PODPIS ZAUFANY
MACIEJ WOJCIECH
ZWIERZCHOWSKI
03.03.2022 13:34:29 [GMT+1]
Dokument podpisany elektronicznie
podpisem zaufanym

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA

Wydział Mechaniczny

AUTOREFERAT

Załącznik nr 3

do wniosku o wszczęcie postępowania habilitacyjnego

w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie

Inżynieria Mechaniczna

Autor: dr inż. Maciej Zwierzchowski

Katedra Obróbki Plastycznej Spawalnictwa i Metrologii

Wydział Mechaniczny

Politechnika Wrocławska

Spis treści

1. Dane wnioskodawcy 3
2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe 3
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych 3
4. Wskazanie osiągnięcia 3
4.1. Cykl publikacji powiązanych tematycznie 3
5. Omówienie celu naukowego, osiągniętych wyników oraz ich zastosowań 7
5.1. Wprowadzenie 7
5.2. Cele naukowe 8
5.3. Osiągnięte wyniki badań 8
5.4. Uzyskane wyniki naukowe oraz wykorzystanie w praktyce (wyniki utylitarne) 44
6. Współpraca z innymi jednostkami naukowymi 46
7. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowych 48
7.1. Działalność prowadzona przed doktoratem 48
7.2. Działalność prowadzona po obronie pracy doktorskiej. 49
7.3. Działalność dydaktyczna 50
7.4. Działalność organizacyjna 50
8. Podsumowanie działalności naukowo-badawczej 52

1. Dane wnioskodawcy

Imię i nazwisko: Maciej Zwierzchowski
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 74

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

- Dyplom doktora nauk technicznych w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn. 2007r. Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny.
Tytuł rozprawy doktorskiej: ***Wpływ struktury i właściwości materiałów elementów układu rozrządu silnika ZS na charakterystykę zużycia.***
Promotor: **prof. dr hab. inż. Andrzej Weroński**
Recenzenci: prof. dr hab. inż. Jerzy Okrajni
dr hab. Tadeusz Hejwowski

- Dyplom magistra inżyniera w zakresie Technologia Maszyn. 2001r.
Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny. Kierunek studiów: Inżynieria Materiałowa. Tytuł Pracy dyplomowej: ***Analiza metod badania odporności na zmęczenie cieplne.***
Promotor: **prof. dr hab. inż. Andrzej Weroński**

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- od 2001r. do 2007r. – doktorant w Katedrze Inżynierii Materiałowej **Politechniki Lubelskiej**
- od 2007r. do 2009r. – asystent w Instytucie Technologii Maszyn i Automatyzacji, Zakład Obróbki Plastycznej, Wydział Mechaniczny, **Politechnika Wrocławska.**
- od 2009r. do obecnie – adiunkt w Katedrze Obróbki Plastycznej, Spawalnictwa i Metrologii, Wydział Mechaniczny, **Politechnika Wrocławska**

4. Wskazanie osiągnięcia

Jako osiągnięcie naukowe, uzyskane po otrzymaniu stopnia doktora, stanowiące znaczny wkład w rozwój dyscypliny naukowej Inżynieria Mechaniczna oraz 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. 2018 poz. 1668 ze zm.) wskazuję cykl publikacji powiązanych tematycznie na który składa się dziewiętnaście artykułów naukowych opublikowanych w latach 2009 – 2020, pt.:

„***Studium wpływu wybranych czynników oraz zjawisk na zmiany w warstwie wierzchniej narzędzi kuźniczych w aspekcie ich trwałości"***

4.1. Cykl publikacji powiązanych tematycznie

W skład rozważanego cyklu publikacji wchodzą następujące prace:

1. Zbigniew Gronostajski, Paweł Widomski, Marcin 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, Volume 52, 2020, Pages 247-262, ISSN 1526-6125, https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.037. (**IF 3,462**, MNiSW z: 2019-2020 140 pkt)
   Wkład: Opracowanie koncepcji artykułu w zakresie doboru metodyki badawczej, przeprowadzenie badań oraz analiza mikroskopowa w obszarze warstwy wierzchniej dla różnych wariantów azotowania. Opracowanie wniosków w zakresie zmian w warstwie wierzchniej narzędzi w kontekście stosowanych metod azotowania. Korekta artykułu na etapie recenzji.

2. **Maciej Zwierzchowski** Impact of tool magnetization on changes in the surface layer of forging tools / M. Zwierzchowski. Archives of Metallurgy and Materials. 2019, vol. 64, nr 1, s. 317-324, http://dx.doi.org/10.24425/amm.2019.126254, (**IF 0.697**, MNiSW z: 2019-2020: 40 pkt.)
   Wkład: Artykuł jednoautorski.

3. Barbara Mrzygłód*, Marek Hawryluk, Zbigniew Gronostajski, Andrzej Opaliński*, Marcin D. Kaszuba, Sławomir Polak, Paweł Widomski, Jacek Ziemba, **Maciej Zwierzchowski**: Durability analysis of forging tools after different variants of surface treatment using a decision -support system based on artificial neural networks / Barbara Mrzygłód [i in.]. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2018, vol. 18, nr 4, s. 1079-1091, https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.02.010 (**IF 2.846,** MNiSW z: 2013-2018: 30pkt)
   Wkład: Opracowanie koncepcji w zakresie metod oraz analiz dotyczących zjawisk zachodzących w warstwie wierzchniej narzędzi kuźniczych, analizy mikroskopowe SEM oraz LM, opracowanie bazy danych dla procesu decyzyjnego sieci neuronowych. Weryfikacja otrzymanych wyników dla różnych wariantów danych wejściowych. Opracowanie wniosku w zakresie badań. Korekta artykułu na etapie recenzji.

4. Zbigniew Gronostajski, Marek Hawryluk, Paweł Widomski, Sławomir Polak, Jacek Ziemba, **Maciej Zwierzchowski**: Influence of application of GN+Cr/CrN hybrid layer on durability improvement of die inserts used in hot forging process of wheel forging / Zbigniew Gronostajski [i in.]. Procedia Manufacturing [Dokument elektroniczny]. 2018, vol. 15, s. 396-403 17th International Conference on Metal Forming, Metal Forming 2018, 16-19 September 2018, Toyohashi, Japan. http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.235 (**MNiSW: 5 pkt**)
   Wkład: Opracowanie metodyki badawczej, badania mikroskopowe LM oraz SEM, badanie właściwości warstwy wierzchniej narzędzi z powłokami PVD. Opracowanie części wniosków dotyczących wpływu rodzaju powłoki na charakterystykę zużycia. Korekta artykułu na etapie recenzji.

5. 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 / Zbigniew Gronostajski [i in.]. Surface Innovations. 2018, vol. 6, nr 4/5, s. 301-310, http://dx.doi.org/10.1680/jsuin.18.00021 (**IF 2,333**, MNiSW z: 2013-2018: 25 pkt)
   Wkład: Opracowanie metodyki badawczej w obszarze zmian w warstwie wierzchniej narzędzi kuźniczych. Opracowanie metodyki badań mikroskopowych oraz wykonanie badań narzędzi kużniczych. Badania właściwości warstwy wierzchniej. Opracowanie wyników oraz wniosków z badań materiałowych. Korekta artykułu na etapie recenzji.

6. Marek Hawryluk, Zbigniew Gronostajski, Marcin D. Kaszuba, Jakub J. Krawczyk, Paweł Widomski, Jacek Ziemba, **Maciej Zwierzchowski,** Marta Janik : Wear mechanisms analysis of dies used in the process of hot forging a valve made of high nickel steel, Archives of Metallurgy and Materials. 2018, vol. 63, nr 4, s. 1963-1974 http://dx.doi.org/10.24425/amm.2018.125131 (**IF 0.697**, MNiSW z: 2013-2018: 30 pkt)

Wkład: Opracowanie planu badań w zakresie metod oraz analiz dotyczących zjawisk zachodzących w warstwie wierzchniej narzędzi kuźniczych do kucia stali wysokoniklowych. Wykonanie obszernych badań mikroskopowych SEM oraz LM . Badania właściwości warstwy wierzchniej narzędzi. Opracowanie wniosków z wykonanych analiz dotyczących mechanizmów zużycia.

7. Marek Hawryluk, **Maciej Zwierzchowski**, Marcin Marciniak, Przemysław Sadowski: Phenomena and degradation mechanisms in the surface layer of die inserts used in the hot forging processes. Engineering Failure Analysis. 2017, vol. 79, s. 313-329, https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.04.036 (**IF 2,157** MNiSW z: 2013-2018: 35 pkt)
   Wkład: Opracowanie planu badań w zakresie metod oraz analiz dotyczących zjawisk zachodzących w warstwie wierzchniej narzędzi kuźniczych, badania zmęczenia cieplnego, analiza otrzymanych wyników oraz opracowanie wniosków dotyczących wpływu temperatury na procesy zmęczenia cieplnego. Obszerne badania mikroskopowe pod kątem opracowanie metodyki wyznaczania odporności na zmęczenie cieplne. Współudział w konstrukcji stanowiska do badania zmęczenia cieplnego. Prowadzenia badań odporności na zmęczenie cieplne stali narzędziowych do pracy na gorąco.

8. **Maciej Zwierzchowski**: Selected aspects of wear of forging tools: METAL 2017, 26th International Conference on Metallurgy and Materials, May 24th-26th 2017, Brno, Czech Republic : conference proceedings. Ostrava : Tanger, cop. 2017. s. 357-363, (**Web of Science**)
   Wkład: Artykuł jednoautorski.

9. **Maciej Zwierzchowski**: Factors affecting the wear resistance of forging tools. Archives of Metallurgy and Materials. 2017, vol. 62, nr 3, s. 1567-1576, https://doi.org/10.1515/amm-2017-0240 (**IF 0,625**, MNiSW z: 2013-2018: 30 pkt)
   Wkład: Artykuł jednoautorski.

10. 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, http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2016.01.030 (**IF 3,094**, MNiSW z: 2016: 35pkt)
    Wkład: Opracowanie planu badań w zakresie zmian w warstwie wierzchniej narzędzi kuźniczych, wykonanie analiz termowizyjnych oraz badań w zakresie wpływu tlenków żelaza(zgorzeliny) na zmiany w warstwie wierzchniej. Opracowanie metodyki oraz wykonanie obszernych badań z zakresu mechanizmów niszczących dla narzędzi kuźniczych – odkształcenia plastyczne, zmęczenia cieplne zużycie ścierne itd. Opracowanie wniosków dotyczących wpływu wybranych czynników na procesu zużycia.

11. 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, http://dx.doi.org/10.1007/s00170-015-7522-3, (**IF 2,209**, MNiSW z: 2016: 25pkt)
    Wkład: Opracowanie koncepcji artykułu w zakresie bazy danych oraz implementacji wyników do systemu ekspertowego. Opracowanie zależności oraz wykonanie badań materiałowych i mikroskopowych w zakresie mechanizmów niszczących dla kilkudziesięciu kompletów narzędzi kuźniczych. Opracowanie wniosków. Konsultacje z zespołem AGH dotyczące budowy zależności występowania mechanizmów.

12. 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, https://hrcak.srce.hr/138288 (**Lista Filadelfijska**, **MNiSW z: 2015: 25pkt**)

Wkład: Opracowanie koncepcji laboratoryjnych badań materiałowych w zakresie tematyki artykułu. Określenie na ich podstawie wpływu stosowania warstw hybrydowych na trwałość narzędzi kuźniczych. Opracowanie wniosków z wykonanych badań oraz analiz. Korekta artykułu na etapie recenzji.

13. 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, http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2014.07.002 (**IF 1,793,** MNiSW z: 2014: 25pkt)
    Wkład: Na podstawie wykonanych obszernych analiz procesów zużycia narzędzi kuźniczych opracowałem metodykę badawczą / mikroskopową oraz badania właściwości w warstwie wierzchniej. Wykonałem obszerne badania oraz opracowałem wnioski dotyczące współudziału mechanizmów niszczących oraz ich wpływu na trwałość narzędzi kuźniczych. Korekta artykułu na etapie recenzji.

14. Zbigniew Gronostajski, Marek Hawryluk, Adam Niechajowicz, **Maciej Zwierzchowski,** Marcin D. Kaszuba, Tomasz Będza: Application of the scanning laser system for the wear estimation of forging tools - Zastosowanie systemu skanowania laserowego do oceny zużycia narzędzi kuźniczych. Computer Methods in Materials Science. 2011, vol. 11, nr 2, s. 425-431, (**MNiSW z: 2010: 6pkt**)
    Wkład: Opracowanie koncepcji artykułu oraz badań w zakresie badań dotyczących mechanizmów niszczących oraz badań materiałowych w tym zakresie. Opracowanie wniosków dotyczących stanu warstwy wierzchniej dla narzędzi po odkuciu różnej liczby odkuwek. Korekta artykułu na poziomie recenzji.

15. Marek Hawryluk, **Maciej Zwierzchowski**: Structural analysis of hot forging dies with regard to their life - Analiza strukturalna matryc stosowanych do kucia na ciepło w aspekcie ich trwałości. Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability. 2009, nr 2, s. 31-41 (**Lista Filadelfijska, MNiSW z: 2010: 9 pkt**)
    Wkład: Opracowanie koncepcji artykułu, wykonanie badań, interpretacja wyników oraz opracowanie wniosków dotyczących wpływu pasmowości węglików w stalach narzędziowych do pracy na gorąco na ich trwałość. Korekta artykułu na etapie recenzji.

16. **Maciej Zwierzchowski**: Wybrane aspekty zużycia narzędzi kuźniczych. Rudy i Metale Nieżelazne. 2017, R. 62, nr 12, s. 58-61, https://dx.doi.org/10.15199/67.2017.12.10 , **(MNiSW z 2017: 8pkt)**
    Wkład: Artykuł jednoautorski.

17. Łukasz Rauch, Adrian Chmura, Zbigniew Gronostajski, **Maciej Zwierzchowski,** Maciej Pietrzyk.: Cellular automata model for prediction of crack initiation and propagation in hot forging tools. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2016, vol. 16, nr 3, s. 437-447. https://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2016.02.008 (**IF 2,216, MNiSW z: 2016: 30 pkt**)
    Wkład: Opracowanie koncepcji w zakresie wykonania badań dotyczących wpływu mechanizmów zużycia na propagację pęknięć z uwzględnieniem zużycia ściernego oraz innych mechanizmów. Wykonanie bazy danych dla narzędzi po odkuciu różnej liczby odkuwek. Opracowanie wniosków w tym zakresie.

18. **Maciej Zwierzchowski**: Analysis of the possibilities of using forging heat in isothermal annealing processes for AISI 4140 alloy. Archives of Metallurgy and Materials. 2020, vol. 65, nr 2, s. 951-958. https://dx.doi.org/10.24425/amm.2020.132843 , (**IF 0,586, MNiSW z: 2016: 40 pkt**)
    Wkład: Artykuł jednoautorski.

19. Marek Hawryluk, Maciej Zwierzchowski, Marcin Marciniak: A destructive mechanisms occurring in the surface layer of forging tools used in hot forging processes. Archives of Metallurgy and Materials. 2018, vol. 63, nr 2, s. 941-952. https://dx.doi.org/10.24425/122426 , (**IF 0,697, MNiSW z: 2016: 30 pkt**)

Wkład: Opracowanie koncepcji artykułu, założeń do badań przemysłowych i laboratoryjnych w aspekcie odporności na zmęczenie cieplne stali narzędziowych do pracy na gorąco. Opracowanie warunków brzegowych badań, Wykonanie badań oraz opracowanie wyników dla laboratoryjnych badań zmęczenia cieplnego. Opracowanie wniosków. Korekta artykułu na etapie recenzji.

5. Omówienie celu naukowego, osiągniętych wyników oraz ich zastosowań

5.1. Wprowadzenie

Warunki technologiczne w procesach kucia na gorąco są bardzo złożone. Materiały z grupy stali narzędziowych do pracy na gorąco nierzadko posiadają właściwości niewystarczające aby zapewnić odpowiednią wytrzymałość i odporność na warunki eksploatacyjne. Dla procesów kucia głównymi czynnikami mającymi wpływ na trwałość narzędzi są: temperatura, czas kontaktu z kształtowanym materiałem, naciski oraz inne. Złożoność zjawisk jest na tyle duża, że nie ma żadnej metody prognozy i opisu mogącego pomóc w przewidywaniu trwałości narzędzi kuźniczych. Temperatura kucia na gorąco przyjmowana jest jako (0,6 – 0,9 $T_{topnienia}$). Zwiększenie temperatury procesu powoduje zmniejszenie nacisków niezbędnych do kształtowania plastycznego, zwiększenie możliwości odkształcania materiału. Ograniczeniem jest fakt, że przy zbyt wysokich temperaturach następuje nadmierne utlenianie, odwęglenie oraz rozrost ziaren w materiale odkuwki. Sam proces powstawania zgorzeliny na stali ma przebieg logarytmiczny. Należy przy tym nadmienić, że zbyt wysoka temperatura odkuwki może mieć istotny wpływ na przebieg procesów zużycia narzędzi kuźniczych. Poza przedstawionymi głównymi czynnikami możemy mieć do czynienia z obecnością pola magnetycznego. Magnesowanie się narzędzi podczas kucia na gorąco jest również zjawiskiem niekorzystnym. Wszystkie obecne w obszarze kucia – wykrój matrycy - cząstki materiału ferromagnetycznego są przyciągane przez matrycę i mogą powodować wzrost prędkości zużycia narzędzi – dotyczy to głównie procesów kształtowania wyrobów stalowych. Powodem tego może być zgorzelina (Fe_2O_3, Fe_3O_4 – ferromagnetyk) oraz wszelkie produkty zużycia w przypadku kucia materiałów na bazie żelaza. Wysoka temperatura odkuwki może być również powodem zbyt szybkiego odpuszczania się warstwy wierzchniej powierzchni roboczych narzędzi kuźniczych, utraty stabilności warstwy azotowanej, zintensyfikowania procesów zmęczenia cieplnego – poprzez zwiększenie amplitudy cieplnej, gradientu oraz średniej temperatury narzędzi. Szereg czynników ma istotny wpływ na przebieg procesów zużycia narzędzi kuźniczych. Oddziaływują one również między sobą. Typowe zjawiska (**mechanizmy zużycia**) z którymi możemy się spotkać przy omawianiu problematyki trwałości narzędzi kuźniczych przedstawiono na Rys. 1

Rys. 1 Zjawiska mające wpływ na trwałość narzędzi kuźniczych

Bardzo istotnym elementem prowadzenia badań zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i przemysłowych jest odpowiednie i przemyślane wykorzystanie metod oceny oraz analizy trwałości narzędzi

kuźniczych. Głównymi aspektami mającymi wpływ na poprawność w formułowaniu wniosków jest odpowiednia interpretacja wyników pomiarów z procesu kucia – pomiary siły, temperatury, naciski itp. Równie istotnym są nieniszczące, jak i niszczące badania makro i mikroskopowe oraz pomiary twardości (również rozkłady mikrotwardości). Dzięki badaniom mikroskopowym na mikroskopie świetlnym można uzyskać szereg informacji dotyczących wpływu parametrów eksploatacyjnych na zmiany w warstwie wierzchniej narzędzi. Podobnie badania mikroskopowe SEM pozwalają uzyskać szereg informacji dotyczących topografii powierzchni uszkodzonych narzędzi, zmian na powierzchni materiału, a przy użyciu BSE, EDS oraz EBSD szereg informacji pomocnych w ujawnianiu zmian w materiale na skutek oddziaływania różnych zjawisk podczas procesów kucia na gorąco.

Odpowiednie metody archiwizowania danych pomiarowych w postaci numerycznej pozwalają na późniejsze opracowywanie zależności wpływu poszczególnych czynników procesu na właściwości warstwy wierzchniej narzędzi kuźniczych – (ubytki materiału, zmiany twardości oraz mikrotwardości, itp.). Gromadzone dane pozwalają z kolei na wspomaganie procesów modelowania numerycznego procesów zużycia, a także do budowy baz danych czy systemów ekspertowych.

5.2. Cele naukowe

Wysoce uzasadnionym jest właściwe zrozumienie procesów fizycznych które zachodzą podczas kucia na gorąco. Zarówno od strony materiału narzędziowego, jak i materiału odkuwki. Pozwala to na pełne zrozumienie zjawisk zachodzących w kolejnych stadiach zużycia – pracy narzędzi kuźniczych. Podejścia takie pozawala również na wprowadzanie zmian w procesie i odpowiednie kształtowanie i optymalizację ich trwałości.

Tematyka która została podjęta może zostać podzielona **na trzy główne zagadnienia (cele naukowe).**

Pierwszym głównym zagadnieniem które nadal stanowi źródło wielu nierozwiązanych problemów jest analiza i identyfikacja zjawisk zachodzących podczas procesu kucia na gorąco i ich wpływu na zmiany w warstwie wierzchniej narzędzi kuźniczych. **Część ta zawiera najistotniejsze informacje oraz wyniki badań procesów technologicznych oraz ich parametrów na przykładzie kucia różnych wyrobów.** Uzyskane wyniki są źródłem wielu cennych informacji mających wpływ na procesy poznawcze zjawisk zachodzących w warstwie wierzchniej materiału narzędziowego – narzędzi kuźniczych.

Drugim głównym zagadnieniem zaprezentowanym w pracy są wybrane czynniki i technologie mogące podnieść trwałość narzędzi kuźniczych. **Obszar ten obejmuje tematykę stosowania powłok PVD na warstwach azotowanych (powłoki hybrydowe), napawanie + azotowanie oraz wariantowe azotowanie różnymi metodami.** Część ta przedstawia najistotniejsze informacje mogące w istotny sposób wpłynąć na trwałość narzędzi kuźniczych.

Trzecim zagadnieniem istotnym z punktu widzenia rozwoju nauki jest wspomaganie procesów modelowania i prognozowania zjawisk. Obszar ten (modelowania zmian materiałowych) w ostatnich latach rozwinął się niezwykle dynamicznie, pozwalając na wstępne prognozowanie procesów i zjawisk zachodzących w analizowanych materiałach. Poza modelowaniem zmian materiałowych, równie istotnym jest możliwość analizy trwałości narzędzi kuźniczych poprzez wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych – budowa systemów ekspertowych.

5.3. Osiągnięte wyniki badań

Zagadnienie 1: Analiza i identyfikacja zjawisk zachodzących podczas procesu kucia na gorąco

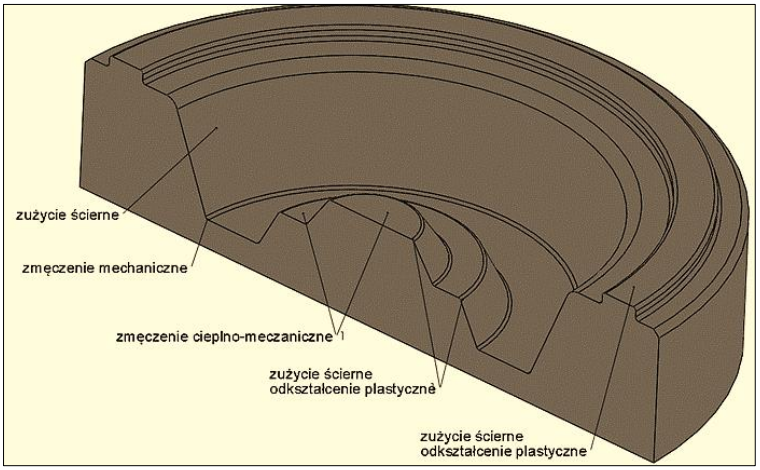
Usystematyzowanie zapisu dotyczącego pierwszego celu naukowego – analiza i identyfikacja zjawisk fizycznych podczas procesu kucia, jest nadrzędnym celem w procedurze analizy trwałości narzędzi kuźniczych. Jak już wspomniano, istnieje szereg czynników mających wpływ na przebieg procesów zużycia. Począwszy od materiału z którego wykonane są narzędzia a następnie ich obróbkę cieplną, przygotowanie powierzchni [4], odpowiedni montaż, warunki procesu kucia [7] (temperatura, naciski, czas kontaktu, obecność

smarowania/chłodzenia itp.)-[9,10] aż skończywszy na obecności zgorzeliny, pola magnetycznego [2], usuwanie produktów niepożądanych z obszaru roboczego – zgorzelina [6,8].

Wszystkie wymienione czynniki mają wpływ na przebieg procesów zużycia. Samo zużywanie w tym miejscu warto określić jako szereg zmian w warstwie wierzchniej, powodowanych przez różne zjawiska, czego konsekwencją jest zużycie które można zmierzyć liniowo, objętościowo lub np. wagowo. Proces zużywania jest przyczyną obniżenia trwałości, w tym przypadku narzędzi kuźniczych. Trwałość narzędzi kuźniczych najczęściej wyrażana jest jako liczba odkuwek, które można wykonać dane narzędzie. Wykonane odkuwki muszę być zgodne z wymaganiami technicznymi dla ich odbioru.

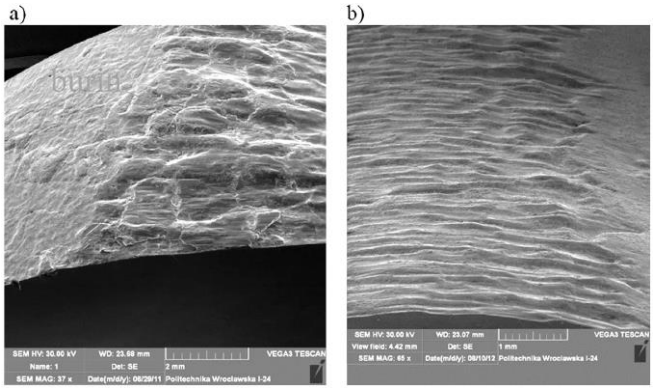
W opracowaniu [8,13] przedstawiono główne zagadnienia związane z wpływem wybranych czynników na mechanizmy zużycia narzędzi kuźniczych. Opisano główne mechanizmy zużycia narzędzi na wybranym przykładzie narzędzi do kucia na gorąco odkuwek o różnych kształtach – odkuwki osiowosymetryczne. Są nimi: zużycie ścierne – opisane modelem Archarda, zużycie adhezyjne, utlenianie – zarówno materiału narzędziowego jak i odkuwki (wpływ tlenków żelaza – zgorzeliny), zmęczenie mechaniczne, zmęczenie cieplne i cieplnomechaniczne oraz odkształcenie plastyczne spowodowane odpuszczaniem / mięknięciem warstwy wierzchniej narzędzi kuźniczych[13].

Ze względu na charakter procesów kucia możemy wyróżnić kilka obszarów (Rys. 2) które są uprzywilejowane jeśli chodzi o dominację poszczególnych zjawisk wymienionych powyżej.



Rys. 2 Schemat przedstawiający miejsca, w których dominują poszczególne typy zużycia – przekrój przykładowej matrycy [13].

