



POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY
KATEDRA AUTOMATYKI, MECHANIKI
I KONSTRUKCJI

dr inż. Łukasz Bohdal

AUTOREFERAT

Załącznik do wniosku o przeprowadzenie postępowania
habilitacyjnego w dziedzinie Nauk Technicznych
w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn

Koszalin, 2018

1. CHARAKTERYSTYKA HABILITANTA

1.1. Uzyskane stopnie i tytuły naukowe

- **2005 – tytuł zawodowy magistra inżyniera**
Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, kierunek Mechanika i Budowa Maszyn, specjalność: Inżynierskie Zastosowania Komputerów. Temat pracy magisterskiej: „*Analiza numeryczna procesu cięcia nożycami krążkowymi*”. Promotor: prof. dr hab. inż. Leon Kukiełka. Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny.
- **2009 – stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn**, Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, promotor: prof. dr hab. inż. Leon Kukiełka, temat pracy doktorskiej: „*Modelowanie i analiza numeryczna procesów cięcia blach z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i fizycznej*”. Rozprawa doktorska **obroniona z wyróżnieniem**. Recenzenci w przewodzie doktorskim: prof. dr inż. Kazimierz Wieczorowski dr h.c. Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, prof. nzw. dr hab. inż. Przemysław Borkowski, Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny.

1.2. Przebieg pracy zawodowej

2009 - 2010	Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów, stanowisko: asystent.
Od 2010 do obecnie	Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów (obecnie Katedra Automatyki, Mechaniki i Konstrukcji), stanowisko: adiunkt.

2. WSKAZANIE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO

Zgodnie z art. 16, ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, jako osiągnięcie naukowe wskazuję monografię oraz cykl publikacji naukowych powiązany tematycznie z tytułowany: ***Podstawy modelowania, analizy i optymalizacji procesów cięcia mechanicznego stopów metali***. Są to:

A. Monografia:

1. Bohdal Łukasz: *Teoretyczne i doświadczalne podstawy optymalizacji procesów cięcia mechanicznego stopów metali lekkich i stali elektrotechnicznych*. Monografia Wydziału Mechanicznego nr 344, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2018, ISSN 0239-7129, ISBN 978-83-7365-481-5.

B. Cykl 20 publikacji opublikowanych w latach 2011÷2017 (w tym 7 z listy A MNiSzW oraz 13 z listy B MNiSzW):

1. **Bohdal Ł.:** *Finite element simulation of 3D sheet metal guillotining using elastic/viscoplastic damage model*. Steel Research International SE Vol. 1, Rok 2012, ISSN 1611 – 3683, s. 1419-1422 – Lista A (27 pkt.). *Mój wkład w powstanie tej publikacji polegał na opracowaniu przeglądu literaturowego (w tym: badanie wpływu parametrów technologicznych procesu na jego przebieg, modelowanie i symulacja procesów cięcia), opracowaniu modelu fizycznego, matematycznego i symulacyjnego procesu cięcia na gilotynie, przeprowadzeniu badań symulacyjnych dla różnych warunków cięcia, analizie wyników badań i opracowaniu wniosków z badań, doborze materiałów źródłowych, pracach edytorskich. Mój udział w tej publikacji szacuję na 100%.*

2. **Bohdal Ł., Walczak P.:** *Eco-modeling of metal sheet cutting with disc shears*, Annual Set The Environment Protection, Tom 15, 2013, s. 863-872. ISSN 1506-218X – Lista A (15 pkt.). *Mój wkład w powstanie tej publikacji polegał na opracowaniu przeglądu literaturowego dotyczącego m.in. sposobów modelowania procesów cięcia materiałów metalowych na nożycach krążkowych, analizie eksperymentalnej, ocenie defektów powierzchni przecięcia. Brałem udział w opracowaniu modelu fizycznego, matematycznego i symulacyjnego procesu cięcia na nożycach krążkowych, przeprowadzeniu badań symulacyjnych dla różnych warunków cięcia np. w zależności od wielkości luzu między narzędziami. Analizowałem wyniki badań i opracowałem wnioski z badań. Brałem udział w doborze materiałów źródłowych, pracach edytorskich. Mój udział w tej publikacji szacuję na 80%.*
3. **Bohdal Ł., Kukielka L.:** *Application of variational and FEM methods to the modeling and numerical analysis of guillotining process for geometrical and physical nonlinearity*. Mechanika, Tom 20 (2), 2014, s. 197-204. ISSN 1392 – 1207 – Lista A (15 pkt.). *Mój wkład w powstanie tej publikacji polegał na opracowaniu modelu fizycznego, matematycznego i symulacyjnego procesu cięcia na gilotynie. Przeprowadziłem badania symulacyjne i eksperymentalne. Opracowałem wytyczne dotyczące prawidłowego doboru parametrów obróbkowych w aspekcie uzyskania odpowiedniej jakości wyrobu. Analizowałem wyniki badań i opracowałem wnioski z badań. Brałem udział w doborze materiałów źródłowych, pracach edytorskich. Mój udział w tej publikacji szacuję na 70%.*
4. **Bohdal Ł., Kułakowska A., Patyk R.:** *Analysis of Slitting of Aluminum Body Panels in the Aspect of Scrap Reduction*. Annual Set The Environment Protection, Tom 16, 2014, s. 105-114. ISSN 1506-218X – Lista A (15 pkt.). *Mój wkład w powstanie tej publikacji polegał na przygotowaniu stanowiska do badań eksperymentalnych, opracowaniu planu eksperymentu. Przeprowadziłem badania eksperymentalne i opracowałem wytyczne dotyczące prawidłowego doboru parametrów obróbkowych w aspekcie uzyskania odpowiedniej jakości wyrobu. Analizowałem wyniki badań i opracowałem wnioski z badań. Przeprowadziłem optymalizację procesu cięcia. Mój udział w tej publikacji szacuję na 50%.*
5. **Bohdal Ł., Kukielka L.:** *Application of variational and FEM methods to the modeling and numerical analysis of the slitting process for geometrical and physical nonlinearity*. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Tom 53 (2), 2015, s. 487-500. ISSN 1429-2955 – Lista A (15 pkt.). *Mój wkład w powstanie tej publikacji polegał na opracowaniu modelu fizycznego, matematycznego i symulacyjnego procesu cięcia na nożycach krążkowych wybranych stopów aluminium. Przeprowadziłem symulacje i analizy wrażliwości modeli 3D. Analizowałem wyniki badań i opracowałem wnioski z badań. Opracowałem wytyczne dotyczące prawidłowego doboru parametrów obróbkowych w aspekcie uzyskania odpowiedniej jakości wyrobu. Mój udział w tej publikacji szacuję na 70%.*
6. **Bohdal Ł.:** *Application of FEM and vision-based methods to analysis of shearing processes in the aspect of scrap reduction*. Annual Set The Environment Protection, Tom 17, 2015, s. 90-103. ISSN 1506-218X – Lista A (15 pkt.). *Mój wkład w powstanie tej publikacji polegał na budowie systemu wizyjnego do rejestracji zjawisk szybkozmiennych, opracowaniu planu badań, przeprowadzeniu badań eksperymentalnych. Opracowałem wytyczne związane z doбором komponentów systemu wizyjnego. Analizowałem wpływ wybranych parametrów procesu na jakość wyrobu. Opracowałem wnioski z przeglądu literatury, przeprowadziłem prace edytorskie. Mój udział w tej publikacji szacuję na 100%.*

7. **Bohdal Ł.:** *The application of the smoothed particle hydrodynamics (SPH) method to the simulation and analysis of blanking process.* Mechanika, Tom 22 (5), 2016, s. 380-387. ISSN 1392 – 1207 – Lista A (15 pkt.). *Mój wkład w powstanie tej publikacji polegał na opracowaniu modelu fizycznego, matematycznego i symulacyjnego procesu wykrawania materiałów metalowych z zastosowaniem metody SPH. Przeprowadziłem symulacje i analizy wrażliwości modeli. Analizowałem wyniki badań i opracowałem wnioski z badań. Opracowałem zależności i wytyczne umożliwiające implementację metody SPH do symulacji zjawisk rozdzielania materiałów metalowych. Opracowałem wnioski z przeglądu literatury, przeprowadziłem prace edytorskie. Mój udział w tej publikacji szacuję na 100%.*
8. **Bohdal Ł., Kukielka L.:** *Modelowanie i analiza numeryczna procesu cięcia blach nożami krążkowymi z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i fizycznej.* Mechanik nr. 8-9/2011r., ISSN 0025-6552, str. 712-716. – Lista B (7 pkt.). *Mój wkład w powstanie tej publikacji polegał na opracowaniu modelu fizycznego, matematycznego i symulacyjnego procesu cięcia na nożycach krążkowych stali konstrukcyjnych. Przeprowadziłem symulacje 2D i analizy wrażliwości modeli. Analizowałem wyniki badań i opracowałem wnioski z badań. Opracowałem wytyczne dotyczące prawidłowego doboru parametrów obróbkowych w aspekcie uzyskania odpowiedniej jakości wyrobu. Opracowałem wnioski z przeglądu literatury, przeprowadziłem prace edytorskie. Mój udział w tej publikacji szacuję na 70%.*
9. **Bohdal Ł.:** *Eksperymentalne i numeryczne metody określania jakości wyrobów w procesach cięcia blach.* Pomiary Automatyka Kontrola. Nr 5/2011r. s. 523-527. – Lista B (7 pkt.). *Mój wkład w powstanie tej publikacji polegał na opracowaniu zaleceń dotyczących budowy stanowisk badawczych procesów cięcia mechanicznego, sposobów rejestracji tych procesów, pomiarów cech uzyskanych wyrobów. Przeprowadziłem badania eksperymentalne. Opracowałem wnioski z przeglądu literatury, wnioski z badań, przeprowadziłem prace edytorskie. Mój udział w tej publikacji szacuję na 100%.*
10. **Bohdal Ł.:** *Numeryczne metody określania jakości wyrobów w procesach cięcia blach na gilotynie.* Pomiary Automatyka Kontrola. Nr 6/2012r., ISSN 0032-4140, str. 549-553. – Lista B (9 pkt.). *Mój wkład w powstanie tej publikacji polegał na opracowaniu zaleceń dotyczących budowy stanowisk badawczych procesów cięcia na gilotynie, przedstawieniu metod określania jakości wyrobów po cięciu. Przeprowadziłem badania eksperymentalne. Opracowałem wnioski z przeglądu literatury, wnioski z badań, przeprowadziłem prace edytorskie. Mój udział w tej publikacji szacuję na 100%.*
11. **Bohdal Ł.:** *Modelowanie 3D i analiza numeryczna procesu cięcia blach na gilotynie z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i fizycznej.* Mechanik nr. 8-9/2012r., ISSN 0025-6552, s. 688 – 696. – Lista B (9 pkt.). *Mój wkład w powstanie tej publikacji polegał na opracowaniu modelu fizycznego, matematycznego i symulacyjnego procesu cięcia na gilotynie stali konstrukcyjnych. Opracowałem wytyczne do modelowania tego procesu. Przeprowadziłem symulacje 3D i analizy wrażliwości modeli, a następnie analizy przebiegu procesu ciecicia. Opracowałem wnioski z przeglądu literatury, wnioski z badań, przeprowadziłem prace edytorskie. Mój udział w tej publikacji szacuję na 100%.*
12. **Bohdal Ł.:** *Analiza wpływu luzu między narzędziami tnącymi na strukturę geometryczną powierzchni przecięcia wyrobów kształtowanych na nożycach krążkowych.* Pomiary Automatyka Kontrola. Nr 7/2013, ISSN 0032-4140, s. 671-675. – Lista B (7 pkt.). *Mój wkład w powstanie tej publikacji polegał na opracowaniu planu badań eksperymentalnych, przygotowaniu stanowiska badawczego a następnie przeprowadzeniu badań dla różnych wartości luzu między narzędziami tnącymi. Przeprowadziłem optymalizację procesu cięcia. Opracowałem wnioski z przeglądu*

- literatury, przeprowadziłem prace edytorskie. Mój udział w tej publikacji szacuję na 100%.*
13. **Bohdal Ł.:** *Zastosowanie przyrostowej metody analizy siatki koordynacyjnej do numerycznej analizy procesu cięcia.* Pomiary Automatyka Kontrola. Nr 10-12/2014, ISSN 0032-4140, s. 909-912. – Lista B (7 pkt.). *Mój wkład w powstanie tej publikacji polegał na opracowaniu metodyki badań modelowych procesu cięcia klinowym narzędziem. Przeprowadziłem badania modelowe, opracowałem wnioski z badań oraz przeprowadziłem prace edytorskie. Mój udział w tej publikacji szacuję na 100%.*
 14. **Bohdal Ł.:** *Badania eksperymentalne i symulacyjne procesu cięcia stopów aluminium na nożycach krążkowych.* Mechanik nr. 7/2014r., ISSN 0025-6552, s. 534-539. – Lista B (6 pkt.). *Mój wkład w powstanie tej publikacji polegał na opracowaniu planów badań symulacyjnych i eksperymentalnych, przeprowadzeniu badań, wykonaniu pomiarów stref powierzchni przecięcia, analizie stanów naprężeń i odkształceń w materiale. Opracowałem wnioski z badań oraz przeprowadziłem prace edytorskie. Mój udział w tej publikacji szacuję na 100%.*
 15. **Bohdal Ł.:** *Zastosowanie metody numerycznej i doświadczalnej do analizy procesu cięcia stopów aluminium na nożycach krążkowych.* Pomiary Automatyka Kontrola. Nr 10-12/2014, ISSN 0032-4140, s. 913-916. – Lista B (7 pkt.). *Mój wkład w powstanie tej publikacji polegał na opracowaniu planów badań symulacyjnych i eksperymentalnych, przeprowadzeniu badań w zależności od przyjętych warunków procesu. Przeprowadziłem optymalizację procesu cięcia. Opracowałem wnioski z badań oraz przeprowadziłem prace edytorskie. Mój udział w tej publikacji szacuję na 100%.*
 16. **Bohdal Ł.,** Kukielka L., Kukielka K., Kułakowska A., Małąg L., Patyk R.: *Three Dimensional Finite Element Simulation of Sheet Metal Blanking Process,* Applied Mechanics and Materials, vol. 474, 2014, str. 430-435 – Lista B (7 pkt.). *Mój wkład w powstanie tej publikacji polegał na opracowaniu aplikacji komputerowych procesu wykrawania 3D stali konstrukcyjnych, przeprowadzeniu symulacji procesu, analizie wybranych wyników badań. Opracowałem wnioski z badań. Mój udział w tej publikacji szacuję na 35%.*
 17. **Bohdal Ł.,** Gotowała K.: *Numeryczna i eksperymentalna analiza wpływu geometrii narzędzia na rozkład naprężeń i odkształceń podczas cięcia stopów aluminium na nożycach krążkowych.* Mechanik nr. 3/2015r., ISSN 0025-6552, s. 261-269. – Lista B (11 pkt.). *Mój wkład w powstanie tej publikacji polegał na analizie stanu wiedzy, przeprowadzeniu optymalizacji procesu cięcia stopów aluminium na nożycach krążkowych, analizie wyników badań. Mój udział w tej publikacji szacuję na 80%.*
 18. **Bohdal Ł.:** *Application of a SPH coupled FEM method for simulation of trimming of aluminum autobody sheet,* Acta Mechanica et Automatica. Vol. 10, no. 1, pp. 56-61, (2016) – Lista B (14 pkt.). *Mój wkład w powstanie tej publikacji polegał na opracowaniu modelu hybrydowego MES+SPH dla procesu cięcia stopów aluminium na gilotynie, przeprowadziłem analizy wrażliwości modelu oraz jego walidację. Opracowałem wnioski z badań. Mój udział w tej publikacji szacuję na 100%.*
 19. **Bohdal Ł.,** Patyk R.: *A mesh-free particle model for simulation of trimming of aluminum alloy sheet,* w monografii: *Advances in Mechanics: Theoretical, Computational and Interdisciplinary Issues – Monografia,* CRC Press, Taylor & Francis Group, London 2016, ISBN: 978-1-138-02906-4, s. 93-101. *Mój wkład w powstanie tej publikacji polegał na opracowaniu modelu SPH dla procesu cięcia na gilotynie. Przeprowadziłem analizę parametryczną procesu, dokonałem walidacji modelu z zastosowaniem systemu wizyjnego. Mój udział w tej publikacji szacuję na 60%.*
 20. **Bohdal Ł.,** Tandecka K., Kałdunski P., *Numerical simulation of shear slitting process of grain oriented silicon steel using SPH method,* Acta Mechanica et Automatica, Vol.
-

11, No. 4, (2017), pp. 333-338 – Lista B (14 pkt.). *Mój wkład w powstanie tej publikacji polegał na opracowaniu modelu SPH procesu cięcia stali elektrotechnicznych. Przeprowadzeniu badań symulacyjnych i walidacji eksperymentalnej. Mój udział w tej publikacji szacuję na 50%.*

2.1. Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników przedstawionych w monografii

2.1.1. Aspekty technologiczne procesów cięcia

Proces cięcia jest jednym z najbardziej rozpowszechnionych sposobów wytwarzania elementów, zapewniającym bardzo wysoką wydajność i mającym szerokie zastosowanie w technologii kształtowania części w różnych gałęziach przemysłowych.

Rozwój procesów cięcia narzuca konieczność rozwijania i doskonalenia metod obliczeń tego procesu. Trudności związane z silnie nieliniowym charakterem procesu cięcia nie pozwalały przez długi czas na uzyskanie miarodajnych oraz możliwie uniwersalnych metod jego analizy. Niezwykle szybki w ostatnich latach rozwój w zakresie teorii ośrodków ciągłych, teorii plastyczności oraz metod numerycznych w mechanice, a zwłaszcza metody elementów skończonych, związany z postępowaniem systemów obliczeniowych, stworzył warunki, w których analizowanie złożonych problemów obróbki plastycznej stało się możliwe.

Obróbka stopów metali lekkich i stali elektrotechnicznych za pomocą cięcia stwarza problemy związane z zapewnieniem: stabilności procesu, dokładności wymiarowo-kształtowej, niewielkich zmian właściwości fizykochemicznych w strefie cięcia, skłonności do tworzenia narostu na narzędziach.

Do głównych problemów związanych z dokładnością wymiarowo-kształtową wyrobów można zaliczyć częste pojawianie się niepożądanych, losowych defektów w przekroju poprzecznym ciętego elementu, co może przyczynić się do znacznego zużycia narzędzi tnących, a także obniżenia jakości powierzchni przecięcia i wzrostu energochłonności procesu.

Wszystkie gatunki blach elektrotechnicznych charakteryzujące się strukturą metalograficzną o ziarnie zorientowanym dostarczane są przez wytwórców po końcowej obróbce cieplnej w stanie wolnym od naprężeń. Kolejne operacje technologiczne wytwarzania rdzeni transformatorów powodują pogarszanie się właściwości magnetycznych tych materiałów. Dzieje się tak, wskutek powstawania naprężeń, generowanych w warunkach transportu, składowania (ściskanie, zginanie, uderzenia), oraz obróbki (procesy cięcia, wykrawania, pakietowania).

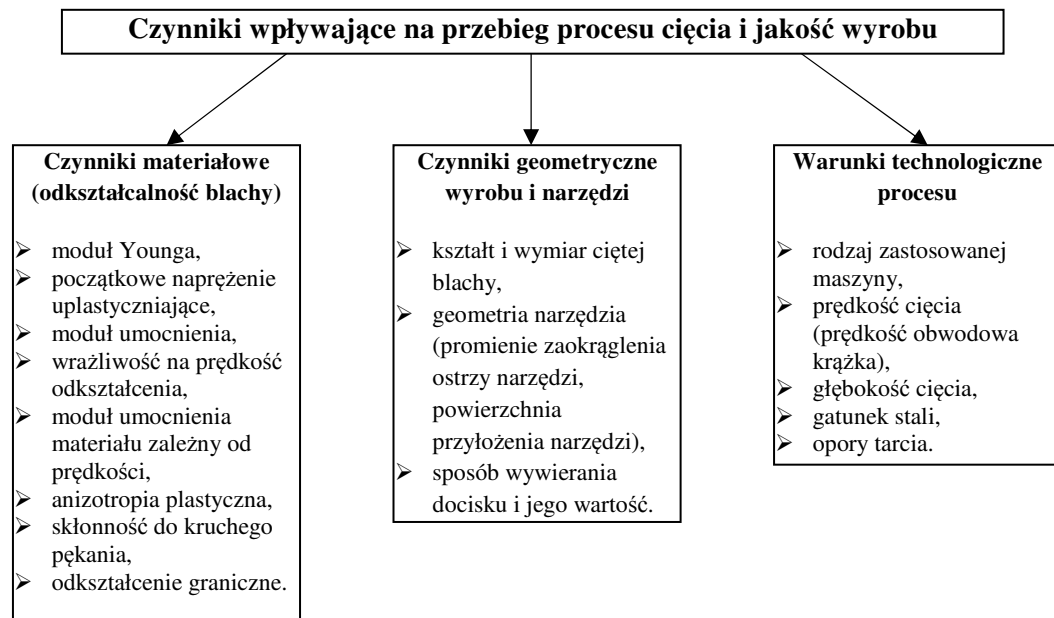
Proces cięcia jest praktycznie nieodzowną i niemożliwą do pominięcia operacją w czasie formowania wykrojów z taśm lub arkuszy blachy. Stwarza jednak duże problemy, ze względu na częste pojawianie się mikrozadziórów na powierzchni przecięcia, które mogą zwierać blachy rdzeni transformatorów i powodować pogorszenie ich właściwości magnetycznych (straty wiropądowe). Deformacje struktury w strefie cięcia oraz powstawanie naprężeń wpływają także na straty histerezy.

2.1.2. Charakterystyka problemów badawczych

Na podstawie analizy stanu wiedzy oraz badań autora można stwierdzić, że:

- Aktualne wymagania w dziedzinie procesów cięcia narzucają konieczność prowadzenia skomplikowanych badań eksperymentalnych oraz stosowania możliwie dokładnych metod obliczeniowych procesu. Trudnością w opisie tego procesu jest przede wszystkim

jego nieliniowość oraz duża liczba czynników mająca wpływ na jego przebieg (rys. 1). Nieliniowość procesu powoduje między innymi, że w narzędziu realizującym cięcie w materiale poddawanym procesowi zachodzą niekorzystne zjawiska fizyczne. Wśród nich można wymienić: defekty w przekroju poprzecznym narzędzi, defekty na powierzchni przecięcia (zadziory, zagięcie krawędzi, duża chropowatość powierzchni na całej grubości i szerokości blachy), które uniemożliwiają dalsze wykorzystanie elementu.



Rys. 1. Podział czynników wpływających na przebieg procesu cięcia i jakość wyrobu

- Procesy cięcia materiałów konstrukcyjnych są szeroko opisywane w literaturze. Najwięcej publikacji dotyczy procesu wykrawania, znacznie mniej cięcia gilotynowego oraz z wykorzystaniem nożyc krążkowych. Niewielka liczba publikacji dotyczy natomiast procesów cięcia stopów metali lekkich i stali elektrotechnicznych. Tym zagadnieniom poświęcone są badania autora [3, 5, 17, 18].
- Informacje dotyczące warunków procesu są często uogólniane do wszystkich przypadków, co nie zawsze daje dobre rezultaty w postaci odpowiedniej dokładności wymiarowo kształtowej. Badania są prowadzone na blachach o znacznej grubości i niewielkiej długości linii cięcia. Brakuje wyników badań zjawisk fizycznych zachodzących podczas wycinania elementów o złożonych kształtach. W publikacjach składających się na osiągnięcie naukowe autora przedstawiono opracowane modele oraz podstawy optymalizacji operacji cięcia [1, 7, 11, 13, 14, 16].
- Specyfika stopów metali lekkich i stali elektrotechnicznych powoduje trudności w opracowaniu uniwersalnych zaleceń dotyczących prawidłowego doboru parametrów procesu, w tym: luzów między narzędziami, geometrii narzędzi, prędkości cięcia, sposobu smarowania itp., ze względu na pożądaną jakość wyrobu finalnego. Dla poszczególnych metod cięcia, rodzaju materiału i jego grubości niezbędne jest stosowanie odmiennych parametrów cięcia, co wykazano w pracach [2, 4, 9, 14, 18].
- W przypadku cięcia stali elektrotechnicznych można, w dostępnej literaturze, znaleźć prace opisujące wpływ wybranych operacji cięcia na właściwości magnetyczne materiału, jednak wartości parametrów technologicznych procesu nie są podane przez autorów lub badania są realizowane dla stałych ich ustawień. Brakuje informacji związanych z wpływem parametrów procesu cięcia na stany naprężeń, odkształceń, ich

powiązania z jakością powierzchni przecięcia oraz właściwościami magnetycznymi materiału po procesie. Rozwiązaniom tych problemów poświęcono prace autora [6, 7, 19, 20].

