i obszarze III, które osiągają wartość około 1,7 mm (Rys. 46 c). Zużycie to jest typowe dla tego rodzaju warstwy azotowanej z warstwą azotków na powierzchni, która ulega wykruszeniu, w efekcie czego wykruszone twarde cząstki lokalnie intensyfikują zużycie w osłabionym obszarze. Kolejnym analizowanym wariantem obróbki był przypadek z zastosowaniem warstwy napawanej materiałem Robotool 46 (Rys. 46). Pomiar wykazał obecność zużycia w tych samych obszarach jak w poprzednim przypadku, przy czym w obszarze I zużycie jest bardziej równomierne i osiąga

maksymalną wartość około 1 mm. Natomiast w obszarze III zużycie osiąga wartość około 1,3 mm.

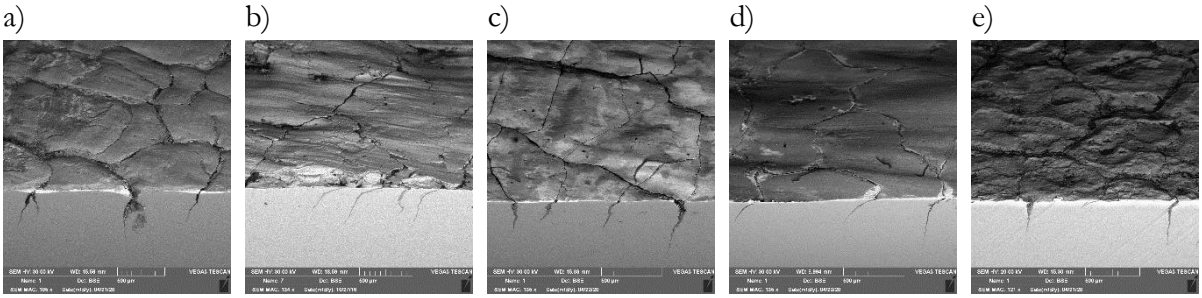
W przypadku matrycy z warstwą hybrydową łączącą napawanie i azotowanie pomiarów zużycia dokonano w kilku etapach po różnych okresach eksploatacji, po 9200 szt., 16 700 szt. oraz po 25 00 szt.. Po odkuciu 9200 odkuwek w analizowanych obszarach nie stwierdzono niemal żadnego zużycia a zaobserwowano jedynie minimalne zużycie na krawędzi otworu wypychacza (przedstawione w pracy [**H17**]) , spowodowane prawdopodobnie nadmiernym przesyceniem naroża podczas azotowania i powstaniem niekorzystnego tzw. „efektu krawędziowego". Na kolejnym obrazie uzyskanym po odkuciu 16 700 szt. zidentyfikowano nierównomierne zużycie w obszarze I i II Rys. 47b), których maksymalna wartość nie przekracza 1 mm. Finalnie matryca była eksploatowana do momentu odkucia 25 000 szt. odkuwek. Podobnie jak w przypadku pozostałych matryc, również po odkuciu 25 000 szt. nie stwierdzono zużycia w obszarze II. Zużycie w obszarze I jest dość równomierne, maksymalna wartość nie przekracza 1,3 mm. Natomiast niskie w stosunku do ilości wykonanych odkuwek jest zużycie w obszarze III, gdzie matryca ze względu na intensywne tarcie zazwyczaj zużywa się najbardziej.



Rys. 47 Analiza zużycia matrycy z warstwą hybrydową łączącą napawanie i azotowanie: a) po 9200 szt., b) 16700 szt., c) 25000 szt. [**H17**]

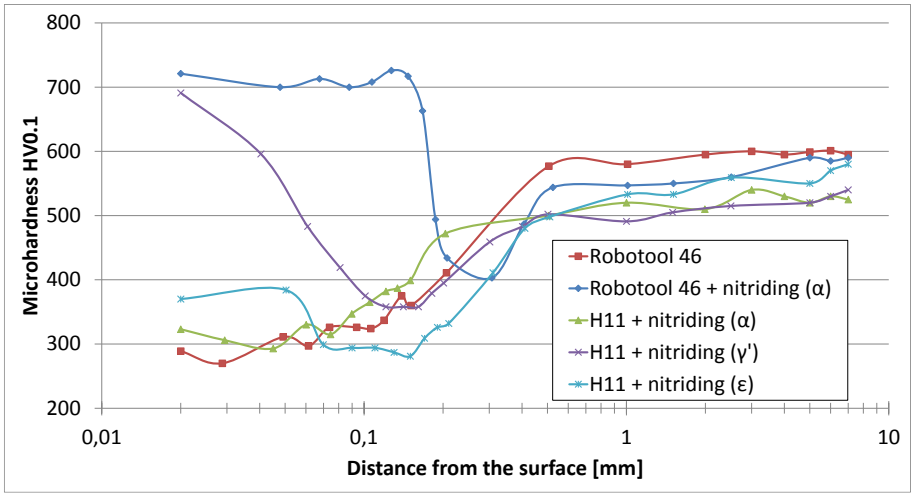
Podobnie jak w przypadku wcześniejszych badań szczegółową analizę zmian w warstwie wierzchniej analizowanych narzędzi przeprowadziłem za pomocą mikroskopu skaningowego. Poniżej przedstawiłem przykładowe wyniki z Obszaru I, gdzie jak wykazano w pracy [**H2**] narzędzie jest najbardziej narażone na obciążenia cieplne.

W obszarze tym dochodzi do najdłuższego czasu kontaktu z gorącym materiałem odkuwki, co sprawia, że temperatura warstwy wierzchniej osiąga wartość nawet 500°C a następnie podczas intensywnego chłodzenia przez strumień rozpylonej cieczy smarująco-chłodzącej temperatura gwałtownie spada. W wyniku intensywnych cyklicznych obciążeń cieplnych wywołanych naprzemiennym nagrzewaniem i chłodzeniem powierzchnia matrycy w Obszarze I jest naprzemiennie rozciągana oraz ściskana i powstają wówczas naprężenia cieplne powodujące tworzenie się siatki mikropęknięć. Ta forma zniszczenia określana jako zmęczenie cieplne, występuje we wszystkich analizowanych narzędziach, przy czym jak można zauważyć na Rys. 48 zaobserwowana na powierzchni siatka pęknięć dla wszystkich analizowanych przypadków obróbki ma podobny charakter. Różnice widoczne są na przekroju próbek, gdzie wyraźnie widać odkształcenia w warstwie wierzchniej w postaci zakrzywionych pęknięć (Rys. 48 a, b, c, d). Jedynie w przypadku matrycy z warstwą hybrydową widoczne na przekroju pęknięcia są prostopadłe względem powierzchni (Rys. 48 e). Wskazuje to na większą odporność nowej warstwy hybrydowej odpuszczanie spowodowane długotrwałym oddziaływaniem wysokiej temperatury.