Jak wskazały studia literatury oraz badania własne [13], w przypadku narzędzi kuźniczych, **zużyciem ściernym** możemy nazwać proces w wyniku którego na powierzchni następuje oddzielenie materiału od podłoża. Dzieje się tak na skutek oddziaływania luźnych cząstek ściernych lub też usuwania nierówności materiału. W przypadku kucia na gorąco dominujący charakter zużycia ściernego to ten w którym występują obce cząstki „ścierniwa" w kontakcie kształtowanej odkuwki i twardego materiału narzędziowego. Poza produktami zużycia, cząstkami intensyfikującymi zużycie są twarde tlenki z materiału odkuwki [8] oraz materiału narzędziowego. Na Rys. 3 przedstawiono obszary narzędzi kuźniczych z typowym zużyciem ściernym.



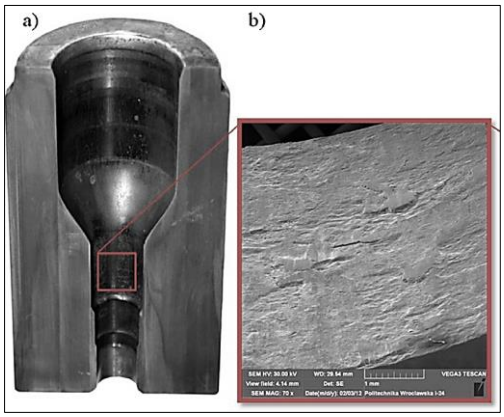
Rys. 3 Obszar matrycy z typowym obszarem zużycia ściernego po odkuciu 4300 szt. odkuwek[8].

W pracy [8] poza przedstawionym już wcześniej modelem Archarda przedstawiono również podejście Shawa w którym wielkość zużycia jest skorelowana z ilością rozproszonej energii jako wynik tarcia:

$$\frac{B}{P \times L} = \frac{\mu}{u} \tag{2}$$

Gdzie B – moduł zużycia, P – siła normalna, L – długość poślizgu, μ – współczynnik tarcia, u – energia jednostkowa zużycia. Powyższe równanie opisuje ilość energii potrzebnej do wytworzenia cząstki wynikającej ze zużycia pod danym naciskiem, na danej odległości poślizgu/tarcia i wielkości tarcia pomiędzy elementami ślizgowymi.

Opisano w pracy [13] również ogólną charakterystykę **zużycia adhezyjnego.** Z tym rodzajem zużycia mamy do czynienia przy małych prędkościach poślizgu lecz dużych naciskach. Zachodzi najczęściej w przypadku ubogiego smarowania lub jego braku. Proces rozpoczyna się od sczepiania nierówności powierzchni a następnie ich ścinania i odrywania od powierzchni współpracujących elementów. Zużycia adhezyjne w procesach kucia może mieć miejsce po upływie pewnego czasu, gdy temperatura narzędzi rośnie a materiał w warstwie wierzchniej ulega odpuszczeniu/mięknięciu - Rys. 4 .

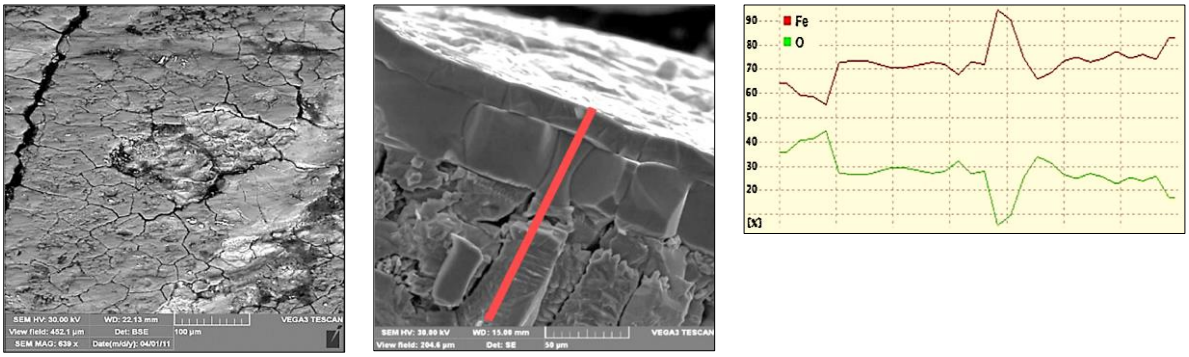


Rys. 4 Przykład zużycia adhezyjnego: a)wybrany obszar matrycy, b) obszar z mikrowyrwami [13]

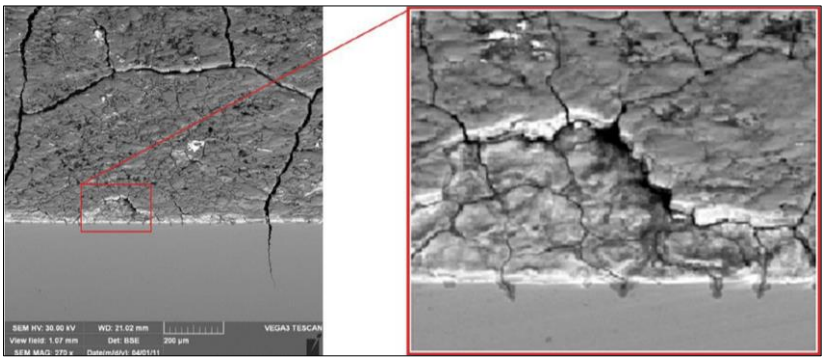
Przypadek przedstawiony na Rys. 4 spowodowany jest obniżoną temperaturą kucia stalowego przegubu homokinetycznego, która wynosi ok 900^{o}C. Wraz ze wzrostem liczby odkuwek wykonanych w danym narzędziu następuję odpuszczanie/mięknięcie warstwy wierzchniej i może dochodzić do tego typu zużycia.

Zużycie przez **utlenianie** polega na degradacji warstwy wierzchniej narzędzi poprzez tworzenie się i późniejszym oddzielaniu się powłok tlenkowych. Jak wskazały badania, w procesach kucia mamy do czynienia z dużą ilością zgorzeliny pochodzącej z materiału odkuwki [8] oraz utlenianiu się warstwy wierzchniej narzędzi – Rys. 5 oraz Rys. 6 [13].

a) b) c)



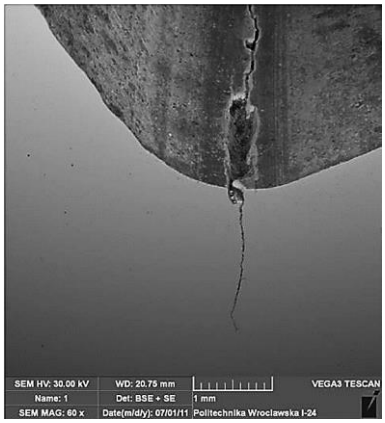
Rys. 5 Tlenki na a)powierzchni matrycy, b) tlenki z odkuwki, c) EDS z rysunku b) [13].



Rys. 6 Warstwa tlenków na powierzchni narzędzi kuźniczych z widocznymi pęknięciami – propagacja w głąb materiału[13].

W wysokich temperaturach warstwy tlenkowe mogą odkształcać się plastycznie [13] lecz po schłodzeniu do temperatury poniżej 200^{o}C stają się bardzo twarde (951 HV0.01 - 1347 HV0.01)[2]. W procesach kucia mamy do czynienia z tlenkami typu Fe_2O_3, Fe_3O_4. Wpływ twardych tlenków pochodzących z materiału odkuwki zostanie opisany w dalszej części pracy.

Zmęczenie mechaniczne występujące w charakterystycznych miejscach narzędzi kuźniczych pojawia się z powodu koncentracji naprężeń w warstwie wierzchniej spowodowanej przez cykliczne (najczęściej jednostronne) naprężenia generowane podczas kucia odkuwek. Pojawiające się pęknięcia zmęczeniowe rozwijają się / propagują w trakcie dalszej eksploatacji narzędzi [17,13]. Uprzywilejowanym miejscem powstawania tego typu uszkodzeń są wewnętrzne naroża narzędzi kuźniczych – Rys. 2 oraz Rys. 7 [13].



Rys. 7 Pęknięcie zmęczeniowe w narożu matrycy do kucia koła czołowego[13].

Dla procesów kucia zagadnienia związane ze zmęczeniem cieplnym oraz cieplno-mechanicznym są praktycznie nierozłączne. Transfer ciepła z gorącej odkuwki odbywa się podczas kontaktu / kształtowania i jest ściśle połączony z cyklicznym obciążeniem mechanicznym odbywającym się w tym samym czasie. Powstająca już we wczesnym etapie pracy narzędzia siatka pęknięć zmęczenia cieplnego rozwija się a proces ten intensyfikowany jest przez cykliczne obciążenia mechaniczne.

Jak przedstawiono w [13] większość teoretycznych rozważań i modeli **zmęczenia cieplnego** jest odwzorowaniem ciała na przemian grzanego i chłodzonego umieszczonego pomiędzy sztywnymi podporami. W przypadku idealnego cyklu cieplnego całe odkształcenie termiczne jest przekształcane na odkształcenia sprężyste lub/i plastyczne.

$$\varepsilon_p = \alpha\Delta T - \frac{(1-\vartheta)\Delta\sigma}{E} \tag{3}$$

Dla określenia liczby cykli do zniszczenia można wykorzystać odkształcenia plastyczne – zależność Coffina – Mansona:

$$N_f^n \varepsilon_p = C\varepsilon_f \tag{4}$$

Gdzie: N_f – liczba cykli do zniszczenia, ε_p – odkształcenie plastyczne, ε_f – współczynnik zdefiniowany jako odkształcenie potrzebne do zniszczenia w jednym cyklu, C oraz n – stałe materiałowe.

Po uwzględnieniu faktu, że nie całe odkształcenie termiczne przekształcane jest w odkształcenie mechaniczne, a część przekształcana jest w swobodną deformację powierzchni narzędzia otrzymujemy:

$$\varepsilon_T = \alpha\Delta T - (\in_e - \in_p) \tag{5}$$

$$\varepsilon_e = \frac{(1-\vartheta)\Delta\sigma}{E} \tag{6}$$

W związku z tym:

$$\varepsilon_p = \frac{\alpha\Delta T - (1-\vartheta)\Delta\sigma}{E - \varepsilon_T} \tag{7}$$

Gdzie: ε_p – odkształcenie plastyczne, $\alpha\Delta T$ – całkowite odkształcenie cieplne, $(1-\nu)\,\Delta\sigma/E$ – odkształcenie sprężyste, ε_T – swobodne odkształcenie powierzchni roboczej. Po podstawieniu do zależności Coffina – Mansona otrzymujemy:

$$N_f = \left(\frac{C\varepsilon_f}{\alpha\Delta T - (1-\vartheta)\Delta\sigma/(E-\varepsilon_T)}\right)^{1/n} \tag{8}$$

Należy przy tym pamiętać, że pod uwagę należy wziąć odkształcenie plastyczne wynikające z mechanicznego obciążenia matrycy.

Duże naciski pojawiające się podczas kucia wpływają na odkształcenie plastyczne w warstwie wierzchniej narzędzi i nasilają lub zmniejszają (zależnie od obszaru) efekt zmęczenia w każdym cyklu. Cykl zmęczenia cieplnego składa się z krzywej grzania oraz chłodzenia, naprzemiennie występujących po sobie. Podczas nagrzewania materiał w warstwie wierzchniej jest ściskany a proces ten jest intensyfikowany oddziaływaniami od obciążeń mechanicznych procesu kucia. Następnie znika obciążenie mechaniczne i następuję gwałtowny

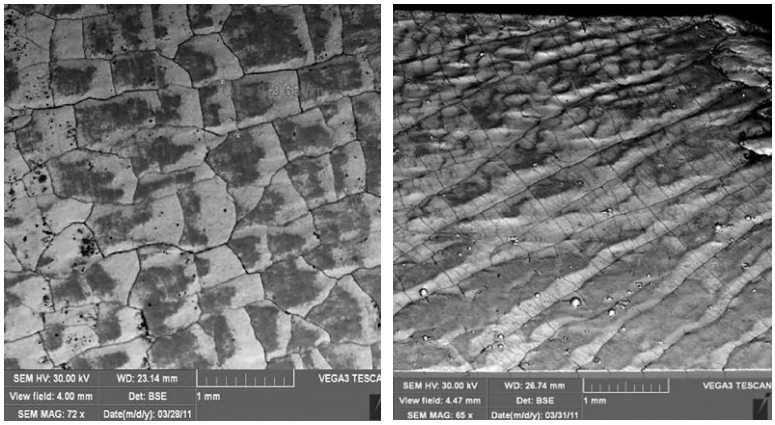
spadek temperatury - chłodzenie narzędzi. Materiał w warstwie wierzchniej jest rozciągany na skutek tych cyklicznych obciążeń termomechanicznych powstaje siatka pęknięć na powierzchni narzędzi.

Pewne wątpliwości może budzić sformułowanie „odkształcenie plastyczne narzędzi". Spowodowane jest ono wysoką temperaturą w kontakcie z gorącą odkuwką. Badania własne wskazują na temperaturę w przedziale 600°C - 800°C panującą w strefie kontaktu z gorącą odkuwka. Wraz ze wzrostem temperatury dla stali narzędziowych do pracy na gorąco zmienia się granica plastyczności [13] – tabela 1.

Tabela 1. Granica plastyczności dla wybranych gatunków stali narzędziowych do pracy na gorąco[13].

Grade of steel (steel symbol acc. to PS)	Yield point Re (MPa)		
	25 °C	450 °C	600 °C
1.2343	1570	1080	470
1.2344	1750	1040	540
1.2365	1570	1080	640

W pracy [13] opisano, że dla narzędzi do kucia stali w temperaturze ok 1150°C po odkuciu ok 500szt. odkuwek możemy na powierzchni roboczej zaobserwować drobną siatkę pęknięć zmęczeniowych. Po odkuciu ok 2000szt odkuwek pojawia się znacznie większa siatka pęknięć z wyraźnymi głębokimi pęknięciami. Równolegle materiał ulega procesowi odpuszczania/mięknięcia i zaczyna się odkształcać oraz intensyfikowane jest zużycie ścierne. Widoczne na Rys. 8 bruzdy tworzące się w kierunku zgodnym z kierunkiem płynięcia materiału podczas kucia.



Rys. 8 Powierzchnia robocza matrycy kuźniczej (po ok 500 szt. i 2 tys. odkuwek) z widoczną siatką pęknięć termomechanicznych [13].

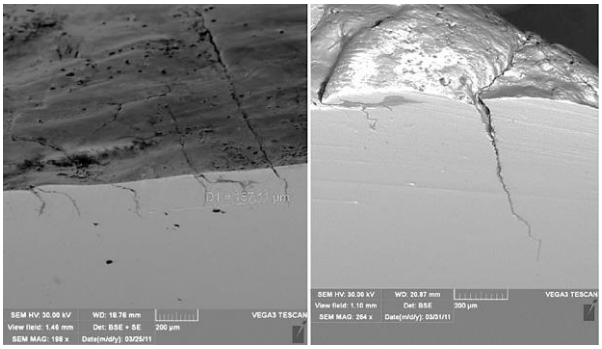
Stosunkowo długi czas kontaktu gorącej odkuwki z materiałem narzędziowym powoduje, po pewnym czasie spadek twardości w warstwie wierzchniej. Tym samym spadek odporności na ścieranie (zgodnie z modelem Archarda – zużycie jest odwrotnie proporcjonalne do twardości) oraz zwiększa się jego podatność na pęknięcia i odkształcenia plastyczne w warstwie wierzchniej. Szybkość zmian występowania poszczególnych mechanizmów zmienia się wraz ze zmianą parametrów procesu i zależy od miejsca w narzędziu (jak wspomniano wcześniej - Rys. 2 i opis). Współistnienie mechanizmów zmęczenia termomechanicznego i użycia ściernego możemy zaobserwować choćby na Rys. 8 oraz Rys. 11 .

Stosunkowo wysoka średnia temperatura w całej objętości narzędzi kuźniczych (150°C - 400°C) oraz cyklicznie zmienne wysokie temperatury w warstwie wierzchniej, spowodowane kontaktem z gorącą odkuwką,

powodują obniżenie granicy plastyczności materiału w tej strefie. W połączeniu z oddziaływaniami mechanicznymi doprowadza to do odkształceń plastycznych w obszarach szczególnie wrażliwych.

Tabela 1 przedstawia zmianę granicy plastyczności typowych stali narzędziowych do pracy na gorąco w trzech temperaturach. Jak wskazują badania własne oraz studia literatury, temperatura w warstwie wierzchniej w kontakcie z odkuwką, podczas procesu kształtowania materiału może sięgać nawet 800^{o}C a naprężenie generowane przy obciążeniu kuciem może sięgać nawet 1000MPa. Wskazuje to na duże prawdopodobieństwo występowania odkształceń plastycznych w uprzywilejowanych obszarach narzędzi kuźniczych. Odpuszczanie / mięknięcie warstwy wierzchniej potęguje ten proces [9,13].

Podatność strefy przypowierzchniowej narzędzi do kucia na **odkształcenia plastyczne** (Rys. 9) rośnie wraz z czasem pracy narzędzi (liczna odkuwek). Wszelkie dane o tym, jak zmienia się twardość narzędzi kuźniczych ze stali do pracy no gorąco, w kontakcie z gorącą odkuwką są niezwykle przydatne do przewidywania możliwego występowania odkształceń plastycznych[9, 13].



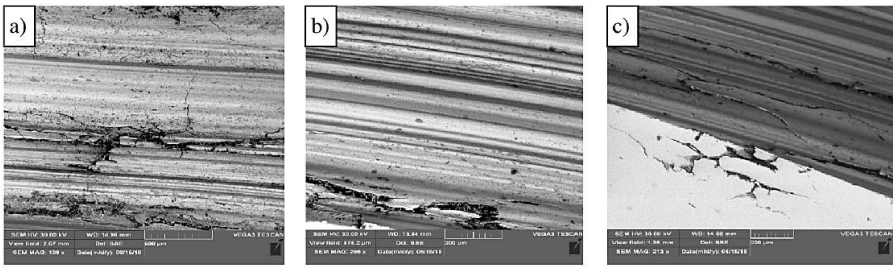
Rys. 9 Odkształcenie plastyczne warstwy wierzchniej narzędzi po odkuciu 1850szt. odkuwek[13].

Sam mechanizm odpuszczania/mięknięcia warstwy wierzchniej zależy od wielu czynników, od dyfuzji węgla i pierwiastków stopowych i jest funkcją czasu oraz temperatury. Uogólniony wpływ czasu i temperatury na twardość stali wyraża parametr M , Hollomana – Jaffe:

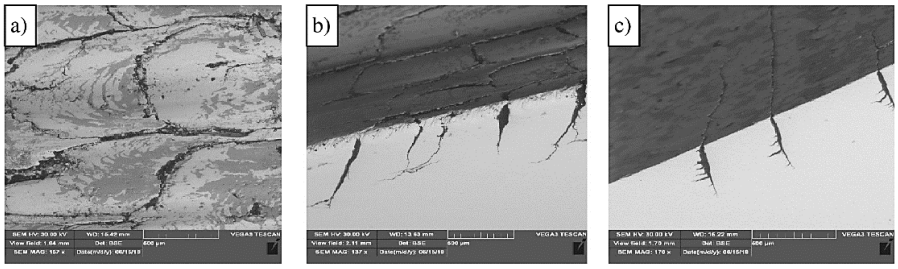
$$M = T(C + \log t) \tag{9}$$

Gdzie: T – temperatura odpuszczania K, t – czas odpuszczania, C – stała zależna od zawartości węgla.

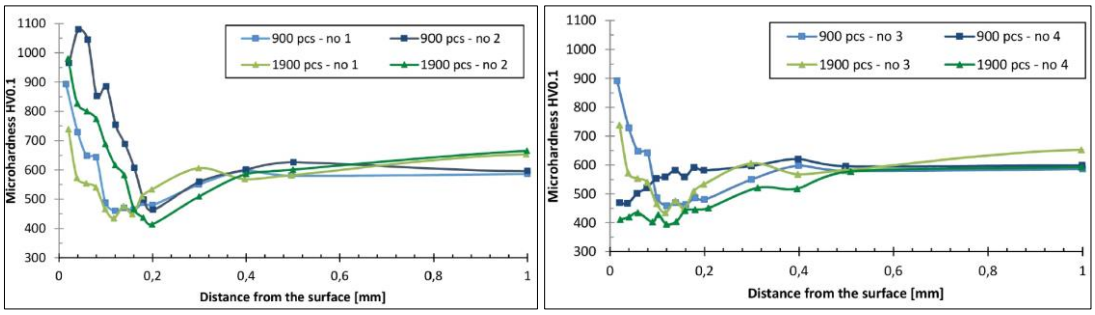
W literaturze oraz materiałach producentów stali narzędziowych określana jest odporność na odpuszczanie/mięknięcie. Wyniki są najczęściej przedstawiane jako krzywe (twardość w funkcji czas dla danej temperatury odpuszczania) i wyznaczane w warunkach laboratoryjnych [9,13]. W artykule [13] zaprezentowano wyniki zmian twardości narzędzi kuźniczych ze stali Unimax w warunkach przemysłowych. Temperatura pod powierzchnią mierzona była zamontowaną termoparą a wyniki pomiarów pozwoliły na wyznaczenie MES warunków termicznych panujących w kontakcie z gorącą odkuwką (temp. Odkuwki 940^{o}C). Wyniki modelowania wskazały na temperaturę na powierzchni 650^{o}C, a 2,5mm pod powierzchnią na temperaturę 450^{o}C. W pracy [9] oraz [16] zaprezentowano wyniki badań przeprowadzonych również w warunkach rzeczywistych oraz wyniki badań laboratoryjnych prowadzonych przez autora. Przedstawiono je w części dotyczącej temperatury procesów kuźniczych (Rys. 16 do Rys. 21). Jak wskazują otrzymane wyniki, analiza zmian twardości w funkcji temperatury i czasu kucia, temperatura ma znacznie większy wpływ niż czas na zmianę twardości [13] i jest to zgodne z modelem teoretycznym. Wyniki otrzymane również w pracy [6] również potwierdzają współistnienie i wzajemne oddziaływanie mechanizmów zużycia (Rys. 11). W pracy przedstawiono analizę zużycia narzędzi do kucia stali wysokoniklowych. Poza występowaniem typowych mechanizmów opisanych w [6] wykonano, jak i w innych przypadkach analizę zmian twardości w funkcji ilości odkutych odkuwek – Rys. 12 [6].



Rys. 10 Pęknięcia zmęczeniowe oraz bruzdy zużycia ściernego[6].



Rys. 11 Odkształcenia plastyczne oraz siatka pęknięć zmęczenia cieplnego [6].



Rys. 12 Zmiany mikrotwardości w funkcji odległości od powierzchni dla narzędzi po odkuciu 900 oraz 1900 sztuk odkuwek [6].

Również dla tych narzędzi zaobserwowano spadek twardości wraz ze wzrostem liczby odkutych odkuwek – dla wybranych obszarów narzędzi. W pracy [6] opisano również przypadek naklejania się / adhezji materiału odkuwki na narzędzia.

Występujące charakterystyczne mechanizmy zużycia przedstawiono miedzy innymi [1 ,3-7 ,9-12, 14] Opisywane zjawiska i mechanizmy dotyczą przemysłowych procesów kucia na gorąco. W ramach prowadzonych prac, projektów i badań własnych wykonywałem również analizy uszkodzeń narzędzi kuźniczych przedstawione w literaturze uzupełniającej.

Prowadzone prace oraz studia literatury w zakresie mechanizmów zużycia oraz trwałości narzędzi kuźniczych pozwalają sformułować poniższe wnioski [13]. Wpływ poszczególnych, przedstawionych zjawisk rozpatrywany jest osobno i nie ma całościowego opisu ani modelu, który obejmowałby wszystkie zjawiska jednocześnie. W warunkach rzeczywistych wszystkie zjawiska niszczące zachodzą jednocześnie, a ponadto oddziaływują między sobą. Obecność tlenków intensyfikuje procesy zużycia. Nie tylko jako materiał ścierny ale również jako element wypełniający mikropęknięcia – w wysokich temperaturach tlenki żelaza są stosunkowo miękkie i mogą w pewien sposób oddziaływać jako medium rozklinowujące (zjawisko podobne do efektu Rebindera). Intensyfikuje to rozwój pęknięć zmęczeniowych. Zarówno pochodzących od zmęczenia cieplnego i mechanicznego. Spadek twardości spowodowany kontaktem z materiałem gorącej odkuwki obniża odporność na ścieranie oraz powoduje wzrost podatności na odkształcenia plastyczne i obniżenie wytrzymałości warstwy wierzchniej. Ponadto szybkość występowania różnych mechanizmów niszczących jest funkcją parametrów

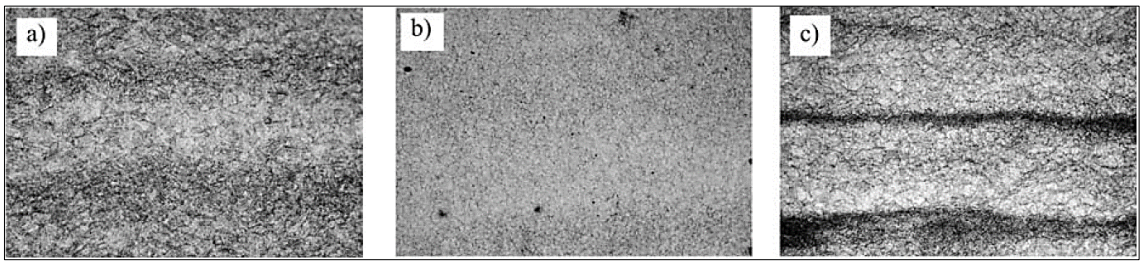
procesu i zależna jest od miejsca na narzędziu. Czas kontaktu z gorącą odkuwką oraz temperatura w różnych miejscach narzędzia są różne. Jak przedstawiono na rysunkach powyżej, różne mechanizmy występują jednocześnie w różnych obszarach narzędzi – np. Rys. 9 przedstawia pęknięcia pochodzące od zmęczenia cieplnego, warstwę tlenów, odkształcenia plastyczne oraz zużycie ścierne. Dowodzi to współzależności mechanizmów niszczących. Większość opisanych badań wskazuje na zużycie ścierne jako główny mechanizm zużycia. Jednak badania jak i wieloletnie doświadczenie pozwalają stwierdzić, że wzajemne oddziaływanie pomiędzy wszystkimi zjawiskami jak, zużycie ścierne, zmęczenie cieplnomechaniczne, pękanie zmęczeniowe, odkształcenia plastyczne, utlenianie i zużycie adhezyjne utrudniają określenie dominującego mechanizmu niszczącego. Dodatkowo utrudnia to kształt narzędzi. Różnym obszarom można przypisać występowanie różnych zjawisk w warstwie wierzchniej podczas pracy narzędzia. Istnieje, poza kształtem matrycy wiele parametrów takich jak twardość, czas kontaktu, droga tarcia, rodzaj materiału, temperatura odkuwki, rodzaj smarowania oraz chłodzenia oraz wiele innych, które intensyfikują lub też spowalniają mechanizmy degradacji narzędzi kuźniczych. Jak opisano w [13] jednym z najważniejszych jest chłodzenie oraz smarowanie i temperatura. Dla opisanego przykładu kucia stali w temperaturze 1100^{o}C z dodatkowym chłodzeniem w wybranych obszarach narzędzi dominującym zjawiskiem jest zmęczenie cieplne. Już przy niewielkiej liczbie odkutych odkuwek tworzy się siatka pęknięć zmęczenia cieplnego, która później rozwija się. Interakcje pomiędzy gorącą odkuwką i materiałem narzędziowym powodują powstanie w późniejszym etapie pracy narzędzia powstanie wtórnej siatki pęknięć zmęczeniowych zmęczenia cieplnego na całej powierzchni kontaktu z gorącą odkuwką. Ponadto odpadająca z materiału odkuwki zgorzelina stygnie dość szybko i jako twardy materiał ścierny potęguje zużycie – już w początkowym etapie tworzą się bruzdy w kierunku płynięcia materiału. Kolejnym opisanym czynnikiem mającym niezwykle istotny wpływ na intensywność mechanizmów niszczących jest spadek twardości w warstwie wierzchniej na skutek kontaktu z gorącym materiałem w procesie kucia. W przypadku kucia odkuwki stalowej w temperaturze powyżej 1150^{o}C bez dodatkowego chłodzenia (ma to miejsce najczęściej w przypadku pierwszej operacji, spęczania, spłaszczania itd.) szoki termiczne są mniejsze ale osłabienie materiału spowodowane wysoką temperaturą znaczne, obniżenie granicy plastyczność warstwy wierzchniej [9,13], a w konsekwencji poprzez oddziaływanie mechaniczne prowadzi do odkształcenia plastycznego oraz zwiększonego zużycia ściernego. Zwiększenie zużycia ściernego następuje na skutek spadku twardości. Z kolei obniżenie temperatury powierzchni narzędzi poprzez zastosowanie chłodzenia/smarowania pozwala zmniejszyć wielkość odkształcenia plastycznego w warstwie wierzchniej, lecz mamy wtedy do czynienia ze zwiększeniem amplitudy cyklu temperaturowego zmęczenia cieplnego i wzrostem zużycia w procesach tarcia ze względu na osłabiony materiał w warstwie wierzchniej. Podsumowaniem [13] oraz w świetle prowadzonych badań i otrzymanych wyników wysoce wątpliwym wydaje się stwierdzenie, że dominującym mechanizmem niszczącym jest zużycie ścierne.