- Duża liczba występujących czynników oraz złożoność zjawisk fizycznych jest przyczyną trudności w opracowaniu uniwersalnych metod modelowania procesów cięcia. Mimo wielu lat rozwoju metod analizy numerycznej obiektów sprężysto-plastycznych z szybkozmiennymi obciążeniami zauważa się, że stosuje się w niektórych pracach znaczne uproszczenia. Nadal wykonywane są badania doświadczalne ukierunkowane na formułowanie bazy do opracowania nowych modeli konstytutywnych, bądź identyfikację parametrów istniejących modeli. Największe problemy związane z modelowaniem procesu cięcia dotyczą prawidłowego sformułowania równań konstytutywnych (modelu materiałowego) oraz zamodelowania procesu pęknięcia (dekohezji) materiału. W literaturze istotnym problemem jest opracowanie uniwersalnego modelu materiałowego uwzględniającego szereg jego właściwości. Zbudowanie takiego modelu, uwzględniającego zarówno właściwości mechaniczne, jak i aspekty strukturalne umożliwiłoby znaczny wzrost dokładności obliczeń. Modele opracowane przez autora spełniają te postulaty i zostały opisane w pracach [1, 3, 5, 8, 12, 14].
- W wielu pracach zaniedbuje się wpływ dynamicznych właściwości materiałowych, m.in. wpływ prędkości odkształcenia plastycznego, traktując go najczęściej jako ciało idealnie sztywno-plastyczne, tzn. nie uwzględnia się umocnienia oraz odkształceń sprężystych. Pomija się tarcie w obszarach kontaktu narzędzia z przedmiotem, przyjmuje się płaski stan odkształceń i naprężeń, pomija się prędkość przemieszczania narzędzia. Nie uwzględnia się stanów naprężeń i odkształceń warstwy wierzchniej po obróbkach poprzedzających. Nie uwzględnia się również pęknięcia materiału poprzedzonego znacznymi odkształceniami plastycznymi. Modele i symulacje komputerowe opracowane przez autora spełniają te postulaty i zostały opisane w pracach [1, 3, 5, 8, 12, 14, 19, 20].
- W literaturze brakuje trójwymiarowych modeli symulacyjnych uwzględniających przestrzenny stan naprężeń i odkształceń, rzeczywiste wymiary, kształty narzędzi oraz wycinanych elementów, które charakteryzują się zróżnicowaną długością linii cięcia oraz jej przebiegiem (linia prosta, krzywa). Rozwiązaniom tych problemów poświęcono prace autora [1, 3, 7, 11, 16, 18, 20].
- Opracowane przez autora aplikacje numeryczne z wykorzystaniem programów MES, pozwalają prognozować jakość technologiczną wyrobu ciętego, z wymaganą dokładnością, z uwzględnieniem występujących nieliniowości (geometrycznej i fizycznej) oraz wszystkich istotnych czynników (związanych z materiałem obrabianym, warunkami obróbki poprzedzającej, historii odkształceń i prędkości odkształceń itd.) oraz warunkami początkowo-brzegowymi. Wyniki badań autora mają duże znaczenie aplikacyjne również w efekcie opracowania zastosowań innych metod (oprócz MES) do modelowania i analizy procesów cięcia np.: metod bezsiatkowych.

Osiągnięcie naukowe autora zwiększa poziom wiedzy i jej przydatność do zastosowań, poprzez analizy zjawisk fizycznych zachodzących podczas i po procesie cięcia mechanicznego stopów metali lekkich i stali elektrotechnicznych, powiązania parametrów technologicznych procesu z jakością powierzchni przecięcia i właściwościami magnetycznymi wyrobu. Opracowano również uniwersalne zalecenia dotyczące prawidłowego doboru parametrów procesu, np.: luzów między narzędziami, geometrii narzędzi, prędkości cięcia, sposobu smarowania itp., ze względu na wymaganą jakość technologiczną wyrobu. Uwzględniono, że dla poszczególnych metod cięcia i rodzaju materiału niezbędne jest stosowanie odmiennych parametrów cięcia, które wcześniej

dobierano na podstawie prób i błędów. Wyniki prac naukowych pozwalają zoptymalizować projektowane procesy technologiczne, a przy tym: skrócić cykl projektowania, zmniejszyć koszty produkcji oraz podwyższyć jakość wyrobów. Dla autora było ważne również stworzenie możliwości prognozowania jakości wyrobów już na etapie projektowania technologii.

Jednym z elementów przedstawionego osiągnięcia naukowego jest monografia, którą poświęcono problematyce opracowania teoretycznych i doświadczalnych podstaw optymalizacji procesów cięcia mechanicznego stopów metali lekkich i stali elektrotechnicznych, a tym samym uzupełnieniu wiedzy o tym procesie. Zagadnienia przedstawione w pracy są jednymi z najważniejszych problemów współczesnej techniki. Charakteryzują się dużą złożonością, niestacjonarnością oraz wielowymiarowością. Zaproponowano wykorzystanie metod numerycznych i badań eksperymentalnych do kompleksowej analizy zjawisk zachodzących podczas procesu cięcia stopów metali lekkich i stali elektrotechnicznych.

Rozwiązane problemy naukowe

Wnioski wynikające z analizy aktualnego stanu wiedzy w zakresie procesów cięcia mechanicznego stopów metali lekkich i stali elektrotechnicznych oraz ich modelowania stanowiły podstawę do sformułowania problemów badawczych, które rozwiązano na drodze badań eksperymentalnych i analiz numerycznych, w tym:

- Opracowano efektywne modele numeryczne, umożliwiające analizę zjawisk występujących podczas procesu cięcia mechanicznego materiałów trudnoobrabialnych, stopów metali lekkich i stali elektrotechnicznych. Modele posiadają cechy uniwersalne w zastosowaniu do różnych rodzajów materiałów, różnych grubości ciętych arkuszy i ich wymiarów. Stanowią cenne narzędzie, za pomocą którego możliwe jest określenie: stanów przemieszczeń, odkształceń, naprężeń, sił cięcia, odchyłek kształtu, jakości powierzchni przecięcia, warunków początkowych dla przemieszczeń, odkształceń i naprężeń itp.
 - Opracowano symulacyjne modele trójwymiarowe procesu cięcia mechanicznego. Dzięki temu możliwe jest uwzględnienie w analizach wpływu wielu parametrów technologicznych, dotychczas pomijanych w literaturze takich, jak np: długość linii cięcia i jej kształt, rzeczywistych wymiarów narzędzi, sposobów mocowania blachy, sposobów docisku blachy w zależności od jej długości i szerokości. Możliwe jest analizowanie zjawisk fizycznych zachodzących podczas i po procesie cięcia w każdym miejscu blachy oraz w całym przekroju, a także analizowanie zjawisk zachodzących pod powierzchnią przylegania narzędzia (np.: analiza przemieszczeń i odkształceń materiału, analiza tarcia i poślizgu, nacisków kontaktowych).
 - Zastosowano nowe metody numeryczne do modelowania i analizy procesów cięcia, w tym metody bezsiatkowe. Umożliwia to dokładniejszy opis zjawisk występujących podczas dużych deformacji plastycznych oraz dekohezji materii.
 - Zastosowano nowe metody analizy eksperymentalnej, np. techniki wizyjne. Wykorzystanie zaawansowanego systemu wizyjnego do monitorowania procesu cięcia materiałów trudnoobrabialnych umożliwia obserwowanie zjawisk powstawania zaginania krawędzi, zadziórów oraz opracowywanie wytycznych do prawidłowego doboru parametrów obróbki w aspekcie uzyskania wysokiej jakości wyrobu.
 - Opracowano jakościowe zależności wpływu warunków procesu cięcia na właściwości magnetyczne materiału np.: kształt i parametry pętli histerezy, szerokość histerezy, wartości średniej namagnesowania szczytkowego, maksymalnej wartości indukcji magnetycznej, pola powierzchni histerezy.
-

- Opracowano podstawy optymalizacji procesów cięcia, zależności pomiędzy parametrami cięcia, stanem naprężeń, odkształceń w wyrobie, jakością wyrobu oraz jego właściwościami magnetycznymi. W efekcie możliwe jest zarówno prognozowanie jakości wyrobu po procesie dla zadanych warunków realizacji procesu lub określenie wymaganych warunków realizacji procesów obróbki w aspekcie wymaganej jakości wyrobu.

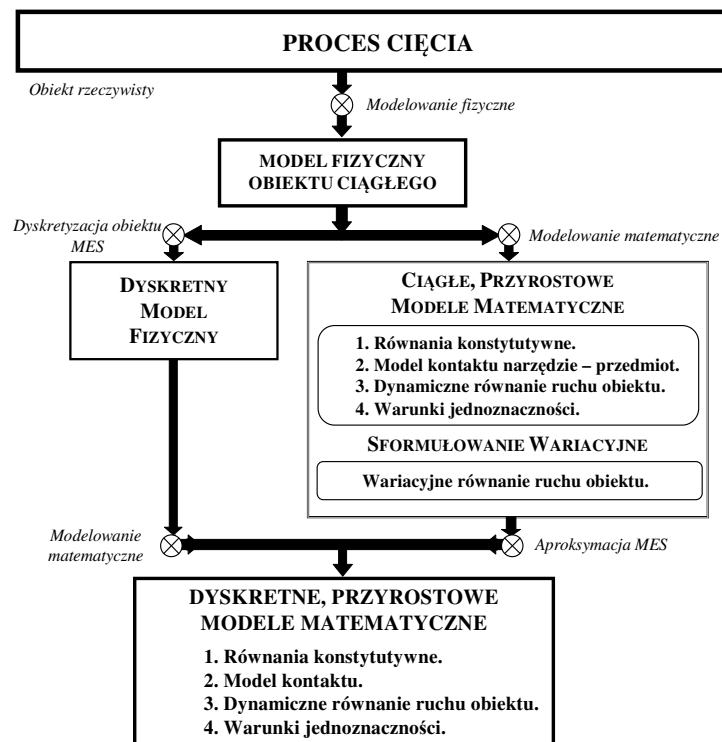
Badania własne prowadzono w dwóch kierunkach:

- teoretyczno-analitycznym (obejmującym zastosowanie opisu przyrostowego w modelowaniu procesów cięcia mechanicznego oraz analizy i symulacje komputerowe zjawisk fizycznych zachodzących podczas i po procesie cięcia, z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES) oraz metody bezsiatkowej: hydrodynamiki cząstek),
- doświadczalnym (obejmującym obserwację i analizę zjawisk fizycznych zachodzących podczas rozdzielania oraz obejmującym charakterystykę otrzymywanych wyrobów i wybranych parametrów charakteryzujących właściwości magnetyczne).

SYNTETYCZNY OPIS UZYSKANYCH WYNIKÓW:

1. *Metodyka modelowania MES procesu cięcia mechanicznego materiałów trudnoobrabialnych, stopów metali lekkich i stali elektrotechnicznych, uwzględniająca:*

- algorytm modelowania i analizy procesu cięcia przy zastosowaniu metod wariacyjnych i elementów skończonych (rys. 2),



Rys. 2. Schemat modelowania procesu cięcia

- model materiałowy ciała sprężysto-lepko-plastycznego,
- model dynamicznych naprężeń uplastyczniających,
- przyrostowy model dynamicznych naprężeń uplastyczniających,
- przyrostowe modele składowych tensora odkształceń całkowitych i tensora naprężeń,

- wariacyjne sformułowanie przyrostowego równania ruchu, dyskretne równanie ruchu,
- całkowanie jawnych równań ruchu i deformacji,
- zastosowanie metody elementów skończonych do modelowania procesu cięcia,
- implementację numeryczną rozwiązywania dyskretyzowanych równań ruchu.

Proces cięcia rozpatrzono jako geometrycznie i fizycznie nieliniowe zagadnienie brzegowo-początkowe, z nieznanymi warunkami brzegowymi w obszarze kontaktu. Do opisu zjawisk nieliniowych, na typowym kroku przyrostowym, wykorzystano uaktualniony opis Lagrange'a. Przyrosty odkształceń i naprężeń opisano odpowiednio przyrostem nieliniowego symetrycznego tensora odkształceń Green'a-Lagrange'a i przyrostem drugiego symetrycznego tensora naprężeń Pioli-Kirchhoff'a. W celu wariacyjnego sformułowania przyrostowego równania ruchu obiektu dla procesu cięcia wprowadzono funkcjonal wariacyjny, w którym występuje tylko jedno niezależne pole, a mianowicie pole przyrostu przemieszczeń. Ponadto przyjęto, że spełnione są równania zgodności oraz warunki początkowe i brzegowe. Takie założenia prowadzą do tak zwanego zgodnego, wyrażonego w przyrostach przemieszczeń, modelu dla zagadnień nieliniowej dynamiki.

Opracowane modele materiałowe, zastosowane w autorskich aplikacjach, umożliwiają uwzględnienie warunków początkowych dla naprężeń i odkształceń, a także umożliwiają analizę stanów naprężeń, odkształceń i przemieszczeń, w dowolnym punkcie kształtowanego materiału i w dowolnej chwili trwania procesu. Wykorzystano sformułowanie metody elementów skończonych z jawnym schematem całkowania równań ruchu względem czasu. Główną zaletą schematu jawnego jest nieiteracyjny charakter rozwiązania, brak potrzeby rozwiązywania układu równań oraz małe zapotrzebowanie na moc obliczeniową komputera. Wadą jest warunkowa stabilność rozwiązania ograniczająca krok całkowania. W przypadku dużych zagadnień zalety przeważają nad wadami, dlatego jest to bardzo popularna metoda w zastosowaniu do złożonych problemów rzeczywistych, takich jak przedstawione w niniejszej monografii problemy cięcia. Opracowane przyrostowe modele matematyczne ruchu i deformacji obiektu oraz algorytmy numeryczne ich rozwiązania pozwalają na kompleksową analizę zjawisk zachodzących w trakcie procesu cięcia, przy użyciu dostępnych programów metody elementów skończonych (ANSYS), oraz SPH (LS - Prepost), a na ich podstawie prognozować jakość technologiczną wyrobu [1, 3, 8, 9, 14].

2. Opracowanie modeli i aplikacji numerycznych procesu cięcia mechanicznego stopów metali lekkich i stali elektrotechnicznych z zastosowaniem MES

Aplikacje opracowane w systemach MES umożliwiają kompleksową analizę w dziedzinie czasu stanów naprężeń, deformacji (przemieszczeń, odkształceń), występujących w obiekcie składającego się z przedmiotu i narzędzi. Możliwa jest również zmiana parametrów, dotycząca układów: wymiar modelu – geometria przedmiotu, parametry obciążenia – siły cięcia, prędkości cięcia, parametrów technologicznych procesu, w tym luzów między narzędziami, warunków smarowania, sposobów mocowania lub docisku arkuszy blach, czasu oraz dowolna zmiana materiału przedmiotu oraz materiału narzędzia (dowolny moduł *Younga*, nieliniowa zależność właściwości plastycznych materiału od: intensywności odkształceń, intensywności prędkości odkształceń i różne modele umocnienia itp.) [2, 3, 5, 11].

Opracowane przez autora aplikacje do modelowania procesów cięcia mechanicznego w systemach MES spełniają w pełni zaawansowane wymagania stawiane przez praktyków i mogą być z powodzeniem wykorzystywane do symulacji rzeczywistych procesów cięcia. Wzrost wymagań technicznych i ekonomicznych wymusza konieczność poszukiwania nowych rozwiązań oraz opracowywania dokładniejszych modeli teoretycznych i numerycznych, które umożliwiłyby analizę zjawisk fizycznych zachodzących podczas i po procesie cięcia z wymaganą dokładnością. Opracowane modele posiadają cechy uniwersalne w zastosowaniu do różnych rodzajów materiałów, różnych grubości ciętych arkuszy i ich

wymiarów. Stanowią cenne narzędzie, za pomocą którego możliwe jest określenie: stanów przemieszczeń, odkształceń, naprężeń, sił cięcia, odchyłek kształtu, jakości powierzchni przecięcia, warunków początkowych dla przemieszczeń, odkształceń i naprężeń, itp.

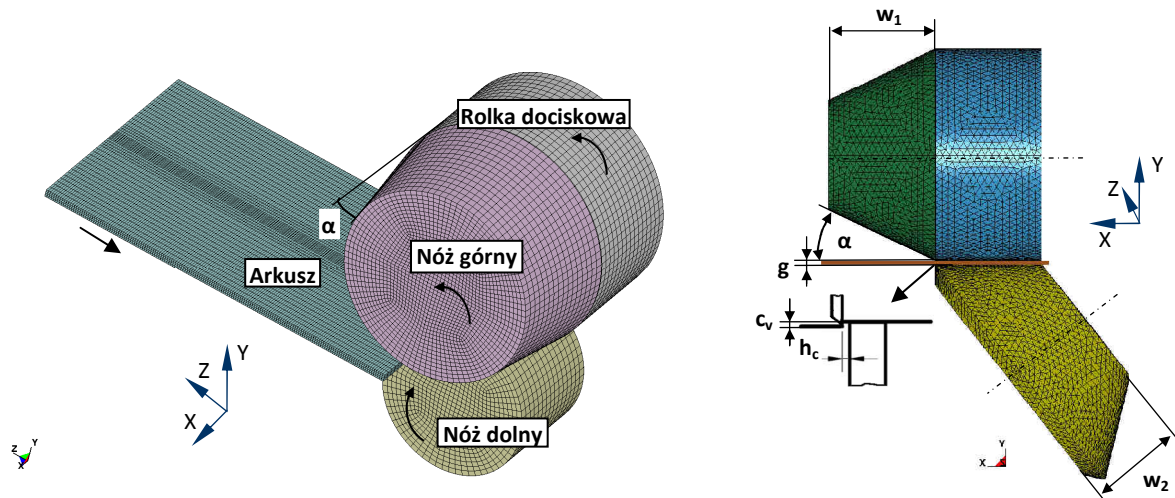
Do zalet opracowanych modeli i aplikacji numerycznych można zaliczyć m.in.:

- efektywny schemat rozwiązania,
 - różnorodne modele konstytutywne,
 - możliwość analizy różnorodnych problemów fizycznych: przemieszczeń, odkształceń i naprężeń,
 - możliwość zadawania różnorodnych warunków brzegowych i więzów kinematycznych,
 - możliwość zadawania różnorodnych warunków początkowych (historii),
 - efektywny algorytm analizy zagadnienia kontaktowego,
 - określenie wymiarów przedmiotu,
 - określenie początku pęknięcia blachy, kształtów pęknięć, wielkości zadziórów itp.,
 - określenie geometrii przedmiotu w czasie trwania procesu i po odciążeniu sprężystym,
 - określenie stanów naprężeń i odkształceń lokalnych w materiale,
 - określenie wpływu współczynnika tarcia na przebieg procesu i jakość wyrobu,
 - określenie stanów obciążenia, naprężeń i odkształceń narzędzi,
 - określenie obszarów kontaktu, poślizgu i przylegania.
- Opracowanie modeli trójwymiarowych procesu cięcia na nożycach krążkowych, gilotynie oraz wykrawania (rys. 3)

Dzięki temu możliwe jest uwzględnienie w analizach wpływu wielu parametrów technologicznych, dotychczas pomijanych w literaturze takich, jak np: długość linii cięcia i jej kształt, rzeczywistych wymiarów narzędzi, sposobów mocowania blachy, sposobów docisku blachy w zależności od jej długości i szerokości. Możliwe jest analizowanie zjawisk fizycznych zachodzących podczas i po procesie cięcia w każdym miejscu blachy oraz w całym przekroju, a także analizowanie zjawisk zachodzących pod powierzchnią przylegania narzędzia (np.: analiza przemieszczeń i odkształceń materiału, analiza tarcia i poślizgu, nacisków kontaktowych). Założono, że w procesie cięcia występuje w kształtowanym arkuszu blachy przestrzenny stan naprężeń i odkształceń. Opracowane aplikacje umożliwiają w systemach MES kompleksową analizę czasową stanów deformacji (przemieszczeń, odkształceń) i naprężeń, występujących w ciętym materiale dla przestrzennych stanów naprężeń i stanów przemieszczenia i odkształcenia. Możliwa jest pełna analiza dla następujących danych:

- dowolny materiał blachy oraz materiał narzędzi (dowolny moduł *Younga*, nieliniowa zależność właściwości plastycznych materiału od: intensywności odkształceń, intensywności prędkości odkształceń i temperatury, różne modele umocnienia, oraz ich uwzględnienie w procesie dekohezji itp.),
 - dowolna geometria narzędzi (np. nóż krążkowy, gilotynowy, stempel, matryca itp.) i materiału (dowolna długość, szerokość i grubość), a także ich zmienności w trakcie realizacji procesu,
 - dowolne parametry i nastawy rzeczywiste stanowiska badawczego np.: kąty pochylenia noży krążkowych w odniesieniu do danej płaszczyzny, zmienne siły docisku dociskaczy itp.,
 - dowolna struktura geometryczna powierzchni po obróbkach poprzedzających,
 - różne warunki tarcia w obszarze kontaktu narzędzi z blachą,
 - dowolne przemieszczenie poziome i pionowe narzędzia w czasie,
-

- dowolne warunki początkowe i brzegowe dla przemieszczeń, prędkości przemieszczeń, odkształceń, prędkości odkształceń i naprężeń.

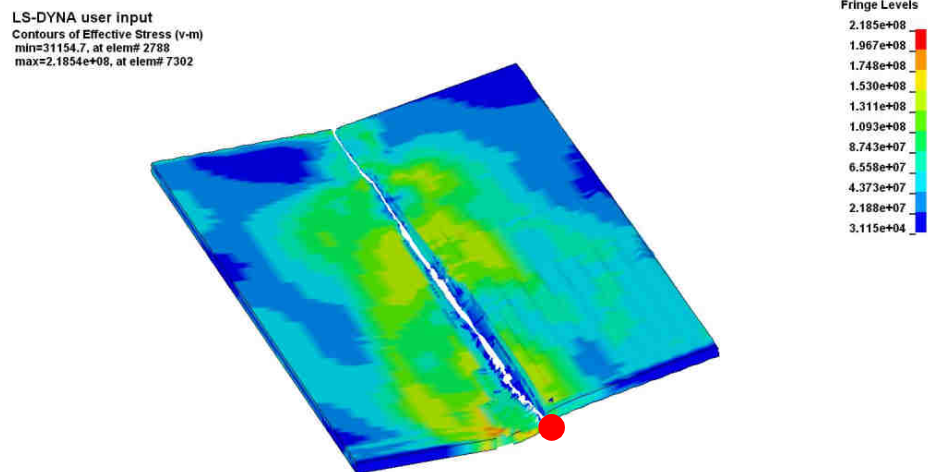


Rys. 3. Przykładowe modele komputerowe z widoczną siatką MES procesu cięcia na nożycach krążkowych

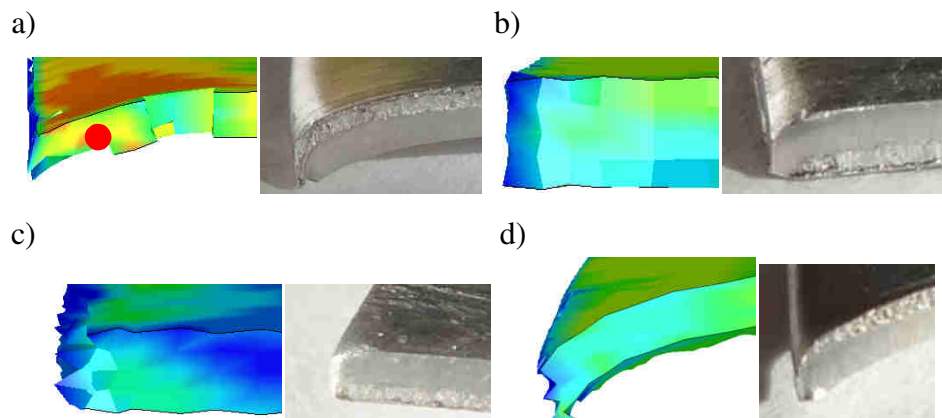
W przypadku obliczeń procesu cięcia z zastosowaniem MES niezbędnym etapem było określenie, jaka jest wrażliwość maksymalnych odkształceń i naprężeń w punktach dyskretnych blach na: zmianę wymiarów elementu skończonego, liczby elementów skończonych. W tym celu przeprowadzono analizę wrażliwości, a następnie opracowano modele efektywne procesu cięcia przy użyciu Solvera LS – DYNA oraz aplikacji LS – PrePost [3, 5, 16].

- Prognozowanie przebiegu procesów cięcia i jakości uzyskanych wyrobów w zależności od przyjętych parametrów i warunków realizacji procesu

Głównym problemem występującym podczas cięcia stopów metali lekkich na nożycach krążkowych i gilotynie jest bardzo częste formowanie się wiórów i zadziórów na powierzchni przecięcia, a także powstawanie odchyłek kształtu, w tym: zakrzywienia w postaci łuku, skręcenia arkusza blachy, wygięcia wypukłego arkusza, czy zagięcia krawędzi cięcia. Wiedza na temat możliwości kształtowania tego materiału za pomocą technik cięcia mechanicznego jest niewielka. Aktualnie w literaturze brakuje publikacji opisujących zachowanie się tego materiału podczas cięcia na nożycach krążkowych. Brakuje także modeli symulacyjnych, które mogą być cennym narzędziem umożliwiającym rozszerzenie przedziału czasu i poznanie zjawisk fizycznych, których analiza za pomocą badań eksperymentalnych jest utrudniona lub niemożliwa. Przykładowe wyniki badań symulacyjnych dotyczących wpływu luzu h_c między nożycami (rys. 3b) na jakość ciętej krawędzi przedstawiono na rys. 4 ÷ 6 z wykorzystaniem modelu materiałowego sprężysto/lepko-plastycznego *Johnson'a-Cooke'a*.