Rys. 48 Widok SEM matryc w obszarze I: a) z warstwą dyfuzyjną α po odkuciu 10 000 szt. odkuwek, b) z warstwą z wydzieleniami fazy γ' w strefie przypowierzchniowej po odkuciu 7500 szt. odkuwek, c) z warstwą azotowaną z wydzieleniami faz ε+γ' w strefie przypowierzchniowej po odkuciu 6500 szt. odkuwek, d) napawanego materiałem Robotool 46 po odkuciu 6900 szt. odkuwek e) z warstwą hybrydową łączącą napawanie i azotowanie po odkuciu 25000 szt. [**H17**]

Przeprowadzona analiza obejmowała również wyznaczenie rozkładów mikrotwardości w warstwie wierzchniej. Rozkłady mikrotwardości dla analizowanych narzędzi wyznaczono tylko w obszarze II, gdzie dla wszystkich przypadków nie stwierdzono ubytku geometrycznego. W pozostałych obszarach występują ubytki geometryczne znacznie przekraczające strefę dyfuzyjną, co utrudnia interpretację uzyskanych wyników. Natomiast analiza w obszarze II, gdzie nie występuje zużycie geometryczne pozwoliła na ocenę odporności zastosowanych wariantów obróbki na działanie wysokiej temperatury w całym okresie eksploatacji. W celu szczegółowego ukazania zmian mikrotwardości w całym obszarze warstwy hybrydowej uzyskane wyniki przedstawiono w funkcji odległości od powierzchni w skali logarytmicznej (Rys. 49).



Rys. 49 Wyniki pomiaru mikrotwardości w warstwie wierzchniej narzędzi w obszarze II po eksploatacji [**H17**]

Wyznaczone rozkłady mikrotwardości wykazały wyraźne różnice w odporności poszczególnych narzędzi na działanie podwyższonych temperatur. Maksymalna twardość dla wszystkich analizowanych narzędzi obniżyła się w porównaniu do twardości wyjściowej. Największy spadek twardości zaobserwowano dla narzędzi z warstwą dyfuzyjną α, oraz warstwą z wydzieleniami faz ε+γ' w strefie przypowierzchniowej, gdzie twardość mierzona w obszarze powierzchni roboczej spadła do poziomu około 300-350 HV. Należy podkreślić, że warstwa wierzchnia w przypadku tych narzędzi uległa wyraźnemu odpuszczeniu także poniżej strefy azotowanej, na głębokości 0,15-

0,5mm, gdzie zanotowano spadek twardości poniżej 400HV. Podobny rozkład mikrotwardości wyznaczono dla matrycy z warstwą napawaną, która uległa odpuszczeniu do głębokości około 0,5 mm.

W przypadku matrycy z warstwą azotowaną z wydzieleniami fazy γ' w strefie przypowierzchniowej, twardość bezpośrednio w obszarze przypowierzchniowym utrzymuje się na poziomie 700-600 HV, natomiast spadek twardości obserwowany jest pod warstwą azotowaną, gdzie na głębokości około 0,2 mm twardość spada do wartości około 350 HV.

Najwyższą odporność na działanie wysokiej temperatury, pomimo najdłuższego czasu eksploatacji wykazała matryca z zastosowaną warstwą hybrydową. Warstwa azotowana uzyskana na podłożu napawanym utrzymuje twardość na poziomie ponad 700 HV. Niewielki spadek twardości obserwowany jest pod warstwą azotowaną, na głębokości około 0,2 mm, gdzie twardość lokalnie spada do wartości 400 HV następnie stopniowo wzrasta to wyjściowej wartości napawanego podłoża, czyli wartości około 550HV.

Uzyskane wnioski naukowe

Podsumowując, moje osiągnięcie naukowe polega na **opracowaniu skutecznej metody poprawy trwałości narzędzi stosowanych w przemysłowych procesach kucia matrycowego na gorąco**.

Prace naukowo-badawcze, prowadzone w ramach opracowania jednotematycznego cyklu prac tworzących „osiągnięcie habilitacyjne" w rozumieniu przepisów; art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 z późn. zm.), pozwalają na sformułowanie następujących wniosków o charakterze naukowym.

1. Na podstawie analizy wielu procesów kucia matrycowego na gorąco, można stwierdzić, że dominującym mechanizmem niszczącym występującym w narzędziach kuźniczych jest zmęczenie cieplno-mechaniczne, w wyniku wystąpienia którego dochodzi do „wyrywania" twardych cząstek z powierzchni roboczych narzędzi, co z kolei intensyfikuje zużycie ścierne.

2. Przeprowadzone badania (pomiary i modelowanie) wykazały, że w procesach kucia na gorąco prowadzonych zgodnie z przyjętą technologią często dochodzi do lokalnego przegrzewania warstwy wierzchniej narzędzi. Temperatura chwilowo osiąga wartość powyżej 600-700˚C, co prowadzi do odpuszczenia warstwy wierzchniej, a w konsekwencji do obniżenia jej twardości co w efekcie prowadzi do powstania odkształceń plastycznych jak również do obniżenia odporności na zużycie ścierne.

3. W swoich badaniach potwierdziłem, że azotowanie może być skuteczną metodą poprawy trwałości narzędzi kuźniczych. Wykazałem również, że ważne jest aby uzyskana warstwa azotowana musi posiadać jednolitą i określoną budowę.

4. Moje badania dotyczące możliwości zastosowania warstw hybrydowych typu warstwa azotowana powłoka PVD, wykazały korzystny wpływ na efekt poprawy trwałości narzędzi kuźniczych. Przy czym bardzo istotny jest ich poprawny dobór zastosowanej warstwy. Jak wykazałem w swoich badaniach niepoprawny dobór powłoki PVD może przyczynić się do obniżenia trwałości.