Wpływ wybranych czynników oraz zjawisk na zmiany w warstwie wierzchniej narzędzi kuźniczych.

Selektywne określenie wpływu poszczególnych czynników oraz zjawisk mogących mieć wpływ na procesy zużycia narzędzi do kucia na gorąco jest praktycznie niemożliwe. Ilość czynników i zmiennych powoduje, że omówione główne mechanizmy zużycia stają się funkcją wielu zmiennych, a dodatkowo oddziaływują miedzy sobą. Biorąc pod uwagę choćby materiał narzędziowy, jego gatunek, rodzaj obróbki cieplnej (twardość, mikrostruktura), metoda obróbki skrawaniem, jakość powierzchni i wiele innych to tylko część czynników mających wpływ na proces zużycia narzędzi.

Badania stanu materiału / stali narzędziowej do pracy na gorąco powinny być standardem dla odbioru narzędzi w warunkach przemysłowych. Nie zawsze istnieje taka możliwość z powodu skomplikowanego kształtu, gabarytów, itd. Stąd też powiązanie badań materiałowych z trwałością narzędzi najczęściej odbywa się po wyeksploatowaniu danego narzędzia lub zestawu (czasem badania mają miejsce wcześniej w przypadku uszkodzeń katastroficznych – np. pęknięcie globalne na wskroś, pęknięcia hartownicze itp.)

Przeprowadzono badania wpływu mikrostruktury stali X38CrMoV5-3 z różnych wytopów i od różnych producentów [15]. Wykonane narzędzia/matryce były stosowane w procesie kucia przegubu homokinetycznego. Dla jednego z wytopów stwierdzono dużą pasmowość wydzieleń węglikowych (możliwy zbyt niski stopień przerobu - P3) Rys. 13 – wskazane obszary występowania wydzieleni węglikowych. Skład analizowanego materiału podano w tabeli 2.



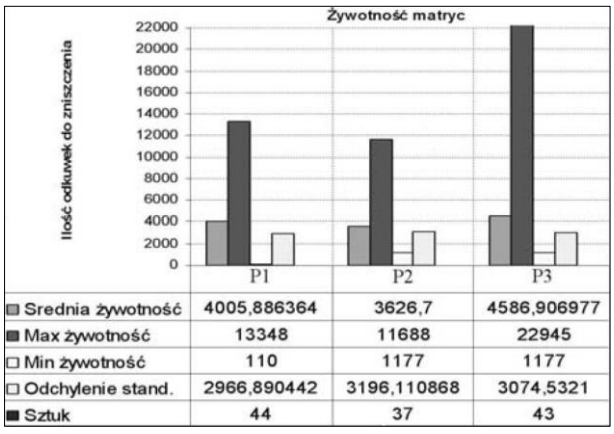
Rys. 13 Mikrostruktura materiału X38CrMoV5-3 dla matryc stosowanych w 4 operacji kucia: a) P1, b) P2, c) P3. Przekroje wzdłużne. Pow. 200x. Trawiono Nitalem. [15]

Tabela 2 Skład chemiczny stali X38CrMoV5-3 – 1.2367 [15]

Zawartość pierwiasków [%]							
C	*Si*	*Mn*	*P*	*S*	*Cr*	*Mo*	*V*
0,35-0,4	*0,3-0,5*	*0,3-0,5*	*<0,03*	*<0,02*	*4,8-5,2*	*2,7-3,2*	*0,4-0,6*

Przeprowadzono analizę trwałości dla trzech różnych wariantów materiałowych. Należy pamiętać jednak, że nawet przygotowanie oraz procesy obróbki cieplnej mają istotny wpływ na mikrostrukturę (rozdrobnienie i rozmieszczenie wydzieleni węglikowych). Potwierdziły to przeprowadzone badania. Równie istotnym czynnikiem mającym wpływ na stopień dyspersji węglików w stali ma czas wygrzewania oraz stopień zgniotu półfabrykatu.

Przeprowadzone badania oraz analiza strukturalna badanych materiałów pozwalają stwierdzić, że moją one istotny wpływ na trwałość narzędzi kuźniczych – Rys. 14.

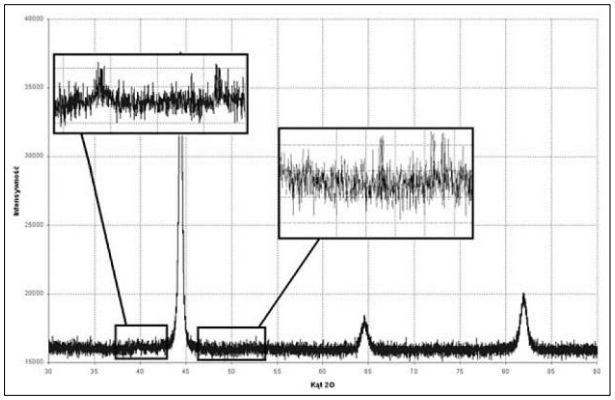


	P1	P2	P3
Srednia żywotność	4005,886364	3626,7	4586,906977
Max żywotność	13348	11688	22945
Min żywotność	110	1177	1177
Odchylenie stand.	2966,890442	3196,110868	3074,5321
Sztuk	44	37	43

Rys. 14 Trwałość matryc stosowanych w procesie kucia obudowy przegubu dla 4 operacji kucia na ciepło dla trzech producentów P1, P2, P3 [15].

Przeprowadzona analiza wskazała, że omawiana struktura była w całej objętości materiału – różny stopień dyspersji dla omawianych narzędzi P1, P2, P3. Próbki do badań pobierane były z różnych części matryc i ich struktura była niemal identyczna w każdym przypadku dla materiału pochodzącego od jednego producenta. Jak

wskazują wyniki badań [16] na dyfraktometrze rentgenowskim (Rys. 15) w obszarach 2θ występowania wydzieleń węglikowych od omawianych pierwiastków wchodzących w skład materiału, wykryto piki pochodzące najprawdopodobniej od tych wydzieleń (węgliki molibdenu i wanadu). W celu potwierdzenia przypuszczeń konieczna jest wnikliwa analiza oraz szczegółowe badania dyfraktometryczne w wąskich zakresach kąta 2θ z bardzo małym posuwem kątowym.



Rys. 15 Dyfraktogram analizowanego materiału X38CrMoV5-3 z wyróżnieniem obszarów występowania wydzieleni węglikowych [15].

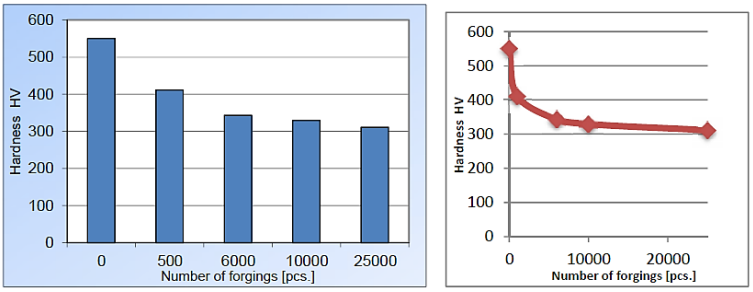
Obecność wanadu w strukturze stali wskazuje na dużą skłonność do tworzenia węglika VC, który rozpuszcza się znacznie trudniej niż Fe_3C. Nierozpuszczony całkowicie w temp. austenityzacji węglik wanadu nie przejmuje węgla z austenitu koniecznego do zahartowania materiału. Podczas odpuszczania początkowy spadek twardości wywołany pojawieniem się Fe_3C, zostaje zrównoważony przez wzrost twardości wywołany drobnymi wydzieleniami węglika V_4C_3 (efekt utwardzania dyspersyjnego). Dopiero powyżej temperatury 600^oC twardość znacznie maleje z powodu koagulacji wydzielonych węglików. Obecność chromu powoduje obniżenie rozpuszczalności węgla w austenicie, co z kolei powoduje wzrost ilości węglików w stali. Analizowany materiał nie wskazywał jednak oznak przegrzania w rdzeniu (jedynie przy powierzchni 470HV) a jego twardość wynosiła 550HV [15]. Analiza próbki z najbardziej widocznymi podczas badań pasmami wydzieleni węglikowych potwierdziły, że materiał P3 miał największe zróżnicowanie w twardości poszczególnych składników mikrostruktury (pasmowe wydzielenia miały o ok 50HV wyższą twardość). Jak wskazały badania w warunkach eksploatacyjnych struktura taka (bogata w wydzielenia pasmowe węglików) doskonale sprawdza się na narzędzia kuźnicze dla procesu kucia przegubów homokinetycznych i charakteryzowała się najwyższą odpornością na zużycie wśród analizowanej grupy materiałów.

Warto też w tym miejscu wspomnieć, że procesy obróbki cieplnej narzędzi (hartowanie + dwukrotne odpuszczanie) mają istotny wpływ na trwałość narzędzi. Jest to typowa obróbka stosowana w przypadku matryc do kucia wykonanych ze stali narzędziowych do pracy na gorąco. Typowe gatunki materiałów to 1.2343, 1.2344, 1.2367, 1.2999 oraz inne. Obróbka cieplna matryc ze stali narzędziowych do pracy na gorąco polega na wielostopniowym nagrzaniu do temperatury powyżej A_3 czyli 850 – 1150^oC (w zależności od gatunku). Temperatura nie może być zbyt wysoko ponieważ może spowodować to rozrost ziarna austenitu a w konsekwencji, skłonność do pękania i przedwczesnego uszkodzenia. Sam proces hartowania matryc odbywa się najczęściej w oleju, a dla większych elementów możemy stosować mgłę wodną, sprężone powietrze lub inny gaz. Następnie stosowane jest dwukrotne odpuszczanie w zakresie temperatur 500 – 600^oC. W zakresie tym pojawia się zjawisko tzw. twardości wtórnej i wydzielają się węgliki stopowe typu M_7C_3, M_4C_3, M_2C. Przykładowy skład chemiczny stali 1.2367 przedstawiono wyżej w tabeli 1. Dodatek wanadu podwyższa efekt twardości wtórnej.

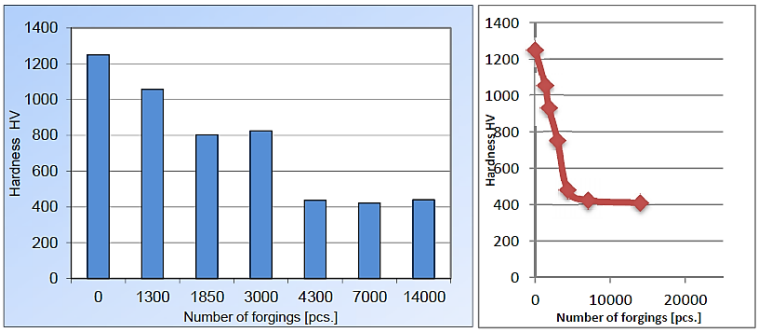
W zależności od charakteru procesu i rodzaju wytwarzanego elementu/odkuwki dobiera się twardość narzędzi do kucia na gorąco. Najczęściej twardość po obróbce cieplej mieści się w zakresie 46 – 55 HRc (460 – 600 HV). W oczywisty sposób twardość wpływa na zużycie/trwałość narzędzi. W modelu Archarda jest ona odwrotnie proporcjonalna do wielkości zużycia(1). Gdzie: w – wielkość zużycia [mm], V – prędkość materiału w kontakcie [mm/s], H – twardość materiału [MPa], σ – naprężenie normalne [MPa][10].

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

W pracy [9] odniosłem się do podobnej zależności opracowanej przez J.H. Kang, I.W. Park, i innych. Wprowadzili Oni zmienną twardość. W ich opracowaniu przyjęli twardość jako funkcję zmienną w czasie i temperaturze. Jednak przyjęte czasy mięknięcia (softening) stali narzędziowej wynoszące 20, 40 oraz 60h są zdecydowanie zbyt długie dla procesów kucia na gorąco. W przypadku procesu kucia [9] – spęczanie odkuwki koła czołowego ekwiwalent czasowy wynosił ok 2 – 3 h. Jest to sumaryczny czas pracy narzędzia, rozumiany jako sumaryczny czas kontaktu narzędzia i odkuwki. Czas pracy danego zestawu narzędzi dla pierwszej operacji wynosił około 10 zmian roboczych (10 x 8h – ok 20tys odkuwek.). Nie można jednak czasu przestojów i przerw brać pod uwagę. Stąd w prowadzonych badaniach przyjęto ekwiwalent czasowy. I dla danego ekwiwalentu przeprowadzono badania wpływu temperatury odpuszczania / mięknięcia na zmiany twardości w funkcji czasu oraz temperatury [9]. W tej samej pracy przedstawiono zależność spodku twardości narzędzi do spęczania oraz narzędzi drugiej operacji (kucie wstępnie matrycujące) w funkcji ilości odkuwek. Wyniki przestawiono poniżej Rys. 16 oraz Rys. 17 [9].

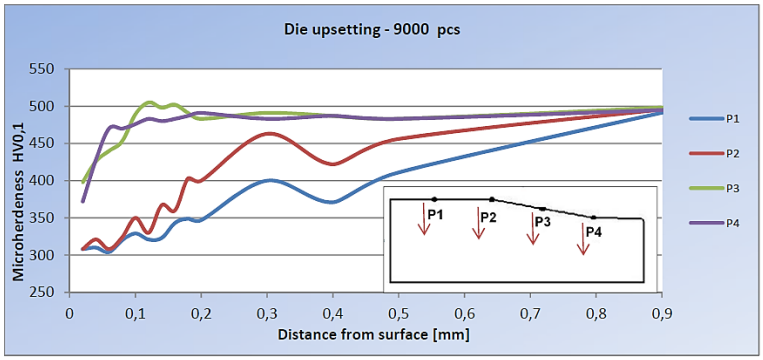


Rys. 16 Zmiana twardości w funkcji ilości odkuwek dla narzędzi do spęczania[9].

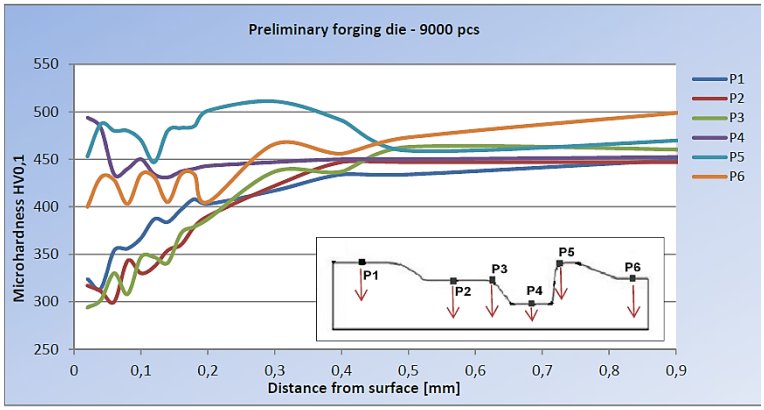


Rys. 17 Zmiana twardości w funkcji ilości odkuwek dla narzędzi do kucia wstępnego[9].

Charakterystyki wyznaczone w badaniach [9] dotyczą zmian twardości przyjmowanej na powierzchni materiału. Nie wykonywano ich jednak na powierzchni lecz na przekroju poprzecznym w odległości 0,02 mm od powierzchni. W modelu Archarda twardość jest przyjmowana taka jaka jest w kontakcie z kształtowanym materiałem. Niestety nie jest ona stała na całej głębokości lecz zmienna. Na Rys. 18 oraz Rys. 19 przedstawiono przykładowe rozkłady twardości w wybranych miejscach matryc do kucia koła czołowego – operacji spęczania i kucia wstępnego. Przestawione wykresy wyznaczono po odkuciu przez narzędzia 9tys. odkuwek.

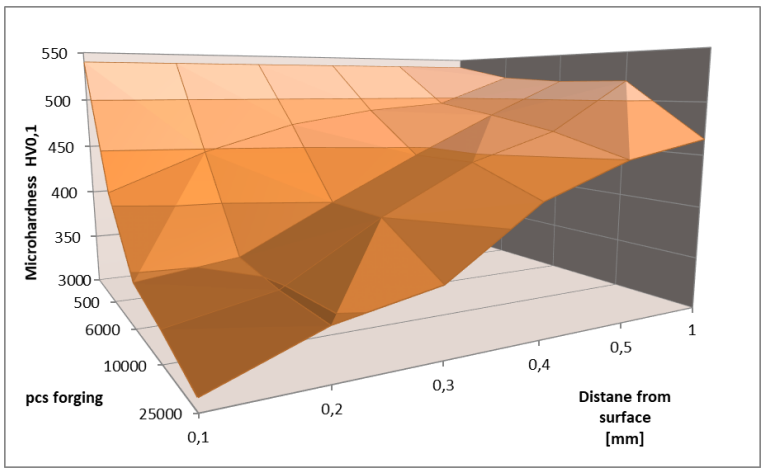


Rys. 18 Rozkład mikrotwardości w wybranych miejscach pomiarowych w funkcji odległości od powierzchni po odkuciu 9tys. odkuwek[9].



Rys. 19 Rozkład mikrotwardości w wybranych miejscach pomiarowych w funkcji odległości od powierzchni po odkuciu 9tys. odkuwek[9].

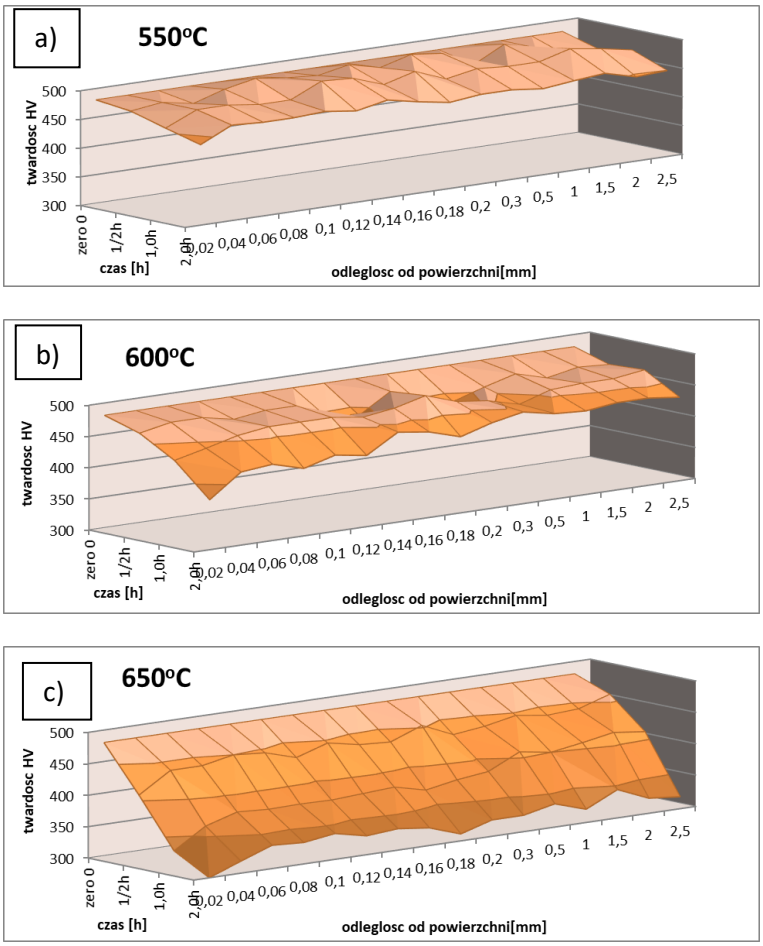
W pracy [16] zaprezentowano wyniki dotyczące badań zmian twardości w funkcji ilości odkuwek oraz odległości od powierzchni. Przyjętą płaszczyznę można zaimplementować jako funkcję dwóch zmiennych do modelowania procesów zużycia metodą elementów skończonych Rys. 20.



Rys. 20 Zmiana twardości narzędzi spęczających ze stali 1.2344 w funkcji ilości odkuwek oraz odległości od powierzchni [16]

W pracy tej [16] zaprezentowano również wyniki (Rys. 21) dotyczące wpływu temperatury oraz czasu odpuszczania/mięknięcia stali 1.2344 w funkcji temperatury czasu oraz odległości od powierzchni. Przyjęte

ekwiwalenty czasu oraz temperatury wynosiły odpowiednio 1/2h, 1,0h , 2,0h oraz 550°C, 600°C oraz 650°C. Wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych przedstawiono poniżej.



Rys. 21 a,b,c -Wpływ temperatury i czasu wygrzewania na rozkład twardości w funkcji odległości od powierzchni[16].

Przeprowadzone badania pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków. Wraz ze wzrostem temperatury na powierzchni stali narzędziowej / narzędzi kuźniczych twardość w warstwie wierzchniej maleje. Dla prezentowanych wyników dla matryc twardość maleje z 540 HV0,1 do ok 300 HV0,1. Obserwacje z badań w warunkach laboratoryjnych pozwalają stwierdzić że wytrzymanie próbki w piecu w temperaturze 650°C przez czas ok 2,0h powoduje obniżenie twardości w zbliżonym zakresie, czyli od 500 HV0,1 do ok 300 HV0,1. Jednak jak możemy zaobserwować na Rys. 21c ma to miejsce na całym przekroju próbki. Badania mikroskopowe pozwoliły stwierdzić rozpoczęcie procesu odwęglania oraz utleniania w tej temperaturze. Badania wykonane w temperaturze 600°C wykazały spadek twardości do ok 350HV0,1 ale tylko w warstwie wierzchniej – na głębokości ok 0,05mm[16].

Przeprowadzone badania wpływu czasu pracy narzędzi można wykorzystać w modelowaniu automatami komórkowymi [17]. W pracy zaprezentowano możliwość przewidywania uszkodzeń narzędzi kuźniczych na skutek odziaływań zmęczenia cieplnego oraz zużycia ściernego. Otrzymane wyniki z pracy [17] zostaną omówione w dalszej części.

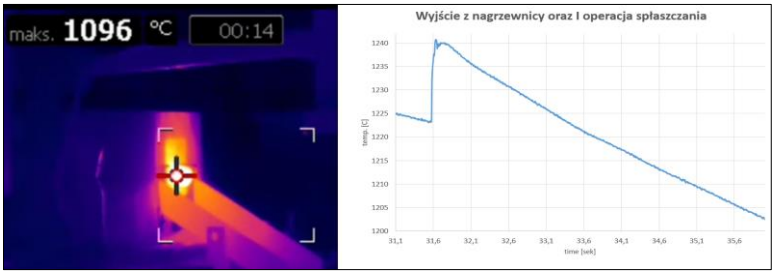
Warto w tym miejscu poświęcić nieco uwagi temperaturze procesu [18]. Zarówno od strony odkuwki jak i od strony materiału narzędziowego. Temperatura odkuwki jest wielkością fizyczną determinującą powstawanie wymienionych wcześniej mechanizmów zużycia narzędzi kuźniczych. Temperatury odkuwki ma bezpośredni

wpływ na średnią temperaturę narzędzi/matryc, na temperaturę przy i na powierzchni narzędzi, procesy zmęczenia cieplnego, odpuszczania/mięknięcia warstwy wierzchniej itp.

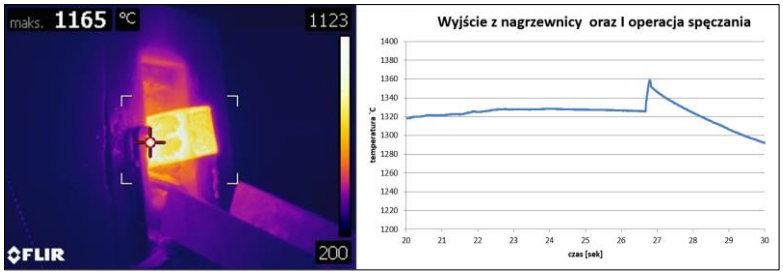
W zależności od materiału odkuwki **zakres temperatur procesu kucia** może być różny. Dla przykładu: wybrane stopy aluminium 480 – 560^{o}C, wybrane stopy miedzi 700-800^{o}C, wybrane gatunki stali 950 - 1150^{o}C.

Zagadnienia związane z metodyką pomiarową zostaną pominięte. Dotyczy to najczęściej stosowanych rozwiązań przemysłowych – pirometry, kamery IRD. Wieloletnie doświadczenie wskazuje jednak, że pomiary pirometrami obarczone są stosunkowo dużym błędem, zwłaszcza w temperaturach 1100 – 1300^{o}C, jeśli środowisko jest niesprzyjające, panuje zadymienie, zapylenie, zakłócenia wysokiej częstotliwości od nagrzewnic indukcyjnych itp.