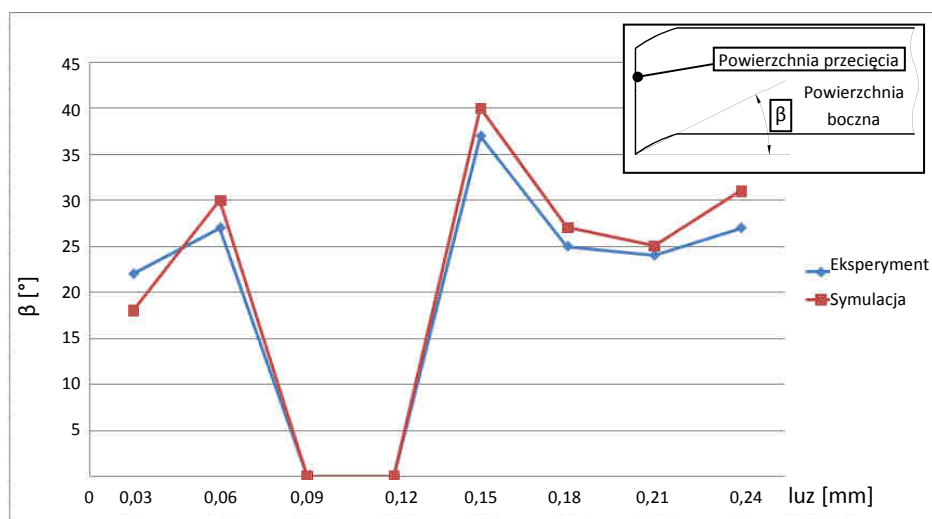


Rys. 4. Rozkład naprężeń zastępczych Hubera - Misesa po procesie cięcia ($h_c = 0,06$ mm)



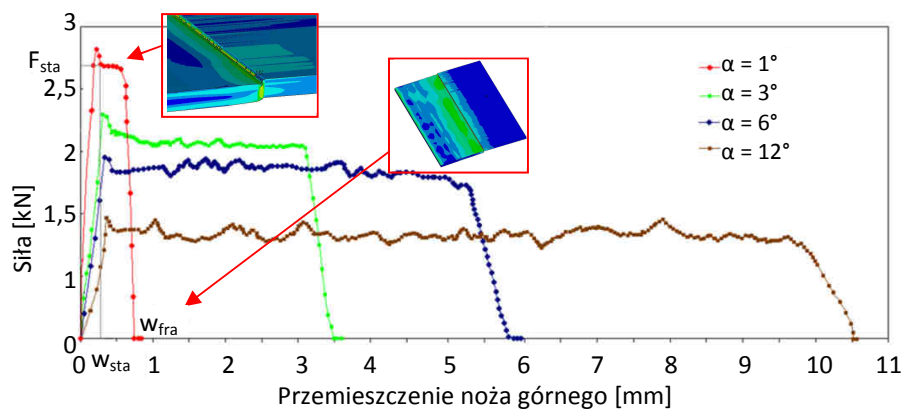
Rys. 5. Przykładowe porównanie zagięć powierzchni przecięcia uzyskanych w wyniku eksperymentu i symulacji:
a) $h_c = 0,06$ mm, b) $h_c = 0,09$ mm, c) $h_c = 0,12$ mm, d) $h_c = 0,24$ mm

Na rys. 6 porównano wartości kąta zagięcia powierzchni przecięcia uzyskanych w wyniku eksperymentu i symulacji. Uzyskane porównania wskazują na wysoki poziom zgodności wyników.



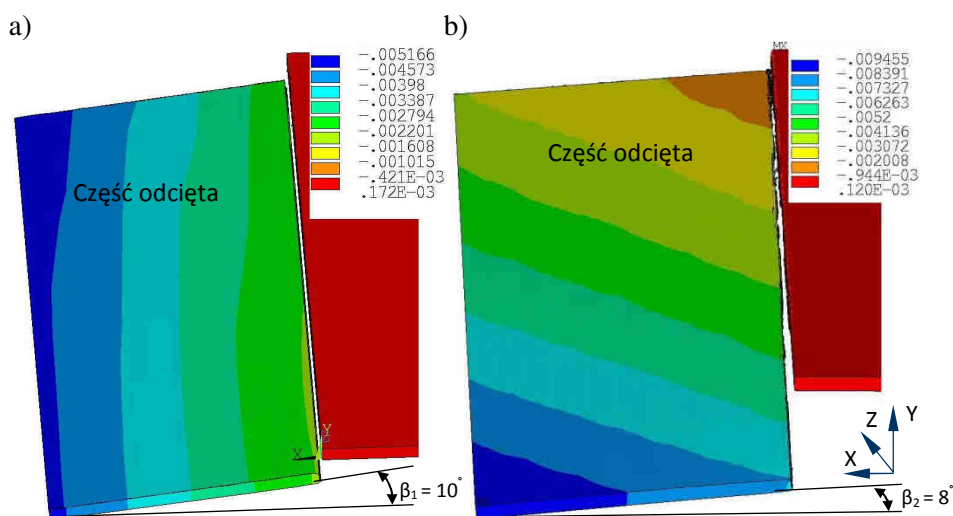
Rys. 6. Porównanie wartości kąta zagięcia powierzchni przecięcia uzyskanych w wyniku przeprowadzonego eksperymentu i symulacji

Na rys. 7 przedstawiono wpływ kąta pochylenia krawędzi tnącej noża górnego α na przebieg sił cięcia podczas cięcia stali 1018 na gilotynie. Podczas cięcia w przypadku gdy wartość kąta $\alpha > 0^\circ$, w wybranej chwili trwania procesu blacha cięta jest tylko w danym przekroju. W związku z tym wartości siły ustalonej F_{sta} nie zależą od długości linii cięcia. Siła cięcia zależy głównie od wartości kąta pochylenia krawędzi tnącej noża górnego α , którego wzrost powoduje spadek sił potrzebnych do przecięcia materiału, wydłuża jednak czas procesu w związku z koniecznością pokonania przez nóż górny dłuższej drogi. Z przeprowadzonych badań wynika, że najmniejsze zużycie energii potrzebnej do przecięcia materiału można uzyskać stosując wartość kąta pochylenia krawędzi tnącej noża górnego wynoszącą $\alpha = 3^\circ$. Zużycie jest mniejsze o około 17% w porównaniu do przypadku, gdy $\alpha = 1^\circ$. W przypadku gdy kąt wynosi $\alpha = 6^\circ$ zużycie wzrasta o około 29% w porównaniu do wartości zużycia dla $\alpha = 3^\circ$. W wyniku przeprowadzonych badań, z zastosowaniem piezoelektrycznego siłomierza, możliwe było wyznaczenie różnicy wartości maksymalnej siły cięcia pomiędzy symulacją a eksperymentem, która wynosiła około 10% [1, 3, 5, 6].

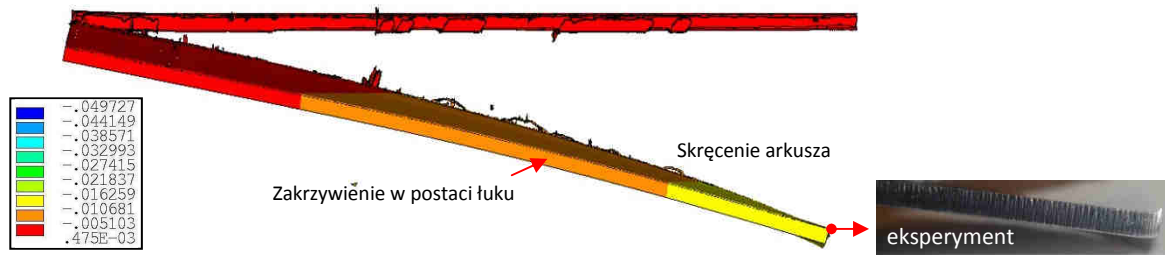


Rys. 7. Zależność siły cięcia od przemieszczenia noża górnego dla poszczególnych kątów pochylenia krawędzi tnącej noża górnego α

Rys. 8 przedstawia mapy przemieszczeń UY arkuszy blach po całkowitym rozdzieleniu dla wartości kąta $\alpha = 1^\circ$, $\alpha = 6^\circ$, $\alpha = 12^\circ$ oraz stałego luzu $a = 0,1$ mm.



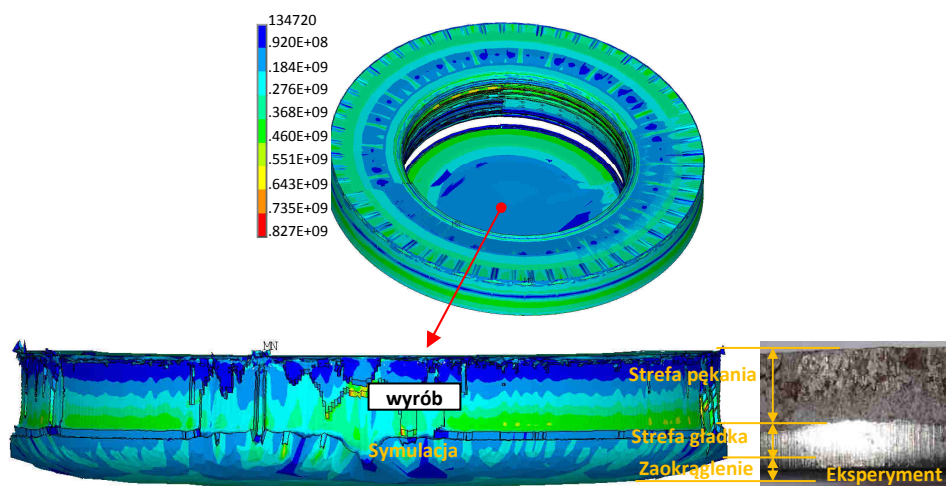
Rys. 8. Przemieszczenia UY arkusza blachy po całkowitym rozdzieleniu [m]: a) $\alpha = 1^\circ$, b) $\alpha = 6^\circ$



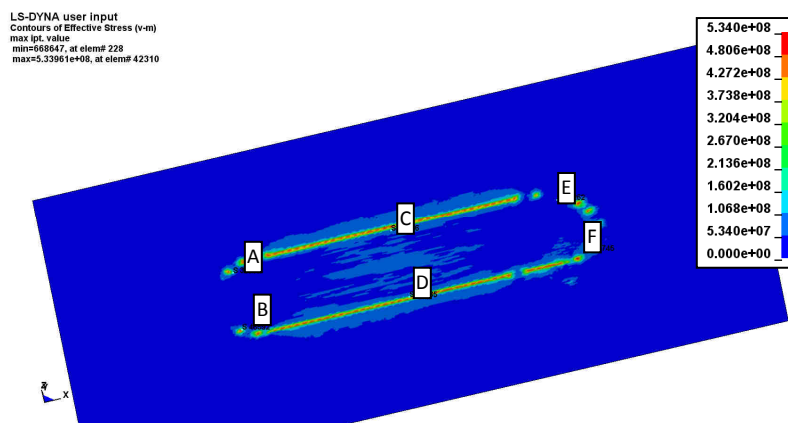
Rys. 9. Przemieszczenia UY arkusza blachy po całkowitym rozdzieleniu dla $\alpha = 12^\circ$

Wartość pochylenia α krawędzi tnącej noża górnego znacząco wpływa na stany przemieszczeń części odcinanej arkusza blachy. Przy mniejszych wartościach kąta, gdy $\alpha \leq 3^\circ$, część odcięta przemieszcza się równomiernie na całej długości linii cięcia (rys. 8a). Wartości przemieszczeń rosną natomiast w kierunku prostopadłym do linii cięcia w miarę oddalania się od niej. Kąt pochylenia krawędzi bocznej arkusza osiąga po procesie cięcia wartość $\beta_1 = 10^\circ$. W przypadku, gdy $\alpha = 6^\circ$ występuje już inny stan przemieszczeń (rys. 8b). Przemieszczenia rosną wzdłuż linii cięcia. Kąt pochylenia krawędzi bocznej arkusza osiąga po procesie cięcia wartość $\beta_2 = 8^\circ$. Stosowanie wartości kąta pochylenia krawędzi tnącej noża górnego $\alpha = 12^\circ$ jest niekorzystne ze względu na występowanie defektów arkusza w postaci jego skręcenia i zakrzywienia w postaci łuku (rys. 9).

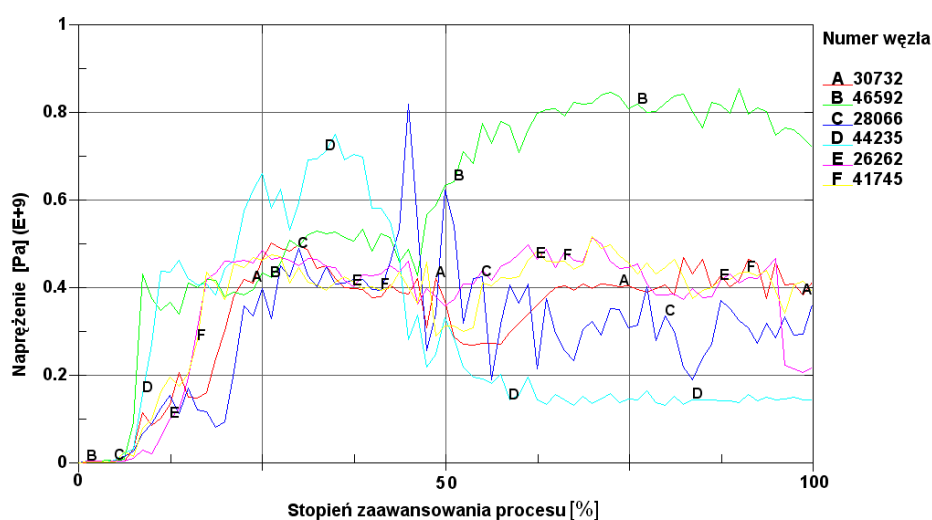
Przykładowe wyniki symulacji procesu wykrawania grubych i cienkich blach z uwzględnieniem krzywizny linii cięcia, przedstawiono na rysunkach 10 ÷ 12. Wykorzystując opracowane algorytmy i aplikacje komputerowe przeanalizowano wpływ luzu między stemplem a matrycą na stany naprężeń, odkształceń i jakość wyrobu. Z przeprowadzonych badań symulacyjnych i eksperymentalnych wynika, że wielkość luzu pomiędzy stemplem a matrycą ma znaczący wpływ na prędkość rozdzielania materiału. Jak wykazały badania eksperymentalne opracowane modele symulacyjne procesu wykrawania mogą być przydatne do oceny jakości powierzchni przecięcia wyrobu (rys. 10). Uzyskane wyniki pomiaru szerokości stref przelomów poślizgowego i rozdzielczego są do siebie zbliżone. Wzrost luzu spowodował zwiększenie szerokości strefy pęknięcia i zaokrąglenia na powierzchni przecięcia materiału. W przypadku wykrawania blach cienkich ($g < 0,5 \text{ mm}$) z przeprowadzonych analiz wynika, że największe wartości naprężeń w materiale występują w miejscach jego kontaktu z zaokrąglonymi krawędziami stempla (linie A, B, E, F). Powoduje to, że w wielu przypadkach następuje przyspieszone zużycie krawędzi tnących stempla i matrycy. Mniejsze wartości występują gdy, krawędź stempla jest prostoliniowa (linie C i D) (rys. 11).



Rys. 10. Porównanie wyników symulacji i eksperymentu charakterystycznych cech powierzchni przecięcia wyrobu: $a = 15\%g$



Rys. 11. Miejsca pomiaru naprężeń zastępczych podczas procesu wykrawania podłużnego elementu o zaokrąglonych krawędziach



Rys. 12. Wykres zmian maksymalnych naprężeń zastępczych podczas procesu wykrawania

Konsekwencją uzyskanych wyników procesu cięcia mechanicznego w odniesieniu do kształtowania materiałów metalowych jest możliwość sterowania właściwościami uzyskanego wyrobu [4, 10, 11, 12]. Wykazano, że przez odpowiedni dobór parametrów cięcia możliwe jest prognozowanie, jak i sterowanie rozkładem naprężeń i odkształceń własnych. Zwrócono uwagę na możliwość sterowania nie tylko wartością, rozkładem naprężeń i odkształceń wynikowych, ale i obszarem ich występowania, co ma znaczenie w wielu branżach przemysłu. Bardzo przydatnymi dla praktycznych zastosowań są wyniki symulacji, umożliwiające analizę sił cięcia potrzebnych do całkowitego rozdzielenia materiału. Możliwe jest prognozowanie wartości sił maksymalnych, jak i stacjonarnych, w zależności od parametrów procesu (np.: geometrii narzędzi, prędkości cięcia, luzów itp.) oraz od rodzaju materiału, jego grubości i wymiaru arkusza blachy. Dotychczas w wielu symulacjach cięcia mechanicznego bazujących na modelach 2D było to niemożliwe.

Opracowanie autorskich modeli MES do analizy procesów wykrawania detali o zarysie krzywoliniowym umożliwia rozwiązanie wielu problemów inżynierskich, takich jak: wyjaśnienie przyczyn powstawania zagięć i pofalowań krawędzi, co jest częstym defektem podczas wycinania cienkich blach i folii spożywczych [16]. Możliwe jest także określenie stanów naprężeń, odkształceń, przemieszczeń materiału, co ma decydujący wpływ w wypadku zgrzewania folii oraz kształtowania natryskowego.

3. Zastosowanie metody hydrodynamiki cząstek (SPH) do modelowania i analizy procesów cięcia mechanicznego materiałów metalowych

▪ Opracowanie procedur symulacji procesów cięcia z zastosowaniem metody SPH

Metoda SPH ma liczne zastosowania, zwłaszcza w zagadnieniach, w których występują skomplikowane i zmienne w czasie algorytmy kontaktowe oraz duże deformacje struktury. Taka cecha metody pozwala na jej wykorzystanie w symulacji procesów cięcia. Materiał poddawany jest w procesie cięcia złożonemu procesowi odkształcania, charakteryzującemu się dużymi lokalnymi przemieszczeniami i dużymi odkształceniami.

Metoda SPH wykorzystuje aproksymację jądra z tzw. funkcji jądra (ang.: *kernel approximation*). Numeryczne rozwiązywanie problemu wymaga w pierwszej kolejności dyskretyzacji dziedziny, dla której równania zostały zdefiniowane. W kolejnym etapie metoda aproksymuje dla każdego punktu każdą zmienną z dopuszczalnej przestrzeni funkcji oraz jej pochodne. Funkcja aproksymująca ma na celu przedstawienie równań różniczkowych cząstkowych, w postaci układu równań różniczkowych zwyczajnych w dyskretnej formie, ze zmienną czasu. Metoda SPH bazuje na funkcji wygładzającej (opisuje parametry stanu występujące w cząstce), oraz zbioru elementów dyskretnych rozmieszczonych w badanej przestrzeni, do których przypisana jest funkcja wygładzająca. W metodzie SPH maksymalny dystans, na którym występuje oddziaływanie między cząsteczkami, nazywa się długością wygładzania h (ang.: *smoothing length*), a odległość między cząstkami gęstością d (ang.: *particle density*).

Modelowanie procesu cięcia z zastosowaniem metody SPH przebiega według następujących etapów:

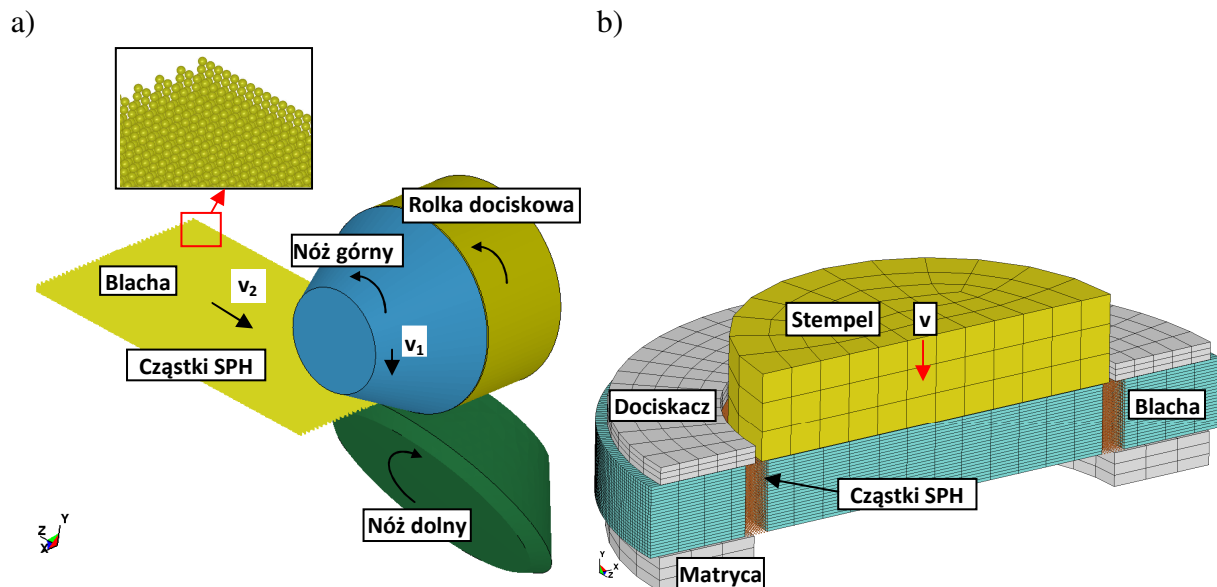
- 1) dyskretyzacja domeny w wyniku której otrzymuje się zbiór cząstek;
- 2) aproksymacja jądra (wykorzystanie całkowych reprezentacji dla aproksymacji pola funkcji);
- 3) zastąpienie aproksymacji jądra aproksymacją cząstek;
- 4) aproksymacja cząstek na odpowiednim kroku czasowym;
- 5) aproksymacja cząstek dla każdej zmiennej w przestrzeni funkcji. W wyniku tego otrzymuje się układ równań różniczkowych zwyczajnych ze zmienną czasową, które rozwiązuje się jawną metodą iteracyjną.

Opracowane procedury pozwalają ograniczyć problemy wynikające z modelowania procesu cięcia z zastosowaniem MES, w tym: nadmiernej dystorsji siatek, utraty masy obiektów, konieczności implementacji kryteriów pęknięcia itp. Przeprowadzono modelowanie numeryczne procesu cięcia zarówno z zastosowaniem metody bezsiatkowej SPH, jak i łączące dwie metody (w tym przypadku metody analizy MES z metodą cząstek hydrodynamicznych SPH) [7, 18, 19, 20].

▪ Opracowanie modeli trójwymiarowych procesu cięcia na nożycach krążkowych, gilotylinie oraz wykrawania z zastosowaniem metody SPH

W celu analizy procesów cięcia mechanicznego z zastosowaniem metody SPH opracowano modele przestrzenne, uwzględniające przestrzenny stan naprężeń i odkształceń w materiale. Aplikacje komputerowe wykonano dla procesów cięcia na nożycach krążkowych, gilotylinie oraz wykrawania (rys. 13). W pierwszym proponowanym podejściu metodą SPH opisano cały arkusz blachy (rys. 13a), w drugim podejściu zaproponowano połączenie modelu MES z modelem bazującym na cząstkach hydrodynamicznych (rys. 13b). Miało to na celu zwiększenie gęstości cząstek i dokładniejsze odwzorowanie procesu utraty spójności struktury materiału w obszarach kontaktu narzędzi z materiałem ciętym, przy jednoczesnej redukcji czasu obliczeń. Dlatego wydzielono w modelu obszar, który opisano regularną siatką cząstek SPH. Pozostały obszar blachy

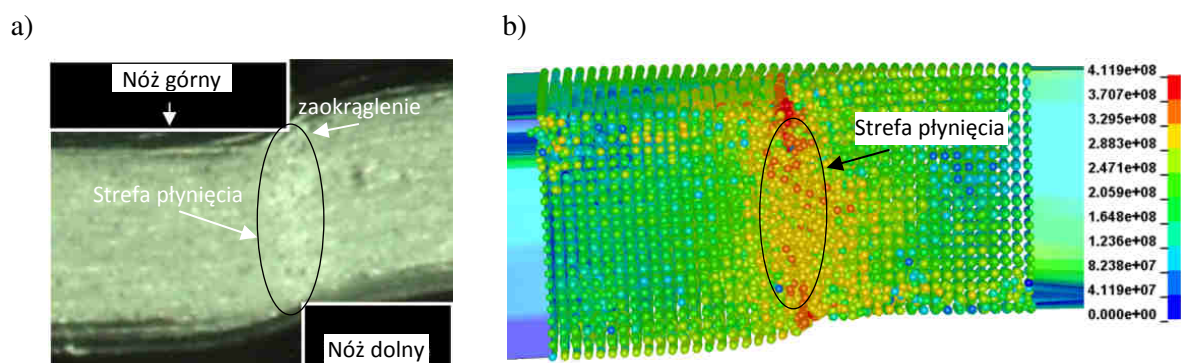
opisano jak w modelach MES siatką regularną o polach kwadratowych lub prostokątnych oraz typem elementu skończonego 3D SOLID164. Obie domeny, tzn. dyskretną MES i bezsiatkową SPH, scalono, z wykorzystaniem metody więzów kinematycznych. Przeprowadzona analiza wrażliwości modeli umożliwiła określenie wpływu najważniejszych parametrów charakteryzujących metodę SPH, tj.: długości wygładzania h oraz gęstości cząstek d na stany naprężeń, odkształceń mechanizmy płynięcia, rozdzielania materiału oraz na przebiegi sił cięcia [18, 19].