5. Napawanie wykrojów roboczych może być stosowane zarówno jako napawanie regeneracyjne, prowadzone w celu odbudowy zużytych narzędzi, jak również jako metoda stosowana w celu wytworzenia warstw odpornych na działanie występujących mechanizmów niszczących.

6. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że zaproponowana przeze mnie metoda poprawy trwałości narzędzi kuźniczych polegająca na zastosowaniu warstwy hybrydowej łączącej napawanie i azotowanie jest najbardziej skuteczną metodą poprawy trwałości narzędzi kuźniczych stosowanych w procesach kucia matrycowego na gorąco.

Wnioski utylitarne

W ramach prowadzonych badań przedstawionych w cyklu publikacji monotematycznych, sformułowałem także następujące wnioski utylitarne:

1. W swoich badaniach dotyczących możliwości zastosowania warstw azotowanych wykazałem, że w celu zwiększenia trwałości narzędzi kuźniczych stosowanych w procesach kucia matrycowego na gorąco najlepsze efekty można uzyskać stosując warstwę azotowaną bez warstwy azotków żelaza ε w strefie przypowierzchniowej oraz bez występowania wydzieleń fazy γ' w strefie przypowierzchniowej i w strefie dyfuzyjnej α.

2. Wykazałem, że warstwa hybrydowa z powłoką Cr/CrN jest skuteczna w poprawie odporności narzędzi kuźniczych na zużycie ścierne dzięki wysokiej twardości i dobrej adhezji do podłoża, ograniczającej tendencję do propagacji pęknięć w głąb materiału narzędzia. Natomiast powłoka Cr/CrN/AlCrTiN może być przydatna do zwiększenia trwałości narzędzi kuźniczych ze względu na zdolność do tworzenia bariery cieplnej ograniczającej przekazywanie ciepła w kontakcie z odkuwką a także wykazuje odporność na zużycie ścierne.

3. Prowadzone przeze mnie badania wykazały, że napawanie drutami proszkowymi samoosłonowymi cechuje się dużą precyzją układania ściegów warstwy oraz dużą wydajnością procesu napawania i może z powodzeniem być stosowane zarówno jako napawanie regeneracyjne jak również napawanie prowadzone w celu zwiększenia odporności na zużycie.

4. W przypadku narzędzi do kucia matrycowego najlepsze efekty (właściwości eksploatacyjnewarstw napawanych) można uzyskać stosując stopiwo z drutu Robotool 46. Uzyskana napoina ma strukturę martenzytu wysokostopowego ze złożonymi węglikami Fe, Cr, Mo, V. o twardości od 45 do 60 HRC zależnie od obróbki cieplnej napoiny. Uzyskane napoiny z tego drutu mają właściwości stali narzędziowej do pracy na gorąco zbliżonych do stali gat. X37CrMoV5-1.

5. Azotowanie napoin wyraźnie zwiększa ich odporność na zużycie ścierne, co potwierdziły testy tribologiczne. Największą odporność na zużycie ścierne wykazała warstwa hybrydowa z napoiną z drutu Robotool 46 oraz dyfuzyjną warstwą azotowaną α bez azotków γ' oraz ε. Wyniki te zostały również potwierdzone w testach eksploatacyjnych.

6. Na podstawie testów eksploatacyjnych wykazałem, że zaproponowana przeze mnie obróbka hybrydowa łącząca napawanie oraz azotowanie pozwala na ponad dwukrotne zwiększenie trwałości narzędzi stosowanych w procesach kucia na gorąco.

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

W ramach prowadzonej działalności naukowej nawiązałem współpracę z innymi jednostkami naukowymi zarówno krajowymi jak i zagranicznymi. Współpraca ta dotyczy zarówno badań prowadzonych w ramach wspólnie realizowanych projektów badawczych oraz badań związanych z wspólnymi obszarami zainteresowań naukowych, które nie są związane z projektami badawczymi.

Zagraniczne jednostki naukowe:

Materials Innovation Institute (M2I): Instytut badawczy przy TU Delft

Współpracę z instytutem nawiązałem na konferencji naukowej 1st EUROFORGE ConFAIR 2018, gdzie M2i prezentował swoje osiągnięcia w obszarze regeneracji narzędzi kuźniczych metodami spawalniczymi. W wyniku nawiązanej współpracy został przygotowany projekt w ramach programu Horyzont 2020, dotyczący opracowania zaawansowanych technologii funkcjonalnych materiałów gradientowych w celu budowania struktur i warstw użytkowych. Projekt jest realizowany w ramach dużego konsorcjum, które tworzy 21 partnerów z Holandii, Francji, Belgii, Danii, Wielkiej Brytanii, Niemiec, Polski i Słowenii. To naukowcy z czterech uczelni i specjaliści z firm z całego łańcucha produkcji – od przedsiębiorstw wytwarzających drut elektrodowy, przez twórców sprzętu i oprogramowania oraz producentów w technologii WAAM, po firmy, które staną się użytkownikami końcowymi gotowych rozwiązań.

Technische Universität Bergakademie Freiberg - The Institute of Metal Forming

Z Technische Universität Bergakademie Freiberg współpracuję od początku swojej działalności naukowej, już na studiach doktoranckich brałem czynny udział we wspólnie organizowanej letniej szkole dla Doktorantów - „Summer Schools", która była organizowana naprzemiennie w Niemczech i w Polsce. Obecnie współpraca z instytutem The Institute of Metal Forming dotyczy zarówno wspólnego obszaru zainteresowań naukowych związanych między innymi z kształtowaniem stopów lekkich w tym stopu magnezu AZ31 oraz wspólnie organizowanej konferencji międzynarodowej AutoMetForm - Advanced Metal Forming Processes in Automotive Industry. Konferencja ta jest organizowana co 2 lat od 2008r, w organizacji tej konferencji biorę czynny udział. Celem konferencji jest prezentacja wyników badań i prac prowadzonych przez polskie oraz niemieckie jednostki naukowe (Instytuty, Uczelnie) oraz przez przedstawicieli przemysłu związanego z branżą Automotive oraz obszarów badawczych. Od 2016 roku do współorganizatorów dołączył Fraunhofer IWU – Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology Chemnitz, jako współorganizator cyklu konferencji.