Temperatura, jej amplituda oraz gradient w warstwie wierzchniej ma istotny wpływ na przebieg procesów zużycia narzędzi kuźniczych. Przeprowadzono w jednej z kuźni badania [18] mające na celu porównanie wyników pomiarów temperatury kamerą IRD oraz termoparą umieszczoną w materiale odkuwki po procesie nagrzewania indukcyjnego. Jak możemy zaobserwować na Rys. 22 oraz Rys. 23, pomiar temperatury wykonany kamerą IRD wskazuje na znacznie niższą temperaturę odkuwki niż jest w rzeczywistości. Warunki pracy i ustawienia zarówno pirometru w kuźni jak i kamery były właściwe. Lecz z powodów ciężkich warunków pracy nie wskazywała one właściwej temperatury która wynosiła ponad 1200^{o}C, dla innego elementu różnica była jeszcze większa - 1165^{o}C (wskazania pirometru oraz kamery), a pomiar termoparą wskazywał 1325^{o}C.



Rys. 22 Temperatura na wyjściu z nagrzewnicy oraz temperatury odkuwki podczas spęczania (wykres po prawej)[18].



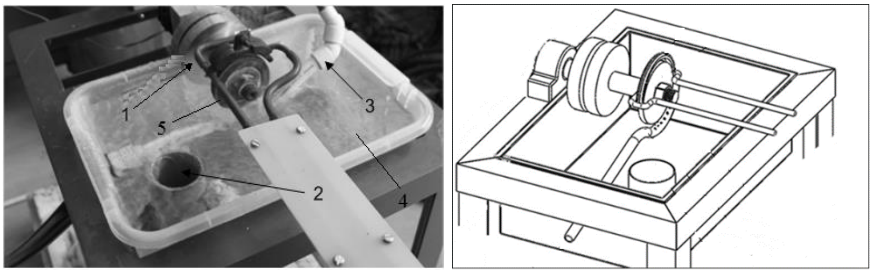
Rys. 23 Temperatura na wyjściu z nagrzewnicy oraz temperatury odkuwki podczas spęczania (wykres po prawej)[18].

Jak już wspomniano wcześniej temperatura odkuwki ma istotny wpływ na odpuszczanie/mięknięcie warstwy wierzchniej narzędzi do kucia na gorąco [9,16]. Wzrost temperatury odkuwki a tym samym procesu kucia ma również istotny wpływ na procesy zmęczenia cieplnego.

Zmęczenie cieplne jest procesem niszczenia materiału na skutek oddziaływania cyklicznie zmiennych pól temperatury. Jak wskazał w swojej monografii prof. A Weroński, im większy gradient temperatury tym odporność na zmęczenie cieplne jest mniejsza. W publikacji [7,19] przedstawiono wnioski dotyczące badań mechanizmów niszczących w warstwie wierzchniej narzędzi do kucia na gorąco. Przeprowadzona analiza dotyczyła badań zmęczenia cieplnego metodą wirującego krążka (Rys. 24) oraz badania zużycia ściernego przy dużych naprężeniach Triboforge. Badania realizowane były na specjalnie przygotowanych/zbudowanych stanowiskach

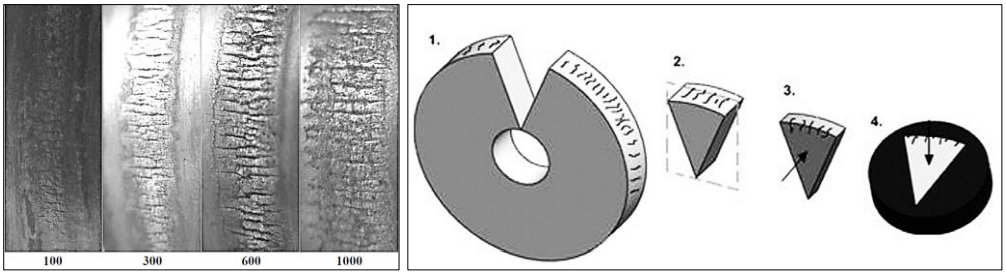
badawczych. Metoda wirującego książka wykorzystana w badaniach A. Werońskiego poddana została wielu modyfikacjom. Ze względu na możliwość realizowania badań dla różnych krzywych grzania oraz chłodzenia, zastosowano zmienną prędkość obrotową krążka oraz chłodzenie swobodne i wymuszone powietrzem oraz wodą lub kombinację wody i powietrza – mgłę wodną.

Na rysunku przedstawiono ogólny oraz schematyczny widok stanowiska badawczego. Główne elementy stanowiska to: 1 – wzbudnik indukcyjny z generatorem i programowalnej mocy, 2 –przelew wody, 3 – natrysk wody, 4 – wanna, 5 – badana próbka.



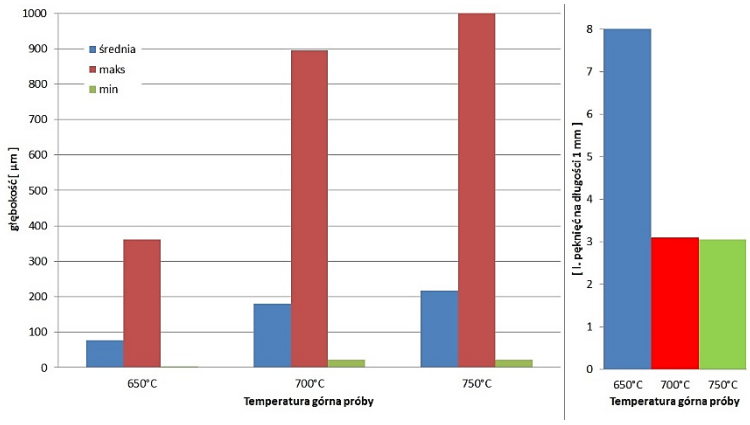
Rys. 24 Ogólny wygląd stanowiska do badań zmęczenia cieplnego metodą wirującego krążka[19].

Przykładowy wygląd próbek po badaniu oraz metodykę pobierania materiału do badań przedstawiono na Rys. 25. Na wybranym odcinku pomiarowym analizowano liczbę oraz głębokość pęknięć zmęczenia cieplnego.



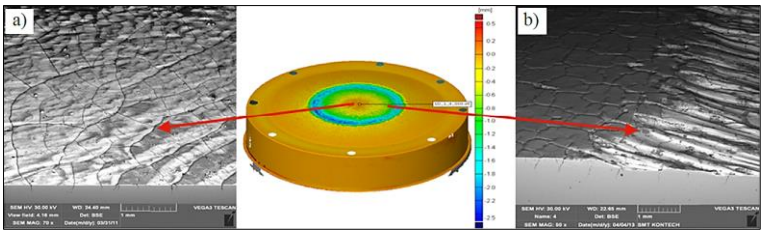
Rys. 25 Rozwój pęknięć na skutek zmęczenia cieplnego na powierzchni analizowanych próbek oraz metodyka pobierania próbek z badań zmęczenia cieplnego[19].

Analizowane przykładowe wyniki dla stali 1.2344 przedstawiono na Rys. 26. W prezentowanym przykładzie górna temperatura cyklu wynosiła odpowiednio 650°C, 700°C oraz 750°C. Na zgładach metalograficznych oznaczona została głębokość pęknięć oraz ich ilość w przeliczeniu na 1mm długości – Rys. 26.



Rys. 26 Wykresy obrazujące wartości wskaźników zmęczenia dla poszczególnych wariantów prób po 1000 cyklach[19].

Z przeprowadzonych badań możemy wywnioskować że, dla 1000 cykli badawczych maksymalna wartość głębokości pęknięć wynosiła 1.0 mm dla Tg-750^{o}C. Dla temperatury 650^{o}C wartość ta jest ok 3x niższa. Jednak dla tych temperatur liczna powstałych pęknięć jest zbliżona wynosi ok 3 p/mm. Pokazuje to jak istotnym jest Tg – temperatura góra cyklu a nie tylko w odniesieniu do naprężeń pochodzących od gradientu temperatury. W zakresie temperatur przekraczających temperaturę odpuszczania dla stali narzędziowych do pracy na gorąco ok.550^{o}C zaobserwowano spadek twardości materiału – przedstawiono już wcześniej. Dla temperatur badawczych 650^{o}C zaobserwowano powstawanie bardzo gęstej siatki pęknięć zmęczeniowych – ok dwukrotnie większa liczba pęknięć niż przy wyższych temperaturach badawczych – Rys. 26. Spowodowane jest to najprawdopodobniej wolniejszą kinetyką przemian i wolniejszym spadkiem twardości w warstwie wierzchniej. Dla materiałów o większej twardości zaobserwowano łatwiejszą inicjację nowych pęknięć. Natomiast dla wyższych temperatur gdzie materiał powierzchniowo odpuszcza się / mięknie szybciej liczba pęknięć jest mniejsza lecz ich głębokość jest większa. Prezentowane wyniki zestawione były jako porównanie z pierwszą operacją kucia koła czołowego (Rys. 27) gdzie procesy zmęczenia cieplnego oraz zużycia ściernego zachodzą niezwykle intensywnie [19].



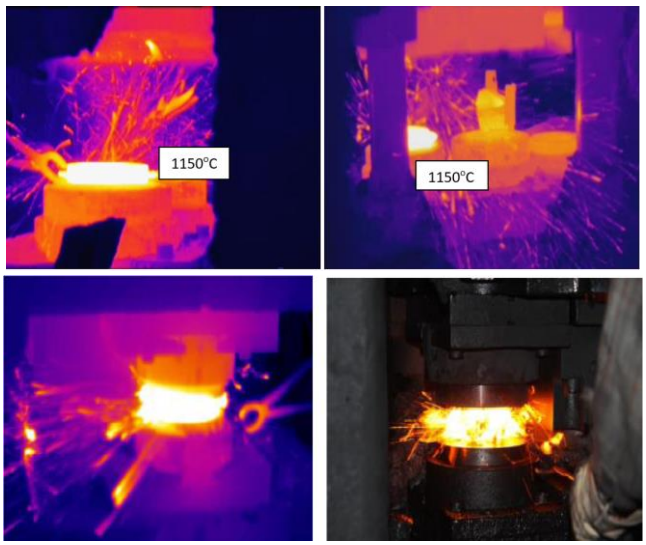
Rys. 27 Wybrane obszary narzędzi do spęczania w procesie kucia koła czołowego, a)obszar intensywnego zmęczenia cieplnego, b)obszar intensywnego zużycia ściernego [19].

Przeprowadzone badania pozwoliły na fizyczną symulacje / odwzorowanie obciążeń cieplnych panujących w procesie kucia. Górna temperatura cyklu stosowana w badaniach laboratoryjnych została wybrana w oparciu o dane otrzymane w procesie modelowania – temperatura w kontakcie materiału odkuwki C45 i materiału narzędziowego 1.2344. Budowa stanowiska pozwoliła na przeprowadzenie badań pod kątem odporności na zmęczenie cieplne z wykorzystaniem różnych ośrodków chłodzących i możliwością odwzorowania różnych krzywych grzania (ustawienia generatora wzbudnika indukcyjnego) i chłodzenia (chłodzenie powietrzem, wodą, natryskiem oraz mgłą wodną).

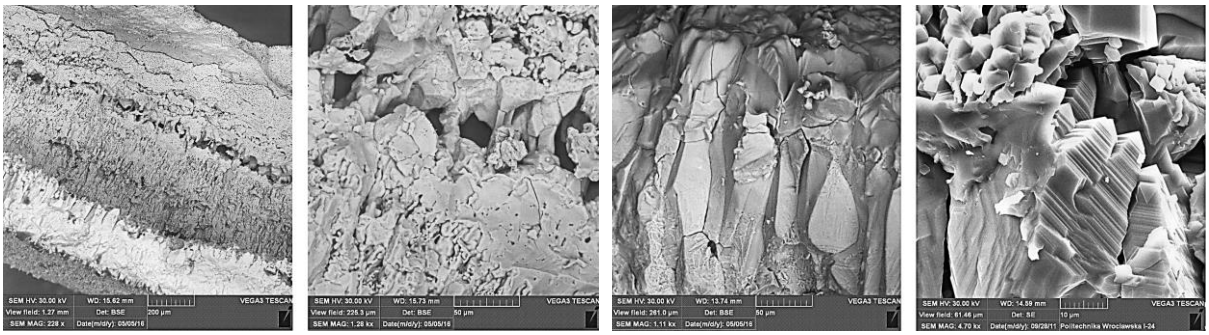
Przedstawione zagadnienia oraz otrzymane wyniki w zakresie wpływu temperatury i jej cyklicznych zmian stanowią tylko część zjawisk z jakimi mamy do czynienia w procesach kucia na gorąco. W dalszej części zostaną przedstawione kolejne zjawiska mające bezpośredni wpływ na procesy zużycia narzędzi kuźniczych.

W pracy [6] przedstawiono analizę procesu oraz zużycia narzędzi do kucia na gorąco stali austenitycznych o zawartości niklu do 33,5% oraz chromu 15%. Jak wspomniano już wyżej (Rys. 10 oraz Rys. 11) występują tam wszystkie opisane mechanizmy zużycia narzędzi kuźniczych. Kucie tego typu materiałów – stale wysokostopowe, superstopy – wiąże się z inną charakterystyką procesu. Zwłaszcza jeśli chodzi na naprężenie uplastyczniające materiału odkuwki – jest ono znacznie wyższe niż dla przeciętnych gatunków stali sosowanych w przemyśle motoryzacyjnym, rolniczym itp, oraz obecność zgorzeliny. Często stosowane w przemyśle samochodowym, rolniczym itp. stale w gatunkach C45, 42CrMo4, 16HG oraz inne konstrukcyjne oraz przeznaczone do OC wykazują dużą zdolność do pokrywania się warstwą tlenków Fe_2O_3, Fe_3O_4. Zgorzelina powstająca w procesie nagrzewania (indukcyjne, gazowe, elektryczne) usuwana jest najczęściej w pierwszej operacji kucia (spęczanie, spłaszczanie – Rys. 28) lub na stanowisku poprzedzającym kucie – walcowania / zdzieranie zgorzeliny. W przypadku kucia superstopów oraz wysokostopowych stali austenitycznych warstwa powstającej zgorzeliny różni się składem chemicznym (tlenki tytanu, aluminium, chromu itp.) oraz

właściwościami. Jest on zdecydowanie cieńsza – kilka µm. Natomiast w przypadku stali zwykłych ma ona grubość najczęściej 0,1-0,6 mm. Nie przylega tak ściśle jak to ma miejsce dla stali austenitycznych i susperstopów. Przykłady odrywającej się od odkuwek warstwy tlenków przestawiono na Rys. 28. Badania termowizyjne IRD wykonałem w różnych procesach kucia stali do OC oraz konstrukcyjnych. Rys. 29 oraz Rys. 30 przedstawiają badania mikroskopowe warstwy tlenków pobranej ze odkuwki stalowej.



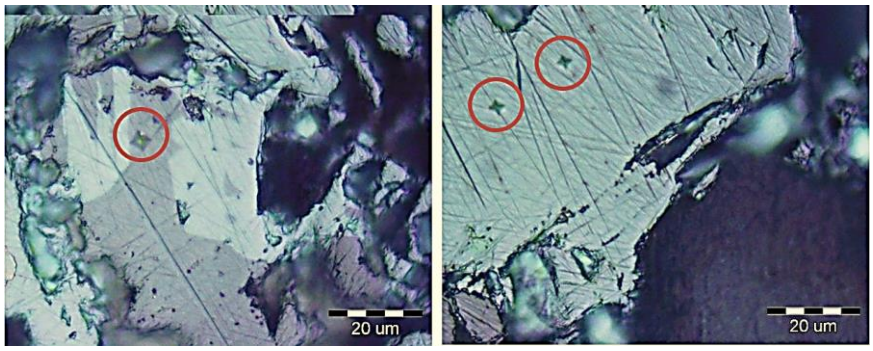
Rys. 28 Przykłady odrywającej się zgorzeliny z materiału odkuwki stalowej [10, 16].



Rys. 29 Obraz mikroskopowy SEM przełomu tlenkowej warstwy zgorzeliny z odkuwki stalowej[16].

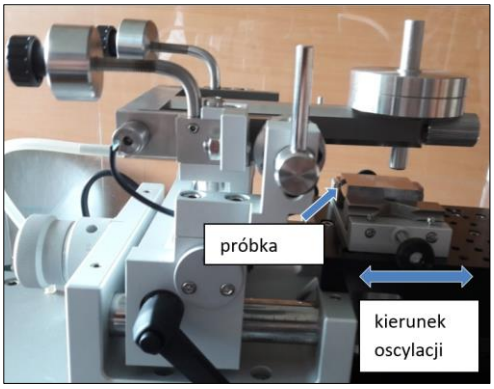
Jak przedstawiono na Rys. 28 oraz zaobserwowano podczas procesu kucia, mamy do czynienia z dużą ilością zgorzeliny. Stanowi ona ścierniwo w procesie zużycia narzędzi kuźniczych i jej obecność jest niepożądana. Niestety nie da się jej wyeliminować. Jak możemy zaobserwować na Rys. 29 część drobnych tlenków ma duży a część mały kąt natarcia płaszczyzn skrawających. Wielkość twardych cząstek Fe_2O_3 i Fe_3O_4 mieści się w granicach od 0,5µm do 150µm.

Tlenki żelaza – zgorzelina z materiału odkuwki jest bardzo krucha, co w pewnym stopniu ułtwia jej usuwanie z powierzchni odkuwek stalowych. Z drugiej jednak strony utrudnia to wykonanie dodatkowych analiz, choćby przykładowych pomiarów jej twardośći. W ramach prac [2,16] wykonałem takie badania (Rys. 30) mikrotwardości które wskazują na wartośći w zakresie od 951 HV0,01 do 1347 HV0,01.



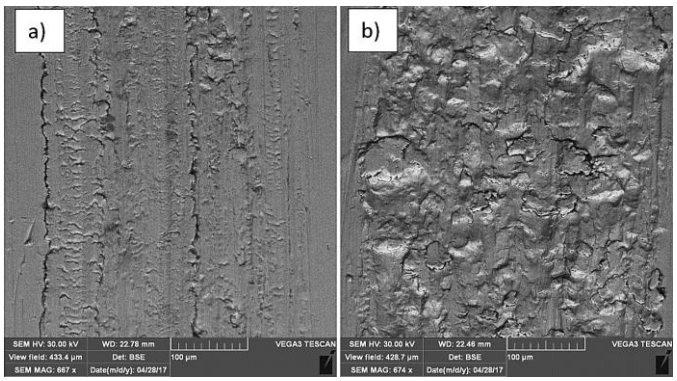
Rys. 30 Struktura zgorzeliny z materiału odkuwki wraz z widocznymi odciskami po badaniach twardości HV0,01-[16].

Praca [16] przedstawia otrzymane wyniki podjętej próby badania wpływu obecności zgorzeliny w procesach zużycia. Badania przeprowadziłem w laboratorium w warunkach tarcia oscylacyjnego. Urządzenie badawcze przedstawiono na Rys. 31. Materiał próbki (ok 470HV) to stal 1.2344. Przeciwpróbka to kulka stalowa o twardości ok 700HV. Trzpień przeciwpróbki zakończony był powierzchnią kulistą o promieniu r=2,5mm i wykonywał ruch oscylacyjny o amplitudzie 10mm z częstotliwością 2Hz. Obciążenie trzpienia oscylatora wynosiło 10N.



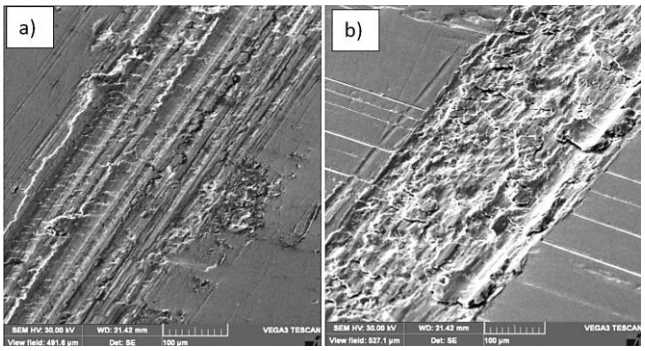
Rys. 31 Stanowisko do badania materiałów w styku oscylacyjnym[16].

Badania wykonano dla materiałów: stal – stal, bez smarowania oraz stal – stal, z dodatkiem zgorzeliny Fe_2O_3 i Fe_3O_4. Wyniki pomiaru szerokości toru zużycia przedstawiono poniżej (Rys. 32 a,b)[16].



Rys. 32 Wyniki pomiaru szerokości toru zużycia dla różnych warunków próby. Mikroskop elektronowy Detektor SE[16].

Szerokość torów pomiarowych (ślad zużycia) wyniosła odpowiednio: z Rys. 32a - **380µm** oraz Rys. 32b - **450 µm**.



Rys. 33 Widok toru zużycia dla różnych warunków próby. Mikroskop elektronowy Detektor SE[16].

Na Rys. 32a oraz Rys. 33a przestawiono tor zużycia dla skojarzenia materiałowego: **stal – stal, bez smarowania.** Obraz typowego zużycia ściernego determinowanego poprzez mikroskrawanie (widoczne długie rysy). Pęknięcia w formie schodkowej typowe dla niskocyklowego zmęczenia powierzchni. Liczne rysy oraz bruzdy. Widoczne deformacje plastyczne materiału wzdłuż bruzd toru badawczego). Nieznaczna ilość zaprasowanych produktów zużycia. Szerokość toru zużycia **377µm.**

Na Rys. 32b oraz Rys. 33b przestawiono tor zużycia dla skojarzenia materiałowego: **Stal – Stal, z dodatkiem zgorzeliny Fe_2O_3 i Fe_3O_4. (wielkość ścierniwa zgorzeliny 10-70 µm**) Zużycie ścierne oraz adhezyjne (Rys. 32b). Widoczne deformacje plastyczne produktów zużycia. Produkty zużycia ściernego (materiał podłoża) zaprasowane w torze badawczym – bardzo duża ilość. Brak nalepień materiału ścierniwa na badanej próbce. Szerokość toru zużycia to **447 µm.** Tematyka zużycia stali narzędziowych do pracy na gorąco w pracy [17] została poruszona w aspekcie trwałości narzędzi do spęczania – pierwsza operacja kucia, gdzie stwierdzono największą ilość odpadającej zgorzeliny – w tej operacji usuwana jest zgorzelina z powierzchni odkuwek w procesie spęczania lub spłaszczania. Obecność zgorzeliny (**Fe_2O_3 i Fe_3O_4)** może intensyfikować procesy zużycia. Tym samym zmiana mechanizmów zużycia może powodować przyspieszone zużycie narzędzi kuźniczych do pracy na gorąco. Badania EDX potwierdziły, że badaną zgorzelinę stanowią bardzo twarde cząstki tlenów żelaza.

Badania wpływu temperatury dla analizowanych narzędzi przedstawiono wyżej na Rys. 16 - Rys. 19 (opis w tekście). Silne oddziaływanie zmiennych pól temperatury powoduje zmniejszenie twardości narzędzi w warstwie wierzchniej. Spadek twardości jest funkcją czasu i temperatury. Jak wskazują badania w warunkach rzeczywistych oraz laboratoryjnych, oddziaływanie wysokiej temperatury powoduje utratę stabilności warstwy wierzchniej, spadek twardości, a co za tym idzie zwiększenie prędkości zużycia.

Otrzymane wyniki w pracy [16] dały początek kolejnym badaniom. W pracy [2,8] przedstawiono analizę oraz otrzymane wyniki badań wpływu namagnesowania narzędzi kuźniczych na zmiany w warstwie wierzchniej. Jak wskazują studia literatury oraz badania własne [2,8], obecność pola magnetycznego powoduje zmianę mechanizmów zużycia par trących materiałów ferromagnetycznych. Wskazane w literaturze artykułu [2] przykłady wskazują, że w zależności od wartości indukcji magnetycznej, prędkości poślizgu oraz materiału możemy mieć do czynienia ze wzrostem lub spadkiem prędkości zużycia materiału pracującego w parze ciernej. Brak jest jednoznacznych wyników, a cytowane w pracy [2] nie udzielają odpowiedzi, jaki wpływ na procesy zużycia ma namagnesowanie narzędzi do kucia na gorąco. Obecność pola magnetycznego powoduje zmianę mechanizmów zużycia par trących materiałów ferromagnetycznych. Zarówno zgorzelina (Fe_2O_3 i Fe_3O_4) ferromagnetyk jak i grafit diamagnetyk nie pozostają obojętne na działania pola magnetycznego – zwłaszcza w warunkach dynamicznych. Wartość indukcji magnetycznej zmierzonej na analizowanych 24 szt. (Rys. 34) narzędziach wynosiła ok 1,6-3,7 mT.

Przeprowadzona analiza dotyczyła narzędzi poddanych już eksploatacji oraz kilku narzędzi zupełnie nowych. Otrzymane wyniki wskazują wyraźnie, że poziom namagnesowania narzędzi nowych i używanych w

procesie kucia jest prawie identyczny. Na podstawie tego można przypuszczać, że namagnesowanie powstaje w procesach przygotowania narzędzi, np.: cięcie, obróbka skrawaniem, obróbka erozyjna oraz inne.

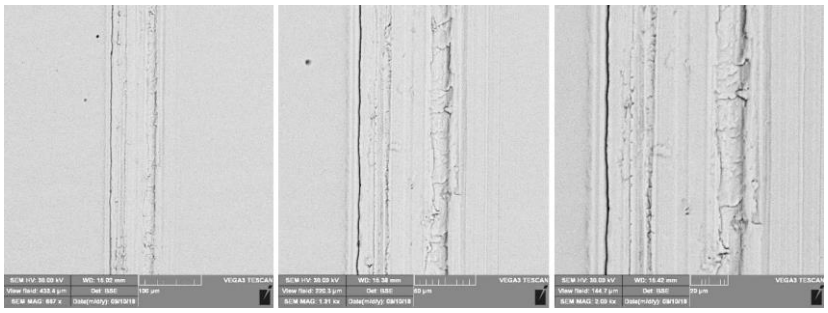
Rys. 34 Przykładowe narzędzia oraz przykładowe wyniki analizy pola magnetycznego[2].