Rys. 13. Przykładowe modele numeryczne procesów cięcia mechanicznego: a) proces cięcia na nożycach krążkowych (metoda SPH), b) proces wykrawania (połączenie hybrydowe MES + SPH)

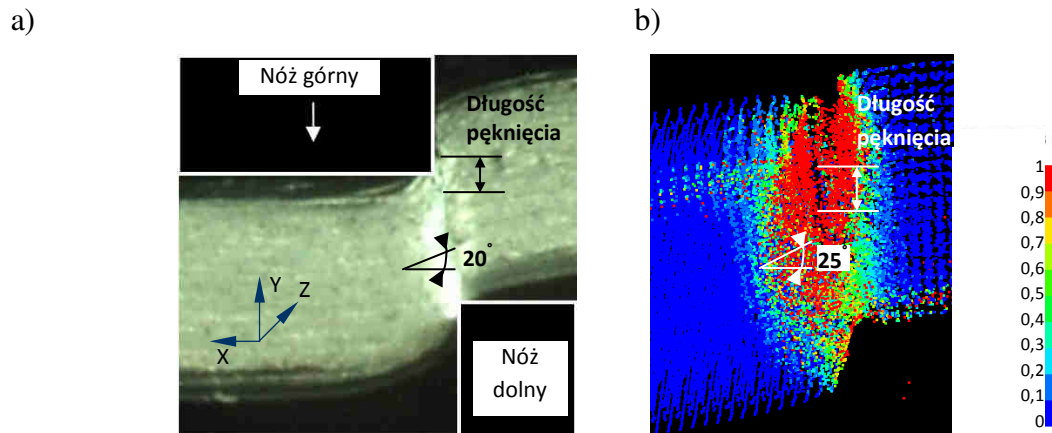
▪ Analiza rozkładu naprężeń, odkształceń mechanizmów płynięcia i pęknięcia materiałów metalowych

Przykładowe rozkłady naprężeń zastępczych w różnych fazach procesu cięcia na gilotynie stopu aluminium AA6111-T4 o grubości $g = 1$ mm przedstawiono na rysunkach 14-16. Stany deformacji z poszczególnych faz procesu porównano ze stanami uzyskanymi w badaniach eksperymentalnych i zarejestrowanych za pomocą kamery szybkoobrotowej. W początkowej fazie procesu obszar uplastyczniony występował tylko w sąsiedztwie krawędzi tnących narzędzi. W fazie plastycznego płynięcia, po pokonaniu drogi przez nóż górny $w = 0,25$ mm, można zaobserwować rozciągnięcie obszaru uplastycznionego na całą grubość blachy. Strefa płynięcia jest widoczna w postaci jaśniejszego obszaru na zdjęciu z kamery (rys. 14a).



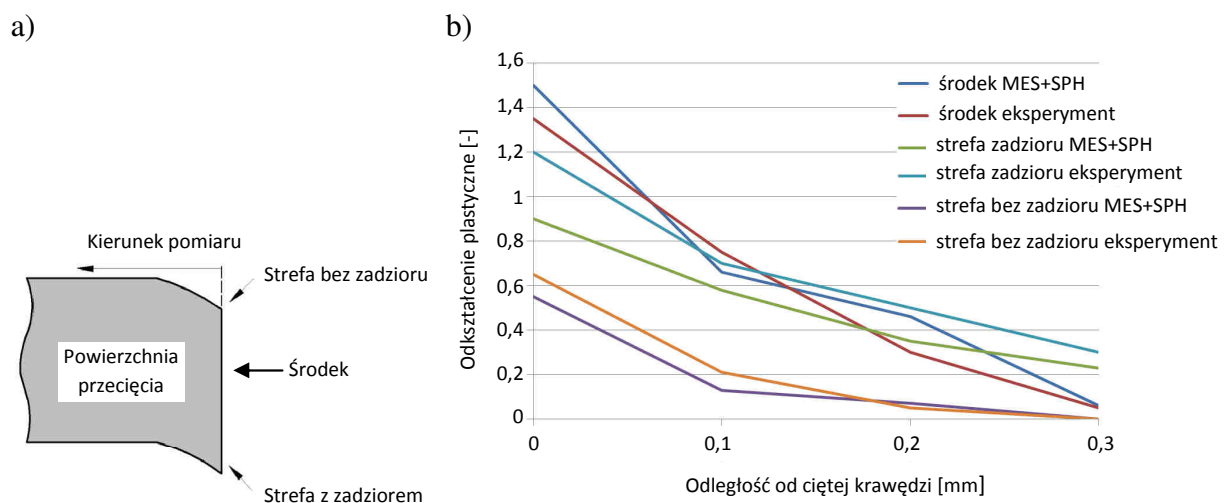
Rys. 14. Porównanie wyników badań eksperymentalnych z symulacją dla $w = 0,25$ mm: a) obraz z kamery, b) model MES + SPH (rozkład naprężeń zastępczych)

W fazie pęknięcia (rys. 15) można zaobserwować zwiększony udział strefy maksymalnych odkształceń plastycznych, która rozciągnęła się wzdłuż osi y. Jednocześnie pojawiły się w tym obszarze pierwsze pęknięcia. Opracowane modele SPH umożliwiają prognozowanie początku pęknięcia, jego kształtu i rozwoju w dowolnej chwili trwania procesu. Długości pęknięć oraz ich kształty uzyskane w wyniku symulacji są zbliżone do wyników eksperymentów (rys. 15a). Modele 3D umożliwiają także po wyłączeniu opcji widocznych krawędzi prognozowanie kształtów pęknięć w dowolnych kierunkach (rys. 15b). W wyniku prowadzonych badań wykonano pomiary odchylenia kierunku włókien materiału części odciętej, w stosunku do części zamocowanej blachy. Różnice pomiarów eksperymentalnych i symulacyjnych mieściły się w granicach pięciu stopni.



Rys. 15. Porównanie wyników badań eksperymentalnych z symulacją dla $w = 0,45$ mm: a) obraz z kamery, b) model MES + SPH (rozkład odkształceń zastępczych)

Pomiary odkształceń i naprężeń wykonano w trzech miejscach na powierzchni przecięcia tzn.: w strefie bez zadzioru, w środku próbki oraz w strefie z zadziorem (rys. 16a). Maksymalne wartości odkształceń plastycznych występują na krawędzi ciętej i maleją wraz ze wzrostem odległości od krawędzi aż do osiągnięcia stałej niewielkiej wartości (rys. 16b). Maksymalna wartość odkształcenia wynosiła dla analizowanego przypadku cięcia około 1,5 i występowała w strefie środkowej próbki, co świadczy o silnym umocnieniu się materiału w tej strefie. Najmniejsze wartości odkształceń wystąpiły w górnej strefie powierzchni przecięcia gdzie występuje zaokrąglenie. Największe deformacje struktury wystąpiły w obszarze około $0,1 \div 0,2$ mm od ciętej krawędzi [18, 19].



Rys. 16. Strefy pomiaru odkształceń i naprężeń na powierzchni przecięcia (a), zmiany wartości odkształcenia plastycznego w warstwie materiału w funkcji odległości od linii cięcia (b)

▪ Optymalizacja procesu wykrawania z zastosowaniem metody SPH

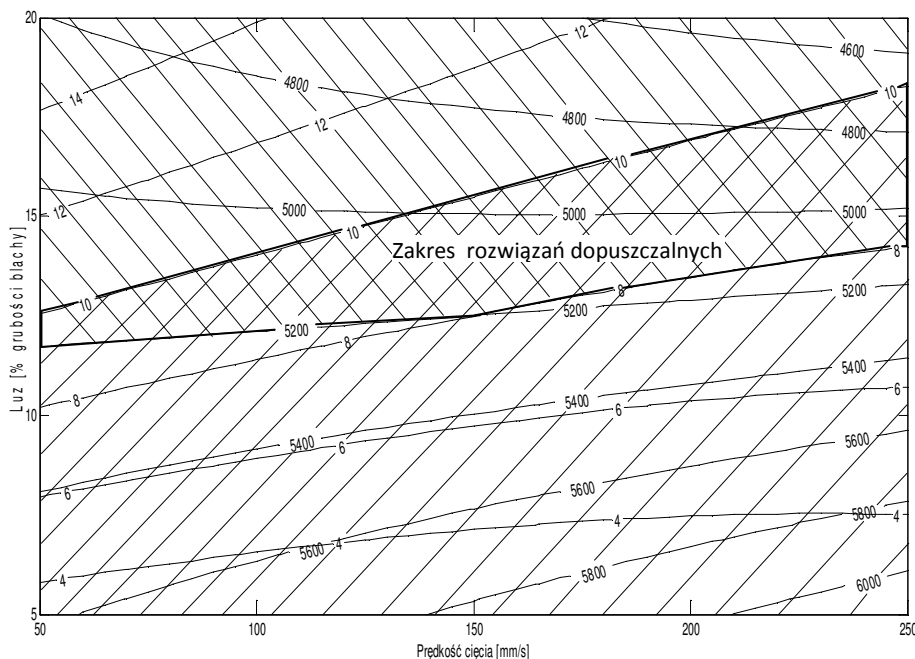
Głównymi parametrami w procesach wykrawania, umożliwiającymi sterowanie procesem są: luz między matrycą a stemplem oraz prędkość wykrawania. Wymagane jest przy tym zapewnienie odpowiednich krawędzi stempla, pozbawionych oznak zużycia. W związku z tym, że odpowiedni dobór parametrów procesu dla konkretnych grup materiałów oraz w zależności od ich grubości stwarza wiele trudności na liniach produkcyjnych przedstawiono podejście umożliwiające uzyskanie wymaganej jakości wyrobu przy jednoczesnym zachowaniu maksymalnej wydajności procesu.

Ważnym problemem w zastosowaniach praktycznych, jest sterowanie właściwościami użytkowymi wyrobu (zachowanie odpowiednich tolerancji kształtu wyrobu, minimalizacja zadziorów itp.) już na etapie jego wytwarzania. Dlatego też niezbędne jest określenie optymalnych warunków realizacji procesu. Ze względu na określone kryteria i warunki ograniczające najkorzystniej jest stosować istniejące programy komputerowe np. Matlab.

Autor przeprowadził badania dla stali 1018 o grubości $g = 4$ mm. Do zmiennych decyzyjnych zaliczono: prędkość wykrawania o przedziale zmienności $v = 5 \div 250$ mm/s, oraz luz między stemplem a matrycą o przedziale zmienności $a = 5 \div 20\%$ g. Warunki cięcia dobierano zgodnie z planem statycznym zdeterminowanym pięciopoziomowym rotabilnym, wykorzystując program komputerowy PLANEKS – STAT. Do badań wykorzystano model hybrydowy wykrawania MES + SPH (rys. 13b). Wyniki badań zostały poddane weryfikacji statystycznej. Istnienie błędów grubych sprawdzano za pomocą statystyk B_6 , natomiast jednorodność wariancji – za pomocą testu *Cochrana*.

Optymalizację procesu wykrawania przeprowadzono przy użyciu programu Matlab z użyciem toolbox Optimization. Dla rozpatrywanego procesu wykrawania określono zbiór wariantów dopuszczalnych w obszarze zmiennych sterowalnych do jakich należy zaliczyć prędkość wykrawania v oraz luz między stemplem a matrycą a (rys. 17), przy następujących ograniczeniach wynikających z uwarunkowań technologicznych: wysokość zadzioru $h_z \leq 10\%$ g, siła wykrawania $F_w \leq 5200$ N.

Wyniki obliczeń numerycznych procesu cięcia zarówno z zastosowaniem metody bezsiatkowej SPH, jak i łączące dwie metody (w tym przypadku metody analizy MES z metodą cząstek hydrodynamicznych SPH) potwierdzają możliwość przeprowadzenia poprawnej analizy zjawisk fizycznych zachodzących podczas procesu cięcia mechanicznego. Opracowanie autorskich aplikacji numerycznych, istotnych w analizie złożonych zjawisk fizycznych występujących w procesach cięcia mechanicznego, w dowolnej chwili trwania procesu, stwarza możliwości jego optymalizacji ze względu na przyjęte kryteria.



Rys. 17. Wykres zależności wysokości zadzioru i siły wykrwania od luzu między narzędziami i prędkości wykrwania

Ważnym problemem w zastosowaniach praktycznych, jest sterowanie właściwościami użytkowymi wyrobu już na etapie jego wytwarzania. Przedstawiono sposób formułowania zadania optymalizacji wielokryterialnej oraz jego rozwiązania dla procesu wykrwania przy pomocy opracowanych skryptów, w programie Matlab (toolbox Optimization). Z opracowanego zbioru rozwiązań dopuszczalnych wynika, że funkcje kryterialne są funkcjami monotonicznymi ze względu na zmienne sterujące (parametry technologiczne). Wykres ułatwia wybór przez technologa najlepszego rozwiązania dla innych warunków cięcia i kryteriów optymalizacji [15, 17].

4. Opracowanie systemu wizyjnego do monitorowania procesu cięcia

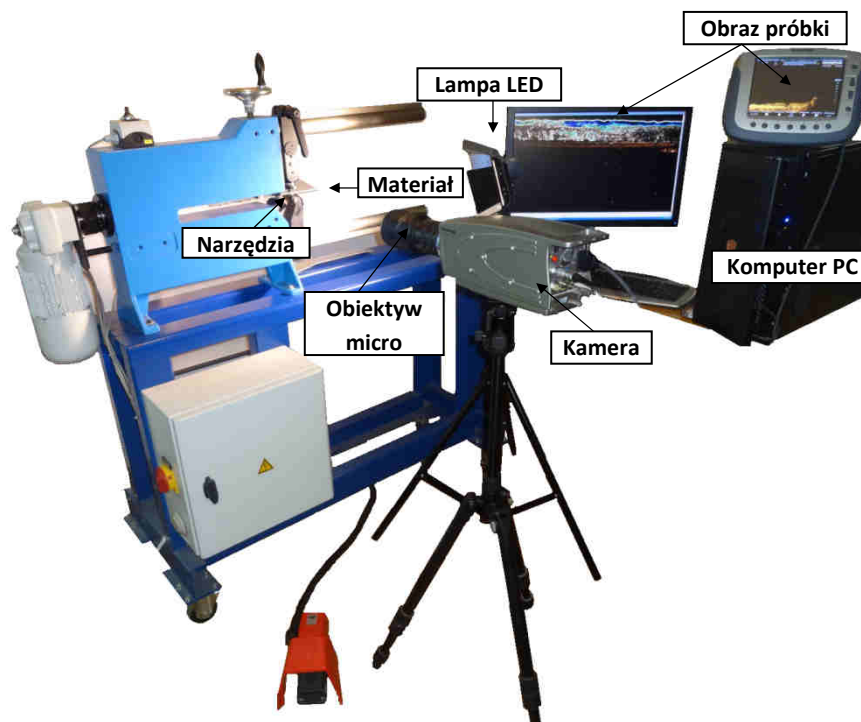
Zastosowanie nowej metody rejestracji przebiegu procesu cięcia stwarza bardzo duże możliwości poznawcze. Badania z użyciem zintegrowanego systemu rejestracji obrazów szybkozmiennych umożliwiają analizę procesu w zakresie dużych przemieszczeń i odkształceń, dużych prędkości cięcia z uwzględnieniem nieliniowości procesu. Zastosowanie technik wizyjnych umożliwia wyjaśnienie zjawisk fizycznych towarzyszących procesowi cięcia oraz opracowanie zaleceń dotyczących projektowania tego procesu oraz prawidłowego doboru parametrów obróbki ze względu na przyjęte kryteria.

Zaproponowana przez autora monografii metoda badań, z wykorzystaniem zaawansowanego systemu wizyjnego, polega na pomiarze przemieszczeń i odkształceń w strefie cięcia, momentu propagacji pęknięcia, analizie trajektorii, pomiarze prędkości pęknięcia oraz ocenie jakości wyrobu, w zależności od przyjętych parametrów obróbkowych. Zastosowanie technik wizyjnych umożliwiło kompleksową analizę procesu cięcia, m.in.: wybranych stali konstrukcyjnych, stopów aluminium oraz stali elektrotechnicznych, a także weryfikację modeli symulacyjnych bazujących na metodach MES oraz bezsiatkowych – SPH. W ramach przeprowadzonych badań przez autora monografii z zastosowaniem systemu wizyjnego wykonano następujący zakres prac [3, 6, 7, 9, 13, 18, 19, 20]:

- przeprowadzono analizę pól przemieszczeń materiału,
- dokonano analizy procesu narastania frontu pęknięcia podczas deformacji,

- przeprowadzono pomiary ugięcia powierzchni czołowej powstałej pod wpływem docisku narzędzia,
- zarejestrowano widok stanu powierzchni wyrobu powstałej po cięciu w postaci obszarów: błyszczącego i matowego oraz dokonano oceny wielkości zadziorów lub innych defektów np.: zagięcie krawędzi, wiórów,
- określono zależności pomiędzy stosowanymi parametrami obróbki, ich wpływem na jakość wyrobu finalnego oraz na jego własności magnetyczne.

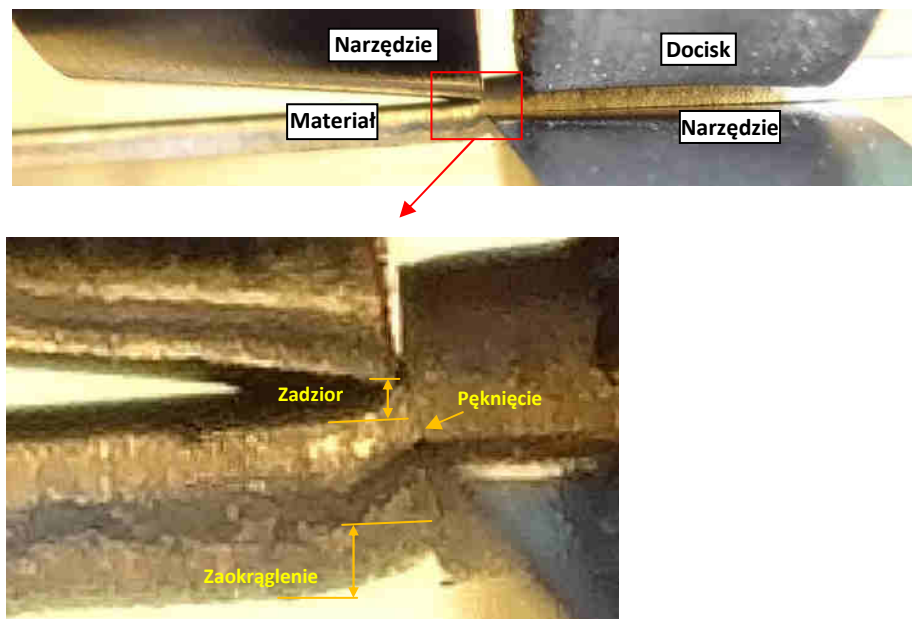
System wizyjny składał się z następujących elementów składowych: kamery szybkoobrotowej i-SPEED TR, obiektywy: AF-S MICRO NIKKOR 105 mm 1:2.8G; AF-S NIKKOR 50 mm 1:1.4G, pierścienie pośrednie, pierścień LED oraz lampy LED, komputera PC (rys. 18). W proponowanym przez autora projekcie oświetlenia zapewniono odpowiednie zobrazowanie powierzchni próbki z uwzględnieniem struktury materiału. Sekwencja zdjęć (do 10000 klatek na sekundę) zarejestrowanych za pomocą kamery ze specjalnie dobranym obiektywem dedykowanym do dużych powiększeń jest zapisywana na dysku twardym komputera. Zastosowane oprogramowanie umożliwiło śledzenie obiektów, zmieniających swoje położenie w czasie, wyznaczenie przemieszczeń, zaś wyniki przedstawiać w postaci tabel lub wykresów. Pomiary polegały na okresowej rejestracji serii obrazów w zadanym interwale czasu, z których pierwszy stanowił obraz referencyjny.



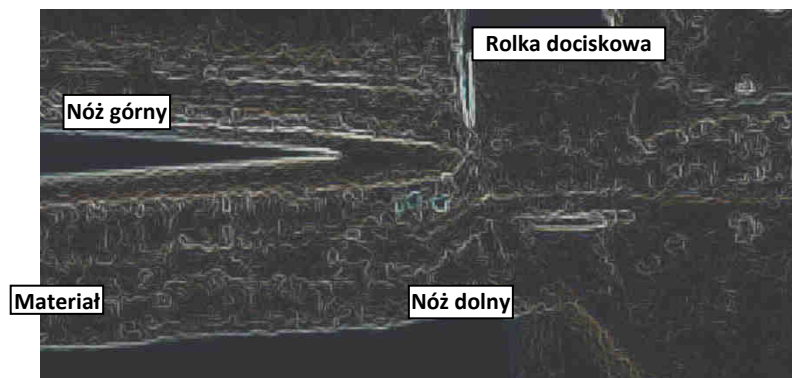
Rys. 18. System wizyjny wykorzystany do analizy procesu cięcia (cięcie na nożycach krążkowych)

Przykładowe wyniki monitorowania procesu w trybie online przedstawiono na rysunkach 19 ÷ 21. Na rys. 19 pokazano fazę pęknięcia stopu aluminium AA6111 - T4 o grubości $g = 1,5$ mm podczas procesu cięcia na nożycach krążkowych. Dzięki opracowanej metodzie uzyskano możliwość analizy przebiegu zjawisk fizycznych w strefie cięcia, jak i poza nią. Dzięki temu możliwe było śledzenie zarówno mechanizmów rozdzielania, jak i odsprężynowania części odciętej arkusza blachy. Proponowana przez autora metoda stwarza możliwość śledzenia płynięcia i pęknięcia materiału. Obserwacja tworzenia się charakterystycznych stref na powierzchni przecięcia oraz jej defektów jest możliwa już

w trakcie trwania procesu. Pomiar długości stref jest możliwy po przeskalowaniu obrazu. Za pomocą pomiaru przemieszczeń pikseli materiału, z wykorzystaniem opcji wykrywania krawędzi, możliwe jest wyznaczenie stref płynięcia i wartości odkształceń w strefie cięcia



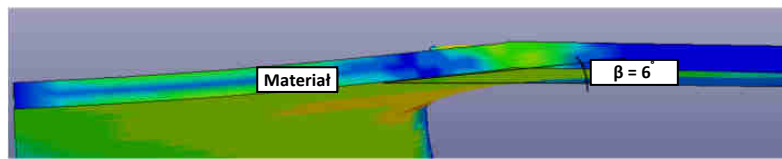
Rys. 19. Faza pęknięcia stopu aluminium AA6111 - T4 kształtowanego na nożycach krążkowych



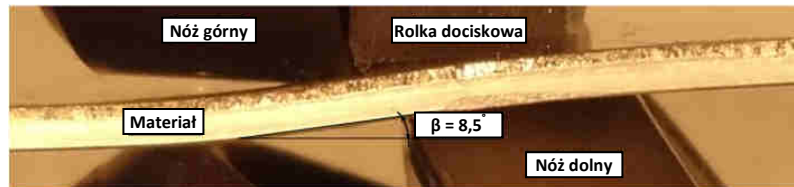
Rys. 20. Analiza kinematyki płynięcia z zastosowaniem opcji wykrywania krawędzi i rozpoznawania pól przemieszczeń

Zastosowane techniki wizyjne zostały wykorzystane do walidacji modeli numerycznych. Obecnie walidacja modeli symulacyjnych procesów cięcia opiera się głównie na porównywaniu sił cięcia i jakości powierzchni przecięcia uzyskanych w symulacji i w warunkach eksperymentu. Zaproponowana metoda badań stwarza możliwość porównywania także momentów inicjacji pęknięcia, wartości odkształceń, kształtów pęknięć w dowolnej chwili trwania procesu, co stwarza możliwość weryfikacji stosowanych modeli zniszczenia bądź kryteriów pęknięcia użytych w symulacjach MES [3, 5, 7]. Ocena dokładności komputerowych badań symulacyjnych odbywała się w poszczególnych fazach procesu i obejmowała także obszary blachy występujące poza linią cięcia (rys. 21).

a)



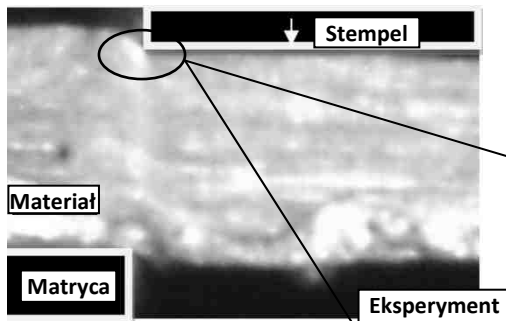
b)



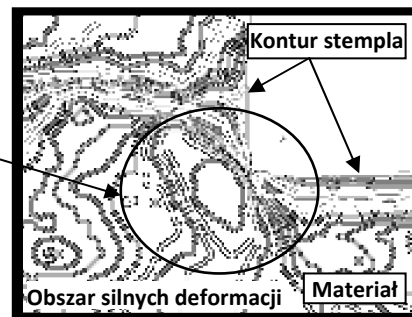
Rys. 21. Porównanie wyników symulacji z eksperymentem w końcowej fazie procesu: a) symulacja, b) eksperyment ($a = 40$ mm)

Techniki wizyjne zostały wykorzystane także do walidacji modeli SPH. Na rys. 22 przedstawiono analizę stanów przemieszczeń na początku fazy plastycznego płynięcia w procesie wykrawania stali 1018, z zastosowaniem obrazu z widoczną strukturą materiału. Największe deformacje struktury materiału można zaobserwować w miejscu kontaktu stempla z materiałem. Po obróbce obrazu i uwidocznieniu jego struktury, objawiającej się w postaci charakterystycznego układu linii, możliwe było porównanie układów linii z kolejnych obrazów zarejestrowanych w poszczególnych fazach procesu. W wyniku tego określono obszary występowania silnych nieliniowości geometrycznych, określono obszary przylegania i poślizgu, a następnie porównano je ze zmianami układów cząstek SPH.