Technische Universität Dresden - Institute of Lightweight Engineering and Polymer Technology

W ramach współpracy z Technische Universität Dresden prowadziłem badania związane z wyznaczenia trwałości zmęczeniowej stali narzędziowej. Wymiernym efektem tej współpracy jest między innymi wspólna publikacja. Obecnie utrzymuję kontakt z Instytutem, biorę udział w regularnych spotkaniach na których omawiane są plany dalszej współpracy w obszarze związanym z trwałością narzędzi kuźniczych.

- Joanna Wollmann, Andrzej Dolny, **Marcin D. Kaszuba**, Zbigniew Gronostajski, Maik Gude: Methods for determination of low-cycle properties from monotonic tensile tests of 1.2344 steel applied for hot forging dies. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019, vol. 102, nr 9-12, s. 3357–3367, ISSN: 0268-3768, http://dx.doi.org/10.1007/s00170-019-03349-2 (IF: 02.633, MNiSW z 2019-2020: 100)

Fraunhofer - Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU)

W ramach dotychczasowej współpracy z Instytutem brałem udział w opracowaniu i przygotowaniu wniosku o dofinansowanie udziału w realizacji projektu międzynarodowego w ramach Inicjatywy CORNET. Głównym celem opracowanego projektu pt. „Określenie trwałości maszyn do przeróbki plastycznej z uwzględnieniem warunków ich pracy oraz parametrów procesu" było opracowanie referencyjnego katalogu przypadków obciążeniowych dla różnych typów i technologii maszyn do przeróbki plastycznej (głównie pras) z uwzględnieniem newralgicznych węzłów konstrukcyjnych – tj. spoin.

Krajowe jednostki naukowe:

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie - Katedra Informatyki Stosowanej i Modelowania

Moja współpraca z AGH rozpoczęła się w 2012 w związku z realizacją projektu dotyczącego opracowania systemu ekspertowego umożliwiającego prognozowanie trwałości narzędzi stosowanych w procesach kucia matrycowego na gorąco. Opracowany system ekspertowy pozwala oszacować procentowy udział poszczególnych mechanizmów niszczących, jak również wartość ubytku materiału narzędzia. Wyniki tych badań zostały przedstawione we wspólnej publikacji:

- Zbigniew Gronostajski, Marek Hawryluk, **Marcin D. Kaszuba**, Monika Marciniak, Adam Niechajowicz, Sławomir Polak, Maciej Zwierzchowski, Anna Adrian, Barbara Mrzygłód, Jarosław Durak: The expert system supporting the assessment of the durability of forging tools. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016, vol. 82, nr 9-12, s. 1973-1991, ISSN: 0268-3768 http://dx.doi.org/10.1007/s00170-015-7522-3 (MNiSW z 2013-2018: 030)

Nawiązana współpraca była kontynuowana w wielu obszarach, między innymi wspólnie z AGH w 2016 roku opracowałem i złożyłem projekt pt. „Hybrydowy model numeryczny zużycia narzędzi w procesach kucia na gorąco", w ramach konkursu Opus 12, którego byłem kierownikiem. Niestety projekt nie uzyskał finansowania.

Obecnie współpracuję w AGH w ramach realizacji projektu LIDER pt. „Opracowanie innowacyjnej metody zwiększenia trwałości narzędzi kuźniczych przez dobór optymalnych parametrów hybrydowego procesu napawania z azotowaniem wspomagany modelowaniem

numerycznym warstwy wierzchniej", którego jestem kierownikiem. Wspólne badania w ramach tego projektu dotyczą opracowania modelu matematycznego warstwy wierzchniej narzędzi kuźniczych poddanych obróbce hybrydowej.

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Obróbki Plastycznej

Współpraca z Instytutem Obróbki Plastycznej dotyczy głównie wspólnie realizowanych projektów badawczych. Współpracę z Instytutem rozpocząłem w 2009 roku, brałem wówczas czynny udział w przygotowaniu wspólnego projektu finansowanego z Unii Europejskiej POIG.01.03.01-02-161/09, pt: „Kompleksowy system ekspertowy do optymalizacji trwałości narzędzi w procesach kucia", projekt uzyskał finansowanie, byłem głównym wykonawcą projektu ze strony Politechniki Wrocławskiej.
Kolejnym projektem wspólnie przygotowanym był projekt pt. „Prasy do obróbki plastycznej metali z innowacyjnym napędem wykorzystującym zjawisko rezonansu mechanicznego" złożony w ramach konsorcjum z Instytutem i partnerem przemysłowym. Projekt został pozytywnie zaopiniowany i uzyskał finansowanie, niestety jednak ze względów formalnych nie została podpisana umowa pomiędzy partnerem przemysłowym a NCBiR.
Obecnie współpraca z Instytutem jest kontynuowana w ramach wspólnie realizowanego projektu Techmatstrateg III pt. „Nowe powłoki zwiększające trwałość narzędzi w procesach kucia i wyciskania". W ramach tego projektu powstanie nowa technologia łącząca syntezę targetów metodą spiekania iskrowo-plazmowego oraz osadzanie cienkich powłok z trójskładnikowych borków wolframu W1-xTMxBy, gdzie TM=Ti, Zr, Ta; x=0-1 i y=2 lub 4 metodą impulsowego rozpylania magnetronowego wysokiej mocy. W projekcie tym oprócz Politechniki Wrocławskiej i Instytutu Obróbki Plastycznej biorą uczestniczą również: Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji, instytutu PAN (Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN), Politechnika Warszawska oraz partnerzy przemysłowi z branży obróbki plastycznej (Albatros Aluminium i Sanha Polska). Realizacja projektu zakończy się 09.30.2023.

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji

Moja wieloletnia współpraca z Instytutem rozpoczęła się od wspólnie realizowanego projektu realizowanego w ramach PBS II, PBS2/A5/37/2013 pt. „Zastosowanie zaawansowanych warstw hybrydowych typu PN+PVD dedykowanych do zwiększenia trwałości narzędzi w procesach kucia". Projekt był realizowany przez konsorcjum Politechnika Wrocławska – Kuźnia Jawor – Instytut Technologii Eksploatacji Państwowego Instytutu Badawczego w Radomiu. Brałem czynny udział w przygotowaniu projektu oraz po uzyskaniu dofinansowania byłem jednym głównych wykonawców badań. Wyniki badań zostały opublikowane w wielu wspólnych artykułach, poniżej przedstawiam tylko wybrane.