Zdecydowałem się po przeprowadzeniu analizy poziomu namagnesowania (1,6-3,7 mT) i jego wpływu na zmiany w warstwie wierzchniej stali narzędziowej do pracy na gorąco. W pracy [2] przeprowadzono próbę oscylacyjnego zużycia materiału narzędziowego dla 4 warunków tarcia:

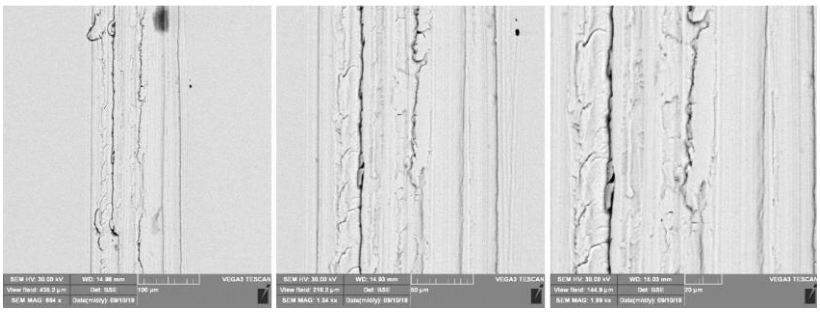
- zużycie stal – stal bez oddziaływania pola magnetycznego
- zużycie stal – stal z oddziaływaniem pola magnetycznego
- zużycia stal – stal w obecności zgorzeliny
- zużycie stal – stal w obecności zgorzeliny i pola magnetycznego

W warunkach laboratoryjnych przeprowadzono badania zużycia w warunkach tarcia oscylacyjnego. Materiał próbki (ok 470HV) to stal 1.2344. Przeciwpróbka to kulka stalowa o twardości ok 700HV – podobnie jak dla badań przedstawionych powyżej. Stanowisko przedstawiono już wcześniej – Rys. 31. Trzpień przeciwpróbki zakończony był powierzchnią kulistą o promieniu r=1,25mm i wykonywał ruch oscylacyjny o amplitudzie 10mm z częstotliwością 2Hz. Obciążenie trzpienia oscylatora 20N. Wartość namagnesowania dla próby w polu magnetycznym wynosiła ok 3,5 mT. Taka wartość namagnesowania pozwala na przyleganie wszelkich opiłków i produktów zużycia do materiału bazowego.

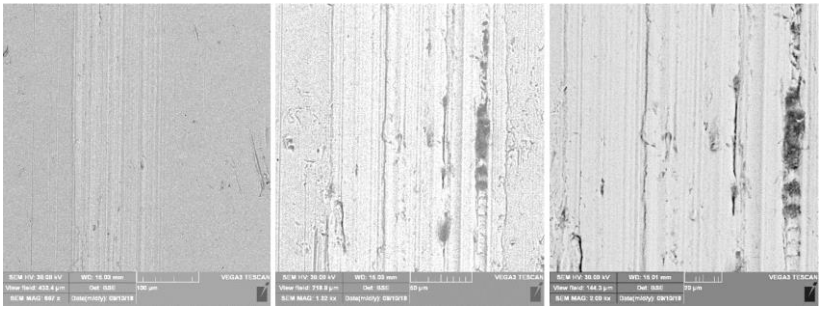
Na Rys. 35 - Rys. 38 przedstawiono obraz SEM śladów zużycia dla różnych warunków tribologicznych.



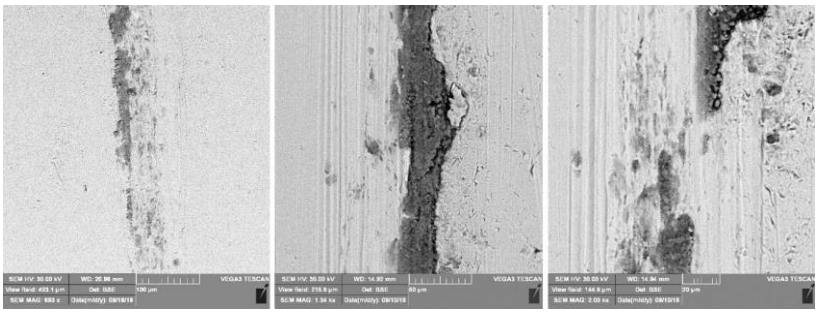
Rys. 35 Ślad zużycia dla pary materiałowej stal - stal bez oddziaływania pola magnetycznego[2].



Rys. 36 Ślad zużycia dla pary materiałowej stal – stal z oddziaływaniem pola magnetycznego[2].



Rys. 37 Ślad zużycia dla pary materiałowej stal – stal w obecności zgorzeliny[2].



Rys. 38 Ślad zużycia dla pary materiałowej stal – stal w obecności zgorzeliny i pola magnetycznego[2].

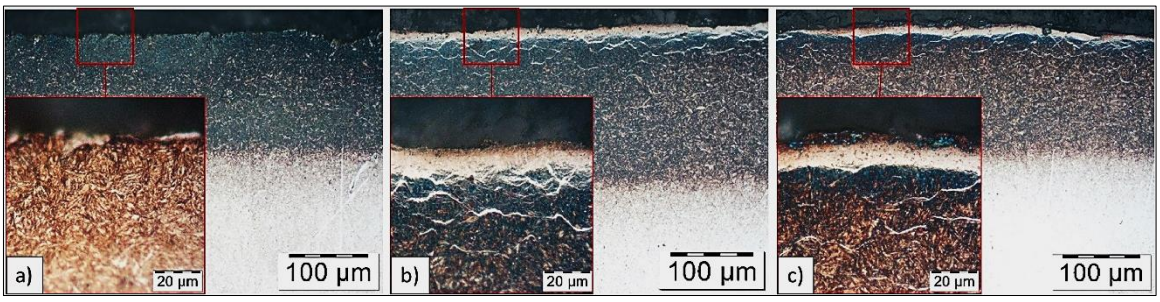
Wynikiem przeprowadzonych badań dla czterech wariantów jest zmiana mechanizmów zużycia warstwy wierzchniej materiału podłoża ze stali 1.2344. Na Rys. 35 przedstawiono obraz mikroskopowy SEM toru zużycia dla pary materiałowej **stal-stal bez oddziaływania pola magnetycznego**. Obraz typowego zużycia ściernego determinowanego poprzez mikroskrawanie. Widoczne są długie rysy oraz pęknięcia w formie schodkowej typowe dla niskocyklowego zmęczenia powierzchni. Liczne rysy oraz bruzdy na całej długości toru badawczego. **Stal – stal z oddziaływaniem pola magnetycznego** (Rys. 36) – widoczny tor zużycia. Zużycie ścierne w formie mikroskrawania (długie rysy), widoczne pęknięcia schodkowe oraz odkształcony plastycznie materiał wzdłuż toru zużycia. **Stal – Stal, z dodatkiem zgorzeliny Fe_2O_3 i Fe_3O_4 bez oddziaływania pola magnetycznego.** Zużycie ścierne oraz adhezyjne (widoczne zagłębienia po wyrwaniu materiału). Produkty zużycia ściernego (materiał podłoża) zaprasowane w torze badawczym. Widoczne nieliczne nalepienia materiału ścierniwa na badanej próbce (ciemne pola) –Rys. 37. **Stal – Stal, z dodatkiem zgorzeliny Fe_2O_3 i Fe_3O_4 oraz pod działaniem pola magnetycznego**. Intensywne zużycie ścierne, zaobserwowano intensywne nanoszenie materiału na przeciwpróbkę. Związane to jest z charakterem próby pod działaniem pola magnetycznego. Widoczne nalepienia materiału ścierniwa. (ciemne obszary na Rys. 38). Przeprowadzone badania w sposób jednoznaczny wskazują, że podczas tworzenia się bruzd w torze zużycia materiał w formie zgorzeliny ma tendencję do zalegania i zaprasowywania się wzdłuż toru. Spowodowane jest to obecnością pola magnetycznego. Dla testu bez pola magnetycznego nie zaobserwowano tak intensywnego nalepiania się zgorzeliny w miejscu zużycia. Obecność pola magnetycznego (namagnesowania narzędzi) może mieć istotny wpływ na charakterystykę zużycia narzędzi

kuźniczych. Wytyczne prób dotyczące zakresu temperatur odkuwki oraz narzędzi i poziomu magnesowania przedstawiono w publikacji [9, 10] oraz innych. Średnia temperatura analizowanych narzędzi nie przekracza w procesie kuźniczym poziomu 150 – 220°C.

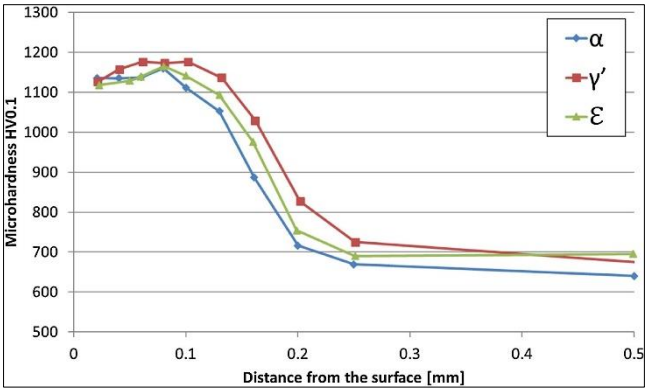
Analiza stanu wiedzy, przeprowadzone badania własne oraz otrzymane wyniki pozwoliły na sukcesywne i systematyczne próby zwiększania trwałości narzędzi kuźniczych wybranych procesów przemysłowych poprzez zastosowanie powłok hybrydowych, napawania oraz azotowania oraz wariantowego azotowania[1] (α, Y', Ɛ) - [2,5,12] oraz inne. Równolegle prowadziłem prace na możliwością wykorzystania otrzymywanych wyników w procesach analizy mechanizmów zużycia narzędzi kuźniczych, w procesach modelowania zmian strukturalnych, opracowywaniu systemów ekspertowych oraz na analizie trwałości narzędzi kuźniczych po różnych wariantach obróbki powierzchni z wykorzystaniem systemu wspomagania decyzji opartego na sztucznych sieciach neuronowych [3,11,17] oraz inne.

Zagadnienie 2: wybrane czynniki i technologie mogące podnieść trwałość narzędzi kuźniczych.

Istnieje wiele metod poprawy trwałości narzędzi kuźniczych. Mogą one dotyczyć zmian technologicznych oraz konstrukcyjnych dotyczących samego procesu oraz wielu innych czynników. Jednak obecnie najwięcej opracowań skupia się wokół technik inżynierii powierzchni. To właśnie one, ze względu na poprawę właściwości w warstwie wierzchniej materiału, pozwalają niekiedy w znaczący sposób podnieść trwałość narzędzi kuźniczych. W pracy [1] przedstawiono wyniki badań oraz analiz zastosowania różnych warstw azotowanych dla narzędzi do kucia widłaka ze stali C45 w czterech operacjach. Głównym celem badań opisanych w artykule było uzyskanie warstw o podobnej głębokości, ale o różnej mikrostrukturze, zawierających różne fazy azotku żelaza. Dlatego też ustalono stały czas, ponieważ czas procesu azotowania wpływa głównie na grubość warstwy dyfuzyjnej. Założono, że celem będzie uzyskanie warstwy dyfuzyjnej o łącznej grubości 0,15-0,18 mm (kryterium twardości rdzenia + 50 HV). Drugim istotnym parametrem, który był brany pod uwagę, był potencjał azotowania, który został wybrany na podstawie zmodyfikowanego przez prof. L. Małdzińskiego wykresu Lehrera [1]. Potencjał został przyjęty w taki sposób, aby uzyskać wyraźnie inną strukturę fazową w każdym typie procesu - ferryt α z azotkami, γ' lub ε. Warstwy wykonano w procesie azotowania ZeroFlow. Potencjalne wartości przyjęto z górnej części przedziału dla poszczególnych faz, ze względu na to, że podatność stali narzędziowych na dyfuzję azotu jest mniejsza niż zwykłej stali węglowej. Za temperaturę procesu przyjęto górną temperaturę z zakresu temperatury dostępnej, aby przyspieszyć dyfuzję oraz ogólnie ograniczyć czas i koszty procesu. Jednak ze względu na ryzyko odpuszczania stali w wyższej temperaturze, temperatura 550°C nie została przekroczona. Proces przebiegał dwuetapowo. Najpierw przyjęto bardzo wysoki potencjał - 490°C, aby nasycić warstwę powierzchniową azotem na krótki czas. Zastosowano również pierwszy stopień w niższej temperaturze ze względu na duże rozmiary narzędzi, aby zapewnić odpowiednie nagrzewanie wsadu w trakcie procesu. Następnie wykonano azotowanie z potencjalną charakterystyką danej struktury fazowej typu α (α-Fe), γ '(Fe_4N) lub ε ($Fe_{3-2}N$), przy 550°C [1]. Mikrostrukturę przedstawiono na Rys. 39, rozkłady twardości na Rys. 40.

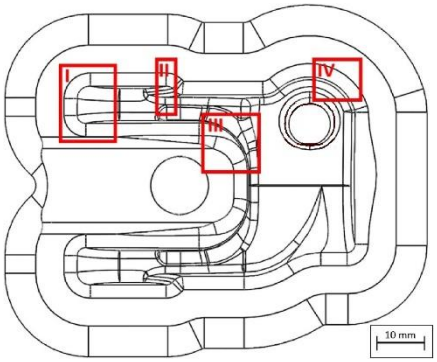


Rys. 39 Mikrostruktura warstwy azotowanej: a) warstwa dyfuzyjna bez warstwy białej (warstwa typu α), b) warstwa dyfuzyjna i biała z przewagą fazy gamma (warstwa kompozytowa typu γ'), c) warstwa dyfuzyjna i biała z γ 'oraz Faza Ɛ (warstwa kompozytowa typu Ɛ)[1].



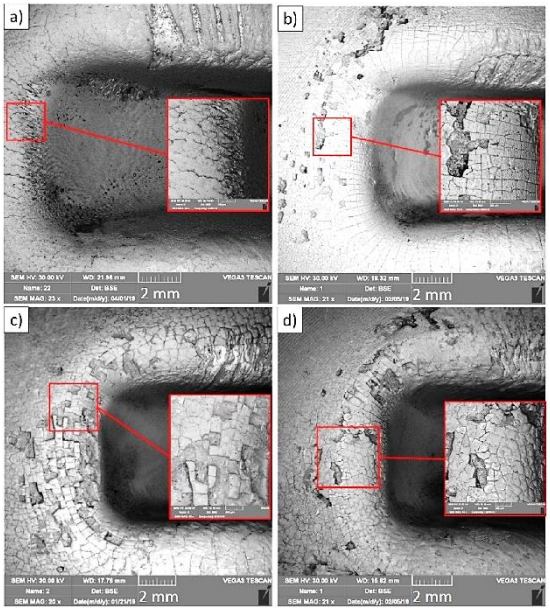
Rys. 40 Mikrotwardość otrzymanych warstw azotowanych[1].

Narzędzia z wykonanymi warstwami dyfuzyjnymi α , γ' , ε oraz narzędzie porównawcze bez warstwy azotowanej poddano normalnej eksploatacji. Analizowane matryce po odkuciu 16 tys. odkuwek każda, poddano badaniom jaki wpływ ma rodzaj azotowania na zmiany w warstwie wierzchniej. Rys. 41 przedstawia miejsca w których wykonano analizy mikroskopowe oraz pomiary rozkładów mikrotwardości.



Rys. 41 Obszary narzędzi wybrane do analizy[1].

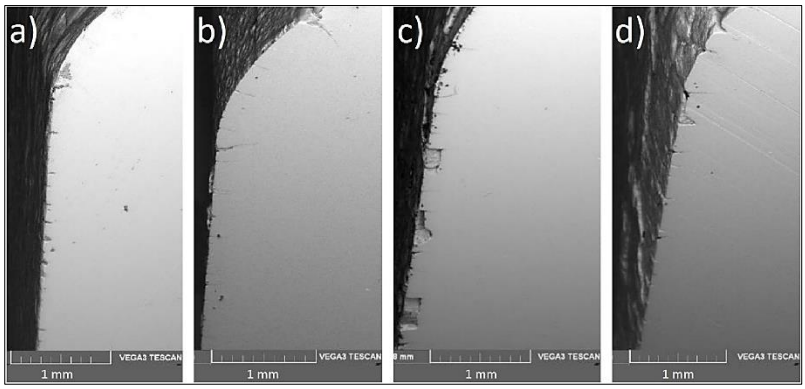
Wyniki analizy SEM obszaru I – (z Rys. 41) przedstawiono na Rys. 42.



Rys. 42 Analiza SEM Obraz SEM powierzchni narzędzia w obszarze I: a) nieazotowane ,b) azotowanie typu α , c) azotowanie typu γ ', d) azotowanie typu ε [1].

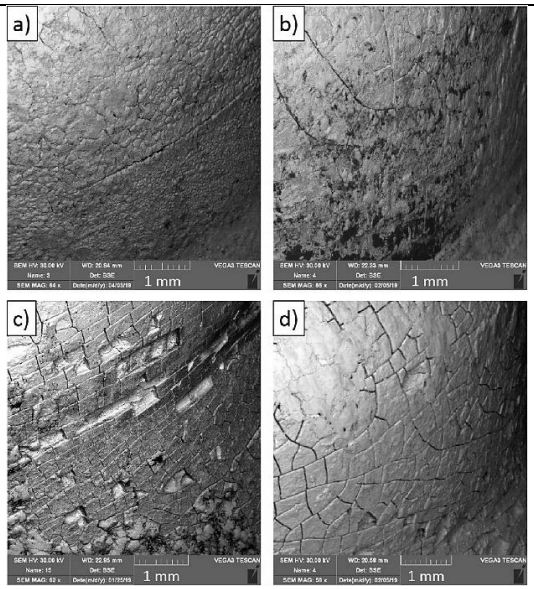
W analizowanym obszarze I dla narzędzi nieazotowanych możemy zaobserwować głębokie bruzdy i nieregularną siatkę pęknięć zmęczenia cieplnego. Gęsta, regularna siatka pęknięć z licznymi ubytkami jest widoczna na całej powierzchni matrycy z warstwą azotowaną typu γ'. W przypadku matrycy z warstwą azotowaną typu Ɛ na powierzchni widoczna jest również intensywna siatka rys z odpryskami, gdzie obserwowane pęknięcia są nieregularne, a ubytki mniejsze i znacznie mniej liczne niż w przypadku matrycy z warstwa azotowana typu γ'.

Analiza obszaru II – (Rys. 43) - prowadziłem obserwacje na przekroju, co pozwoliło określić głębokość pęknięć widocznych na powierzchni w postaci siatki. We wszystkich analizowanych narzędziach pęknięcia przebiegają prostopadle od powierzchni do narzędzia, co wskazuje na brak odkształceń plastycznych w tym obszarze. Najgłębsze pęknięcia można zaobserwować w matrycy z warstwą azotowaną typu α, gdzie pęknięcia te są dość wąskie (Rys. 43 b) i nie wykazują tendencji do tworzenia się obszarów z dużymi ubytkami adhezyjnymi jak ma to miejsce w przypadku matrycy z warstwą γ'(Rys. 43c).

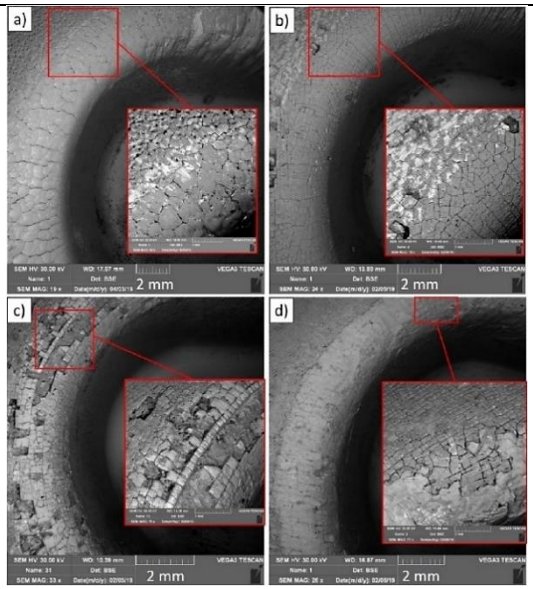


Rys. 43 Widok przekroju próbek z obszaru nr. II: a) stal nieazotowana, b) azotowanie typu α, c) azotowanie typu γ', d) azotowanie typu ε [1].

Analiza obszaru III – (Rys. 44) w którym nie stwierdzono zużycia geometrycznego, największe zmiany na powierzchni można zaobserwować na matrycy z warstwą mieszanki typu γ', a na jej powierzchni występuje drobna, regularna siatka pęknięć termomechanicznych z licznymi ubytkami adhezyjnymi (Rys. 44 c). W przypadku pozostałych narzędzi w tym obszarze występuje nieregularna siatka bez widocznych odprysków.



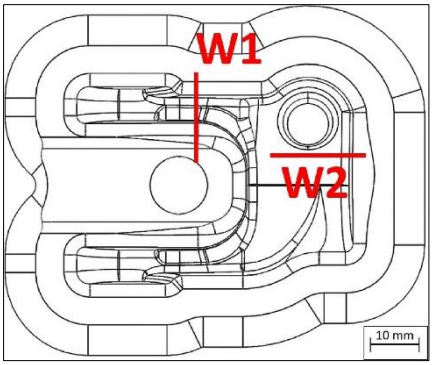
Rys. 44 Analiza SEM powierzchni narzędzia w obszarze III: a) nieazotowane b) azotowanie typu α , c) azotowanie typu γ ', d) azotowanie typu ε [1].



Rys. 45 Obraz SEM powierzchni narzędzia w obszarze nr. IV: a) nieazotowane b) azotowanie typu α , c) azotowanie typu γ ', d) azotowanie typu ε [1].

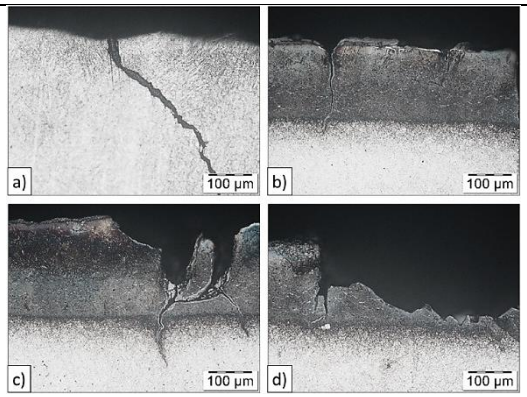
Analiza obszaru nr. IV - (Rys. 45c) największą degradację powierzchni można zaobserwować dla matrycy z warstwą azotowaną typu γ 'w postaci licznych ubytków w siatce pęknięć termomechanicznych, które są szczególnie zlokalizowane na promieniu przejścia do mostka matrycy. W pozostałych przypadkach w tym obszarze występuje nieregularna siatka pęknięć o podobnym kształcie.

Obserwowane różnice w charakterze zużycia i wyglądzie powierzchni roboczych w analizowanych obszarach jak możemy zauważyć są bezpośrednio zależne od rodzaju i struktury nałożonej warstwy azotowanej. W celu weryfikacji zmian zachodzących w mikrostrukturze warstwy wierzchniej narzędzi wykonano badania metalograficzne w dwóch przekrojach dla każdego z badanych narzędzi. Te przekroje zostały oznaczone na Rys. 46 jako W1 i W2.

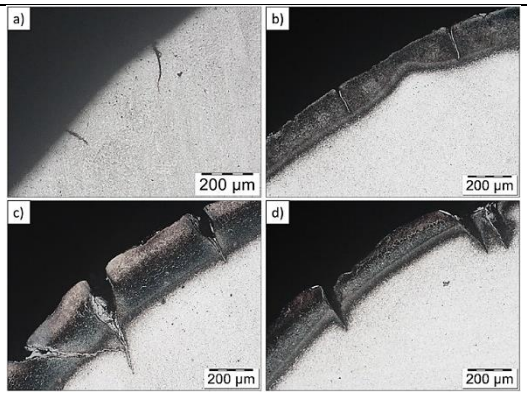


Rys. 46 Rysunek powierzchni roboczej narzędzia z oznaczeniem przekrojów W1 i W2 do badań materiałowych[1].

W obszarze W1 (Rys. 47 oraz Rys. 48) płaskiej części matrycy, gdzie materiał odkuwki płynie bardzo intensywnie i występują duże obciążenia, można zaobserwować liczne pęknięcia na powierzchni. W przypadku braku warstw dyfuzyjnych / azotowanych pęknięcia są bardzo głębokie (Rys. 47a) , a dla narzędzi azotowanych, podobnie jak w badaniach SEM, można zaobserwować liczne ubytki i pęknięcia zmęczeniowe. Największe ubytki materiału warstwy azotowanej występują w warstwach typu γ' (Rys. 47c) i Ɛ (Rys. 47d). Ponadto można również zaobserwować brak spójności materiału przy przejściu z fazy α-Fe do fazy α + γ 'na Rys. 47 c oraz d. Jest to obszar bardziej kruchy - z tendencją do pękania. Obszar W1 na zaokrąglonej krawędzi mostka matrycy charakteryzuje się gęstą siatką z licznymi pęknięciami i licznymi śladami wynikającymi ze zużycia ściernego. W tym obszarze największe zużycie wykazuje narzędzie nieazotowane. Wyniki skanowania narzędzi przedstawiono w publikacji [1]. Tymczasem, narzędzia z warstwami γ' i Ɛ posiadają liczne pęknięcia i ubytki w obszarze alfa + γ' oraz γ' + Ɛ. Głębokie szczeliny sięgające poza dyfuzyjną warstwę azotowania - (Rys. 47c i d). Na zaokrąglonej krawędzi mostka matrycy w obszarze W1 znajduje się biała strefa powierzchni widoczna na Rys. 48 c. Widoczna jest również obecność tlenków żelaza w pęknięciach materiału. Potwierdziła to analiza EDX - zaobserwowano obecność chromu w warstwie tlenkowej. Materiał odkuwki nie zawiera tego pierwiastka w swoim składzie chemicznym.



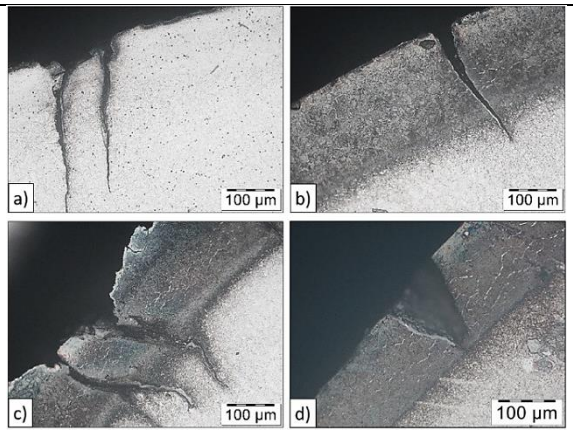
Rys. 47 Warstwa wierzchnia o przekroju W1 w płaskiej powierzchni na mostku matrycy na narzędziach: a) nieazotowane, b) azotowanie typ α, c) azotowanie typu γ ', d) azotowanie typu ε [1].



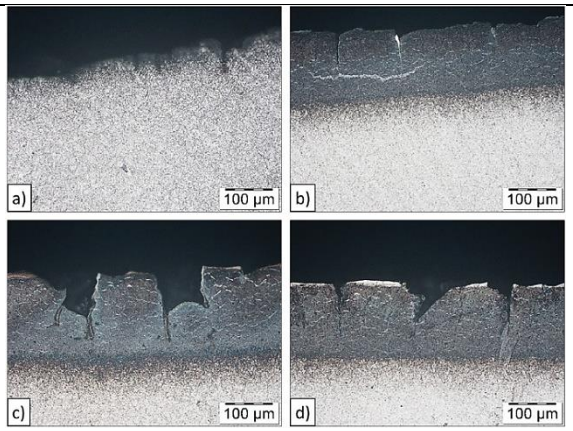
Rys. 48 Warstwa wierzchnia na krawędzi w przekroju W1 na narzędziach: a) nieazotowane, b) azotowanie typu α, c) azotowanie typu γ ', d) azotowanie typu ε[1].