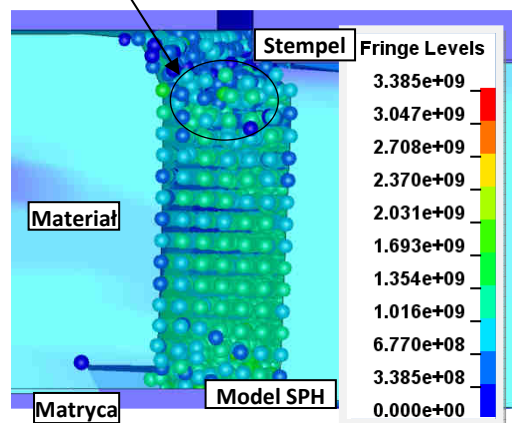
a)



b)



c)



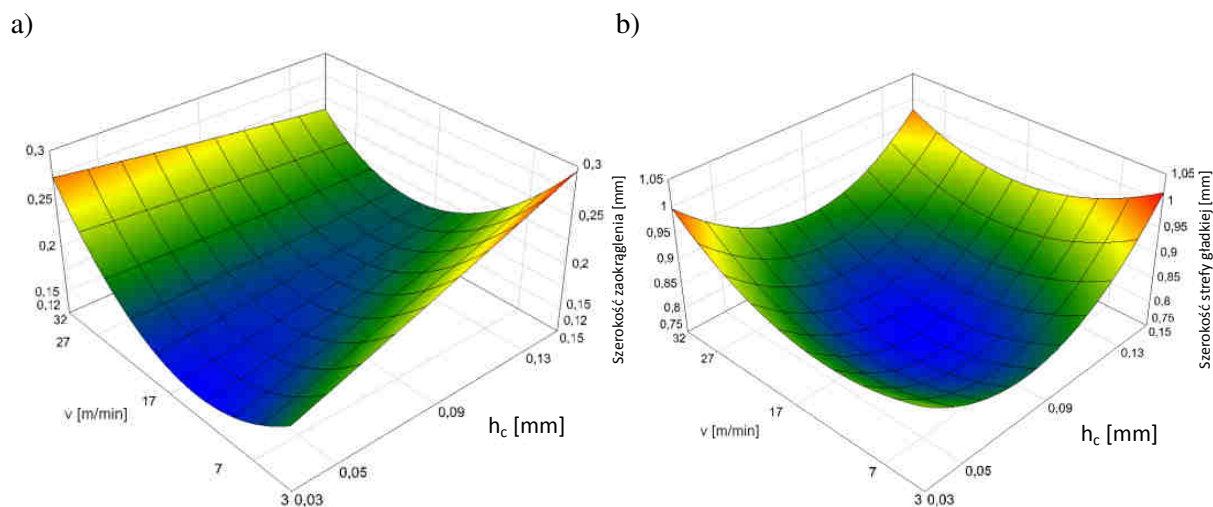
Rys. 22. Wizualizacja początkowej fazy plastycznego płynięcia procesu wykrawania stali 1018 o grubości $g = 4$ mm: a) obraz z kamery, b) obraz z kamery z widoczną strukturą materiału i wydzielonym obszarem silnych deformacji w strefie kontaktu, c) model SPH z widocznym rozkładem naprężeń zastępczych

5. Opracowanie metodyki kompleksowej oceny jakości procesów cięcia stopów metali lekkich

- Opracowanie jakościowych zależności wpływu wybranych parametrów procesu cięcia na jego przebieg i jakość wyrobu

W ramach prowadzonych badań eksperymentalnych przeprowadzono szeroką analizę parametryczną procesów cięcia mechanicznego dla wybranych gatunków stali konstrukcyjnych, stopów metali lekkich i stali elektrotechnicznych [2, 4, 6, 9, 13]. Szczególny nacisk położono na analizę stopów metali lekkich i stali elektrotechnicznych, ze względu na liczne problemy występujące w kształtowaniu tych materiałów oraz niewielki zasób informacji źródłowych dostępnych na ten temat w literaturze.

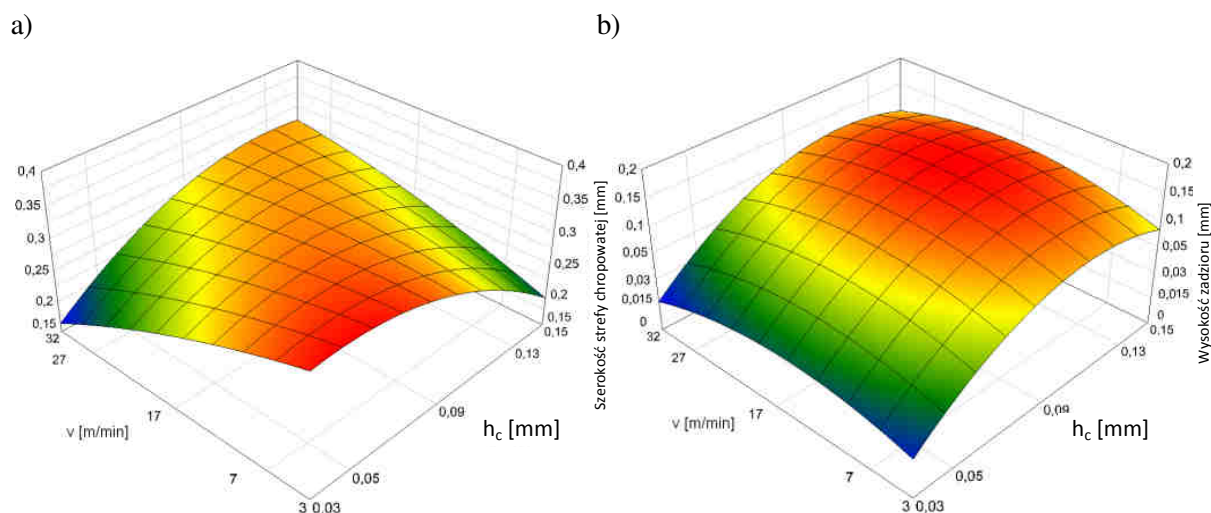
Analizując mechanizmy zjawisk, zachodzących podczas procesu cięcia stopów aluminium za pomocą dwóch elementów tnących, można zaobserwować zwiększony udział momentu gnącego, w porównaniu do kształtowania materiałów konstrukcyjnych. Powoduje to powstawanie dodatkowych sił rozciągających, występujących w miejscu kontaktu noża górnego z materiałem kształtowanym oraz sił ściskających w miejscu kontaktu materiału z krawędzią noża dolnego. Ze wzrostem prędkości cięcia i luzu między narzędziami tnącymi moment gnący oraz krzywienie się arkusza blachy poza strefą cięcia mają zwiększony udział w stabilności procesu i kształtowaniu materiału. Na rysunkach 23 i 24 przedstawiono wpływ prędkości cięcia i luzu na wartości poszczególnych stref na powierzchni przecięcia stopu aluminium AA6111-T4 o grubości $g = 1,5$ mm kształtowanego na nożycach krążkowych. Wykazano, że na kształtowanie się zaokrąglenia duży wpływ oprócz wartości luzu ma także prędkość cięcia i nie może być traktowana marginalnie (rys. 23).



Rys. 23. Wpływ luzu i prędkości cięcia na szerokość stref: a) zaokrąglenia, b) gładkiej

Największe wartości tej strefy występują dla przedziału prędkości cięcia $v = 3 \div 7$ m/min oraz gdy $v = 32$ m/min. Przy prędkościach cięcia wynoszących $v = 3 \div 7$ m/min wzrost luzu powoduje wzrost zaokrąglenia. Wartość prędkości cięcia i luzu ma także znaczący wpływ na udział strefy gładkiej na powierzchni przecięcia (rys. 23b). Szczególnie niekorzystnym przypadkiem w aspekcie kształtowania się tej strefy jest cięcie z luzem wynoszącym $h_c = 6\%g$. Strefa gładka jest wtedy najwęższa ale można ją zwiększyć odpowiednio dobierając prędkość cięcia z zakresu $v = 3 \div 5$ m/min lub $v = 25 \div 32$ m/min. Podczas fazy rozdzielania materiału pęknięcie może przebiegać stabilnie i przyjmować kształt linii prostej lub przebiegać niestabilnie i przyjmować kształt linii zakrzywionej. Faza pęknięcia materiału na powierzchni przecięcia jest widoczna w postaci strefy chropowatej, zwanej również strefą pęknięcia. W niektórych przypadkach można również uzyskać dwie strefy pęknięcia wzdłuż grubości

blachy. W wyniku przeprowadzonych badań, w zakresie zastosowanych wartości parametrów cięcia, wymienione problemy nie wystąpiły. Wpływ prędkości cięcia i luzu na wartość strefy pękania przedstawiono na rys. 24a. Zarówno prędkość cięcia, jak i wartość luzu decydują o szerokości strefy pękania na powierzchni przecięcia. Na rys. 24b przedstawiono wpływ prędkości cięcia i luzu na wysokość zadzioru na powierzchni przecięcia materiału. Na podstawie przeprowadzonej analizy stanu wiedzy stwierdzono, że wzrost wartości luzu powoduje wzrost wysokości zadziorów.



Rys. 24. Wpływ prędkości cięcia i luzu na szerokości stref: a) chropowatej (pękania), b) zadzioru

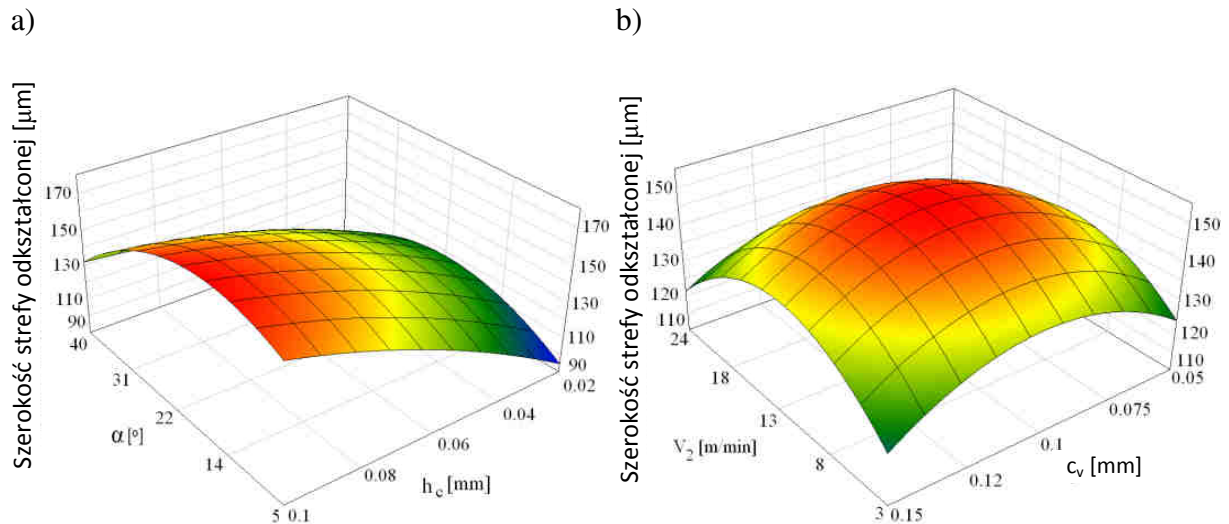
Największe wysokości zadziorów występowały przy środkowych nastawach prędkości wynoszących około $v = 17$ m/min oraz luzach $h_c = 6\%$. W tym przypadku cięcia istotnym problemem było formowanie się nieregularnych zadziorów na powierzchni przecięcia wzdłuż linii cięcia, które powstały na skutek występowania dodatkowych sił rozciągających w strefie cięcia i rozerwania materiału.

6. Opracowanie metodyki kompleksowej oceny jakości procesów cięcia stali elektrotechnicznych

Aktualny zasób wiedzy w literaturze jest ograniczony w zakresie wyników badań wpływu parametrów technologicznych i warunków procesów cięcia na właściwości magnetyczne materiałów elektrotechnicznych. Istotnym problemem jest określenie szerokości powstałej strefy naprężeń i odkształceń w materiale wzdłuż linii cięcia, w zależności od przyjętych wartości parametrów oraz ich powiązania, zarówno z jakością ciętej krawędzi, jak i właściwościami magnetycznymi stali [5, 20].

▪ Opracowanie modeli matematycznych, fizycznych oraz symulacyjnych MES i SPH procesu cięcia stali elektrotechnicznych

Modele umożliwiają kompleksową i bezinwazyjną analizę wpływu warunków procesu i parametrów technologicznych na stany naprężeń, odkształceń, przemieszeń oraz na jakość ciętej krawędzi. Za pomocą opracowanych modeli możliwe było określenie m.in. stanów naprężeń zastępczych w sąsiedztwie ciętej krawędzi oraz szerokości strefy odkształconej w materiale w zależności od przyjętych parametrów obróbki, mającej duży wpływ na zmiany właściwości magnetycznych stali. Na rys. 25 przedstawiono wpływ wybranych parametrów technologicznych procesu cięcia stali krzemowej o ziarnie zorientowanym na nożycach krążkowych na szerokość tej strefy. Badania zrealizowano na stanowisku badawczym przedstawionym na rysunku 3a.

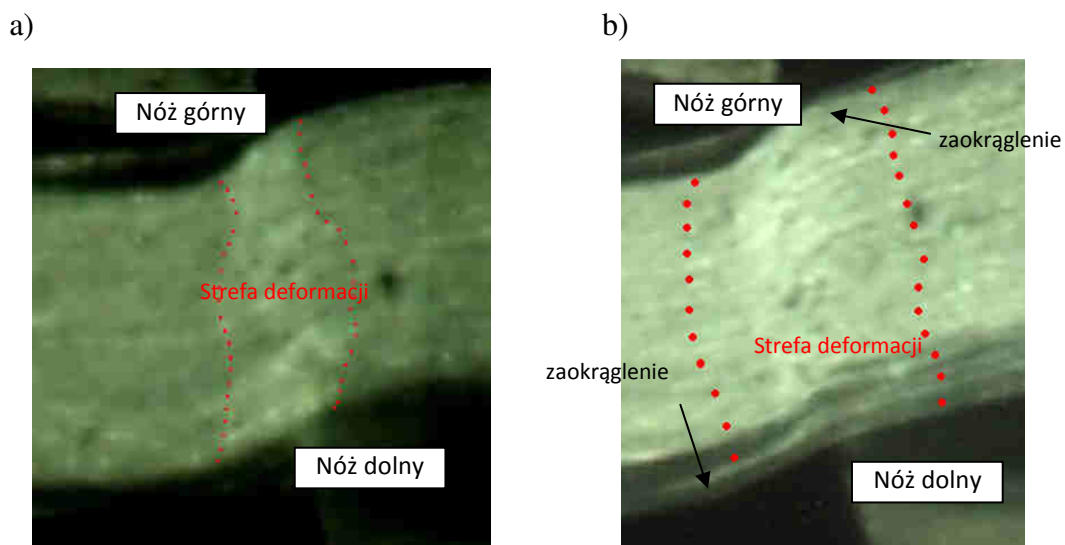


Rys. 25. Wpływ analizowanych parametrów procesu cięcia blachy typu ET 122 - 30 o grubości $g = 0,3$ mm na szerokość strefy deformacji

Analiza wyników badań pozwala na stwierdzenie, że ze wzrostem wartości luzu między narzędziami h_c zwiększa się szerokość strefy zdeformowanej (rys. 25a). Niekorzystne warunki cięcia ze względu na zwiększoną szerokość strefy deformacji wystąpiły podczas cięcia blachy typu ET 122 - 30 nożem o kącie pochylenia krawędzi tnącej kształtującym się w zakresie $\alpha = 20 \div 25^\circ$. Wzrost wartości prędkości cięcia v_2 i luzu między nożami powoduje zwiększenie szerokości strefy odkształconej. Niekorzystną konfiguracją parametrów jest jednoczesny wybór wartości ze średnich zakresów dla prędkości cięcia, kąta pochylenia krawędzi tnącej noża górnego oraz zachodzenia noży c_v (rys. 25b).

▪ Analiza kinematyki płynięcia oraz pomiary szerokości strefy odkształconej z zastosowaniem systemu wizyjnego

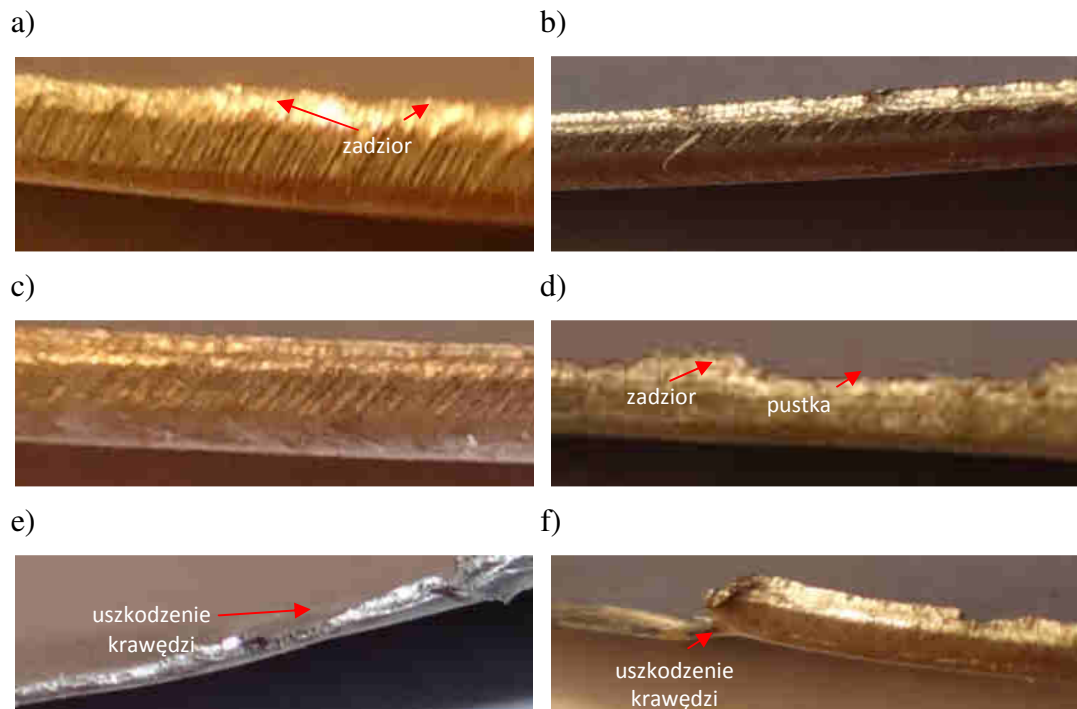
Opracowana metodyka umożliwi obserwację zjawisk fizycznych zachodzących w czasie trwania procesu cięcia, co umożliwi precyzyjne określenie m.in. obszarów przylegania, poślizgu oraz strefy deformacji (rys. 26). Dzięki temu możliwe jest także przeprowadzenie walidacji modeli MES i SPH procesu cięcia stali elektrotechnicznych w dowolnych fazach procesu.



Rys. 26. Wpływ luzu między ostrzami na szerokość strefy odkształconej podczas fazy plastycznego płynięcia: a) $h_c = 0,02$ mm, b) $h_c = 0,08$ mm

▪ Przyczyny powstawania defektów powierzchni przecięcia stali elektrotechnicznych

Na rys. 27 pokazano widok powierzchni przecięcia próbek wykonanych z blachy typu ET 122 - 30 o grubości $g = 0,3$ mm zarejestrowany za pomocą mikroskopu optycznego "Vision Engineering". Wyniki potwierdzają fakt powstawania w pewnych przypadkach niekorzystnych zjawisk w postaci defektów ciętej krawędzi takich jak: zadziorów, pofalowań oraz pustek. Opracowana metodyka badań umożliwia sterowanie właściwościami ciętej blachy w aspekcie redukcji defektów.



Rys. 27. Charakterystyczne cechy powierzchni przecięcia próbek zarejestrowane za pomocą mikroskopu optycznego: a) $v_2 = 3$ m/min, $h_c = 0,04$ mm, $\alpha = 30^\circ$, $c_v = 0,1$ mm, b) $v_2 = 13$ m/min, $h_c = 0,04$ mm, $\alpha = 30^\circ$, $c_v = 0,1$ mm, c) $v_2 = 18$ m/min, $h_c = 0,04$ mm, $\alpha = 30^\circ$, $c_v = 0,1$ mm, d) $v_2 = 3$ m/min, $h_c = 0,08$ mm, $\alpha = 30^\circ$, $c_v = 0,1$ mm, e) $v_2 = 18$ m/min, $h_c = 0,08$ mm, $\alpha = 30^\circ$, $c_v = 0,1$ mm, f) $v_2 = 24$ m/min, $h_c = 0,08$ mm, $\alpha = 30^\circ$, $c_v = 0,1$ mm

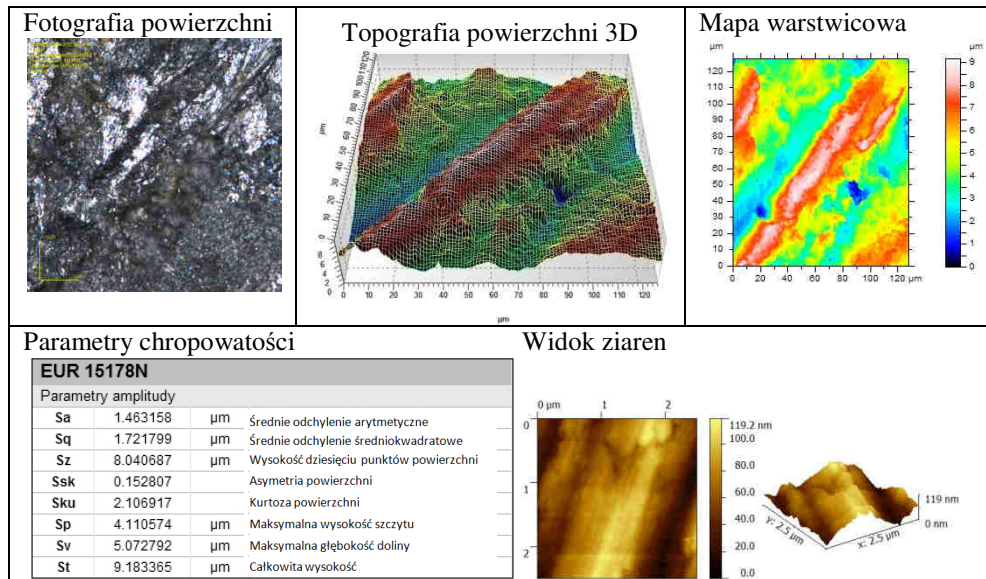
▪ Mikroskopowa analiza stanu powierzchni przecięcia stali elektrotechnicznych

W tablicach 1 i 2 przedstawiono widok, topografie powierzchni i mapy warstwiczne przełomu poślizgowego badanych próbek uzyskane za pomocą mikroskopu konfokalnego LEXT OLS4000 firmy Olympus przy powiększeniu 100x. Zaprezentowano także wartości głównych wielkości określających właściwości chropowatości powierzchni m.in. średniego arytmetycznego odchylenia wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia S_a oraz całkowitej wysokości nierówności powierzchni S_t . Prezentowany przykładowy obszar pomiaru wynosił $120 \times 120 \mu\text{m}$. Do obserwacji ziaren wykorzystano mikroskopię sił atomowych. Dzięki temu możliwe stało się przejście ze skali mikro do skali nano. Do analizy struktury powierzchni w tej skali wykorzystano mikroskop sił atomowych NT 206. Na powierzchni przełomu poślizgowego w skalach makro i mikro występują nierówności których wysokości oraz ułożenie mogą mieć wpływ na właściwości tribologiczne stali po procesie cięcia. Jakość przełomu poślizgowego może mieć duży wpływ na właściwości eksploatacyjne elementów maszyn poprzez warunki tarcia na powierzchniach stykowych, naprężenia stykowe, wytrzymałość zmęczeniową, szczelność połączeń czy właściwości

magnetyczne. Braki produkcyjne w przygotowaniu powierzchni mogą powodować uszkodzenia mechaniczne, w tym: pęknięcia zmęczeniowe.