- Marek Hawryluk, Zbigniew Gronostajski, **Marcin D. Kaszuba**, Sławomir Polak, Paweł Widomski, Jerzy Smolik, Jacek Ziemba: Analysis of the wear of forging tools surface layer after hybrid surface treatment. International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2017, vol. 114, s. 60-71, ISSN: 0890-6955
- Zbigniew Gronostajski, **Marcin D. Kaszuba**, Paweł Widomski, Jerzy Smolik, Jacek Ziemba, Marek Hawryluk: Analysis of wear mechanisms of hot forging tools protected

with hybrid layers performed by nitriding and PVD coatings deposition. Wear. 2019, vol. 420/421, s. 269-280, ISSN: 0043-1648

- Zbigniew Gronostajski, **Marcin D. Kaszuba**, Marek Hawryluk, Marcin Marciniak, Maciej Zwierzchowski, Adam Mazurkiewicz, Jerzy Smolik: Improving durability of hot forging tools by applying hybrid layers. Metalurgija = Metallurgy. 2015, vol. 54, nr 4, s. 687-690, ISSN: 0543-5846

Obecnie współpraca ta jest kontynuowana w ramach wspólnie realizowanego projektu Techmatstrateg III pt. „Nowe powłoki zwiększające trwałość narzędzi w procesach kucia i wyciskania"

Politechnika Lubelska - Katedra Inżynierii Materiałowej

Współpracę z Politechniką Lubelską nawiązałem w ramach wspólnie prowadzonych badań dotyczących określenia właściwości tribologicznych warstw hybrydowych łączących napawanie i azotowanie. Efektem tej współpracy jest między innymi wspólna publikacja.

- **Marcin D. Kaszuba**, Paweł Widomski, Piotr Białucki, Artur Lange, Bożena Boryczko, Mariusz Walczak: Properties of new-generation hybrid layers combining hardfacing and nitriding dedicated to improvement in forging tools' durability. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2020, vol. 20, art. 78, s. 1-12, ISSN: 1644-9665; 2083-3318 http://dx.doi.org/10.1007/s43452-020-00080-8 (IF: 03.672, MNiSW z 2019-2020: 140)

Politechnika Poznańska – Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu

W 2015 roku nawiązałem współpracę z Politechniką Poznańską. Należy podkreślić, że współpraca ta nie wiązała się z realizacją żadnych projektów badawczych, dotyczyła natomiast wymiany doświadczeń związanych z wpływem azotowania na trwałość narzędzi kuźniczych. Efekty wspólnych badań zostały opublikowane we wspólnych publikacjach.

- Zbigniew Gronostajski, Paweł Widomski, **Marcin D. Kaszuba**, Maciej Zwierzchowski, Sławomir Polak, Łukasz Piechowicz, Jagoda Kowalska, Marcin Długozima: Influence of the phase structure of nitrides and properties of nitrided layers on the durability of tools applied in hot forging processes. Journal of Manufacturing Processes. 2020, vol. 52, s. 247-262, ISSN: 1526-6125; 2212-4616

- Paweł Widomski, Zbigniew Gronostajski, **Marcin D. Kaszuba**, Jagoda Kowalska, Mariusz Pawełczyk: The laboratory tests of hybrid layers combining hardfacing and nitriding dedicated to increase the durability of forging tools in hot forging processes. Welding Technology Review = Przegląd Spawalnictwa. 2019, vol. 91, nr 2, s. 1-6, ISSN: 0033-2364; 2449-7959 http://dx.doi.org/10.26628/wtr.v91i2.1020 (MNiSW: 005)

Uniwersytecki Szpital Kliniczny we Wrocławiu - Klinika Chorób Serca

Współpraca dotyczyła badań związanych z analizą trwałości nasypu diamentowego na narzędziach stosowanych w zabiegu rotoablacji, czyli przewiercania się przez zwężoną tętnicę. Narzędzia (bory) diamentowe wiertło o średnicy ok. 1 mm obracają się z prędkością kątową ok. 140.000 obr./min. Okazuje się że w trakcie tego zabiegu z powierzchni wiertła wykrusza się nasyp diamentowy. Prowadziłem obserwacje mikroskopowe wierteł po różnym okresie eksploatacji. Wyniki badań zostały przedstawione we wspólnej publikacji.

- Zbigniew Gronostajski, **Marcin D. Kaszuba**, Wojciech Zimoch, Krzysztof Reczuch: Degradation mechanisms of the burrs in rotablation. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2019, vol. 19, nr 4, s. 1381-1389.

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Współpraca z Uniwersytetem była związana z realizacją wspólnego projektu w ramach programu BIOSTRATEG pt. „Mobilny system iniekcyjnego, precyzyjnego nawadniania i nawożenia, zaspokajający indywidualne potrzeby rośliny" nr BIOSTRATEG3/343547/8/NCBR /2017. Należy podkreślić, że byłem jednym z głównych autorów projektu na etapie przygotowania wniosku, natomiast po uzyskaniu dofinansowania byłem głównym wykonawczą i koordynatorem (kierownikiem projektu) ze strony Politechniki Wrocławskiej. Głównym celem projektu było opracowanie innowacyjnej metody nawadniania i nawożenia wybranych upraw polowych. Innowacyjność polegałą na iniekcji wody i środków odżywczych z mobilnej platformy bezpośrednio do tych przestrzeni gleby, w których znajduje się system korzeniowy roślin. Projekt był realizowany jest przez **8 podmiotów** tworzących Konsorcjum. Jednym z efektów współpracy jest współautorstwo w rozdziale monografii.

- Grzegorz Janik, Amadeusz Walczak, Małgorzata Dawid, Ryszard Pokładek, Katarzyna Adamczewska-Sowińska, Karol Wolski, Józef Sowiński, Zbigniew Gronostajski, Jacek Reiner, **Marcin D. Kaszuba**, Łukasz J. Dworzak, Wojciech Skierucha, Agnieszka Szypłowska, Andrzej Wilczek, Jurik Lubos: Innowacyjna koncepcja nawadniania i nawożenia. W: Innowacyjne metody gospodarowania zasobami wody w rolnictwie = Innovative methods of water resources management in agriculture : praca zbiorowa / pod red. Wiesława Dembka [i in.]. Brwinów : Centrum Doradztwa Rolniczego w Brwinowie, 2016. s. 183-193.