Jak wykazały wyniki skanowania 3D narzędzi – opis w pracy [1], obszar W1 charakteryzuje się intensywnym zużyciem ściernym oraz odpuszczaniem się materiału w warstwie wierzchniej – wskazania pomiaru rozkładów mikrotwardości na przekrojach. Zaobserwowano również liczne pęknięcia oraz ubytki wynikające z kruchości γ’ oraz Ɛ (Rys. 49 oraz Rys. 50).

Dla obszaru W2 można zaobserwować, że matryca bez warstwy azotowanej (Rys. 49) ulega znacznemu zużyciu w tym obszarze - (na co wskazują wyniki skanowania 3D narzędzi) i widoczne są liczne pęknięcia (siatka pęknięć zmęczenie). Porównując te same obszary narzędzi azotowanych z uformowaną warstwą dyfuzyjną α, warstwami kompozytowymi typu γ' lub Ɛ możemy zauważyć, że dominującym mechanizmem niszczącym dla warstwy typu α jest pękanie materiału i nieliczne ubytki widoczne przy analizie SEM . Tymczasem dla warstw typu γ 'i Ɛ obserwuje się w tym obszarze liczne pęknięcia, ubytki adhezyjne i widoczne zużycie ścierne. Potwierdza to opisane wcześniej zjawisko kruchości warstw azotowanych typu γ' i Ɛ.



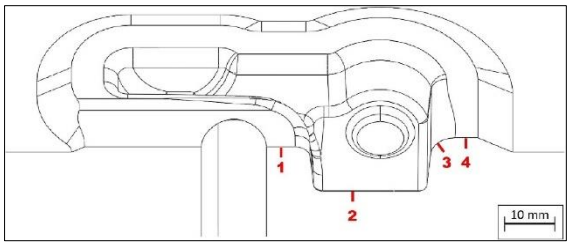
Rys. 49 Warstwa wierzchnia na krawędzi w przekroju W2 na narzędziach: a) nieazotowane, b) azotowanie typu α, c) azotowanie typu γ ', d) azotowanie typu ε.



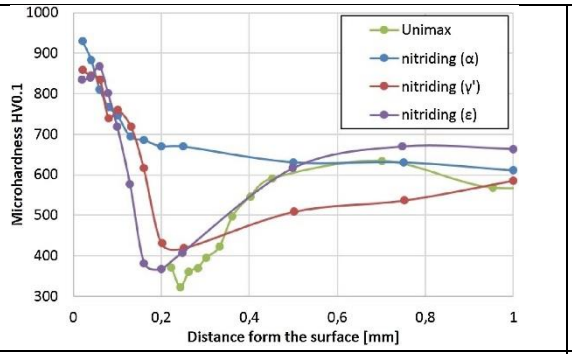
Rys. 50 Warstwa wierzchnia przy dnie matrycy w przekroju W2 na narzędziach: a) nieazotowane, b) azotowanie typu α, c) azotowanie typu γ ', d) azotowanie typu ε.

Można również w tym miejscu omówić aspekt zmian zachodzących w mikrostrukturze azotków. Wiele obserwacji doprowadziło jednak do wniosku, że odpuszczanie warstw azotowanych może zmieniać zarówno właściwości, jak i strukturę azotków. W niektórych miejscach na krawędzi w przekroju W1 i W2 nie występuje warstwa γ' i ε, co może być spowodowane zużyciem ściernym lub odpuszczaniem i rozkładem tych związków - azotków.

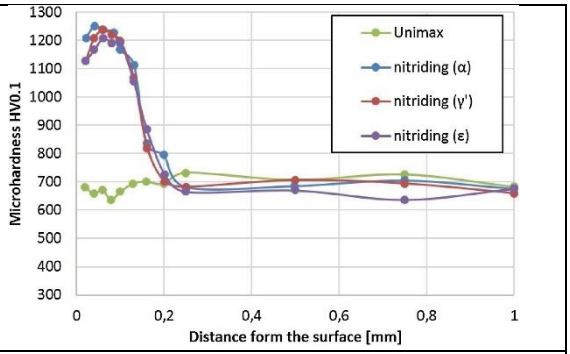
Rozkłady mikrotwardości wykonano na przekrojach poprzecznych. Schemat prowadzonych badań przedstawiono na Rys. 51. Wyniki rozkładu w poszczególnych obszarach na Rys. 52 - Rys. 55.



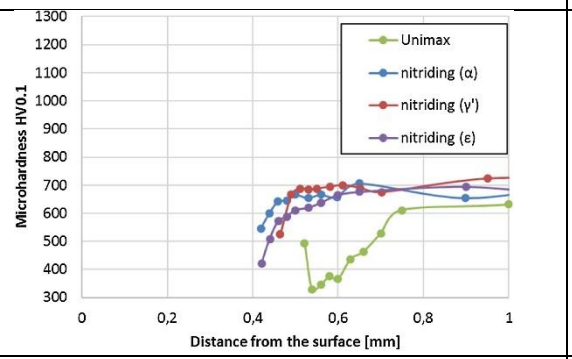
Rys. 51 Miejsca wykonywania analizy rozkładu mikrotwardości[1].



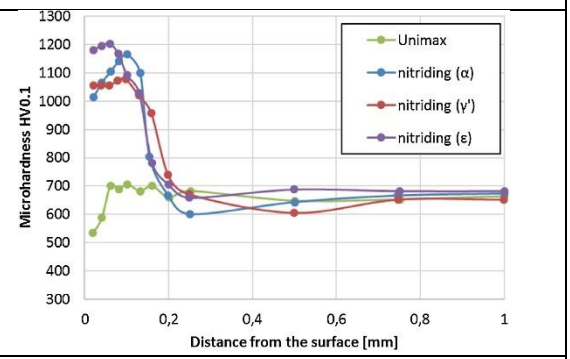
Rys. 52 Wykres zmian mikrotwardości w miejscu nr. 1, dla wszystkich analizowanych narzędzi



Rys. 53 Wykres zmian mikrotwardości w miejscu nr. 2, dla wszystkich analizowanych narzędzi



Rys. 54 Wykres zmian mikrotwardości w miejscu nr. 3, dla wszystkich analizowanych narzędzi



Rys. 55 Wykres zmian mikrotwardości w miejscu nr. 4, dla wszystkich analizowanych narzędzi

Analiza mikrotwardości warstwy wierzchniej narzędzi wykazały, że azotowanie jest krytyczną procedurą ograniczającą efekt odpuszczania, który w różnym stopniu przyczynia się do degradacji warstwy wierzchniej narzędzi podczas kucia. Ponadto wykazano, że odporność warstw na działanie wysokich temperatur zależy od głębokości warstwy dyfuzyjnej, na którą składa się głównie warstwa dyfuzyjna typu α. W miejscu, w którym występują największe obciążenia termiczne, pożądane jest, aby warstwa azotowana była głębsza, ponieważ narzędzie przegrzewa się i podlega odpuszczaniu w zakresie głębokości do ok. 0,5 mm.

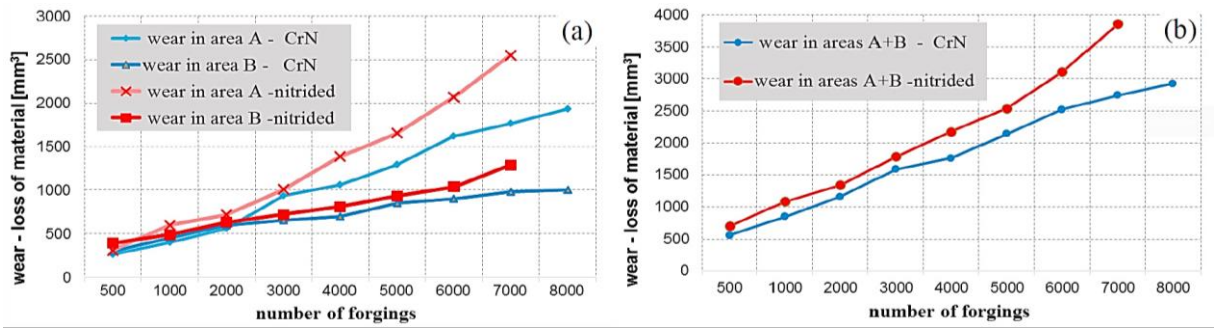
Podsumowaniem prowadzonych obszernych prac [1] jest fakt, że badania potwierdziły możliwość otrzymywania warstw azotowanych o tej samej grubości, o różnej budowie strukturalnej i różniących się właściwościami. Wykazano, że pomimo podobnej głębokości warstwy dyfuzyjnej i podobnego profilu mikrotwardości, różnice w wytrącaniu azotków na powierzchni i w warstwie wierzchniej mają kluczowy wpływ

na odporność warstw azotowanych na zużycie. Kolejne testy eksploatacyjne w procesie kucia na gorąco wykazały różnice w zużyciu, potwierdzając podatność azotków γ na pękanie zmęczeniowe (zmęczenie cieplnomechaniczne) ze względu na podwyższoną twardość i uporządkowaną strukturę krystalograficzną w regularnej sieci.

Jak się okazuje, warstwy azotowane ze złożoną strefą fazy ε wykazują niską ciągliwość przy jednoczesnej dużej odporności na ścieranie, co sprawia, że nadają się do pracy w warunkach, w których nie występują obciążenia dynamiczne, np. W procesach wytłaczania. Z kolei warstwa złożona z azotków i węglikoazotków γ' przyczynia się do zwiększenia odporności na ścieranie i zarysowania oraz do zwiększonej odporności na korozję. Natomiast warstwy azotowane bez stref zespolonych (typu α) charakteryzują się bardzo dobrą wytrzymałością zmęczeniową i są mniej podatne na pękanie w wyniku zmęczenia termo-mechanicznego, co sprawia, że nadają się do pracy w warunkach dużych obciążeń dynamicznych, np. kucie.

Głównym wkładem przedstawionych badań jest ukazanie różnic w zużyciu narzędzi wynikających z budowy krystalograficznej azotków w warstwach azotowanych. Potwierdza to potrzebę kontrolowania procesu azotowania zgodnie ze schematem Lehrera i jego ulepszonymi wersjami, aby uniknąć tworzenia się azotków γ' na powierzchni matryc. Potwierdzono również, że azotowanie wpływa korzystnie na trwałość narzędzi w procesach kucia na gorąco.

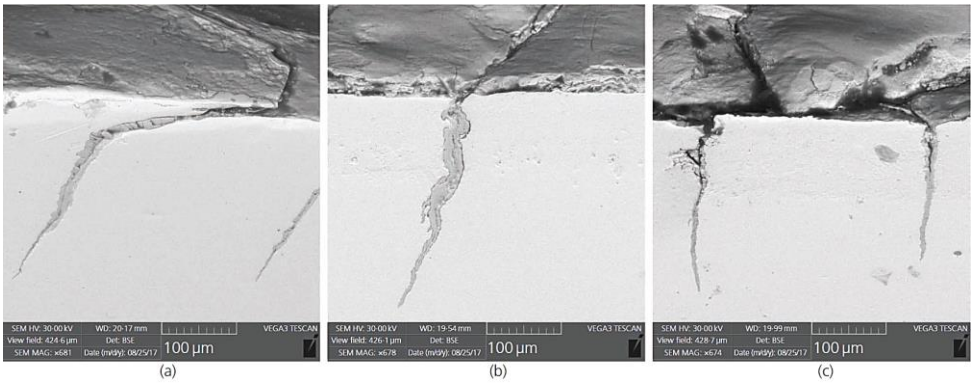
Właściwe parametry azotowania i stabilne podłoże może być doskonałą warstwą podkładową w przypadku stosowania warstw hybrydowych [4,12]. Warstwy azotowane również jak wykazały prowadzone badania i analizy doskonale sprawdza się na narzędziach w których wykonano napawanie regeneracyjne [5]. W publikacji [4] przedstawiono wyniki (Rys. 56) dotyczące możliwości zwiększenia odporności na zużycie narzędzi do kucia koła czołowego poprzez zastosowanie **warstw hybrydowych** GN + Cr / CrN w porównaniu ze standardową warstwą azotowaną na trwałość wybranego narzędzia (górna wkładka matrycowa w operacji II - kucie wstępne). Przeprowadzone badania wykazały, że zastosowanie azotowania gazowego w połączeniu z powłoką PVD zmniejsza zużycie narzędzia i poprawia jego trwałość o 25% po zakończeniu pracy - dla 7000 sztuk. Efekt ten szczególnie dotyczy końcowego okresu eksploatacji (ok. 7000 sztuk), w którym powłoka Cr / CrN (pomimo częściowego pęknięcia i uszkodzenia) pozostaje na powierzchni narzędzia, chroniąc je przed ścieraniem i działając jako bariera przed szokami termicznymi. Spowolnienie w ten sposób zużycia powoduje, że faktyczne zużycie narzędzia zaczyna się później, a tym samym przedłuża żywotność narzędzia. Zastosowanie metody odwrotnego skanowania do analizy stanu narzędzia pozwala na ilościową i jakościową ocenę ubytku materiału, a wybór dwóch charakterystycznych obszarów narzędzia, z różnymi dominującymi mechanizmami degradacji, pozwala na dokładniejszą analizę efektu zastosowania różnych technik inżynierii powierzchni. Korzystne właściwości warstw hybrydowych w porównaniu z tradycyjnymi technikami obróbki cieplno-chemicznej (azotowanie) zaobserwowane i udowodnione w artykule uzasadnia dalsze badania nad poprawą trwałości narzędzi, natomiast ze względu na dodatkowe koszty wynikające z nakładania powłok, warstwy te powinny być szczególnie stosowane do narzędzi przeznaczonych do kucia precyzyjnego, gdzie wysoka jakość i precyzja wymiarowo-kształtowa wyrobów kutych jest bardzo istotna[3].



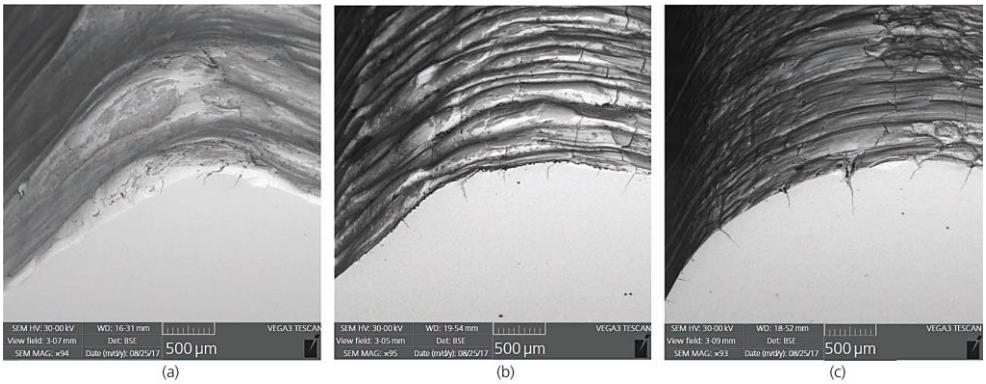
Rys. 56 Zestawienie wyników zużycia objętościowego obliczonego na podstawie odkuwek dla obu wkładek matrycowych: (a) w całym obszarze wnęki i (b) w analizowanym obszarze A i B oddzielnie [4].

W pracy [12] przedstawiono wyniki dotyczące porównania **warstw hybrydowych** typu CrN oraz TiCrAlN oraz wytworzonych na warstwach azotowanych. Zachowanie się warstw w warunkach eksploatacyjnych opisano na podstawie badań metalograficznych, makro- i mikroskopowych LM, SEM oraz badań mikrotwardości analizowanych obszarów. Badania makroskopowe wykazały, że kluczowym czynnikiem odpowiedzialnym za wytrzymałość warstwy hybrydowej narzędzia jest charakter pękania naniesionej powłoki. Wpływ pękania zmęczeniowego na zużycie matrycy z powłoką CrN potwierdzono pomiarami wykonanymi skanerem optycznym. Stwierdzono, że warstwa hybrydowa z powłoką TiCrAlN wykazuje lepsze parametry eksploatacyjne. Zużycie narzędzi z takimi powłokami jest dwukrotnie mniejsze niż w przypadku narzędzi tylko azotowanych. Przedstawione wyniki dowodzą, że trwałość można znacznie zwiększyć poprzez świadomy dobór warstw hybrydowych.

Wielokrotnie podejmowano również próby zwiększania przydatności narzędzi do pracy, poprzez zastosowanie napawania regeneracyjnego. Praca [5] przedstawia wnioski dotyczące możliwości zastosowania napawania oraz późniejszego procesu azotowania tych warstw napawanych. Przedstawione wyniki dotyczą porównania narzędzi napawanych, azotowanych oraz napawanych i azotowanych. Analizę przeprowadzono dla narzędzi do kucia koła czołowego ze stali C45, dla wybranych obszarów w których zużycie jest największe. Na Rys. 57 oraz Rys. 58 przedstawiono przykładowe badania SEM dla tych obszarów. Materiałem stosowanym do napawania był Robotool 46 [5].



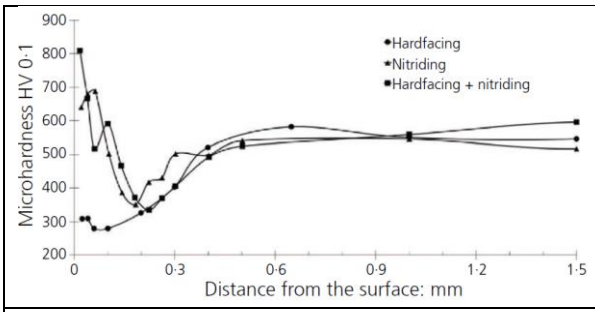
Rys. 57 Analiza SEM - a) matryca napawana, b) matryca azotowana, c) matryca napawana i azotowana [5].



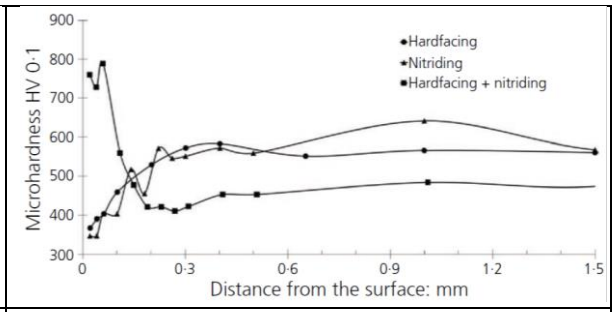
Rys. 58 Analiza SEM - a) matryca napawana, b) matryca azotowana, c) matryca napawana i azotowana [5].

Prezentowane narzędzia zostały poddane normalnej eksploatacji w warunkach przemysłowych[5]. Po odkuciu 7000 szt. odkuwek zostały poddane dokładnym badaniom i analizie. Jak już wspomniano wcześniej, w przypadku kucia odkuwki osiowosymetrycznej koła czołowego ze stali C45, mamy do czynienia z typowymi mechanizmami zużycia. Pojawiająca się już w początkowym etapie siatka pęknięć zmęczenia cieplnomechanicznego, rozwija się w miarę wzrostu liczny odkuwek. Powierzchnia narzędzi traci swoją stabilność (w przypadku warstw azotowanych) i ulega odpuszczaniu / mięknięciu w przypadku narzędzi w których nie stosowano azotowania. Pojawia się deformacja plastyczna warstwy wierzchniej (Rys. 57a) i na skutek tego

warstwa wierzchnia narzędzi podlega procesowi zintensyfikowanego zużycia ściernego. Na powierzchni narzędzi możemy zaobserwować cienką warstwę tlenków (z materiału odkuwki), która w sposób ciągły nalepia się na powierzchnię, a potem na skutek tarcia powoduje zwiększone zużycie ścierne - kruszy się tworząc bruzdy i zagłębienia w procesie kucia. Efekt odziaływania wszystkich mechanizmów obecnych procesie kucia widoczny jest na Rys. 57 oraz Rys. 58. Skutek wpływu wysokiej temperatury odkuwki odziaływującej w kontakcie z narzędziem możemy zaobserwować na wykresach poniżej – (Rys. 59) – twardość w stanie początkowym na przekroju dla 3 wariantów stanu warstwy wierzchniej: napawana, azotowana oraz napawana i azotowana) oraz Rys. 60 (twardości dla wybranych obszarów z Rys. 57 oraz Rys. 58) [5].



Rys. 59 Porównanie mikrotwardości w obszarze A (Rys. 57) analizowanych matryc[5]



Rys. 60 Porównanie mikrotwardości w obszarze B (Rys. 58) analizowanych matryc[5]

Porównanie mikrotwardości przedstawione na Rys. 59 wskazuje na wyraźne różnice w odporności poszczególnych narzędzi na cykliczne odziaływanie podwyższonej temperatury. Najniższą odporność temperaturową wykazywała napawana matryca, która została odpuszczona do głębokości około 0,4 mm, a jej twardość spadła do 300 HV 0,1. W tych samych warunkach narzędzie tylko azotowane również utraciło stabilność warstwy dyfuzyjnej – widoczny wyraźny spadek twardości w porównani z warunkami początkowymi. Nie jest to jednak całkowita utrata stabilności, ponieważ matryca częściowo zachowała efekt podwyższonej twardości bezpośrednio pod powierzchnią, gdzie twardość wynosiła 700 HV 0,1 na głębokości 0,1 mm. Matryca wykonana w technologii hybrydowej łączącej napawanie i azotowanie wykazywała najwyższą odporność na działanie zmiennych obciążeń cieplnych, mimo że odnotowano również spadek twardości (o ok. 200 HV mniej) do głębokości 0,4 mm. Jednak końcowy stan matrycy, szczególnie bezpośrednio przy powierzchni, gdzie twardość utrzymuje się na poziomie 850 HV, wskazuje na jej wystarczającą odporność na obciążenia termiczne. Podsumowując wyniki otrzymane w tej pracy [5] możemy stwierdzić, że azotowanie poprawia odporność narzędzi do kucia na gorąco, ponieważ opóźnia zużycie ścierne i efekt odpuszczania warstwy wierzchniej. Warstwa hybrydowa łącząca napawanie i azotowanie wykazuje największy efekt poprawy trwałości, podnosi odporność na pękanie zmęczeniowe poprzez ograniczenie wzrostu pęknięć oraz zwiększa odporność na zużycie ścierne i odkształcenia plastyczne dzięki zachowaniu warstwy o podwyższonej twardości bezpośrednio przy powierzchni w całej matrycy cały czas pracy. Napawanie drutem proszkowym jest skuteczną metodą regeneracji matryc kuźniczych i stanowi doskonałe podłoże do procesu azotowania w celu tworzenia hybrydowych warstw nowej generacji, łączących napawanie i azotowanie[5].

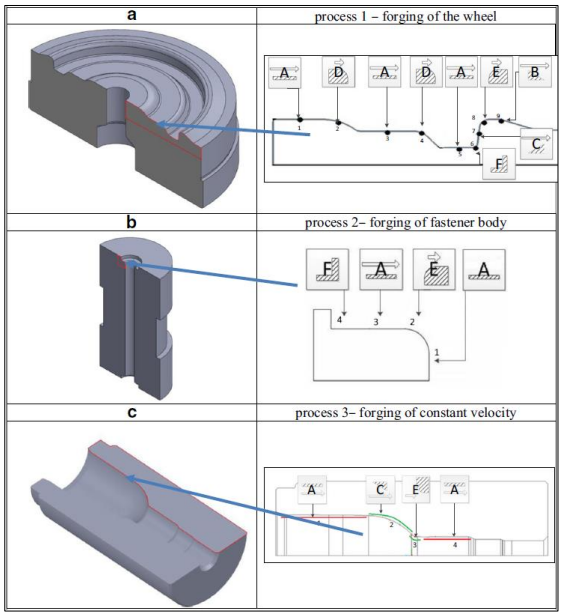
Zagadnienie 3: Wspomaganie procesów modelowania i prognozowania zjawisk.

Określenie wpływu wybranych czynników i zjawisk na poszczególne mechanizmy zużycia narzędzi kuźniczych jest niezwykle trudne. Podobnie jak i wszelkie próby modelowania tych zjawisk. Jest ich dużo a bezpośrednie powiązania i korelacje miedzy nimi nie są w żaden sposób opisane. Pewnym kluczem w usystematyzowaniu zapisów i ewentualnym wykorzystaniu aplikacyjnym było stworzenie systemu ekspertowego wspomagającego ocenę zużycia narzędzi kuźniczych [11] oraz inne. Zadanie było bardzo trudne i wymagało wnikliwych analiz stanu warstwy wierzchniej bardzo dużej liczny narzędzi z różnych procesów kucia. Wyniki

analiz, pomiarów i obserwacji były gromadzone w postaci stabelaryzowanej (opis wielkości matematycznych charakteryzujący stan warstwy wierzchniej oraz dane procesu kucia). Dane te pozwoliły na zbudowanie systemu ekspertowego.

W pracy [11] przedstawiono budowę systemu ekspertowego na podstawie tworzonego przeze mnie opisu oraz analiz narzędzi po odkuciu różnej liczny odkuwek. Budowa systemu była również wspomagana wynikami modelowania MES oraz innymi.

W celu stworzenia opisu stanu warstwy wierzchniej konieczne było wytypowanie charakterystycznych (kształtowo / geometrycznie) obszarów [14] dla różnych narzędzi kuźniczych – w pracy przedstawiono trzy przykładowe procesy oraz narzędzia w nich stosowane (Rys. 61).



Rys. 61 Model narzędzia i przekroje ze schematycznym podziałem na obszary i kształty elementarne dla wkładki matrycowej stosowanej w kuciu: koło, zaczepu oraz przegubu homokinetycznego [11].

Danymi podstawowymi w zakresie analizy wybranych narzędzi do kucia były trzy parametry: parametry narzędzia (matrycy), parametry materiału podstawowego, parametry procesu kucia.

Z punktu widzenia rozpatrywanego problemu najbardziej istotnymi informacjami o narzędziu są: właściwości mechaniczne (np. twardość, granica plastyczności), właściwości tribologiczne, właściwości termiczne (np. przewodnictwo cieplne, ciepło właściwe, moduł w funkcji temperatury, rozszerzalność cieplna) oraz inne właściwości będące pochodnymi składu chemicznego i wzmocnienia materiału; jednak najbardziej reprezentatywnym parametrem, który można kontrolować, jest początkowa twardość narzędzi. Analiza literatury potwierdza, że w różnych obszarach matryc do kucia na gorąco dominują różne mechanizmy zużycia Rys. 2. Na przykład w ostrym narożu wewnętrznym występuje zmęczenie mechaniczne, na płaskiej powierzchni zmęczenie cieplne i zużycie ścierne itp. Do celów analizy każda powierzchnia matrycy jest opisana przez różnorodne kształty geometryczne, w przypadku których można oczekiwać różnych mechanizmów zużycia. Wyróżniono sześć podstawowych kształtów (A – F).

A - płaska powierzchnia stykowa matrycy, miejsce kontaktu z odkuwką

D – powierzchnia lub promień po którym materiał odkuwki spływa po swoim zboczu - powyżej 10 °;

F - wewnętrzny promień naroża

C - powierzchnia nośna we wnęce matrycy;

E - powierzchnia zaokrąglonego , naroże

B - powierzchnia na wyjściu z mostka matrycy.