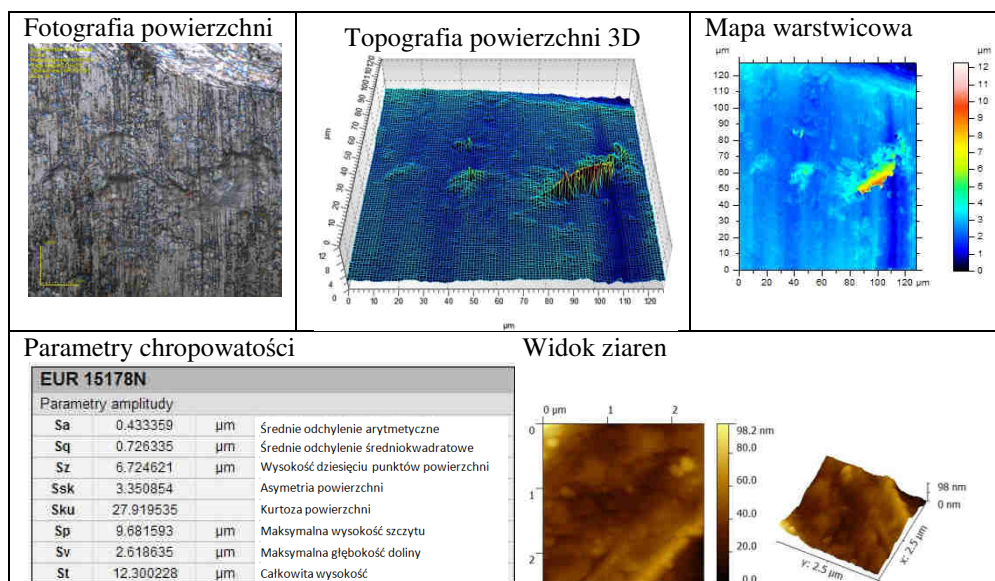
Tablica 1

Wyniki pomiarów powierzchni przełomu poślizgowego po procesie cięcia na mikroskopie konfokalnym oraz AFM dla: $v_2 = 3$ m/min, $h_c = 0,04$ mm, $\alpha = 30^\circ$, $c_v = 0,1$ mm



Tablica 2

Wyniki pomiarów powierzchni przełomu poślizgowego po procesie cięcia na mikroskopie konfokalnym oraz AFM dla: $v_2 = 13$ m/min, $h_c = 0,04$ mm, $\alpha = 30^\circ$, $c_v = 0,1$ mm



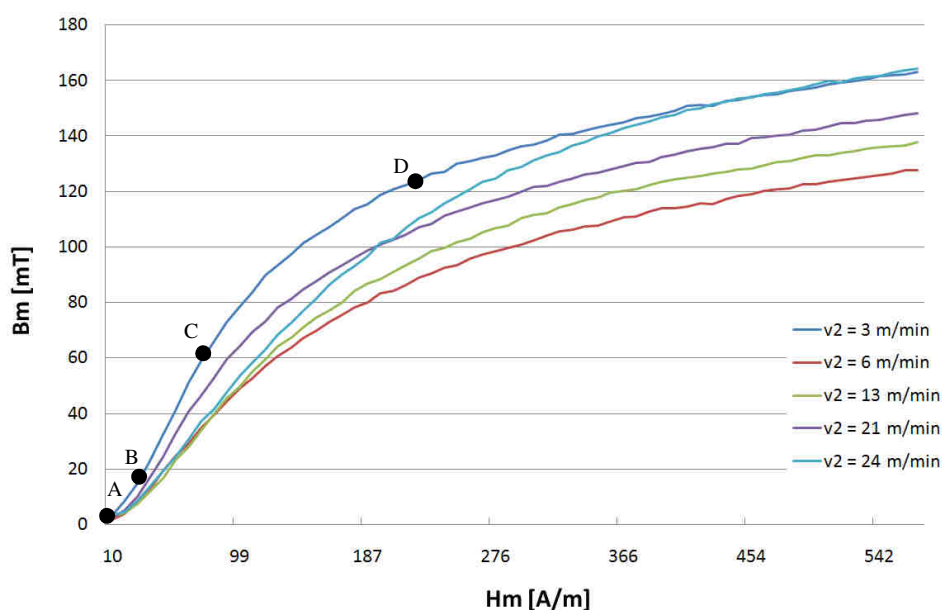
W tablicy 1 przedstawiono wyniki badań stanu powierzchni przełomu poślizgowego dla następujących parametrów cięcia: $v_2 = 3$ m/min, $h_c = 0,04$ mm, $\alpha = 30^\circ$, $c_v = 0,1$ mm. Przełom poślizgowy w tym przypadku składał się zarówno z obszarów błyszczących jak i matowych. Powierzchnia przełomu charakteryzuje się określoną falistością, przy czym można zauważyć wyraźne wzajemne przemieszczenia sąsiednich warstw materiału względem siebie, które są ułożone pod znacznym kątem względem kierunku ścinania. Średnie arytmetyczne odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia S_a wynosi $1,46 \mu\text{m}$, natomiast całkowita wysokości nierówności powierzchni $S_t = 9,18 \mu\text{m}$. Można zaobserwować znaczne wydłużenie i specyficzne ułożenie ziaren. W wyniku

zwiększenia prędkości cięcia do wartości $v_2 = 13$ m/min uzyskano bardziej regularny profil powierzchni, błyszczący pozbawiony falistości o średnim arytmetycznym odchyleniu wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia $S_a = 0,43$ μm i całkowitej wysokości nierówności powierzchni $S_t = 12,3$ μm (tab. 2). Ziarna w tym przypadku nie uległy nadmiernemu wydłużeniu.

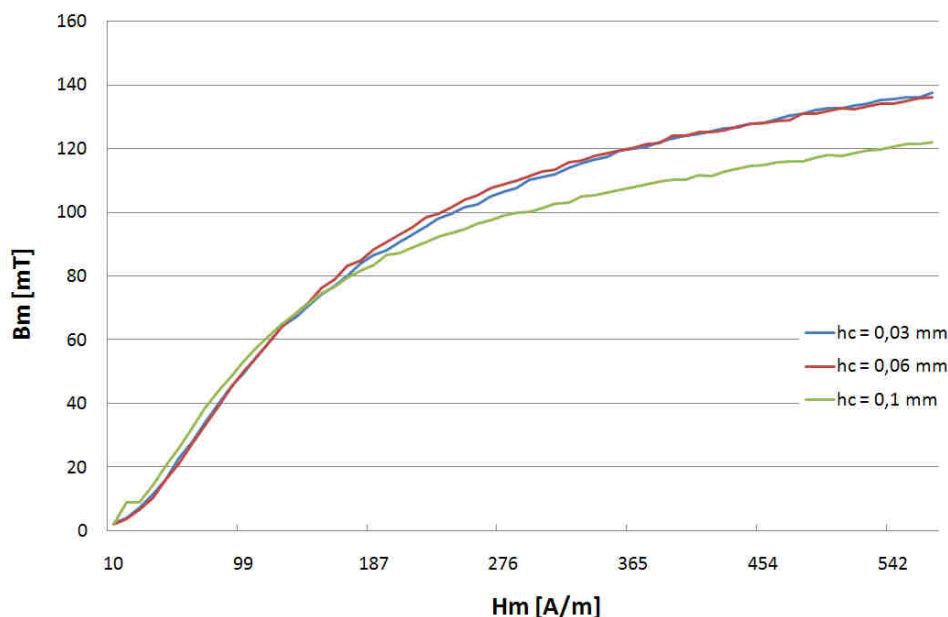
▪ Analiza wpływu wybranych parametrów procesu cięcia stali krzemowej o ziarnie zorientowanym na jej właściwości magnetyczne

Badania właściwości magnetycznych blachy krzemowej o strukturze metalograficznej o ziarnie zorientowanym przeprowadzono na stanowiskach badawczych zlokalizowanych w Politechnice Warszawskiej na Wydziale Mechatroniki oraz Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych. Do badań użyto próbek w kształcie pierścieni wykonanych ze stali ET 122 - 30 o grubości 0,3 mm. Taki kształt umożliwiał ich prawidłowe zamocowanie w generatorze przebiegów magnesujących, równomierny rozkład naprężeń rozciągających w materiale oraz uzyskanie zamkniętej drogi magnetycznej. Podstawowym elementem stanowiska był automatyczny system do badania materiałów magnetycznie miękkich HB-PL30, który wykorzystywano do pomiaru charakterystyk magnetycznych stali. Do badań właściwości magnetycznych wykorzystano metody nieniszczące, wykorzystujące magnetosprężyste zjawisko *Villariego*, polegające na zmianie stanu magnetycznego materiału wywołanej naprężeniami. Metody oparte na tym zjawisku są metodami innowacyjnymi, które stwarzają nowe możliwości opisu właściwości magnetosprężystych pod wpływem naprężeń dla wielu gatunków stali konstrukcyjnych i elektrotechnicznych. Możliwe jest wyznaczenie tych charakterystyk, które pozwalają na właściwą ocenę stanu naprężeń w elementach konstrukcyjnych, a także możliwość zastosowania pomiarów bazujących na efekcie magnetosprężystości w badaniach nieniszczących stali konstrukcyjnych w przemyśle.

Pomiary charakterystyk magnetycznych wykonano dla ustalonych wartości amplitudy natężenia pola magnesującego H_m w zakresie $9,98 \div 570$ A/m. Na rys. 28 i 29 przedstawiono wpływ prędkości cięcia i luzu między narzędziami tnącymi na charakterystyki magnesowania stali ET 122 – 30 kształtowanej na nożycach krążkowych. Badania zrealizowano dla wartości kąta pochylenia krawędzi tnącej noża górnego $\alpha = 30^\circ$ oraz zachodzenia noży $c_v = 0,1$ mm (rys. 3a).



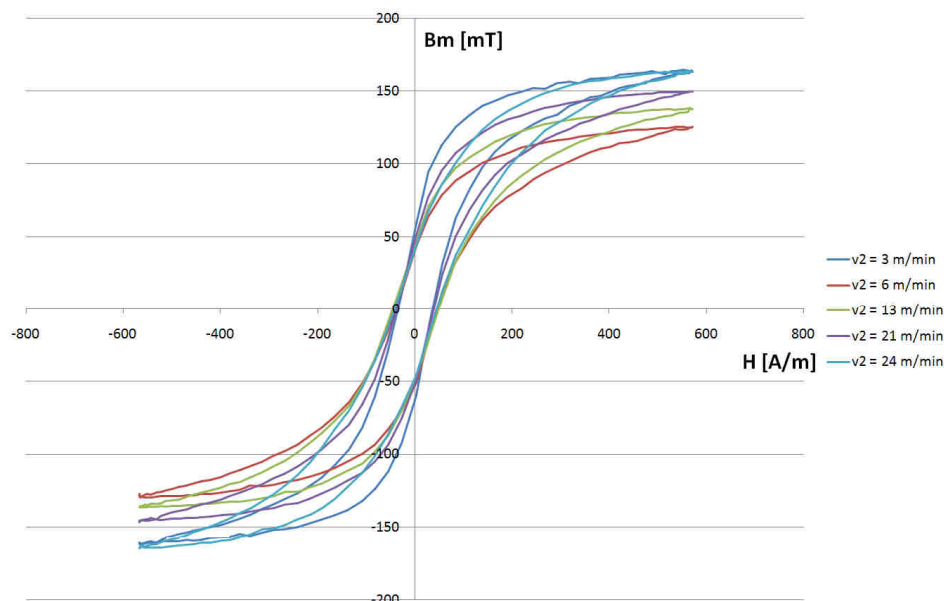
Rys. 28. Wpływ prędkości cięcia na charakterystyki magnesowania stali ET 122 - 30 ($h_c = 0,04$ mm)



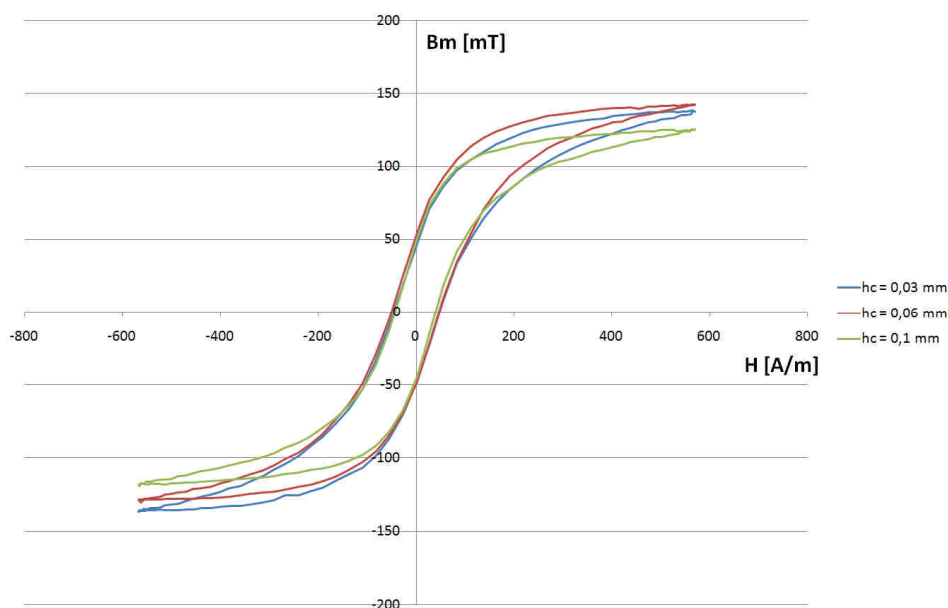
Rys. 29. Wpływ luzu między narzędziami tnącymi na charakterystyki magnesowania stali ET 122 - 30 ($v_2 = 13,5$ m/min)

Indukcja maksymalna B_m osiągnęła największą wartość podczas cięcia materiału z prędkościami $v_2 = 3$ m/min oraz $v_2 = 24$ m/min przy amplitudzie natężenia pola magnesującego wynoszącej 570 A/m (rys. 28). Przypadki te charakteryzują się niewielkim dolnym zagięciem charakterystyki (odcinek A-B), zwiększonym natomiast górnym zagięciem charakterystyki (odcinek C-D), oraz zwiększonym odcinkiem powyżej punktu D, nazywanym obszarem nasycenia; na tym odcinku krzywa ma stałe nachylenie. Największe różnice pomiędzy tymi przypadkami w odniesieniu do wartości indukcyjności maksymalnej występują w obszarze górnego zagięcia charakterystyki ($H_m = 60$ A/m ÷ 300 A/m). W obszarze nasycenia natomiast wartości indukcyjności maksymalnej są do siebie zbliżone dla poszczególnych wartości amplitudy natężenia pola magnesującego. Indukcja maksymalna B_m osiągnęła najmniejszą wartość podczas cięcia materiału z prędkością $v_2 = 6$ m/min przy amplitudzie natężenia pola magnesującego wynoszącej 570 A/m. Dla tego przypadku można zaobserwować bardzo szeroki obszar nasycenia. Zmiana wartości luzu między narzędziami tnącymi z $h_c = 0,03$ mm do $h_c = 0,06$ mm nie wpłynęła znacząco na charakterystyki magnesowania (rys. 29). Dla wartości luzu $h_c = 0,1$ mm nastąpił natomiast spadek indukcyjności maksymalnej widoczny w obszarach górnego zagięcia charakterystyki oraz szczególnie w obszarach nasycenia.

Na rys. 30 i 31 przedstawiono pętle histerezy zarejestrowane dla maksymalnej amplitudy natężenia pola magnesującego wynoszącej $H_m = 570$ A/m dla zadanych prędkości cięcia i wartości luzów między narzędziami tnącymi. Można zaobserwować wyraźne zmiany kształtów pętli histerezy związane z nastawami prędkości cięcia szczególnie w obszarach górnego zagięcia charakterystyki oraz nasycenia (rys. 30). Mniejsze zmiany zachodzą przy wzroście lub redukcji wartości luzu między narzędziami tnącymi i są najbardziej widoczne w obszarach nasycenia (rys. 31). Wpływ prędkości cięcia i luzu między narzędziami tnącymi na szerokość pętli histerezy został przedstawiony na rys. 32b. Najmniejsze wartości szerokości pętli histerezy uzyskano stosując prędkości cięcia $v_2 = 3$ m/min oraz $v_2 = 24$ m/min. Dla tych wartości prędkości wpływ luzu na szerokość histerezy jest niewielki. Wzrasta natomiast, gdy prędkości cięcia dobierane są z zakresu $v_2 = 10$ ÷ 15 m/min. Dla tych wartości szerokość histerezy jest największa.

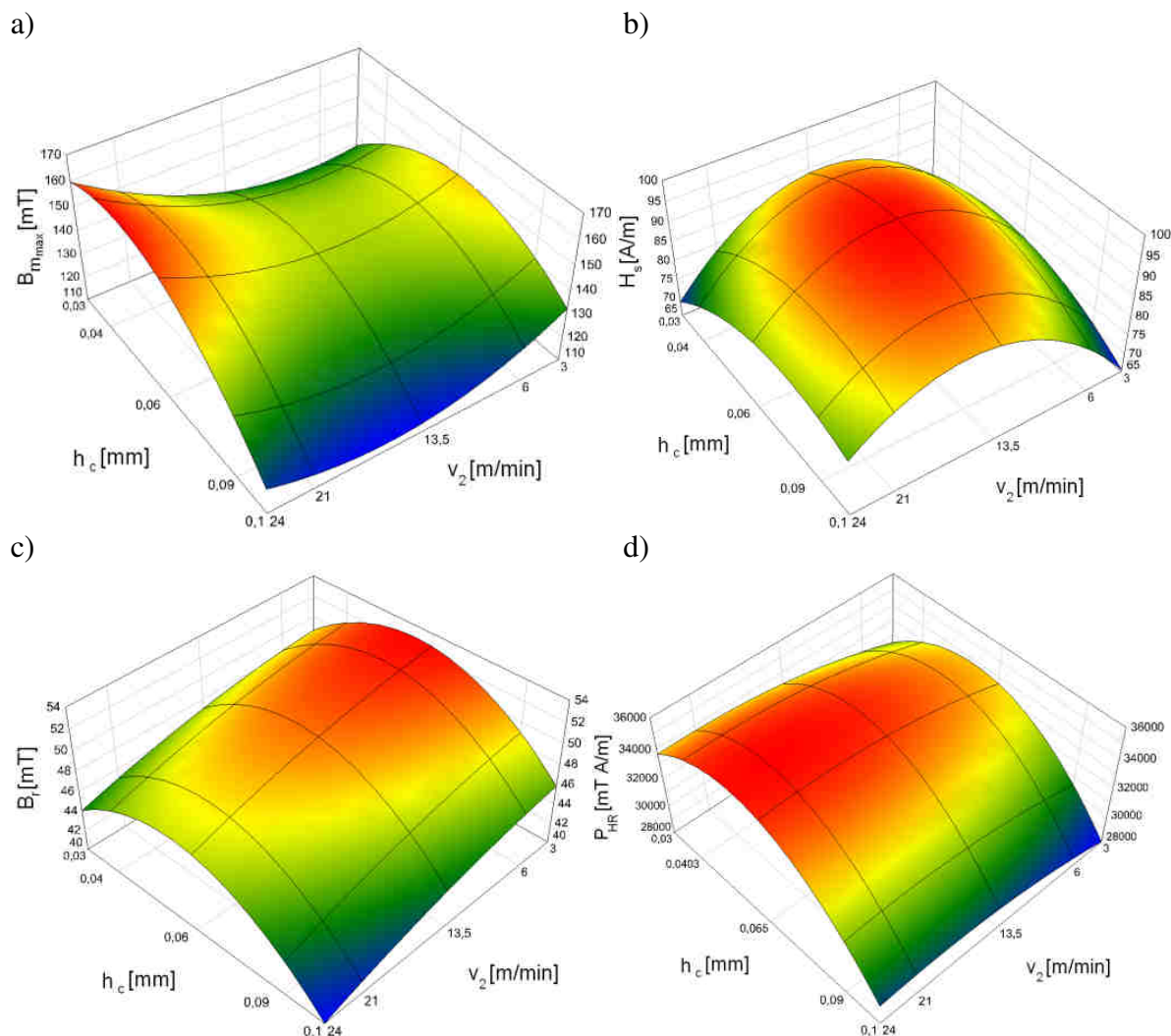


Rys. 30. Wpływ prędkości cięcia na charakterystyki magnetyczne $B(H)$ dla amplitudy natężenia pola magnesującego $H_m = 570$ A/m i luzu $h_c = 0,04$ mm



Rys. 31. Wpływ luzu na charakterystyki magnetyczne $B(H)$ dla amplitudy natężenia pola magnesującego $H_m = 570$ A/m i prędkości cięcia $v_2 = 13$ m/min

Analiza wpływu badanych parametrów procesu cięcia na wartości średnie namagnesowania szczałkowego (rys. 32c) oraz pole powierzchni pętli histerezy, które określa straty histerezowe (rys. 32d) wykazała duży wpływ wartości luzu między narzędziami tnącymi na te charakterystyki. Osiągają one swoje maksymalne wartości przy wartościach luzów wynoszących $h_c = 0,05 \div 0,07$ mm. W obu przypadkach minimalne wartości tych parametrów magnetycznych wystąpiły podczas cięcia z prędkością $v_2 = 24$ m/min oraz luzem $h_c = 0,1$ mm. W przypadku pola powierzchni histerezy zmiany luzu w zakresie od $h_c = 0,03$ do $h_c = 0,06$ mm mają niewielki wpływ na ten wartości tego parametru (rys. 32d). Zmiany wartości luzu w zakresie od $h_c = 0,06$ mm do 0,1 mm mają już znaczny wpływ na pole powierzchni histerezy, które maleje wraz ze wzrostem luzu osiągając minimum dla luzu $h_c = 0,1$ mm.



Rys. 32. Wpływ luzu i prędkości cięcia na charakterystyki magnetyczne stali elektrotechnicznej ET 122 - 30:
a) maksymalna wartość indukcji magnetycznej, b) szerokość pętli histerezy, c) średnia wartość namagnesowania szczątkowego, d) pole powierzchni pętli histerezy

Proces cięcia mechanicznego materiałów elektrotechnicznych, do których zalicza się: blachy elektrotechniczne, taśmy amorficzne i nanokrystaliczne, pomimo szeregu zalet takich jak: duża wydajność, brak strefy odkształceń termicznych w materiale, możliwość kształtowania wyrobów o dowolnej długości linii cięcia, powoduje negatywne zmiany właściwości magnetycznych tych materiałów. Można do nich zaliczyć przyrost strat i pogorszenie charakterystyk magnesowania. Aktualny zasób wiedzy w literaturze jest ograniczony w zakresie wyników badań wpływu parametrów technologicznych i warunków procesu cięcia zarówno na jakość technologiczną wyrobu jak i na jego właściwości magnetyczne. To skłoniło autora do zajęcia się problemem cięcia stali elektrotechnicznych. W celu szczegółowej analizy tych zagadnień opracowano modele matematyczne, fizyczne oraz symulacyjne MES i SPH, które pozwalają na kompleksową analizę zjawisk fizycznych zachodzących podczas procesu. Możliwe było określenie szerokości strefy odkształconej i stanu naprężeń w materiale w zależności od zadanych warunków procesu. Badania eksperymentalne obejmowały zarówno ocenę jakości ciętej krawędzi materiału, jak i analizę jego właściwości magnetycznych. Do badań właściwości magnetycznych wykorzystano metody nieniszczące, polegające na zmianie stanu magnetycznego materiału

wywołanej naprężeniami. Wykazano, że metody te mogą być wykorzystywane do analizy jakości wyrobów kształtowanych za pomocą obróbki mechanicznej cięcia.

Wyniki prac badawczych autora stanowią istotny wkład w rozwój zagadnień cięcia materiałów elektrotechnicznych. Szeroki zakres badań uwzględniających zjawiska mechaniczne i magnetyczne oraz ich wzajemne relacje ma bardzo duże znaczenie w aspekcie sterowania właściwościami ciętej blachy. Stwarza możliwość skuteczniejszej ingerencji w projektowanie procesu technologicznego i dostosowanie jakości technologicznej do odpowiednich warunków eksploatacyjnych.

2.2. Znaczenie naukowe i użyteczne osiągnięcia

Jako praktyczne osiągnięcia autora przeprowadzonych prac należy uznać opracowane algorytmy i aplikacje komputerowe procesu cięcia stopów metali lekkich i stali elektrotechnicznych z zastosowaniem MES oraz metody bezsiatkowej SPH, które powodują że proces projektowania technologii cięcia tych materiałów może być istotnie rozszerzony i ulepszony przez wykorzystanie możliwości, jakie stwarza wprowadzenie do obliczeń metod numerycznych. Przyrostowy model matematyczny ruchu obiektu oraz opracowane algorytmy numeryczne jego rozwiązania pozwalają na kompleksową analizę nieliniowych zjawisk zachodzących w trakcie procesu cięcia. Dzięki temu możliwe jest analizowanie przemieszczeń, odkształceń, naprężeń, stref przylegania i poślizgu w przedmiocie kształtowanym. Uzyskane wyniki mogą być podstawą do projektowania nowych narzędzi o innych zarysach, doboru rodzaju czynnika chłodząco-smarującego oraz prognozowania jakości technologicznej wyrobu. Mogą wskazać także ewentualne zmiany w konstrukcji maszyn przeznaczonych do cięcia mechanicznego stopów metali lekkich i stali elektrotechnicznych.