Wybrane zaświadczenia dotyczące opisanej powyżej współpracy zamieściłem w załączniku 6.

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

Opis osiągnięć przed uzyskaniem stopnia doktora

Działalność naukowa, rozpocząłem już w czasie studiów magisterskich. Pracę magisterską pt. **„Analiza procesu kucia obudów przegubów homokinetycznych"** realizowałem pod kierunkiem Prof. Zbigniewa Gronostajskiego. Badania prowadzone w ramach pracy dotyczyły modelowania numerycznego procesu kucia precyzyjnego obudowy przegubu homokinetycznego. Już w czasie stadiów magisterskich zostałem współautorem artykułu z listy filadelfijskiej, gdzie zostały przedstawione miedzy innymi wyniki moich badań prowadzonych w ramach pracy magisterskiej:

- Zbigniew Gronostajski, Marek Hawryluk, Maciej Zwierzchowski, Marcin D. Kaszuba Analisis of forging process of constant velocity joint body. Steel Research International. 2008, spec. ed. vol. 1, s. 547-554.

Od początku mojej działalności naukowej obszar moich zainteresował związany był z przemysłowymi procesami kucia. Zainteresowania te rozwijałem poprzez realizację projektów badawczych, gdzie oprócz tego, że byłem ich wykonawcą brałem również czynny udział w ich pozyskiwaniu. Pierwszym projektem badawczym, który pozyskałem był Grant Promotorski pt." Optymalizacja parametrów kucia obudowy przegubu homokinetycznego". Celem projektu było zoptymalizowanie wybranych parametrów procesu wielooperacyjnego kucia na gorąco obudowy przegubu homokinetycznego. Nawiązałem wówczas współprace z firmą GKN Driveline, którą kontynuowałem przy realizacji badań związanych z praca doktorską.

Przy moim aktywnym udziale w 2009 roku, wspólnie z Instytutem Obróbki Plastycznej z Poznania został przygotowany projekt finansowany z Unii Europejskiej POIG.01.03.01-02-161/09, pt: „Kompleksowy system ekspertowy do optymalizacji trwałości narzędzi w procesach kucia", którego byłem głównym wykonawczą.

W 2011 roku uzyskałem finansowanie na realizację projektu „Przedsiębiorczy doktorant" realizowanego w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki, Priorytet VIII, Działanie 8.2, Poddziałanie 8.2.2. Celem projektu było opracowanie nowej technologii kucia bezwypływkowego odkuwki koła czołowego. Jednym w wymagań związanych z realizacja projektu było podpisanie umowy o współpracy w ramach projektu z przedsiębiorstwem z Dolnego Śląska. Nawiązałem wówczas współpracę z Kuźnią Jawor.

Wyniki moich badań zrealizowanych przed doktoratem zostały opublikowane tym obszarze badań opublikowałem łącznie w 12 artykułach z których 3 są w czasopismach z listy filadelfijskiej.

Opis osiągnięć po uzyskaniu stopnia doktora

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych w 2013 roku kontynuowałem i rozwijałem zainteresowania związane z przemysłowymi procesami kucia matrycowego, szczególnie w obszarze związanym z trwałością narzędzi stosowanych w procesach kucia na gorąco.

Prowadzone przeze mnie badania były związane głownie z realizacją projektów badawczych i koncentrowały się poszukiwaniu i opracowywaniu metod zwiększania trwałości narzędzi kuźniczych. Dużą część badań poświęciłem analizie możliwości poprawy trwałość narzędzi poprzez zastosowanie warstw hybrydowych typu warstwa azotowana/powłoka PVD, badania te były głównie prowadzone w ramach projektu PBS2/A5/37/2013 pt. „Zastosowanie zaawansowanych warstw hybrydowych typu PN+PVD dedykowanych do zwiększenia trwałości narzędzi w procesach kucia" realizowanego w ramach konsorcjum Politechnika Wrocławska, Instytut Technologii Eksploatacji Państwowego Instytutu Badawczego w Radomiu. Od 2010r. prowadzę intensywną współpracę z Kuźnią Jawor w Jaworze. W ramach tej współpracy byłem jednym z głównych wykonawców projektu, nr POIG.01.03.01-02-063/12 "Opracowanie i wdrożenie technologii kucia dokładnego w Kuźni Jawor S.A.", celem projektu było opracowanie nowych technologii kucia dokładnego polegających na zminimalizowaniu masy materiału wsadowego bez znaczącego pogorszenia trwałości narzędzi. Na podstawie modelowania numerycznego (MES) oraz szerokiego zakresu badań doświadczalnych dokonano optymalizacji oraz opracowania nowych technologii kucia dokładanego dla dwóch typów odkuwek: typu kołnierz i typu rozwidlonego, gdzie udało się zmniejszyć masę materiału wsadowego odpowiednio o 12% i 10,2%

Chcąc kontynuować i rozwijać swoje zainteresowania w obszarze związanym z trwałością narzędzi kuźniczych od 2014 do 2020 roku regularnie wnioskowałem i uzyskiwałem finansowanie działalności polegającej na prowadzeniu badań naukowych lub prac rozwojowych oraz zadań z nimi związanych, służących rozwojowi młodych naukowców realizowanego w ramach dotacji celowej MNiSW (Badania Własne). Badania te obejmowały między innymi zagadnienia związane z możliwościami poprawy trwałości narzędzi poprzez zastosowanie warstw hybrydowych typu warstwa azotowana powłoka PVD oraz analizę możliwości regeneracji narzędzi kuźniczych przez napawanie oraz zajmowałem się robotyzacją procesów kucia matrycowego na gorąco. W ramach tych prac opracowałem i zbudowałem specjalne stanowisko dydaktyczne, odwzorowujące rzeczywiste gniazdo kuźnicze na którym można symulować złożone czynności manipulacyjne związane z przenoszeniem odkuwki pomierzy kolejnymi wykrojami.