Danymi wejściowymi charakteryzującymi dany proces w odniesieniu dla konkretnego narzędzia były: kształt, obszar, temperatura, twardość, czas kontaktu z materiałem odkuwki, naciski, droga tarcia oraz smarowanie. Danymi wyjściowymi była tabelaryczny opis procentowego udziału poszczególnych mechanizmów zużycia: zmęczenia cieplnomechanicznego, zużycia ściernego, odkształcenia plastycznego, pęknięć mechanicznych oraz liniowa wielkość zużycia. Przykład jednej z wielu kart dla narzędzi kuźniczych przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Fragment tabeli zawierającej wartości danych wejściowych i wyjściowych narzędzi – kucie koła czołowego [11].

Input data									Output data				
Number of forgings	Shape	Area	Temp [°C]	Hardness [HV]	Time [s]	Pressure [MPa]	Sliding distance	Lubrication	1 Thermo-mechanical fatigue	2 Abrasive wear	3 Plastic deformation	4 Mechanical fatigue	Wear [mm]
550	A	1	1150	1100	1.068	960	15	Yes	1	0	0	0	0
550	D	2	1150	1100	1.068	640	9	Yes	1	0	0	0	0
550	A	3	1150	1100	1.068	650	5	Yes	0	0	0	0	0
550	D	4	1150	1100	1.068	520	10	Yes	0.8	0.2	0	0	0
550	A	5	1150	1100	0.540	528	1	Yes	1	0	0	0	0
550	F	6	1150	1100	0.532	528	1	Yes	0	0	0	0	0
550	C	7	1150	1100	0.554	560	2	Yes	0	0	0	0	0
550	E	8	1150	1100	0.558	500	8	Yes	0.6	0.4	0	0	0
550	B	9	1150	1100	0.532	120	5	Yes	1	0	0	0	0
1850	A	1	1150	1100	1.068	960	15	Yes	0.6	0.2	0.2	0	−0.2
1850	D	2	1150	1100	1.068	640	9	Yes	1	0	0	0	−0.04
1850	A	3	1150	1100	1.068	650	5	Yes	1	0	0	0	0
1850	D	4	1150	1100	1.068	520	10	Yes	1	0	0	0	−0.07
1850	A	5	1150	1100	0.540	528	1	Yes	1	0	0	0	0
1850	F	6	1150	1100	0.532	528	1	Yes	0	0	0	1	0
1850	C	7	1150	1100	0.554	560	2	Yes	1	0.05	0	0	−0.02
1850	E	8	1150	1100	0.558	500	8	Yes	0.33	0.33	0.33	0	−0.4
1850	B	9	1150	1100	0.532	120	5	Yes	1	0	0	0	−0.04
4300	A	1	1150	1100	1.068	960	15	Yes	0.4	0.4	0.2	0	−0.9
4300	D	2	1150	1100	1.068	640	9	Yes	0.7	0	0.3	0	−0.05
4300	A	3	1150	1100	1.068	650	5	Yes	1	0	0	0	0
4300	D	4	1150	1100	1.068	520	10	Yes	0.7	0.1	0.2	0	−0.05
4300	A	5	1150	1100	0.540	528	1	Yes	1	0	0	0	0
4300	F	6	1150	1100	0.532	528	1	Yes	0	0	0	1	0
4300	C	7	1150	1100	0.554	560	2	Yes	0.9	0.1	0	0	−0.03
4300	E	8	1150	1100	0.558	500	8	Yes	0.4	0.4	0.2	0	−1.6
4300	B	9	1150	1100	0.532	120	5	Yes	1	0	0	0	−0.07

6900	A	1	1150	1100	1.068	960	15	Yes	0.4	0.3	0.3	0	−1.9
6900	D	2	1150	1100	1.068	640	9	Yes	0.7	0	0.3	0	−0.06
6900	A	3	1150	1100	1.068	650	5	Yes	1	0	0	0	0
6900	D	4	1150	1100	1.068	520	10	Yes	0.7	0.1	0.2	0	−0.06
6900	A	5	1150	1100	0.540	528	1	Yes	1	0	0	0	−0.08
6900	F	6	1150	1100	0.532	528	1	Yes	0	0	0	1	0
6900	C	7	1150	1100	0.554	560	2	Yes	0.9	0.1	0	0	−0.04
6900	E	8	1150	1100	0.558	500	8	Yes	0.4	0.4	0.2	0	−2.1
6900	B	9	1150	1100	0.532	120	5	Yes	1	0	0	0	−0.09
9500	A	1	1150	1100	1.068	960	15	Yes	0.33	0.33	0.33	0	−2.5
9500	D	2	1150	1100	1.068	640	9	Yes	0.5	0.2	0.3	0	−0.3
9500	A	3	1150	1100	1.068	650	5	Yes	1	0	0	0	0
9500	D	4	1150	1100	1.068	520	10	Yes	0.7	0.1	0.2	0	−0.15
9500	A	5	1150	1100	0.540	528	1	Yes	1	0	0	0	−0.1
9500	F	6	1150	1100	0.532	528	1	Yes	0	0	0	1	0
9500	C	7	1150	1100	0.554	560	2	Yes	0.8	0.1	0.1	0	−0.2
9500	E	8	1150	1100	0.558	500	8	Yes	0.33	0.33	0.33	0	−2.7
9500	B	9	1150	1100	0.532	120	5	Yes	1	0	0	0	−0.12

Poszukując odpowiednich form reprezentacji wiedzy w systemie wykorzystującym wyniki symulacji komputerowych i wyniki analiz statystycznych (dane wejściowe), stwierdzono, że ze względu na charakter tych danych (wartości przybliżone) logika rozmyta jest formalnie najczęściej używanym narzędziem mającym zastosowanie w przetwarzaniu tego typu danych. Dokładny opis w pracy [11].

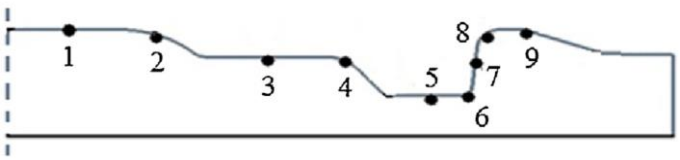
Zestaw reguł, przygotowany i zweryfikowany w środowisku Matlab, można następnie zapisać w bazie reguł systemu ekspertowego, którego silnik JESS został wzbogacony o moduł logiki rozmytej o nazwie FuzzyJToolkit. Takie podejście pozwala na poszerzenie bazy wiedzy o nowe materiały, typy matryc do kucia, parametry procesu itp. Pierwszy krok polega na utworzeniu zbioru danych zawierającego wyniki symulacji numerycznych porównanych z pomiarem rzeczywistej szybkości i rodzaju zużycia dla danego materiału matrycy oraz parametrów kucia. Uzyskany zbiór danych służy do tworzenia zestawu reguł i oceny modelu logiki rozmytej dla tego procesu. Uzyskany z Matlab plik FIS jest następnie tłumaczony na zestaw reguł CLP dla silnika wnioskowania JESS i importowany do bazy wiedzy systemu Sepek.

Analiza procesów zużycia, gromadzenie danych do budowy systemu ekspertowego pozwoliło, po kilkuletniej pracy na właściwe działanie systemu. Analizując pracę [11] można ją podsumować następująco. Przedstawiono koncepcję systemu ekspertowego do określania ilościowego udziału czterech głównych mechanizmów (zużycie ścierne, zmęczenie cieplno-mechaniczne, odkształcenie plastyczne i zmęczenie mechaniczne - pękanie) i ich wpływu na degradację narzędzi kuźniczych i utratę geometrycznego kształtu matrycy dla wybranego przemysłowego proces kucia na gorąco. W literaturze brakuje rozwiązań pozwalających na ocenę zużycia narzędzia w procesach kucia i prognozowanie jego żywotności. Każda matryca została podzielona na podstawowe geometrie, w których dominują w różne mechanizmy zużycia. Dane z modelowania elementów skończonych zostały przypisane do każdej podstawowej geometrii. Wybór logiki rozmytej do tworzenia reprezentacji wiedzy był podyktowany tym, że niektóre zmienne były z jednej strony obciążone błędem pomiaru (np. temperatura) lub obliczeniowym (np. ciśnienie/naciski), z drugiej strony inne zmienne miały charakter jakościowy (np. mechanizm uszkodzenia), w związku z czym dostarczana przez nie wiedza była niepewna. Wprowadzono metodę mechanizmów uszkodzenia, w której każdy mechanizm zużycia jest reprezentowany przez liczbę z zakresu od 0 do 1. Zero oznacza brak analizowanego mechanizmu zużycia, a 1 symbolizuje wystąpienie jedynego analizowanego mechanizmu. Suma liczb przypisanych wszystkim mechanizmom uszkodzeń wynosi 1. Bardzo szczegółowe analizy wszystkich procesów dowodzą, że wszystkie mechanizmy uszkodzeń, takie jak zmęczenie termomechaniczne, zużycie ścierne, odkształcenie plastyczne, pękanie mechaniczne, występują jednocześnie od samego początku procesu i w danych warunkach mogą być tylko mniej lub bardziej intensywne. Na początku procesu dominującym mechanizmem uszkodzenia jest zmęczenie cieplno-mechaniczne, a wraz z wydłużaniem czasu pracy nasila się zużycie ścierne i odkształcenia plastyczne. Wybór logiki rozmytej do stworzenia reprezentacji wiedzy był podyktowany tym, że niektóre zmienne były niepewne. Co

więcej, z faktu pozyskania wiedzy empirycznie wynika niekompletność tej wiedzy (prowadzone obserwacje dotyczyły tylko określonych punktów badanego obszaru). W tej sytuacji wydawało się naturalne użycie logiki przybliżonej lub logiki rozmytej do stworzenia reprezentacji wiedzy dla budowanego systemu. Wybór logiki rozmytej był również podyktowany istnieniem sprawdzonych narzędzi do jej realizacji.

Artykuły [3, 11] dotyczą możliwości zastosowania sztucznych sieci neuronowych (SSN) w systemie wspomagania decyzji do analizy i prognozowania trwałości narzędzi stosowanych w przemysłowych procesach kucia matrycowego na gorąco po różnych wariantach obróbki powierzchni stosowanych w celu zwiększenia trwałości. W obrębie tych publikacji zajmowałem się analizą przyczyn oraz zjawisk i mechanizmów zużycie występujących w warstwie wierzchniej narzędzi kuźniczych. System przedstawiony w artykule został opracowany w oparciu o rozbudowaną zbiorczą bazę narzędzi - stempli zastosowanych w II operacji w procesie kucia pokrywy. Do reprezentacji wiedzy w systemie wykorzystano sztuczne sieci neuronowe. Zbiór danych użyty do nauki sieci zawierał **750 przykładów** uczenia się pochodzących z przeprowadzonych badań eksperymentalnych (analizy mikroskopowe, badania stanu warstwy wierzchniej itd. oraz symulacji komputerowych. Uzyskane wyniki wskazują, że parametryzując czynniki istotne dla procesu kucia można stworzyć system oceniający procentowy udział typowych mechanizmów niszczących (zmęczenie termomechaniczne, zużycie mechaniczne, ścierne i odkształcenie plastyczne) oraz obliczający wartości geometrycznych ubytków narzędzi. Otrzymane przeze mnie i współautorów wyniki pozwoliły opracować wcześniej dwa takie systemy, w których pierwszy wykorzystywał formalizm logiki rozmytej, a drugi sztuczne sieci neuronowe. Jak wykazano we wcześniejszych badaniach, najlepsze wyniki uzyskano dla SSN, gdzie baza danych obejmowała większość procesów kucia wykonywanych w kuźniach matrycowych. W odróżnieniu od dwóch pierwszych systemów proponowana wersja systemu dostarcza dodatkowych informacji w postaci korelacji uzyskanych wyników strat i procentowego udziału mechanizmów niszczących z różnymi wariantami zastosowanych obróbek powierzchni narzędzi. Opracowany system wspomagania decyzji jest doskonałym narzędziem sztucznej inteligencji, które z powodzeniem może wspierać pracę inżyniera procesu w doborze optymalnych warunków pracy narzędzi kuźniczych. Dlatego w pełni uzasadnione i celowe jest rozwijanie tego typu informatycznych systemów wspomagania decyzji, które pozwalają na analizę i prognozowanie trwałości narzędzi kuźniczych w celu zwiększenia ich trwałości.

W pracy [17] przedstawiono projekt i implementację modelu automatów komórkowych (CA), przewidującego uszkodzenia narzędzi kuźniczych na skutek zmęczenia materiału. Reguły przejścia dla modelu zostały opracowane na podstawie znanych informacji dotyczących inicjacji i propagacji pęknięć. Współczynniki w modelu wyznaczono odwrotną analizą testów zmęczenia cieplnego przeprowadzonych na symulatorze Gleeble 3800 oraz w specjalnym urządzeniu z wirującą tarczą. Model CA został połączony z konwencjonalnym modelem zużycia ściernego. Warstwy ogniwa w przestrzeni CA, które stykają się z obrabianym przedmiotem, były usuwane sukcesywnie po zużyciu ściernym narzędzia. Model CA został połączony z programem elementów skończonych (FE), który symuluje naprężenia w narzędziach podczas kucia. Ponieważ to wieloskalowe podejście okazało się niezwykle wymagające, jeśli chodzi o czasy obliczeniowe, przygotowano wydajną implementację modelu na heterogenicznych architekturach sprzętowych. Wyniki symulacji porównano z danymi przemysłowymi i potwierdzono dobre zdolności predykcyjne modelu. Walidacja modelu odbyła się dzięki wynikom badań prowadzonych przeze mnie. W charakterystycznych miejscach na narzędziu wykonywana była analiza parametrów geometrycznych pęknięć zmęczeniowych dla narzędzi po wykonaniu odpowiedniej liczny odkuwek. Wybór miejsc oraz przykładowe wyniki przedstawiono na Rys. 62 oraz w tabeli 4 [17].

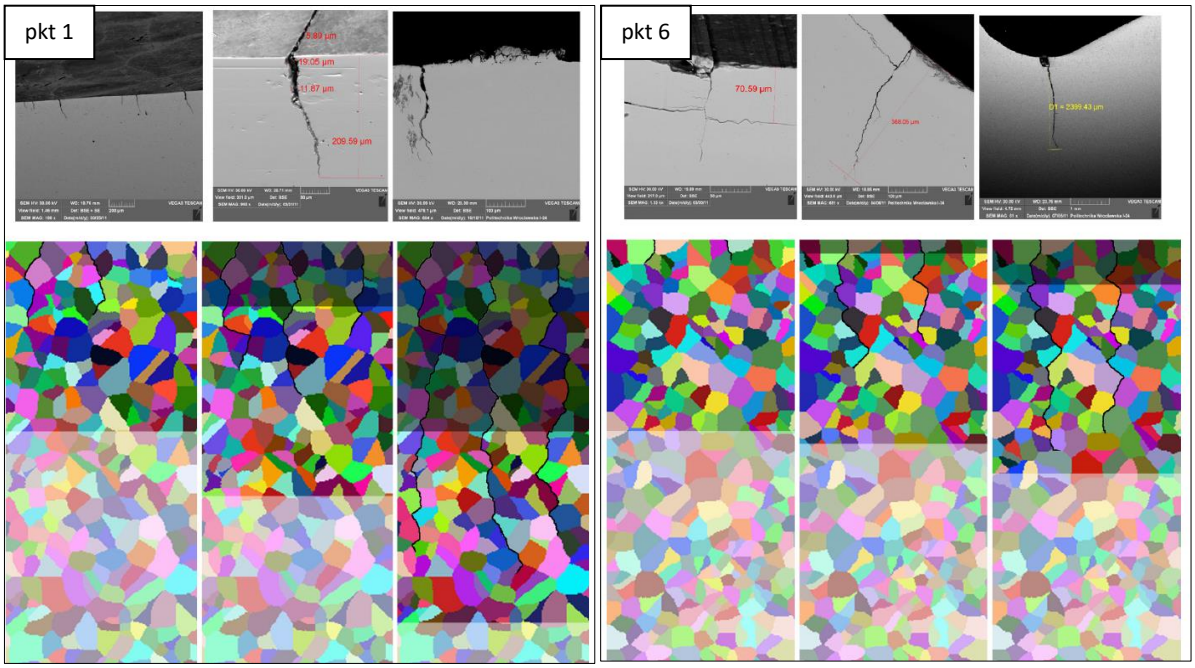


Rys. 62 Miejsca analiz dla walidacji modelu (CA) – matryca do kucia koła czołowego – schemat.

Tabela 4. Przykładowe wyniki analizy geometrii pęknięć zmęczeniowych dla różnej liczby odkutych odkuwek[17].

Point	Number of forged parts				
	550	1850	4300	6900	9500
1	160–180	200–2200	250–450	500–550	350
2	90–200	400–500	400–450	450	550–600
3	170	170–280	300–450	450–550	300–600
4	170	240–400	100–400	550	150–250
5		150			150
6	100	370	2400	2800	2300
7		50–200			
8	220	160–280	300–400	300–350	300–400
9	100–150	70	50		

Dokonano wielu obserwacji po analizach mikroskopowych wykonanych w różnych punktach po odkuciu różnej liczby odkuwek. Punkt 1 (Rys. 63) ma najdłuższy kontakt z obrabianym przedmiotem i widoczne są w nim mikropęknięcia spowodowane zmęczeniem materiału. Głębokość pęknięć waha się w przedziale 50–150 mm. Punkt 2 znajduje się na przejściu między płaską częścią a promieniem. Również w tym miejscu widoczne są mikropęknięcia spowodowane zmęczeniem cieplnym. Kształt pęknięć jest nieregularny, a niektóre rozchodzą się równolegle do powierzchni. Głębokość pęknięć waha się w przedziale 150–300 mm. Punkt 3 matrycy styka się z obrabianym przedmiotem w końcowej fazie odkształcenia, dlatego intensywność pęknięć jest niewielka. Głębokość pęknięcia w punktach 4 i 5 jest również niewielka, poniżej 100 mm. Punkt 6 (Rys. 62) jest poddawany intensywnemu cyklicznemu obciążeniu. Średnie naprężenie obliczone w tym punkcie przez kod FE jest dodatnie. Na mikrografii w punkcie 6 widoczne są duże nieregularne pęknięcia, często równoległe do powierzchni. Ponadto punkty 6 i 7 poddawane są intensywnemu momentowi zginającemu. Głębokość pęknięć w punkcie 6 sięga 2400 µm.



Rys. 63 Mikrografie przykładowych wyników po kuciu 550, 1850 i 9000 sztuk od lewej do prawej (góra) oraz wyniki obliczeń CA (dół) otrzymane dla wybranych charakterystycznych miejsc na narzędziach kuźniczych. Wyniki dla punktu 1 oraz 6 [17].

Punkt 8 znajduje się na promieniu i w tym miejscu zaobserwowano intensywne odkształcenie plastyczne, którego nie uwzględnia model CA. Zginanie pęknięć jest spowodowane płynięciem materiału odkuwki do kołnierza. Naciski są bardzo niskie w punkcie 9 kontakt z przedmiotem obrabianym jest krótki. Nie zaobserwowano żadnych intensywnych pęknięć, a warstwa azotków jest nadal dobrze widoczna na mikrofotografii dla tego punktu. Patrząc na wyniki symulacji można wyciągnąć ogólny wniosek, że poza punktem 8 na model przewidywał inicjację i propagację pęknięć z dość dobrą dokładnością jakościową. Wyniki ilościowe

wskazują na pewne rozbieżności, co oznacza, że potrzeba więcej danych do właściwej identyfikacji parametrów modelu i prawdopodobnie należy uwzględnić inne niż ścierne mechanizmy zużycia i zmęczenia. W punktach, w których dominuje zużycie ścierne (punkt 1), uzyskano zgodność ilościową. Głębokość pęknięć wyniosła 170, 210 i 350 mm na podstawie mikrofotografii oraz około 180, 250 i 300 mm odpowiednio dla odkuwek 550, 1850 i 6900. Wyniki te uzyskano, biorąc pod uwagę usuwanie materiału z powierzchni na skutek zużycia ściernego. Model zużycia ściernego dał wyniki bardzo zbliżone do pomiaru w punkcie 1. Punkt 6 charakteryzuje się niskim zużyciem ściernym (poza końcowym etapem odkształcenia brak kontaktu narzędzia z odkuwką) oraz dużymi naprężeniami rozciągającymi. W konsekwencji zaobserwowano znacznie większą głębokość pęknięć tj. na poziomie 100, 370 i 2400 µm od mikrofotografii oraz na poziomie 100, 300 i 450 mm odpowiednio dla odkuwek 550, 1850 i 6900. Należy podkreślić, że w tym przypadku obliczenia CA nie były możliwe dla liczby odkuwek przekraczającej 4000. Pęknięcia przeszły przez całą domenę obliczeniową. Zwiększenie tej domeny spowodowałoby wydłużenie czasu przetwarzania. Jeśli chodzi o punkt 8, to ani zużycie ścierne w pracy, ani zmęczenie nie zostały prawidłowo przewidziane w niniejszej pracy. Ta część matrycy znajduje się na mostku i następuje odkształcenie plastyczne materiału, czego nie uwzględniają dwa wspomniane modele.

Jak przedstawiono na podstawie prac [3,11,17] oraz innych celowym i niezwykle istotnym zagadnieniem jest wspomaganie procesów tworzenia zarówno systemów ekspertowych jak i innych systemów wspomagających procesy prognozowania trwałości narzędzi. Podobnie rozwijanie możliwości zastosowania automatów komórkowych (CA) w procesach przewidywania uszkodzeń narzędzi kuźniczych oraz inne.

5.4. Uzyskane wyniki naukowe oraz wykorzystanie w praktyce (wyniki utylitarne)

1. Prowadzone badania wykazały istotny wpływy średniej temperatury w warstwie wierzchniej narzędzi oraz jej amplitudy w procesie kucia na podatność na odpuszczanie / mięknięcie. Wzrost temperatury w warstwie wierzchniej przyspiesza kinetykę przemian (odpuszczanie) co w konsekwencji powoduje wzrost prędkości zużycia warstwy wierzchniej.
2. W świetle prezentowanych wyników badań oraz prowadzonych nadal można stwierdzić, że pasmowo występujące wydzielenia węglikowe w stalach narzędziowych do pracy na gorąco, stosowanych na narzędzia kuźnicze, w żaden sposób nie zmniejszają jej trwałości. Jak wykazały analizy w warunkach przemysłowych jest wręcz odwrotnie.
3. Byłem współtwórcą stanowiska oraz uczestniczyłem w badaniach zmęczenia cieplnego metodą „wirującego krążka" Na podstawie otrzymanych wyników można wnioskować, że największa liczba pęknięć w prowadzonych badaniach na odcinku 1mm występowała gdy temperatura górna próby wynosiła 650^{o}C, natomiast największa ich głębokość w temperaturach wyższych – 750^{o}C (lecz liczba pęknięć na 1mm była ponad dwukrotnie mniejsza). Uogólniając – w analizowanym przedziale temperaturowym wyższa górna temperatura cyklu zmęczeniowego ma większy wpływ na głębokość pęknięć, natomiast niższa temperatura powoduje zwiększenie ilości pęknięć na powierzchni stali narzędziowych do pracy na gorąco.
4. Szybkość zmian występowania poszczególnych mechanizmów zmienia się wraz ze zmianą parametrów procesu i zależy od miejsca w narzędziu. Jak wskazują otrzymane wyniki analizy zmian twardości w funkcji temperatury i czasu kucia, temperatura ma znacznie większy wpływ niż czas na zmianę twardości i jest to zgodne z modelem teoretycznym.
5. Zwiększenie prędkości zużycia ściernego następuje na skutek spadku twardości. Z kolei obniżenie temperatury powierzchni narzędzi poprzez zastosowanie chłodzenia/smarowania pozwala zmniejszyć wielkość odkształcenia plastycznego w warstwie wierzchniej, lecz mamy wtedy do czynienia ze zwiększeniem amplitudy cyklu temperaturowego zmęczenia cieplnego i wzrostem zużycia w procesach

tarcia ze względu na osłabiony materiał w warstwie wierzchniej w procesie zmęczenia cieplnomechanicznego.

6. Obecność tlenków żelaza pochodzących z materiału odkuwki w znaczący sposób zmienia i intensyfikuje proces zużycia ściernego. Przechłodzone do temperatury poniżej 200^{o}C mają twardość 951 HV0,01 do 1347 HV0,01 i wielkość cząstek 0,5µm do 150µm. W procesie kucia i kontaktu z odkuwką mogą powodować zjawisko rozklinowywania pęknięć zmęczeniowych.
7. Namagnesowanie stali narzędziowych do pracy na gorąco o wielkości indukcji magnetycznej na poziomie 1,6-3,7 mT ma istotny wpływ na zmianę mechanizmów i wielkości zużycia.
8. Badania eksploatacyjne w procesie kucia na gorąco wykazały różnice w zużyciu, potwierdzając podatność warstw azotków γ' na pękanie zmęczeniowe (zmęczenie cieplnomechaniczne) ze względu na podwyższoną twardość i uporządkowaną strukturę krystalograficzną w regularnej sieci.
9. Stosowanie warstw hybrydowych CrN oraz TiCrAlN pozwala na zwiększenie trwałości narzędzi kuźniczych.
10. Stosowanie napawania regeneracyjnego oraz późniejszego azotowania w istotny sposób podnosi trwałość narzędzi w porównaniu do narzędzi nowych poddawanych procesowi azotowania.
11. Prowadzone badania mikroskopowe, analizy oraz pomiary pozwoliły na budowę bazy danych. Obejmowała ona zbiór informacji dotyczących analizowanych procesów kucia (ubytek materiału, naciski, droga tarcia, temp itp.) i zostały powiązane z częścią której byłem głównym wykonawcą analiz czyli powiązaniem z udziałem poszczególnych mechanizmów niszczących.
12. Powstały dzięki bazie danych system ekspertowy (dzięki pomocy zespołu AGH) umożliwia prognozowanie trwałości narzędzi kuźniczych oraz poza wartością zużycia ocenić udział poszczególnych mechanizmów niszczących.
13. Logika rozmyta oraz sztuczne sieci neuronowe są formalnie najczęściej używanym narzędziem mającym zastosowanie w przetwarzaniu danych przybliżonych – analiza wyników badań mechanizmów niszczących narzędzia kuźnicze.
14. Celowym i bardzo ważnym aspektem prowadzonych badań jest wspomaganie procesów prognozowania trwałości narzędzi kuźniczych przy pomocy automatów komórkowych (CA).

W ramach cyklu publikacji monotematycznych, sformułowałem także następujące wnioski utylitarne:

1. Wykonane badania, analiza i wnioski nad wpływem obecności tlenków żelaza (zgorzeliny) w przestrzeni roboczej narzędzi kuźniczych w sposób przejrzysty mogą zostać wykorzystane w warunkach przemysłowych. Kontrola obecności zgorzeliny, jej ilości w istotny sposób może wpłynąć na trwałość narzędzi.