Duże wartości odkształcenia połączone z ich koncentracją na niewielkich obszarach prowadzące do procesu rozdzielania materiału mają duży wpływ na końcową jakość wyrobu i właściwości magnetyczne. Opracowane na podstawie badań numerycznych i eksperymentalnych zależności stanowią podstawę do określania jakości uzyskanego wyrobu. Wykazano, że dobór parametrów obróbkowych ma istotne znaczenie w kształtowaniu wyrobu, wpływa na stany naprężeń i odkształceń, mechanizmy pęknięcia, strukturę powierzchni przecięcia oraz jego właściwości magnetyczne.

Zastosowanie uaktualnionego opisu Lagrange'a pozwala na właściwe formułowanie zagadnień fizycznie i geometrycznie nieliniowej dynamiki. Efektywne jest wariacyjne ujęcie równań ruchu obiektu, stanowiące podstawę do ich dyskretyzacji metodą elementów skończonych, a następnie rozwiązania otrzymanych równań dyskretnych, przy zastosowaniu metody explicit. Ważnym elementem formułowania wielokrotnie nieliniowego zagadnienia dynamicznego, decydującym w znacznym stopniu o poprawności uzyskiwanych rozwiązań jest odpowiedni opis dynamicznych właściwości materiałowych, uwzględniający wpływ prędkości odkształcenia lepkoplastycznego.

Poprawny dobór parametrów modelowania, z wykorzystaniem metody elementów skończonych stwarza, możliwość dokonania analizy i oceny procesu cięcia. Przeprowadzone w pracy badania procesu cięcia stopów metali lekkich i stali elektrotechnicznych wykazały, że konieczne jest przyjęcie odpowiedniego modelu numerycznego (odpowiedni dobór geometrii narzędzi, opisu materiałów, elementów skończonych przedmiotu oraz elementów kontaktowych i obciążenia) uwzględniającego konsekwencje stosowanej metody rozwiązywania problemu nieliniowego. Model powinien składać się z elementów objętościowych (dla trójosiowego stanu odkształcenia). Muszą być ponadto zachowane: odpowiednia gęstość siatki MES oraz właściwe warunki na brzegach modelu.

Poprawną metodą numerycznego rozwiązywania nieliniowego problemu dynamicznego, w zakresie odkształceń w strefie obróbki w procesach cięcia mechanicznego, jest jawne całkowanie równań ruchu obiektu metodą różnic centralnych. Konieczne jest jednak przyjęcie odpowiednio małych kroków czasowych, liczby podkroków i liczby iteracji. Pomimo wzrostu kosztów metoda ta pozwala na wiarygodną analizę nieliniowych procesów dynamicznych.

Opracowane przez autora przyrostowe modele matematyczne ruchu obiektu oraz algorytmy numeryczne ich rozwiązania pozwalają na kompleksową analizę zjawisk zachodzących w trakcie procesu cięcia, przy użyciu dostępnych programów metody elementów skończonych, a na ich podstawie prognozować o stanie warstwy wierzchniej przedmiotu i jego jakości użytkowej. Zastosowane modele przyrostowe pozwalają rozwiązać wiele problemów, bez znajomości warunków brzegowych w obszarze kontaktu. Dotychczasowe trudności lub wręcz niemożliwość określenia tych warunków było główną przyczyną braku rozwiązań numerycznych. Ta zaleta opracowanych modeli czyni je bardzo przydatnymi w rozwiązywaniu wielu istotnych i złożonych problemów, związanych z właściwym projektowaniem procesu cięcia.

Wdrożenie opracowanego modelu, algorytmów i aplikacji w systemach MES do projektowania procesu cięcia pozwala na rozwiązanie ważnych problemów, takich jak: prognozowanie przemieszczeń i odkształceń w strefie cięcia, momentu propagacji pęknięcia, trajektorii, prędkości pęknięcia co istotnie przyczyni się do wzrostu jakości wyrobu oraz zmniejszenia kosztów wykonania operacji (mniejsze zużycie energii, większa trwałość narzędzi itp.).

Przydatne jest również prognozowanie właściwości magnetycznych wyrobu w zależności od przyjętych parametrów cięcia, występujących stanów naprężeń, odkształceń, jakością powierzchni przecięcia. W efekcie możliwe jest określenie wymaganych warunków realizacji procesów obróbki w aspekcie wymaganej jakości wyrobu.

Możliwe jest rozwiązanie (niewykonalnego dotychczas) zadania odwrotnego - dla wymaganej jakości technologicznej wyrobu określenie optymalnych warunków realizacji procesu cięcia. Są to zagadnienia podstawowe przy projektowaniu procesu technologicznego cięcia mechanicznego.

Wyniki symulacji modeli przestrzennych uwzględniających rzeczywiste kształty narzędzi, wymiary blach i warunki procesu mogą być przydatne dla praktycznych zastosowań, ponieważ pozwala to prognozować jakość technologiczną wyrobu ze znacznie większą dokładnością niż dotychczas. Modele umożliwiają analizę dużych deformacji plastycznych i defragmentacji struktury, a także uwzględnią zjawiska lepkościowe i zjawiska fizyczne występujące w niższych skalach.

Zastosowanie dwóch metod numerycznych MES oraz SPH umożliwiło uzyskanie nowej wiedzy na temat procesów cięcia mechanicznego, co może pomóc w wybraniu najlepszej metody numerycznej do symulacji podobnych procesów szczególnie tych gdzie następuje silna deformacja i rozdzielanie struktury.

Otrzymane wyniki mają istotne znaczenie dla sterowania właściwościami ciętego materiału, gdyż stwarzają możliwość skuteczniejszej ingerencji w projektowanie procesu technologicznego, jego optymalizację i dostosowanie jakości technologicznej do odpowiednich warunków eksploatacyjnych wyrobu.

Przeprowadzone badania eksperymentalne z zastosowaniem systemów wizyjnych pozwoliły na obserwację zjawisk fizycznych zachodzących na bardzo małych obszarach i przebiegających z dużymi prędkościami. Dzięki temu możliwe było dokładniejsze ich poznanie, a także wykorzystanie zarejestrowanych obrazów do walidacji modeli symulacyjnych w poszczególnych fazach cięcia. Dotychczas walidacja modeli symulacyjnych polegała na analizie porównawczej sił cięcia oraz jakości ciętej krawędzi z eksperymentem

w trybie offline (po procesie). Przedstawiona metoda umożliwi analizę dokładności i poprawności modeli symulacyjnych, m.in. w fazach niestabilnych np.: podczas rozdzielania, w trybie online.

W przypadku cięcia stali elektrotechnicznych aktualny zasób wiedzy w literaturze jest ograniczony. Przeprowadzona szczegółowa analiza stanów naprężeń, odkształceń w czasie trwania procesu, mechanizmów rozdzielania tych materiałów i jakości ciętej krawędzi, a następnie powiązania uzyskanych wyników badań ze zmianami charakterystyk magnetycznych stwarza nowe możliwości sterowania procesem cięcia tak aby uzyskać wyrób o pożądanych właściwościach użytkowych i eksploatacyjnych.

Praca zawiera również wyniki pomiarów topografii powierzchni przecięcia. Jest to istotne, ze względu na ciągłe dążenie w technice do minimalizacji (np. rozmiarów), co niesie konieczność analizy powierzchni obrabianych elementów nie tylko w skali mikro, ale i nano. Uzyskane wyniki mają duże znaczenie praktyczne.

Zdaniem autora cykl publikacji stanowiący osiągnięcie naukowe wnosi istotne rozwiązania problemów cięcia stopów metali lekkich i stali elektrotechnicznych, które w znacznym zakresie rozszerzają dotychczasowy stan wiedzy. W podsumowaniu można określić następujące znaczące efekty, a w szczególności:

- **naukowe** - zaproponowano nowe teoretyczne i doświadczalne podstawy optymalizacji procesu cięcia mechanicznego wybranych stopów metali lekkich i stali elektrotechnicznych. Uzyskane wyniki badań stanowią istotny wkład w rozwój współczesnych metod modelowania i analizy eksperymentalnej tego procesu. Zastosowano szereg oryginalnych, autorskich rozwiązań do których można zaliczyć:
 - opracowanie efektywnych modeli numerycznych, umożliwiających analizę zjawisk występujących podczas procesu cięcia mechanicznego materiałów trudnoobrabialnych, stopów metali lekkich i stali elektrotechnicznych,
 - modelowanie numeryczne procesu cięcia z zastosowaniem metody bezsiatkowej SPH (hydrodynamiki cząstek) do modelowania procesów cięcia materiałów trudnoobrabialnych (implementacja metody m.in. do modeli 3D), opracowanie modelu łączącego zalety MES oraz metody SPH,
 - opracowanie symulacyjnych modeli trójwymiarowych procesu cięcia mechanicznego. Dzięki temu możliwe będzie uwzględnienie w analizach wpływu wielu parametrów technologicznych, dotychczas pomijanych w literaturze, takich jak: długość linii cięcia i jej kształt, rzeczywistych wymiarów narzędzi, sposobów mocowania blachy, sposobów docisku blachy w zależności od jej długości i szerokości,
 - opracowanie oryginalnej metodyki badań eksperymentalnych. Zastosowano zaawansowany system wizyjny do monitorowania procesu cięcia materiałów trudnoobrabialnych, dzięki czemu możliwe było obserwowanie zjawisk powstawania zaginania krawędzi, zadziórów oraz opracowanie wytycznych do prawidłowego doboru parametrów obróbki w aspekcie uzyskania wysokiej jakości wyrobu. Analizy struktury geometrycznej powierzchni przecięcia obrabianych elementów dokonano nie tylko w skali mikro, ale i nano za pomocą mikroskopu sił atomowych. Do badań właściwości magnetycznych blach wykorzystano metody nieniszczące, wykorzystujące magnetosprężyste zjawisko *Villarięgo*, polegające na zmianie stanu magnetycznego materiału wywołanej naprężeniami;
- **aplikacyjne** - celowość rozwiązania problemów badawczych przedstawionych i analizowanych przez autora jest uzasadniona technologicznie i ekonomicznie. Zaproponowane zależności mają charakter aplikacyjny w praktyce inżynierskiej do

projektowania nowoczesnych narzędzi do cięcia. Uzyskane wyniki badań wpłyną na dalszy ewidentny postęp nauki związany z podnoszeniem efektywności procesów obróbczych, ich projektowaniem, rozwojem i wdrażaniem. Zalecenia dotyczące doboru parametrów obróbkowych, ze względu na przyjęte kryteria jakościowe, energetyczne itp. mogą być wykorzystane przez podmioty gospodarcze i naukowe zajmujące się procesami cięcia stopów metali lekkich i blach elektrotechnicznych. Zaproponowano szereg rozwiązań i zależności gotowych do bezpośredniego wdrożenia w przemyśle.

- **dydaktyczne** - opracowany materiał badawczy może być wykorzystany do weryfikacji modeli teoretycznych zjawiska cięcia oraz stanowić materiał wykładowy dla studentów studiujących na kierunkach związanych z zagadnieniami mechaniki i obróbki plastycznej metali.

2.3. Inne osiągnięcia naukowo-badawcze

2.3.1. Osiągnięcia naukowe przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora

Zainteresowanie tematyką związaną z szeroko pojętą obróbką plastyczną, aparaturą przemysłową i systemami CAD oraz CAE przejawiałem już w okresie studiów magisterskich na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn na specjalności Inżynierskie Zastosowania Komputerów na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej. Jako student aktywnie brałem udział w pracach kół naukowych (m.in. High Tech), kursach programowania obrabiarek CNC oraz dodatkowych zajęciach dydaktycznych związanych z modelowaniem, symulacją oraz analizą eksperymentalną zjawisk fizycznych w mechanice i obróbce plastycznej metali. W związku z tym zapoznałem się także z tematyką prac badawczo-naukowych realizowanych w Katedrze Maszyn Roboczych (obecnie Automatyki, Mechaniki i Konstrukcji), gdzie w latach 2004 - 2005 r. odbyłem staż badawczy (asystent stażysta w okresie 1.10.2004 - 1.10.2005 r.). Podczas stażu zajmowałem się obsługą zaawansowanych programów komputerowych CAD i CAE (ANSYS, ABAQUS, Matlab, Fluent, Solid Works, Autocad) oraz nieliniowymi symulacjami procesów technologicznych). W 2005 roku na podstawie pracy dyplomowej pod tytułem: „*Analiza numeryczna procesu cięcia nożycami krążkowymi*” pod kierownictwem prof. dr hab. inż. Leona Kukiełki, otrzymałem tytuł magistra inżyniera o specjalności Inżynierskie Zastosowania Komputerów z oceną bardzo dobrą. W wyniku prowadzonych prac badawczych powstały moje pierwsze publikacje związane z procesami cięcia materiałów metalowych (zał. 3, pkt. 1.3). Brałem udział w II Konferencji Studentów i Młodych Pracowników Nauki Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej, gdzie pełniłem także funkcję członka komitetu organizacyjnego odpowiedzialnego m.in., za skład i łamanie materiałów konferencyjnych.

W roku 2005 podjąłem studia doktoranckie w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej, gdzie prowadziłem zajęcia między innymi z przedmiotów: Mechanika Techniczna, Wytrzymałość Materiałów, Termodynamika. W czasie studiów doktoranckich ściśle współpracowałem z zespołem naukowym Katedry Maszyn Roboczych pod kierownictwem prof. dr hab. inż. Leona Kukiełki. W obszarze zainteresowań pracowników tej katedry od wielu lat są badania eksperymentalne i modelowanie matematyczne procesów obróbki plastycznej metali, konstrukcji mechanicznych oraz procesów wytwarzania w przemyśle takich jak: nagniatanie, kulowanie, szlifowanie, skrawanie, cięcie, walcowanie gwintów, toczenie. W efekcie podjętej współpracy powstały moje kolejne współautorskie publikacje naukowe (zał. 3, pkt. 1.3). W pracach tych opracowałem i przedstawiłem modele matematyczne procesu cięcia blach, algorytmy rozwiązań dyskretnych równań ruchu oraz aplikacje w systemie ANSYS.

Opracowane aplikacje umożliwiają kompleksową analizę czasową stanów przemieszczeń, odkształceń i naprężeń występujących w obiekcie, składającym się z przedmiotu (blacha) i narzędzia (stempel, nożyce, klin) dla stanów płaskich. W tym czasie byłem kierownikiem projektu badawczego pt.: „*Modelowanie i analiza numeryczna procesów cięcia blach z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i fizycznej*”. Grant promotorski nr N N503 2322 33, realizowany w okresie 30.08.2007 – 29.08.2009 r. W wyniku prowadzonych badań opublikowałem wiele prac związanych z analizą zjawisk fizycznych zachodzących w procesach obróbki plastycznej metali (współautor 18 artykułów, w tym 4 w języku angielskim). Uczestniczyłem w 17 konferencjach (w tym 3 zagranicznych m.in. w Szwajcarii i Niemczech), na których wygłosiłem 17 referatów (zał. 3, pkt. 1.10 i 1.11). W ramach prowadzonej współpracy badawczej z ośrodkami naukowymi odbyłem wizytę techniczną na Uniwersytecie Technicznym w Bremen, gdzie zapoznałem się z procesami modelowania numerycznego w zakresie obróbki materiałów metalowych (04.04.2008 - 06.04.2008 r.).

W 2009 roku ukończyłem studia doktoranckie oraz obroniłem z wyróżnieniem pracę doktorską pt.: „*Modelowanie i analiza numeryczna procesów cięcia blach z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i fizycznej*”, którą realizowałem pod opieką prof. dr hab. inż. Leona Kukiełki. W 2009 r. otrzymałem stopień doktora – doktora nauk technicznych w dyscyplinie: Budowa i Eksploatacja Maszyn na Wydziale Mechanicznym - Politechniki Koszalińskiej.

W ramach rozprawy doktorskiej wyprowadzono równania konstytutywne dla ciała sprężysto/lepko – plastycznego (E/VP) z umocnieniem mieszanym, dla typowego kroku czasowego. W modelach uwzględniono dynamiczne warunki realizacji procesu cięcia oraz właściwości różnych stali obróbkowych. Opracowano algorytmy implementacji numerycznej opracowanych modeli materiałowych. Opracowano model fizyczny procesu cięcia oraz określono podstawowe założenia i definicje dotyczące modelu fizycznego. Opracowano model matematyczny procesu cięcia sformułowanego w przyrostach. W tym celu wykorzystano uaktualniony opis Lagrange’a. Do sformułowania równania ruchu obiektu zastosowano rachunek wariacyjny. Otrzymane, wariacyjne równanie ruchu dyskrytezyzowano metodą elementów skończonych, otrzymując dyskretny układ równań ruchu i deformacji obiektu. Opracowano model kontaktu narzędzia z przedmiotem obrabianym. Podano algorytmy rozwiązania opracowanych układów równań po zastosowaniu jawnych i niejawnych metod całkowania. Opracowano metodykę badań modelowych procesu cięcia dla przypadku przestrzennego stanu naprężenia i płaskiego stanu odkształcenia. Zbudowano stanowisko do badań mechanizmu plastycznego płynięcia oraz określania warunków brzegowych dla przemieszczeń. Przeprowadzono symulacje numeryczne procesu kształtowania materiału wykonanego z tworzywa modelowego. Opracowano metodykę badań numerycznych oraz aplikacje w języku APDL (ANSYS Parametric Design Language) do symulacji procesu cięcia. Opracowano efektywny model dyskretny oraz przeprowadzono symulacje wpływu wybranych warunków procesu na jakość wyrobu.

2.3.2. Osiągnięcia naukowe po uzyskaniu stopnia naukowego doktora

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych, zostałem zatrudniony na stanowisku asystenta w Katedrze Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów Politechniki Koszalińskiej (1.09.2009 r. – 30.09.2010 r.). Od 1.10.2010 r. do chwili obecnej jestem zatrudniony na stanowisku adiunkta. W pierwszych latach zatrudnienia obiektem moich zainteresowań pozostały procesy cięcia materiałów metalowych gdzie zajmowałem się m.in. opracowaniem przyrostowych modeli matematycznych ruchu obiektu oraz algorytmów numerycznych ich rozwiązania, analizą procesu cięcia pakietów blach. Opracowałem modele

matematyczne oraz aplikacje komputerowe 2D i 3D do analizy zjawisk fizycznych (m. in. wpływu temperatury na stany naprężeń i odkształceń) zachodzących podczas cięcia pakietów.

Opracowałem także aplikacje 3D umożliwiające uwzględnienie przestrzennego stanu naprężeń i odkształceń dla procesów cięcia na gilotynie i wykrawania. Zbudowałem wiele nowych stanowisk badawczych, poszukiwałem także nowoczesnych rozwiązań w zakresie monitorowania procesów cięcia (zał. 3 pkt. 1.3). W ramach prowadzonych prac badawczych brałem udział w wyjazdach zagranicznych m.in. do Meksyku i Kanady, gdzie przedstawiłem wyniki badań na konferencjach naukowych (zał. 3 pkt. 1.10). Odbyłem wizytę techniczną na Uniwersytecie Technicznym w Toronto, gdzie zapoznałem się z procesami modelowania numerycznego w zakresie obróbki materiałów metalowych (30.12.2010 - 02.01.2011 r.).

W 2012 r. nawiązałem współpracę z pracownikami Wydziału Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej. Współpraca opiera się na realizacji wspólnych badań dotyczących zastosowania metod wizyjnych i termowizyjnych w analizie procesów technologicznych w przemyśle, w tym cięcia materiałów sprężysto/lepko-plastycznych. W 2012 roku realizowałem Projekt badawczy Młodych Naukowców pt. „*Modelowanie i analiza numeryczna procesów cięcia ciał sprężysto/lepko-plastycznych na gilotynie z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i fizycznej*” (środki finansowe na działalność naukowo-badawczą w ramach dotacji na badania własne, Politechnika Koszalińska). Charakter udziału: główny wykonawca [zał. 3 pkt. 1.7, poz. 7]. Celem naukowym badań było opracowanie naukowych, teoretycznych i doświadczalnych podstaw procesu cięcia ciał sprężysto/lepko-plastycznych na gilotynie z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i fizycznej. Istotnym było wyjaśnienie zjawisk fizycznych towarzyszących procesowi cięcia na gilotynie, opracowanie zaleceń dotyczących modelowania tego procesu oraz prawidłowego doboru parametrów obróbki ze względu na przyjęte kryteria.

W wyniku projektu opracowano naukowe, teoretyczne i doświadczalne podstawy procesu cięcia materiałów sprężysto/lepko-plastycznych na gilotynie z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i fizycznej. Zaproponowane zależności mają charakter aplikacyjny w praktyce inżynierskiej do projektowania nowoczesnych narzędzi do cięcia. Uzyskany materiał badawczy może być wykorzystany również do weryfikacji modeli teoretycznych zjawiska cięcia.

Wyniki badań zostały opublikowane w renomowanych czasopismach krajowych i zagranicznych (zał. 3, pkt. 1.3). W wyniku realizacji projektu opracowano zalecenia dotyczące doboru odpowiedniej geometrii narzędzi (doboru odpowiedniego kształtu narzędzi, kątów pochylecia krawędzi tnących itp.) ze względu na przyjęte kryteria dotyczące głównie wysokiej jakości wyrobów i energochłonności procesu (zmniejszenie sił cięcia, ilości odpadów itp.). Proces cięcia został zamodelowany w ujęciu przyrostowym, z jawnym i niejawnym schematem całkowania równań ruchu względem czasu, co pozwoliło na skrócenie czasu obliczeń. W modelach uwzględniono dynamiczne warunki realizacji procesu cięcia oraz właściwości różnych materiałów obróbkowych.

Na podstawie modelu matematycznego został opracowany efektywny model komputerowy procesu cięcia materiałów sprężysto/lepko-plastycznych i jego aplikacja w zakresie 3D (przestrzenne stany naprężeń i odkształceń). Wykorzystując opracowane algorytmy wykonano badania dotyczące określenia wpływu stref przylegania i poślizgu w materiale na przebieg procesu cięcia i jakość uzyskanego wyrobu w zależności od przyjętych parametrów technologicznych np.; zużycia narzędzi tnących, prędkości cięcia, tarcia w obszarach kontaktu narzędzia z przedmiotem itp. Przeprowadzono badania z uwzględnieniem wpływu prędkości cięcia na stany naprężeń, odkształceń, deformacji materiału. Prędkość cięcia jest istotnym czynnikiem wpływającym na przebieg odkształcenia materiału, kształty pęknięć i ich trajektorię. Efekty prędkości deformacji zmieniają charakter umocnienia plastycznego oraz

zdolność materiału do odkształceń plastycznych. Uzyskane wyniki umożliwiają prawidłowy dobór prędkości cięcia za względu na przyjęte kryteria.

Z czasem w obszarze moich działań badawczych oprócz analiz procesów obróbki plastycznej metali znalazły się również badania zjawisk fizycznych zachodzących w wymiennikach ciepła i pompach ciepła dużych mocy. Zakres i tematyka podejmowanych przeze mnie w tym czasie prac badawczych wynikały z realizacji wymienionych niżej projektów badawczych, których byłem wykonawcą (zał. 3, pkt. 1.7):

1. **Projekt Badawczy Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego** nr N N 512459536, nt.: *Wpływ zaburzeń na proces skraplania w kompaktowych wymiennikach ciepła z minikanalami*, Grant realizowany w latach 2009 - 2012 - członek Zespołu Badawczego
2. **Projekt Badawczy Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego** nr N N 512355637, nt.: *Badanie wpływu zjawiska flashingu na opory przepływu oraz wymianę ciepła podczas przepływu czynników chłodniczych w mini kanałach rurowych*, Grant realizowany w latach 2009 - 2012 – członek Zespołu Badawczego
3. **Projekt Badawczy Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego** nr N N 512456740, nt.: *Badanie skraplania czynników chłodniczych w minikanalach rurowych kompaktowych wymienników ciepła*, Grant realizowany w latach 2011 – 2014 - członek Zespołu Badawczego
4. **Projekt badawczy Narodowego Centrum Badań i Rozwoju**: *Badania i opracowanie optymalnego typoszeregu wysokoefektywnych powietrznych pomp ciepła dużych mocy wraz z innowacyjnym inteligentnym systemem sterowania – ścieżka B – ID 246502 – projekt realizowany przez konsorcjum: Budopekx S.A. S.K.A (lider), Sytherm Danuta Gazińska Sp.J, Politechnika Koszalińska, 2013 – 2016 – członek Zespołu Badawczego.*

W projektach 1 - 3 byłem odpowiedzialny za prowadzenie obliczeń numerycznych dotyczących modelowania przemian fazowych czynników roboczych w przepływie. Zostały opracowane modele, które pozwalały określać wartości współczynników wymiany ciepła i oporów przepływu. Przeprowadzono również symulacje numeryczne rozchodzenia się zaburzeń w ośrodku dwufazowym z zachodzącą przemianą fazową. Uzyskane wyniki pozwoliły określić prędkość fali ciśnieniowej i temperaturowej w zależności od stopnia wypełnienia.

Wyniki projektów znalazły zastosowanie w projektowaniu elementów instalacji energetycznych oraz w podniesieniu stabilności pracy instalacji. W projekcie 4 prowadziłem modelowanie numeryczne związane z podniesieniem stabilności pracy i wzrostu poziomu sprawności COP nowego typoszeregu pomp ciepła, który został wdrożony do produkcji przez firmę Budopekx S.A. w Świebodzinie.