Następnie w 2014 roku uzyskałem stypendium w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki, Poddziałanie 4.1.1: Wzmocnienie i rozwój potencjału dydaktycznego uczelni Rozwój Potencjału Dydaktyczno-Naukowego Młodej Kadry Akademickiej Politechniki Wrocławskiej.

W efekcie prowadzonych przeze mnie badań została opracowana metoda, pozwalająca na znaczną poprawę trwałości narzędzi poprzez zastosowanie warstw hybrydowych łączących napawanie i azotowanie. Po wykazaniu znacznego efektu poprawy trwałości narzędzi w porównaniu z dotychczas stosowanymi metodami, zostało przygotowane zgłoszeni tego rozwiązania do ochrony patentowej pod nazwą "Sposób poprawy trwałości narzędzia kuźniczego przez modyfikację jego warstwy wierzchniej"(zgłoszenie nr P.424624), na które przyznano ochronę patentową w 2019 roku.

Następnie w 2019 roku za swoją działalność otrzymałem Stypendium dla Wybitnych Młodych Naukowców przyznane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

W tym samym roku przygotowałem projekt pt. „Opracowanie innowacyjnej metody zwiększenia trwałości narzędzi kuźniczych przez dobór optymalnych parametrów hybrydowego

procesu napawania z azotowaniem wspomagany modelowaniem numerycznym warstwy wierzchniej, w ramach konkursu LIDER, na który uzyskałem dofinansowanie. Celem projektu jest opracowanie technologie hybrydowej warstwy wierzchniej łączącej napawanie i azotowanie. Dobór parametrów hybrydowej warstwy wierzchnie będzie indywidualnie dopasowany do warunków pracy danego narzędzia kuźniczego, co będzie możliwe dzięki wnikliwej analizie warunków pracy oraz zastosowaniu specjalnie opracowanego modelu numerycznego warstwy wierzchniej.

Należy również podkreślić, że od 2018 roku zaangażowany byłem w realizację projektu badawczego, który nie był tematyczne związany z obszarem mojej głównej działalności naukowej. Projekt ten pt. „Mobilny system iniekcyjnego, precyzyjnego nawadniania i nawożenia, zaspokajający indywidualne potrzeby rośliny" był realizowany w ramach II edycji konkursu „Środowisko naturalne, rolnictwo i leśnictwo" – BIOSTRATEG. Celem projektu było wykonanie oraz przygotowanie do wdrożenia oszczędnego mobilnego systemu nawadniającego z możliwością nawożenia upraw polowych. Byłem jednym z głównych wykonawców projektu i koordynatorem (Kierownikiem ze strony konsorcjanta) ze strony Politechniki Wrocławskiej. Na uwagę zasługuje fakt, że opracowane w ramach projektu innowacyjne rozwiązania, których jestem współautorem zostały zgłoszone do ochrony patentowej (łącznie 6 zgłoszeń)

Oprócz opisanych powyżej, w obszarze moich zainteresowań naukowych znalazły się również zagadnienia dotyczące opracowania praktycznych rozwiązań i aplikacji przemysłowych, które zostały wdrożenia w przemyśle (potwierdzone oświadczeniami):

- opracowanie stanowiska do szybkich przezbrojeń narzędzi na zrobotyzowanym gnieździe kującym (Kuźnia Jawor 2018)
- opracowanie i budowa urządzeń smarująco-chłodzących, zsynchronizowanych z pracą agregatu kuźniczego, umożliwiających na regulowane i kierunkowe podawanie środka smarnego oraz ustawialnej dawki powietrza do czyszczenie narzędzia ze zgorzeliny (Kuźnia Jawor 2017). Rozwiązanie zgłoszone do ochrony patentowej (w 2019 przyznany patent: nr PL 231792, Układ do dozowania środka do smarowania i chłodzenia narzędzi kuźniczych w procesie kucia na gorąco)
- opracowanie sposobu podawania środka smarująco chłodzącego poprzez zastosowanie dysz pełno stożkowych (Kuźnia Jawor 2019)
- optymalizacja technologii kucia Matrycowego odkuwek typu kołnierz (Kuźnia Jawor 2015)
- opracowanie i budowa systemów rejestrująco-pomiarowych, głównie do kontroli, pomiaru i analizy sił kucia w funkcji czasu, przemieszczenia i/lub położenia kątowego wału korbowego prasy, rozkładów temperatur na powierzchniach roboczych narzędzi lub wewnątrz narzędzia (Kuźnia Jawor).

Działalność dydaktyczna:

Od początku mojej pracy na Uczelni prowadzę zajęcia dydaktyczne ze studentami, różne formy zajęć (wykłady, laboratoria, seminaria, prace przejściowe, projekty).

Tematyka prowadzonych przeze mnie zajęć dotyczy:

- głównie przeróbki plastycznej: Techniki wytwarzania - przeróbka plastyczna, Technologia materiałów inżynierskich, Podstawy technik wytwarzania, Zaawansowane technik wytwarzania
- projektowania CAD/CAM: CAD/MES w modelowaniu procesów technologicznych, Komputerowa symulacja procesów kształtowania plastycznego
- maszyn i urządzeń stosowanych w technikach wytwarzania: Zastosowanie urządzeń mechatronicznych w systemach wytwarzania
- metrologii: Metrologia Warsztatowa, Metrologia Wielkości Geometrycznych.

Od 2013 r. byłem promotorem 59 prac magisterskich oraz 52 prac inżynierskich realizowanych w j. polskim oraz w j. angielskim, Od 2018 r. przystąpiłem do pracy w komisji egzaminów dyplomowych w funkcji sekretarza. Uczestniczyłem w 26 komisjach,

Byłem promotorem pomocniczym zrealizowanego doktoratu wdrożeniowego Pana (obecnie dr) inż. Marcina Rychlika.