2. Prowadzone badania namagnesowania narzędzi dały jednoznaczną odpowiedź co do jego negatywnego wpływu na przebieg zmian procesów zużycia i powinny być ściśle monitorowane, a w razie konieczności poddane procesowi rozmagnesowania.

3. Zbudowany przy moim wyraźnym udziale system ekspertowy do prognozowania narzędzi może zostać wprowadzony i stosowany w warunkach przemysłowych jako narzędzie do prognozowania zużycia oraz pośrednio do wspomagania modelowania dla konstruktorów oraz inżynierów.

4. Logika rozmyta i sztuczne sieci neuronowe są doskonałym narzędziem, które z powodzeniem może wspierać pracę inżyniera procesu w doborze optymalnych warunków pracy narzędzi kuźniczych. Dlatego w pełni uzasadnione i celowe jest rozwijanie tego typu informatycznych systemów wspomagania decyzji, które pozwalają na analizę i prognozowanie trwałości narzędzi kuźniczych w celu zwiększenia ich trwałości.

5. Prowadzone przeze mnie badania, opracowana metodyka oraz wnioski pozwalają zrozumieć jak istotnym parametrem w procesach kucia jest temperatura. Zbyt duża jej amplituda, zbyt duża średnia

temperatura narzędzi to czynniki intensyfikujące procesy zużycia. Wykorzystanie tej wiedzy przez inżynierów i konstruktorów to istotny aspekt zwiększania trwałości narzędzi kuźniczych.

6. W ramach prowadzonych prac badawczych przedstawiłem możliwość stosowania warstw hybrydowych wytwarzanych w procesie azotowania dyfuzyjnego i kolejno metod PVD oraz metod napawania regeneracyjnego wraz z późniejszym procesem azotowania.

6. Współpraca z innymi jednostkami naukowymi

Wnioskodawca współpracował również z wieloma instytucjami naukowymi w ramach prowadzonych badań oraz realizowanych projektów badawczych.

W ramach współpracy z **Technische Universität Dresden** Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik Holbeinstr. 301307 Dresden, w 2016 roku zrealizowano badania pt.: Zastosowanie modelowania numerycznego do określenia i analizy przyczyn powstawania wad dla wybranej odkuwki typu rozwidlonego. Ser. SPR nr 153, 27stron, oraz wiele innym analiz oraz opracowań w ramach prowadzonych wspólnie prac. Przykładem może być również publikacja:

1. Zbigniew Gronostajski, Marek Hawryluk, Joanna Jakubik, Sylwester Kubiciel, Bartłomiej Nowak, Maciej Zwierzchowski: Zastosowanie symulacji numerycznej do określenia przyczyn powstawania wad na przykładzie wybranych odkuwek matrycowych = Application of numerical simulation to determine the causes of defects on the example of selected die forgings. Hutnik-Wiadomości Hutnicze. 2016, R. 83, nr 3. W dokumentacji dołączono deklarację potwierdzającą prowadzoną do dziś współpracę.

Od 2008 roku wraz z **Technische Universität Bergakademie Freiberg** w ramach współpracy organizowane są konferencje naukowe „AutoMetForm" - Advanced Metal Forming Processes in Automotive Industry. Są to 3 dniowe, cykliczne konferencje organizowane co 2 lata. 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. Ponadto od 2016 roku do współorganizatorów dołączył **Fraunhofer IWU – Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology Chemnitz**, jako współorganizator cyklu konferencji.

W ramach zrealizowanego projektu R15 023 03 - Kształtowanie stopów miedzi z wykorzystaniem zjawiska nadplastyczności. Prowadzono ścisłą współpracę między innymi z **Instytutem Metalurgii Żelaza w Gliwicach (obecnie Sieć Badawcza Łukasiewicz).** Efektem współpracy były raporty, prezentacje oraz publikacje, np. Zbigniew Gronostajski, Marek Hawryluk, Roman Kuziak*, Krzysztof Radwański*, Tomasz Skubiszewski, Maciej Zwierzchowski: The equal channel angular extrusion process of multiphase high strength aluminium bronze = Proces równokanałowego wyciskania kątowego wysokowytrzymałych wielofazowych brązów aluminiowych / Z. Gronostajski [i in.]. Archives of Metallurgy and Materials. 2012, vol. 57, nr 4.

Instytut Metalurgii Żelaza w Gliwicach jest jednostką badawczą z którą były i są realizowane wspólne projekty oraz badania i analizy, między innymi: POIR.04.01.04-00-0088/15 „Opracowanie technologii tłoczenia słupka B ze stopów aluminium serii 7xxx" - (główny wykonawca projektu B+R) oraz obecnie realizowane: TECHMATSTRATEG1/348491/10/NCBR/2017 „Energooszczędna technologia obróbki cieplno- plastycznej odkuwek z wykorzystaniem ciepła kucia" - (główny wykonawca projektu B+R) oraz POIR.01.01.01-00-1243/19 Opracowanie energooszczędnej i

wysokowydajnej technologii kucia iglic do rozjazdów kolejowych o podwyższonych właściwościach eksploatacyjnych – inżynier materiałowy.

W ramach zrealizowanego projektu POIG.01.03.01-02-161/09 „Kompleksowy system ekspertowy do optymalizacji trwałości narzędzi w procesach kucia" - (główny wykonawca projektu B+R) rozpoczęto współpracę z Pracownią Informatyki na **Wydziale Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej Akademii Górniczo – Hutniczej**. Współpraca w ramach prowadzonych zadań polegała na stworzeniu Systemu Ekspertowego „Sepek" w ramach projektu, który w późniejszych latach był jeszcze rozbudowywany o dalsze informacje i dane z procesów oraz wyniki uzyskiwane z innych projektów np.: PBS2/A5/37/2013 „Zastosowanie zaawansowanych warstw hybrydowych typu PN+PVD dedykowanych do zwiększenia trwałości narzędzi w procesach kucia.". W ramach współpracy powstało wiele raportów, opracowań, prezentacji i artykułów, między innymi:

1. Zbigniew Gronostajski, Marek Hawryluk, Adam Niechajowicz, Marcin Marciniak, Maciej Zwierzchowski, Sławomir Polak, Anna Adrian*, Barbara Mrzygłód*, Jarosław Durak*: The expert system for forging processes / Z. Gronostajski [i in.]. W: Advanced metal forming processes in automotive industry : the 3st International Lower Silesia - Saxony Conference AutoMetForm, 13-16 May 2012, Wroclaw, Poland : the conference materials / ed. by Zbigniew Gronostajski ; Wrocław University of Technology, Technische Universität Bergakademie Freiberg.

2. Barbara Mrzygłód*, Marek Hawryluk, Zbigniew Gronostajski, Andrzej Opaliński*, Marcin D. Kaszuba, Sławomir Polak, Paweł Widomski, Jacek Ziemba, Maciej Zwierzchowski: Durability analysis of forging tools after different variants of surface treatment using a decision support system based on artificial neural networks / Barbara Mrzygłód [i in.]. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2018, vol. 18, nr 4,

3. 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 / Z. Gronostajski [i in.]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016, vol. 82

W ramach wspomnianego projektu POIG.01.03.01-02-161/09 realizowano również współpracę z (strona w projekcie) **Instytutem Obróbki Plastycznej w Poznaniu.** W ramach współpracy powstało wiele opracowań, publikacji. Podczas realizacji tego projektu powstał wspomniany już wcześniej system ekspertowy Sepek.

Realizacja projektu PBS2/A5/37/2013 „Zastosowanie zaawansowanych warstw hybrydowych typu PN+PVD dedykowanych do zwiększenia trwałości narzędzi w procesach kucia." - (główny wykonawca projektu B+R) pozwoliła na nawiązanie współpracy z **Instytutem Technologii Eksploatacji w Radomiu**. W ramach współpracy powstało wiele opracowań, raportów oraz artykułów. Między innymi:

1. 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 / Z. Gronostajski [i in.]. Metalurgija = Metallurgy. 2015, vol. 54, nr 4

2. Zbigniew Gronostajski, Jerzy Smolik*, Maciej Zwierzchowski, Marek Hawryluk, Marcin Marciniak: Odporność na zmęczenie cieplne stali WCL i WCLV z zastosowaniem powłok

hybrydowych = Thermal fatigue resistance of steel H11/H13 with application of hybrid coating / Zbigniew Gronostajski [i in.]. Hutnik-Wiadomości Hutnicze. 2014, R. 81, nr 8

3. Zbigniew Gronostajski, Marcin D. Kaszuba, Marek Hawryluk, Maciej Zwierzchowski, Tomasz Będza, Jerzy Smolik*: Wpływ warstw hybrydowych na trwałość narzędzi do kucia na gorąco = Influence of hybrid layer on the durability of tools for hot forging / Zbigniew Gronostajski [i in.]. Przegląd Mechaniczny. 2013, R. 72, nr 10

4. Zbigniew Gronostajski, Marek Hawryluk, Marcin D. Kaszuba, Marcin Marciniak, Jerzy Smolik*, Maciej Zwierzchowski: Poprawa trwałości narzędzi do kucia na gorąco przez zastosowanie warstw hybrydowych = Improving tool life for hot forging by the application of hybrid layers / Zbigniew Gronostajski [i in.]. Rudy i Metale Nieżelazne. 2013, R. 58, nr 11

Współpraca z **Katedrą Informatyki Stosowanej i Modelowania** na wydziale Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej **Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie** rozpoczęła się w 2011 i nadal trwa. W ramach współpracy realizowane były wspólne projekty np.:

1. TECHMATSTRATEG1/348491/10/NCBR/2017 „Energooszczędna technologia obróbki cieplnoplastycznej odkuwek z wykorzystaniem ciepła kucia”
2. INNOLOT/I/10/NCBR/2014 „Zaawansowane techniki wytwarzania przekładni lotniczych”
3. PBS2/A5/37/2013 „Zastosowanie zaawansowanych warstw hybrydowych typu PN+PVD dedykowanych do zwiększenia trwałości narzędzi w procesach kucia.”

W ramach tej współpracy powstało wiele interesujących rozwiązań technologicznych, raportów, opracowań oraz artykułów, np.:

1. Łukasz Rauch*, Adrian Chmura*, Zbigniew Gronostajski, Maciej Zwierzchowski, Maciej Pietrzyk*: Cellular automata model for prediction of crack initiation and propagation in hot forging tools / Łukasz Rauch [i in.]. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2016, vol. 16, nr 3.
2. System prognozujący ubytek geometryczny matryc oraz udział mechanizmów niszczących

Od wielu lat trwa również współpraca z **Politechniką Lubelską** – z **Katedrą Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej** oraz **Katedrą Inżynierii Materiałowej**. W ramach tej współpracy również powstało wiele opracowań, referatów oraz artykułów. Między innymi: Mariusz Walczak, Daniel Pieniak, Maciej Zwierzchowski: The tribological characteristics of SiC particle reinforced aluminium composites / M. Walczak, D. Pieniak, M. Zwierzchowski. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2015, vol. 15, nr 1

7. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowych

7.1. Działalność prowadzona przed doktoratem.

Moja główna działalność naukowa, którą rozpocząłem jeszcze w czasie studiów magisterskich na Politechnice Lubelskiej skupiała się wokół zagadnień związanych z inżynierią materiałową. W czasie studiów interesowałem się badaniami oraz analizami mikroskopowymi związanymi z warstwą wierzchnią oraz obróbką cieplną metali i stopów. Zainteresowania moje, w czasie studiów doktoranckich rozwijałem w kierunku inżynierii warstwy wierzchniej - możliwości zwiększenia trwałości elementów silników poprzez technologie spawalnicze. Będąc doktorantem w Katedrze Inżynierii Materiałowej Politechniki Lubelskiej zdobyłem **grant promotorski**, dzięki któremu mogłem rozwinąć swoje zainteresowania i zrealizować część badawczą pracy. Obszarem

badawczym była analiza warunków pracy oraz możliwości zwiększenia trwałości elementów układów rozrządu silników ZS. Badania w ramach otrzymanego grantu promotorskiego realizowałem w Miejskim Przedsiębiorstwie Komunikacyjnym **MPK w Lublinie**. Prowadzone badania pozwoliły na wdrożenie technologii natryskiwania proszkowego z przetopieniem materiałów na bazie niklu na powierzchnie robocze dźwigienek zaworowych w silnikach autobusów miejskich. W czasie studiów doktoranckich opublikowałem 8 artykułów (dwa jaka materiały konferencyjne) – 4 artykuły jednoautorskie, 3 artykuły z LM. Brałem udział w 3 konferencjach oraz aktywnie uczestniczyłem w organizowaniu krajowych Sympozjów Doktoranckich na Politechnice Lubelskiej (wykaz prac w załączniku).

7.2. Działalność prowadzona po obronie pracy doktorskiej.

Po uzyskaniu stopnia nauk technicznych w styczniu 2007 roku na Politechnice Lubelskiej, przeniosłem się do Wrocławia, gdzie od października tamtego roku podjąłem pracę jako asystent w Zakładzie Procesów Kształtowania Plastycznego w Instytucie Technologii Maszyn i Automatyzacji. Od 2009 roku zostałem zatrudniony jako adiunkt, obecnie w Katedrze Obróbki Plastycznej, Spawalnictwa i Metrologii. W podejmowanych początkowo pracach naukowo – badawczych po uzyskaniu stopnia doktora koncertowałem się na wykorzystaniu uzyskanych wyników badań oraz dalszą współpracą z MPK Lublin. Kontynuowałem i jeszcze rozwijałem badania dotyczące właściwości tribologicznych oraz możliwości wykorzystania powłok natryskiwanych na elementy maszyn współpracujące tarciowo. Otrzymałem w tym czasie wewnętrzny projekt I2400-333423-W1000 „Wpływ struktury i właściwości cieplnie wytworzonych powłok na osnowie niklu na przebieg procesów zużycia", Efektem prac były 4 artykuły w czasopismach z LM (dwa jednoautorskie), jeden materiał konferencyjny oraz wystąpienie jako gość specjalny na IX Międzynarodowym Sympozjum Studenckich Kół Naukowych w Lublinie.

Chcąc kontynuować i rozwijać swoje zainteresowania w zakresie analizy zjawisk zachodzących w warstwie wierzchniej, zdecydowałem się na napisanie i złożenie 6 wniosków o finansowanie projektów badawczych (Sonata oraz badania własne – 148604, 85317, 82299, 74773, 58421, 42269 - ZSUN OSF).

Od tamtej pory – **od 2009r**. - praktycznie nieprzerwanie uczestniczę aktywnie w pisaniu, składaniu oraz realizacji wielu projektów finansowanych ze środków unijnych – szczegóły w załączniku. Zakres pracy w projektach obejmował i obejmuje analizy materiałowe związane z inżynierią warstwy wierzchniej oraz najczęściej wybranymi aspektami procesów kucia, obróbki cieplnej, cieplnochemicznej oraz kształtowania struktur odpornych na zużycie warstwy wierzchniej metali i stopów.

Podjęta tematyka wpływu wybranych czynników na właściwości warstwy wierzchniej i charakterystykę procesów zużycia narzędzi kuźniczych jest nieprzerwanie źródłem wielu moich badań laboratoryjnych oraz przemysłowych. Dzięki mojej aktywności udało mi się stworzyć oraz wyposażyć Laboratorium Badań Materiałowych w Katedrze w której pracuję. Od 2008 roku kieruję nieprzerwanie tym laboratorium. Jestem współtwórcą trzech stanowisk badawczych – stanowiska do badań zmęczenia cieplnego metodą wirującego krążka (opis oraz wyniki w części badawczej), stanowiska do badań zmęczeniowych odkuwek typu rozwidlonego stosowanych na elementu układów kierowniczych w branży samochodowej – możliwość badania wpływu parametrów obróbki cieplnej na wytrzymałość zmęczeniową, oraz stanowiska do badania zużycia ściernego. Otrzymane wyniki badań na tych stanowiskach pozwoliły na opublikowanie wielu cennych artykułów w czasopismach z Listy Filadelfijskiej oraz LM.

Wnioskodawca, w ramach prowadzonej działalności naukowo-badawczej po uzyskaniu stopnia doktora, kierował lub brał udział, jako wykonawca w projektach finansowanych ze środków budżetowych. Dodatkowo jestem autorem (niekiedy współautorem) wielu opracowań, raportów i prac zleconych przez firmy zewnętrzne, z którymi osobiście lub jako jednostka naukowa podejmowałem i nadal prowadzę współpracę: Kuźnia Jawor, MAHLE Krotoszyn, NSK Wałbrzych, KIRCHHOFF Automotive Mielec, GKN Driveline Oleśnica, Kuźnia Łabędy, INOFORGES Rydzyna, Schraner Łęczyca, GAWEŁ Łańcut, Winkelmann Legnica, Autolive Oława, oraz wiele innych. Dzięki współpracy, prowadzonym badaniom i analizom, napisałem wiele raportów z wytycznymi do zmian

procesowych, wdrożeń, analiz uszkodzeń elementów maszyn i urządzeń, opracowałem wytyczne do procesów obróbki cieplnej oraz inne. Wyniki tych badań udokumentowane są w postaci raportów lub wdrożeń zawierających cenne opracowania (> 40szt.)- lista w załączniku.

7.3. Działalność dydaktyczna

Poza działalnością naukowo - badawczą, bardzo ważną dla mnie jest działalność dydaktyczna - przekazywanie wiedzy studentom, doktorantom. Za swoją działalność dydaktyczną otrzymałem **w 2011r. nagrodę dziekana Wydziału Mechanicznego PWr**. Od początku mojego zatrudnienia na Politechnice Wrocławskiej prowadzę różne formy zajęć dydaktycznych: laboratoria, wykłady, prace przejściowe oraz projekty. Zajęcia prowadzę w trybie stacjonarnym jak i niestacjonarnym. Przez wiele lat prowadziłem zajęcia również w Zamiejscowym Ośrodku Dydaktycznym w Wałbrzychu (filia PWr). Prowadziłem lub prowadzę następujące kursy: Metrologia Wielkości Geometrycznych, Podstawy Technik Wytwarzania, Techniki wytwarzania – Obróbka bezubytkowa, Przeróbka Plastyczna, Technologie i materiały stosowane w wytwarzaniu konstrukcji lekkich oraz dwa kursy dla studentów ostatniego roku studiów – wykład: Zaawansowane metody kształtowania plastycznego oraz wykład: Narzędzia do przeróbki plastycznej. Dwa ostatnie są opracowanymi przez ze mnie kursami dla studentów ostatniego roku II stopnia studiów. Poruszam w nich najważniejsze zagadnienia oraz przedstawiam najnowsze osiągnięcia, trendy oraz dokonania w zakresie oprzyrządowania, inżynierii powierzchnie eksploatacji itp. narzędzi do obróbki plastycznej. Jestem promotorem 164 prac I oraz II stopnia oraz recenzentem ok 200 prac. Większość realizowanych prac związana jest z przemysłem lub badaniami w zakresie inżynierii materiałowej oraz obróbki plastycznej. Jestem także promotorem pomocniczym dwóch realizowanych w mojej katedrze prac doktorskich.

7.4. Działalność organizacyjna

Jestem jednym z głównych współorganizatorów cyklicznej konferencji organizowanej od 2008 roku przez Katedrę Obróbki Plastycznej i Metrologii oraz TU Bergakademie Freiberg. Konferencje „AutoMetForm" - Advanced Metal Forming Processes in Automotive Industry odbywają się co dwa lat, nieprzerwanie od 2008r. Celem konferencji jest prezentacja wyników badań, osiągnięć naukowych oraz wymiana informacji z zakresu przeróbki plastycznej z przedstawicielami przemysłu motoryzacyjnego. Byłem współorganizatorem konferencji finansowanej z projektu POIG.01.03.01-02-063/12 w 2015r. Konferencja przykuła uwagę polskich kuźni, zakładów przemysłowych a także młode pokolenie doktorantów oraz studentów.

Od 2009 roku byłem współprowadzącym, a od 2019r (decyzja prorektora z dnia 20-1202019 PRS/602/2019). jestem prowadzącym i opiekunem Koła Naukowego Radiokomunikacji SP6PWT na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej. W ramach prac koła naukowego wraz ze studentami rozwijamy umiejętności tradycyjnych i nowoczesnych metod komunikacji, nadzoruję prace konstrukcyjne przy budowie anten komunikacyjnych w zakresie fal krótkich, UKF, VHF oraz mikrofal. Jestem prowadzącym i organizatorem wielu kursów we współpracy z Harcerskim Klubem Łączności SP6ZDA działającym we Wrocławiu. W 2020 roku rozpoczęliśmy współpracę z Wydziałem Bezpieczeństwa i Zarządzania Kryzysowego Dolnośląskiego Urzędu Wojewódzkiego w zakresie szkoleń i zapewniania łączności w obrębie województwa, a w razie potrzeb i całej Polski, na wypadek działań w sytuacjach kryzysowych. Prowadziłem zajęcia w ramach Akademii Młodych Odkrywców Politechniki Wrocławskiej oraz kilkukrotnie w ramach Festiwali Nauki we Wrocławiu.

Nieprzerwanie od 2014 roku jestem członkiem Komisji Egzaminacyjnej Prac Dyplomowych I oraz II stopnia. Szczegółowy wykaz osiągnięć oraz informacja o dorobku naukowo-badawczym, dydaktycznym i organizacyjnym został przedstawiony w Załączniku – Wykaz pozostałych Osiągnięć.

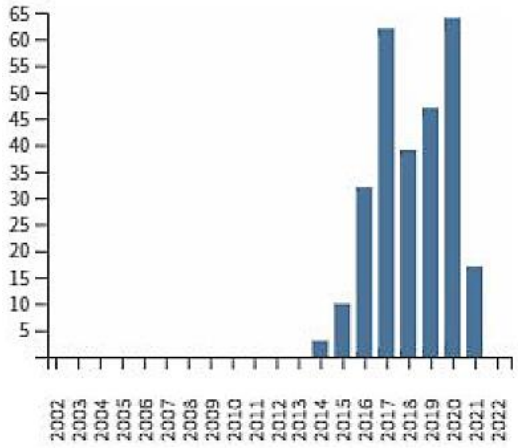
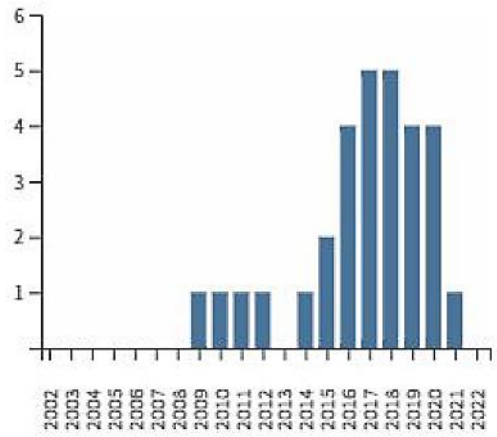
Przez wiele lat organizowałem seminaria Katedry K60. Odbywały się cyklicznie co 2 tygodnie. Prezentowano na nich aktualnie informacje oraz wyniki badań prowadzonych przez pracowników. Osobiście również prezentowałem wyniki swoich badań.

Od wielu lat pełnię funkcję kierownika Laboratorium Badań Materiałowych. Zajmuję się organizowaniem szkoleń dla studentów oraz doktorantów w zakresie preparatyki materiałów inżynierskich. Prowadzę wszelkie możliwe działanie w zakresie poprawności i nieprzerwanego działania Laboratorium.

Dodatkowo, regularnie organizowałem szkolenia dla studentów oraz doktorantów w zakresie preparatyki oraz podstawowych badań mikroskopowych i badania właściwości warstwy wierzchniej metali i stopów.

Organizowanie wyjazdów do przemysłu dla dyplomantów I oraz II stopnia studiów stacjonarnych oraz niestacjonarnych. Organizowanie szkoleń i kursów budowy anten nadawczo – odbiorczych w zakresie działalności Wydziałowego Koła Naukowego.

8. Podsumowanie działalności naukowo-badawczej

	
Liczba cytowani wg Web of Science wg lat.	Liczba publikacji wg Web of Science wg lat.

SUMARYCZNE ZESTAWIENIE KRYTERIÓW OSIĄGNIĘĆ WNIOSKODAWCY

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

Lp.	Kryterium według §3 pkt 4, §4 i §5	tak(liczba)/brak
1.	Publikacje naukowe w czasopismach z bazy Journal Citation Reports	28
2.	Zrealizowane oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne i technologiczne	10
3.	Udzielone patenty: a) międzynarodowe b) krajowe	 a) brak b) brak
4.	Wynalazki, wzory użytkowe i przemysłowe, które uzyskały ochronę i zostały wystawione na międzynarodowych lub krajowych wystawach lub targach	1
5.	Monografie, publikacje naukowe w czasopismach innych niż znajdujące się w bazie JCR	35
6.	Opracowania zbiorowe, katalogi zbiorów, dokumentacja prac badawczych, ekspertyz	42
7	Sumaryczny *impact factor* wg listy Journal Citation Raport (JCR) zgodnie z rokiem opublikowania	42.018
8	Liczba cytowań publikacji wg bazy Web of Science (WoS)/ bez autocytowań	310/ 275
9	Indeks Hirscha wg bazy Web of Science (WoS)	9
10.A	Kierowanie projektami badawczymi c) międzynarodowymi, d) krajowymi.	 a) brak b) tak/1
10.B	Udział w projektach badawczych: a) międzynarodowych b) krajowych	 a) brak b) 15
11.	Międzynarodowe i krajowe nagrody za działalność naukową	5

12.	Wygłoszenie referatów na tematycznych konferencjach: a) międzynarodowych b) krajowych	a) 4 b) 16
13.	Uczestnictwo w programach europejskich oraz innych programach międzynarodowych i krajowych	15
14.	Aktywny udział w konferencjach: a) międzynarodowych b) krajowych	a) 4 b) 16
15.	Udział w komitetach organizacyjnych konferencji naukowych: a) międzynarodowych b) krajowych	a) 3 b) 2
16.	Otrzymane nagrody i wyróżnienia	5
17.	Udział w konsorcjach i sieciach badawczych	10
18.	Kierowanie projektami realizowanymi we współpracy z: a) naukowcami z innych ośrodków polskich, b) naukowcami z ośrodków zagranicznych, c) przedsiębiorcami.	a) brak b) brak c) brak
19.	Udział w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism	Tak / 1
20.A	Członkostwo w międzynarodowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych: a) ogółem b) w tym z wyboru.	brak
20.B	Członkostwo w krajowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych: a) ogółem, b) w tym z wyboru.	a)Tak/1
21.	Osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki	4
22.	Opieka naukowa nad studentami	Tak/164
23.	Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze: a) opiekuna naukowego, b) promotora pomocniczego	a) brak b) tak/2
24.	Staże w ośrodkach naukowych lub akademickich a) zagranicznych, b) krajowych	a) brak b) brak
25.	Wykonane ekspertyzy lub inne opracowania na zamówienie	Tak/42
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) 39 b) 0
29.	Inne osiągnięcia	Tak/4
	Łącznie liczba spełnionych kryteriów	25 / 29

……

(podpis Wnioskodawcy)