Osiągnięcia popularyzujące naukę:

- Obecnie jestem członkiem komitetu naukowego IX Wrocławskiego Sympozjum Spawalniczego, które zostało przełożone z 2020 na 2022 r.
- Byłem członkiem sekcji Procesów Przeróbki Plastycznej Komitetu Metalurgii PAN.
- Uczestniczyłem w zespole oceniającym prace Studentów biorących udział w cyklicznie organizowanej „Międzynarodowej Olimpiady Kuźniczej" w 2016, 2017, 2018, 2019 roku. Należy również podkreślić, że Studencie, którzy reprezentowali Politechnikę Wrocławską do Olimpiady zostali przygotowani przeze mnie i w każdej edycji zajmowali czołowe miejsca.
- Jestem założycielem Wydziałowego Kała Naukowego NOWOCZESNA AUTOMATYKA PRZEMYSŁOWA, którego obecnie jestem opiekunem.

Osiągnięcia organizacyjne:

- Od 2008 roku biorę czynny udział w organizacji konferencji międzynarodowej AutoMetForm - Advanced Metal Forming Processes in Automotive Industry. Konferencja ta jest organizowana co 2 lat od 2008r.
- Ponadto od 2017 roku pełnię funkcję **Zastępcy Kierownika Katedry Obróbki Plastycznej, Spawalnictwa i Metrologii**

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.

Nagrody i stypendia za działalność naukową zdobyte przed uzyskaniem stopnia doktora

- Stypendium Przedsiębiorczy Doktorant przyznane przez Urząd Marszałkowski Województwa Dolnośląskiego, okres pobierania 10.2012-09.2013 r.

Nagrody, stypendia i wyróżnienia za działalność naukową zdobyte po uzyskaniu stopnia doktora

- Wyróżnienie rozprawy doktorskiej przez Radę Wydziału Mechanicznego Politechniki Wrocławskiej, 27.02.2013 r.,
- Nagroda w V Biennalach fotograficznych Uniwersytetu Śląskiego: Nauka Idea w Praktyce 2014: Nauka w obiektywie,
- Nagroda Rektora Politechniki Wrocławskiej za wybitne osiągnięcia naukowe, 2016 r.,
- **Stypendium dla Wybitnych Młodych Naukowców przyznane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego**, okres pobierania 01.2020-12.2022 r.,
- Laureat konkursów Primus realizowanych przez Politechnikę Wrocławską, w ramach których wyłoniono osoby o najwyższym dorobku publikacyjnym z dyscypliny inżynieria mechaniczna, 11.2020 r.,
- Laureat konkursu „Boost your Research Impact 2020" realizowanego przez Politechnikę Wrocławską, w ramach którego wyłoniono 20 osób z dyscypliny inżynieria mechaniczna, które najbardziej powiększyły swój dorobek w stosunku do roku poprzedniego, 12.2020 r.,
- Laureat konkursu Secundus realizowanych przez Politechnikę Wrocławską, w ramach których wyłoniono osoby o najwyższym dorobku publikacyjnym z dyscypliny inżynieria mechaniczna, 07.2021 r.,

8. Sumaryczne zestawienie kryteriów osiągnięć wnioskodawcy wg Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 01.09.2011 r. w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego

l.p.	Kryterium według §3 p.4, §4 i §5	TAK (liczba)/BRAK
1.	Publikacje naukowe w czasopismach z bazy Journal Citation Reports (JCR)	Tak/33
2.	Zrealizowane oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne i technologiczne	Tak/6
3.	Udzielone patenty: a) międzynarodowe b)krajowe	a) Brak b) Tak/ 2
4.	Wynalazki oraz wzory użytkowe i przemysłowe, które zostały wystawione na międzynarodowych lub krajowych wystawach lub targach	Tak/1
5.	Monografie, publikacje naukowe w czasopismach innych niż znajdujące się w bazie JCR	Tak/46
6.	Opracowania zbiorowe, katalogi zbiorów, dokumentacja prac badawczych, ekspertyz	Tak/25
7.	Sumaryczny *impact factor* według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania:	73.171
8.	Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (WoS):	463 (bez autocytowań 364)
9.	Indeks Hirscha według bazy Web of Science (WoS)	14
10.A	Kierowanie projektami badawczymi: a) międzynarodowymi b) krajowymi	a) Brak b) Tak/2
10. B	Udział w projektach badawczych: a) międzynarodowych b) krajowych	a) Tak/2 b) Tak/18
11.	Międzynarodowe i krajowe nagrody za działalność naukową	Tak/2
12.	Wygłoszenie referatów na tematycznych konferencjach a) międzynarodowych b) krajowych	a) Tak/6 b) Tak/7
13.	Uczestnictwo w programach europejskich oraz innych programach międzynarodowych i krajowych	Tak/18
14.	Aktywny udział w konferencjach naukowych: a) międzynarodowych b) krajowych	a) Tak/6 b) Tak/7
15.	Udział w komitetach organizacyjnych konferencji naukowych: a) międzynarodowych b) krajowych	a) Brak b) 1
16.	Otrzymane nagrody i wyróżnienia inne niż wymienione wyżej	Tak/6
17.	Udział w konsorcjach i sieciach badawczych	Tak/16
18.	Kierowanie projektami realizowanymi we współpracy z: a) naukowcami z innych ośrodków polskich, b) naukowcami z ośrodków zagranicznych,	a) Tak/2 b) Tak/1

	c) przedsiębiorcami, innymi niż wymienione wyżej	c) Tak/2
19.	Udział w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism	Brak
20.A	Członkostwo w międzynarodowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych a) ogółem b) w tym z wyboru	 a)Brak b)Brak
20.B	Członkostwo w krajowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych a) ogółem b) w tym z wyboru	 a) Tak/1 b) Brak
21.	Osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki	Tak/4
22.	Opieka naukowa nad studentami	Tak/111
23.	Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze: a) opiekuna naukowego b) promotora pomocniczego	 a)Brak b) Tak/ 1
24.	Staże w ośrodkach naukowych lub akademickich a) zagranicznych b) krajowych	 a)Brak b)Brak
25.	Wykonane ekspertyzy lub inne opracowania na zamówienie	Tak/ 14
26.	Udział w zespołach eksperckich i konkursowych	Brak
27.	Recenzowanie projektów: a) międzynarodowych b) krajowych	 a) Brak b) Brak
28.	Recenzowanie publikacji w czasopismach: a) międzynarodowych b) krajowych	 a) Tak/16 b) Tak/1
29.	Inne osiągnięcia /recenzowanie referatów konferencyjnych/ zapraszane wykłady	Tak/2
	Łącznie liczba spełnionych kryteriów:	**25/29**