W terminie od 18.11.2013 r. do 21.02.2014 r. odbyłem staż badawczy na Politechnice Warszawskiej na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych. W wyniku nawiązanej współpracy z pracownikami Instytutu Pojazdów Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej (m.in. dr hab. inż. Szymonem Gontarzem) w obszarze moich działań badawczych znalazły się zagadnienia modelowania zjawisk magnetycznych zachodzących w stalach elektrotechnicznych w ujęciu Metody Elementów Skończonych. Wynikało to z braku w dostępnej literaturze kompleksowych modeli MES uwzględniających zarówno równania konstytutywne opisujące zjawiska elektromagnetyczne zachodzące w stalach podczas obciążeń (np.: przenikalność magnetyczna, histereza magnetyczna, zjawisko prądów wirowych, anizotropia magnetyczna blach elektrotechnicznych) jak i mechaniczne (np.: historia materiału, naprężenia, odkształcenia, zmęczenie, przyrost temperatury, poślizg, pęknięcie). W związku z tym w tym okresie prowadzone przeze mnie badania dotyczyły m. in. modelowania zjawisk magnetycznych i mechanicznych zachodzących w wybranych urządzeniach (np.: skaner magnetyczny), modelowania i badań

eksperymentalnych procesów technologicznych wytwarzania materiałów elektrotechnicznych (zał. 3, pkt. 1.3, 1.10, 1.11).

W ramach stażu przeprowadzono badania procesów cięcia plazmą, wodą, laserem i na nożycach krążkowych stali konstrukcyjnych i elektrotechnicznych w aspekcie oceny ich własności magnetycznych. Wykazano, że zarówno technika cięcia jak i jakość uzyskanego wyrobu po cięciu mają znaczący wpływ na własności magnetyczne tych materiałów. W przypadku zastosowania dla potrzeb energetyki, są to głównie małe straty i duża indukcja magnetyczna. W elektronice, wymaganiami, które stawia się, to małe straty, szczególnie w zakresie wysokich częstotliwości, duża indukcja oraz duża przenikalność magnetyczna. W efekcie w ramach badań przeprowadzono:

- określono kierunki walcowania próbek do cięcia (stale elektrotechniczne, stale elektrotechniczne laserowane, stale konstrukcyjne),
- przeprowadzono próby cięcia plazmą, wodą, laserem i na nożycach krążkowych zgodnie i przeciwnie do kierunku walcowania tych materiałów,
- zbadano własności magnetyczne przeciętych próbek w zależności od techniki cięcia. Ponadto badania rozszerzono o analizę wpływu luzu między nożycami i prędkości cięcia na własności magnetyczne blach ciętych na nożycach krążkowych (stale elektrotechniczne),
- przeprowadzono badania magnetyczne stali konstrukcyjnych podczas statycznej próby rozciągania dla różnych kierunków walcowania i technik cięcia,
- przeprowadzono badania zmęczeniowe stali elektrotechnicznych na stanowisku giga cyklowym
- ponadto analizowano stan powierzchni przecięcia próbek w skali mikro i makro w zależności od zadanych warunków cięcia.

W ramach współpracy z pracownikami Instytutu Pojazdów Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej brałem udział w realizacji następujących projektów badawczych, których byłem wykonawcą:

1. **Projekt badawczy Narodowego Centrum Badań i Rozwoju** nr PBS1/B4/6/2012, nt.: *Wykrywanie wczesnych faz uszkodzeń stalowych elementów konstrukcyjnych na podstawie analizy zjawisk magnetomechanicznych w ziemskim polu magnetycznym*. Grant realizowany w latach 2012 - 2015 – członek Zespołu Badawczego.
2. **Projekt badawczy Narodowego Centrum Badań i Rozwoju** nr DOB – BI06/21/8/2014, nt.: *„Pasywne i aktywne metody magnetyczne jako podstawa nowej metodyki badań związanych z wykrywaniem, zwalczaniem i neutralizacją zagrożeń terrorystycznych oraz przestępczości zorganizowanej”*. Grant realizowany w latach 2014 - 2017 – członek Zespołu Badawczego.

W projekcie I brałem udział w przeprowadzeniu prób cięcia plazmą, wodą, laserem i na nożycach krążkowych materiałów magnetycznych zgodnie i przeciwnie do kierunku walcowania tych materiałów. Zbadano także własności magnetyczne przeciętych próbek w zależności od techniki cięcia.

W projekcie II byłem odpowiedzialny za opracowanie i analizę modeli połączeń i obróbki stali dla różnych konfiguracji torów pomiarowych do pomiarów magnetycznych. Opracowanie metody redukcji zakłóceń podczas pasywnych pomiarów pola magnetycznego w warunkach rzeczywistych. Wyniki badań przedstawiono na konferencjach krajowych (DIAG [zał. 3, pkt.1.11, poz. 24]) i międzynarodowych (XV International Technical Systems Degradation Conference [zał. 3, pkt.1.10, poz. 12]).

Podczas stażu przeprowadzono także kurs dla pracowników Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej z obsługi programu ANSYS/LS-DYNA (15 godzin). Nawiązano także współpracę w zakresie badań i symulacji zjawisk fizycznych struktur sprężonych.

Kolejnym etapem moich prac badawczych była realizacja projektu badawczego Młodych Naukowców: „Zastosowanie technik wizyjnych do analizy zjawisk fizycznych zachodzących podczas procesów cięcia materiałów trudnoobrabialnych”, (środki finansowe na działalność naukowo-badawczą w ramach dotacji na badania własne, Politechnika Koszalińska), realizowany w latach 2014 - 2015. Charakter udziału: główny wykonawca [zał. 3 pkt. 1.7, poz. 8]. W ramach realizacji projektu zbudowano zintegrowany system rejestracji obrazów szybkozmiennych, a następnie wykorzystano go do analizy zjawisk fizycznych zachodzących podczas procesów cięcia materiałów trudnoobrabialnych. Efektem przeprowadzonych prac badawczych było [zał. 3, pkt. 1.3]:

- opracowanie metody analizy pól przemieszczeń materiału,
- przeprowadzenie analizy procesu narastania frontu pęknięcia podczas deformacji,
- pomiary ugięcia powierzchni czołowej powstałej pod wpływem docisku narzędzia,
- rejestracja wyglądu powierzchni wyrobu powstałej po cięciu w postaci obszarów: błyszczącego i matowego oraz ocenę wielkości zadziorów lub innych defektów np.: zagięć krawędzi, wiórów.

Kolejnym etapem badań naukowych była realizacja Projektu badawczego Młodych Naukowców nt.: „Analiza wpływu procesu cięcia na jakość powierzchni przecięcia i właściwości magnetyczne stali krzemowych o ziarnie zorientowanym” (środki finansowe na działalność naukowo-badawczą w ramach dotacji na badania własne, Politechnika Koszalińska), realizowany w latach 2016 – 2017. Charakter udziału: główny wykonawca [zał. 3 pkt. 1.7, poz. 10]. W ramach projektu opracowano modele matematyczne i symulacyjne procesów cięcia mechanicznego stali elektrotechnicznych (m.in. stali krzemowej o ziarnie zorientowanym) z zastosowaniem metod MES oraz SPH. Przeprowadzono optymalizację procesów cięcia z uwzględnieniem właściwości magnetycznych tych materiałów.

Od roku 2010 do chwili obecnej równolegle z działalnością naukową, realizuję zadania o charakterze rozwojowym i badawczo-usługowe (zał. 3, pkt. 1.5, zał 4, pkt. 1.11, 1.19]. Prace badawcze prowadzono we współpracy z firmami na terenie całego kraju, na zlecenie których zostały wykonane opracowania w zakresie m.in.:

1. Statyczna analiza konstrukcji w zakresie odkształceń sprężystych (E) oraz sprężysto-plastycznych (E/P):
 - analiza platform oraz podestów na potrzeby firmy GIPO Sp. z o.o. Koszalin,
 - analiza zbiorników, mieszalników na potrzeby firmy GIPO Sp. z o.o. Koszalin,
 - badania zaworów kulowych – na potrzeby firmy Arka Sianów,
 - obliczenia numeryczne i opracowanie wytycznych do projektowania przyczepy rolniczej.
 2. Dynamiczna analiza konstrukcji w zakresie odkształceń sprężystych (E) oraz sprężysto-plastycznych (E/P), sprężysto/lepko-plastycznych (E/VP) oraz termo-sprężysto/lepko-plastycznych (TE/VP):
 - analiza procesów technologicznych (obróbki plastyczne – powierzchniowe i objętościowe),
 - obliczenia numeryczne i opracowanie wytycznych do projektowania przyczepy rolniczej,
 - badania wytrzymałościowe złącza meblowego.
 3. Analiza konstrukcji poddanych obciążeniu sejsmicznemu:
 - analiza platform – podestów stosowanych w biogazowniach - na potrzeby firmy GIPO Sp. z o.o. Koszalin.
 4. Optymalizacja parametryczna konstrukcji i procesów technologicznych:
 - badania procesu cięcia mechanicznego materiałów trudnoobrabialnych,
-

- badania procesu wykrawania oraz wycinania laserem detali metalowych,
5. Opracowanie i wdrażanie nowych technologii w produkcji wyrobów w branży metalowej:
- opracowanie koncepcji technologicznej innowacyjnego systemu produkcyjnego nowej generacji pierścieni miedzianych stosowanych przeciw ślimakom w uprawach ogrodowych,
 - opracowanie koncepcji technologicznej zintegrowanego wielogniazdowego systemu produkcji konstrukcji stalowych i aluminiowych,
 - opracowanie innowacyjnej technologii produkcji pił taśmowych.
6. Projektowanie narzędzi i konstrukcji przemysłowych:
- projektowanie nowych narzędzi do cięcia materiałów trudnoobrabialnych,
 - opracowanie wytycznych do projektowania kompaktowych wymienników ciepła,
 - opracowanie wytycznych do projektowania procesu wykrawania oraz wycinania laserem detali metalowych,
 - opracowanie wytycznych do projektowania przyczepy,
 - opracowanie wytycznych do projektowania zbiorników i platform przemysłowych,
 - opracowanie urządzenia do cięcia folii polipropylenowej wykorzystujące zjawisko zimnej ablacji.

3. OPIS OSIĄGNIĘĆ NAUKOWO-BADAWCZYCH, DYDAKTYCZNYCH, POPULARYZATORSKICH I ORGANIZACYJNYCH

Dorobek publikacyjny po uzyskaniu stopnia naukowego doktora nauk technicznych tematycznie jest wyraźnie skupiony wokół zagadnień związanych z modelowaniem, analizą teoretyczną i eksperymentalną procesów cięcia materiałów metalowych. Dorobek ten należy do dyscypliny naukowej Budowa i Eksploatacja Maszyn.

Dorobek obejmuje autorstwo oraz współautorstwo łącznie 104 publikacji naukowych (18 przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora nauk technicznych). 21 publikacji w czasopiśmie wyróżnionych w Journal Citation Reports (JCR) (wszystkie po doktoracie), 11 publikacji zagranicznych niewyróżnionych w JCR (4 przed doktoratem), 32 prace naukowe opublikowane w krajowych czasopiśmie naukowych i naukowo-technicznych niewyróżnionych w JCR (wszystkie po doktoracie), 17 w krajowych wydawnictwach monograficznych (7 przed doktoratem), 9 w zagranicznych wydawnictwach monograficznych (wszystkie po doktoracie), 4 publikacje w materiałach konferencyjnych zagranicznych (wszystkie po doktoracie) i 10 krajowych (3 po doktoracie). Wykaz publikacji z uwzględnieniem autorstwa i współautorstwa oraz języka publikacji obejmuje: 2 publikacje indywidualne przed doktoratem, 16 indywidualnych po doktoracie, 16 publikacji współautorskich przed doktoratem, 70 publikacji współautorskich po doktoracie, 14 publikacji w języku polskim przed doktoratem, 42 po doktoracie, 4 publikacje w języku angielskim przed doktoratem oraz 44 publikacje w języku angielskim po doktoracie.

Ilościowy wykaz najważniejszych osiągnięć naukowo-badawczych			
Wykaz osiągnięć	Przed doktoratem	Po Doktoracie	Łącznie
Publikacje ogółem	18	86	104
Publikacje w czasopiśmie wyróżnionych w <i>Journal Citation Reports</i> ® indeksowanych przez <i>Thomson Reuters</i> ® <i>Web of Knowledge</i> ®	–	21	21
Autorstwo monografii	–	1	1
Autorstwo/współautorstwo dokumentacji prac badawczych, ekspertyz	–	23	23
Sumaryczny <i>impact factor</i> według listy <i>JCR</i>		6,264	
Liczba cytowań publikacji według bazy <i>Web of Science</i>		83	
Liczba cytowań publikacji według bazy <i>Scopus</i>		67	
Liczba cytowań publikacji według bazy <i>Google Scholar</i>		412	
Indeks Hirsha opublikowanych publikacji według bazy <i>Web of Science</i>		7	
Indeks Hirsha opublikowanych publikacji według bazy <i>Scopus</i>		6	
Indeks Hirsha opublikowanych publikacji według bazy <i>Google Scholar</i>		14	
Udział w projektach międzynarodowych	–	-	-
Udział w projektach krajowych	1	10	11
krajowe nagrody za działalność naukową	–	8	8
Międzynarodowe/krajowe stypendia	–	-	-
Wygłoszenie referatów na międzynarodowych konferencjach tematycznych	3	9	12
Wygłoszenie referatów na krajowych konferencjach tematycznych	14	15	29
Zgłoszenia patentowe	–	-	-

Liczba publikacji z uwzględnieniem miejsca publikacji	Przed doktoratem/ Po doktoracie/Łącznie
Publikacje w czasopismach naukowych i naukowo-technicznych wyróżnionych w <i>Journal Citation Reports</i> ® indeksowanych przez Thomson Reuters® Web of Knowledge®	0/21/21
Publikacje w zagranicznych czasopismach naukowych i naukowo-technicznych niewyróżnionych w <i>Journal Citation Reports</i> ® nieindeksowanych przez Thomson Reuters® Web of Knowledge®	4/7/11
Publikacje w krajowych czasopismach naukowych i naukowo-technicznych niewyróżnionych w <i>Journal Citation Reports</i> ® nieindeksowanych przez Thomson Reuters® Web of Knowledge®	0/32/32
Prace opublikowane w krajowych wydawnictwach monograficznych	7/10/17
Prace opublikowane zagranicznych wydawnictwach monograficznych	0/9/9
Prace opublikowane w materiałach konferencji międzynarodowych	0/4/4
Prace opublikowane w materiałach konferencyjnych konferencji krajowych	7/3/10

Publikacje stanowią 104 (Załącznik 3) opracowań naukowych. Index Hirsha według WoS wynosi $H=7$ (Załącznik 6), liczba cytowań 83, zaś sumaryczny Impact Factor 6,264. Natomiast według Harzing's Publish or Perish $H=14$, zaś liczba cytowań 412, według Scopus $H=6$.

Dorobek publikacyjny ma znaczny wpływ na stan wiedzy i kierunki dalszych badań w dziedzinie, która jest uznawana za nowatorską i jedną z ważniejszych dla rozwoju obróbki plastycznej metali.

Prace zaprezentowano poprzez wysokiej rangi publikacje naukowe o dużym znaczeniu i zasięgu międzynarodowym, m.in.:

- *Steel Research International*,
- *Annual Set The Environment Protection*,
- *Mechanika*,
- *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*,
- *Task Quarterly - Scientific Bulletin of the Academic Computer Centre*,
- *Applied Mathematics and Mechanics - English Edition*,
- *Machine Dynamics Research*,
- *Autobusy - Technika eksploatacja systemy transportowe*,
- *Mechanik*,
- *Pomiary Automatyka Kontrola*,
- *Modelowanie Inżynierskie*,
- *Applied Mechanics and Materials*,
- *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*,
- *Technika Transportu Szynowego*,
- *Materials Science Forum*,

- *Acta Mechanica et Automatica.*
- *Journal PAMM,*
- *Proceedings of International Symposium on Plasticity,*
- *Proceedings of 8th International Congress of Croatian Society of Mechanics.*

Za wyróżniający dorobek publikacyjny i naukowy otrzymałem nagrody indywidualne J.M. Rektora Politechniki Koszalińskiej (załącznik 6).

Syntetyczna charakterystyka dorobku dydaktycznego, popularyzatorskiego oraz współpracy międzynarodowej obejmuje (Załącznik 4):

Wykaz osiągnięć	Liczba osiągnięć	Łącznie
Uczestnictwo w programach europejskich i innych programach międzynarodowych lub krajowych	4	4
Udział w międzynarodowych/krajowych konferencjach naukowych	12/29	41
Udział w komitetach organizacyjnych krajowych konferencji naukowych	3	3
Udział w komitetach programowych krajowych konferencji naukowych	1	1
Otrzymane nagrody i wyróżnienia	9	9
Udział w konsorcjach i sieciach badawczych	1	1
Udział w projektach realizowanych we współpracy z naukowcami z innych ośrodków polskich i zagranicznych lub przedsiębiorcami	3	3
Członkostwo w międzynarodowych i krajowych organizacjach i towarzystwach naukowych	1	1
Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze promotora pomocniczego	1	1
Staże w zagranicznych ośrodkach naukowych lub akademickich	2	2
Staże w krajowych ośrodkach naukowych lub akademickich	2	2
Wykonanie ekspertyz lub innych opracowań na zamówienie przedsiębiorców	23	23
Udział w zespołach eksperckich	1	1
Recenzowanie projektów krajowych	-	-
Recenzowanie publikacji w czasopismach międzynarodowych/krajowych	8/12	20

Wyniki badań prezentowano w formie referatów (12 zagranicznych i 29 krajowych) na konferencjach międzynarodowych (Meksyk, Chorwacja, Szwajcaria, Niemcy, Słowacja) i krajowych (Załącznik 3). Zyskały one uznanie w międzynarodowym gronie.

Jako student aktywnie brałem udział w kołach naukowych (m.in. *High Tech*), kursach programowania obrabiarek CNC oraz dodatkowych zajęciach dydaktycznych związanych z modelowaniem, symulacją oraz analizą eksperymentalną zjawisk fizycznych w mechanice i obróbce plastycznej metali.

Od roku 2016 do chwili obecnej pełnię funkcję członka Senatu Politechniki Koszalińskiej (kadencja 2016 - 2020 r.). Jestem również przedstawicielem nauczycieli akademickich nie będących profesorami i doktorami habilitowanymi do Rady Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej (kadencja 2016 - 2020 r.).

W 2015 roku zostałem powołany na koordynatora Wydziału Mechanicznego programu ERASMUS+ dla kierunków: Energetyka (I stopień studiów, Zarządzanie i Inżynieria Produkcji (I stopień studiów). Funkcję tę sprawuję także w kadencji 2016 - 2020 r. Program na celu wspieranie edukacji, szkolenia, inicjatyw młodzieżowych oraz sportowych w całej Europie.

Do moich obowiązków należy m.in.:

- uzgadnianie zakresu wymiany międzynarodowej w ramach umów dwustronnych zawieranych przez wydział,
- rekrutacja studentów wydziału do wyjazdu na stypendia ERASMUS+,
- nadzorowanie pobytu studentów w uczelni zagranicznej,
- organizowanie pobytu studentów zagranicznych,
- koordynowanie zajęć oferowanych przez wydział w językach obcych - uaktualnianie oferty,
- podejmowanie działań w kierunku integrowania studentów zagranicznych ze studentami Wydziału,

W ramach programów ERASMUS i ERASMUS+ przygotowałem karty i prowadziłem kursy w języku obcym z mechaniki technicznej I i II, modelowania procesów wytwarzania, systemów analiz i symulacji komputerowych, metod numerycznych.

Od 2017 roku pełnię funkcję eksperta Małopolskiego Centrum Przedsiębiorczości w Krakowie uczestniczącego w procesie wyboru projektów do dofinansowania współfinansowanych ze środków RPO WM na lata 2014 - 2020 w dziedzinie: Badania przemysłowe i prace rozwojowe w przedsiębiorstwach w ramach specjalizacji:

1. Elektrotechnika i przemysł maszynowy,
2. Produkcja metali i wyrobów metalowych oraz wyrobów mineralnych surowców niemetalicznych.

Od roku 2013 do chwili obecnej pełnię funkcję opiekuna roku kierunku Transport studia stacjonarne i niestacjonarne na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej.

Do moich obowiązków należy m.in.:

- organizowanie spotkań ze studentami np. z przedstawicielami kół naukowych działającymi na Wydziale i na Uczelni, z nauczycielami oferującymi prowadzenie badań naukowych,
- informowanie studentów o możliwościach jakie oferuje Wydział Mechaniczny w zakresie kształcenia oraz wsparcia stypendialnego,
- pomaganie i wspieranie w załatwianiu trudnych spraw indywidualnych i grupowych studentów,
- wsparcie przy wyborze specjalności, przy wyborze przedmiotów obieralnych, itp,
- współpracowanie ze starostą roku, np. przy organizacji ankietyzacji studentów,
- współpraca z prodziekanami w sprawach związanych z procesem kształcenia.

Jestem opiekunem grupy studentów zajmującej się modelowaniem procesów technologicznych. Kilkakrotnie brałem udział w promocji Politechniki Koszalińskiej

w szkołach ponadgimnazjalnych m.in. w Bytowie i Koszalinie, jak również w ramach Koszalińskich Festiwali Nauki oraz dni otwartych Politechniki Koszalińskiej.

Jestem członkiem Kolegium Elektorów Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej na kadencje 2016 - 2020 r. reprezentującym pozostałych nauczycieli akademickich.

Jestem członkiem Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej (PTMTS) oddział Koszaliński. W ramach działalności biorę czynny udział w rozwoju mechaniki teoretycznej i stosowanej oraz współdziałam w jej szerzeniu i rozpowszechnianiu. Biorę udział w organizowaniu konferencji, zebrań, seminariów i kursów naukowych.

Jestem członkiem Komisji ds. Współpracy Międzynarodowej Wydziału Mechanicznego PK oraz Komisji Senackiej – Komisji Oceniającej Uczelni. Pełniłem funkcję członka komitetu organizacyjnego i redakcyjnego XI Konferencji „Nowe Kierunki Rozwoju Mechaniki” Koszalin - Sarbinowo Morskie, 18-20 marca 2015 r., komitetu organizacyjnego XXVIII Sympozjonu Podstaw Konstrukcji Maszyn 19 - 23.09.2017 r. oraz komitetu naukowego IX konferencji Studentów i Młodych Pracowników Nauki Wydziału Mechanicznego PK (2017 r.).

Recenzowałem artykuły w czasopismach krajowych oraz zagranicznych indeksowanych w bazie Journal Citation Reports takich jak: Autobusy (7), Mechanik (1), Pomiary Automatyka Kontrola (4), Machine Dynamics Research (1), Engineering Science and Technology: an International Journal (1), International Journal of Mechanical Sciences (1), Mechanism and Machine Theory (1), Recent Patents on Engineering (1), Simulation Modelling Practice and Theory (1), Applied Mechanics and Materials (2).

Prowadzę aktywną współpracę z następującymi ośrodkami naukowymi:

1. Politechnika Warszawska - Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych – współpraca w zakresie analizy własności magnetycznych materiałów elektrotechnicznych.
2. Politechnika Warszawska – Instytut Technik Wytwarzania – współpraca w zakresie monitorowania procesów technologicznych i stosowania technik wizyjnych w przemyśle.
3. Państwowy Uniwersytet Budownictwa Okrętowego im. Admirała Makarova, Mikołajów (Ukraina) – współpraca w zakresie modelowania i badań eksperymentalnych zjawisk cieplno-przepływowych w maszynach i urządzeniach energetycznych.
4. Technical University of Ostrava (Czechy) – współpraca w zakresie modelowania i badań eksperymentalnych konstrukcji i procesów technologicznych, konsultacje ze studentami z Czech.

W ramach obowiązków adiunkta prowadziłem wszystkie rodzaje zajęć dydaktycznych na studiach stacjonarnych i niestacjonarnych pierwsze go i drugiego stopnia, tj. wykłady, ćwiczenia tablicowe, zajęcia laboratoryjne i projektowe oraz prace przejściowe i seminaria. W ramach programów ERASMUS i ERASMUS + od roku 2010 prowadzę zajęcia dydaktyczne w języku obcym.

Prowadziłem zajęcia ze studentami czterech różnych kierunków studiów: Mechanika i Budowa Maszyn, Technika Rolnicza i Leśna, Transport i Energetyka. W trakcie 7 lat pracy na stanowisku adiunkta przygotowałem i prowadziłem wiele autorskich wykładów, przewodników i kursów z których można wyróżnić następujące bloki tematyczne poruszające zagadnienia związane z:

- *problemami modelowania zjawisk fizycznych w mechanice*: modelowanie z zastosowaniem Metody Elementów Skończonych, Metod dyskretnych, modelowanie konstrukcji, procesów technologicznych, zagadnienia kontaktowe;
- *budową oraz konstruowaniem aparatury*: procesy przemysłowe, konstrukcja i technologia wytwarzania aparatury, metody numeryczne i komputerowe wspomaganie projektowania;

- *mechaniką techniczną*: mechanika ogólna, mechanika teoretyczna, statyka, kinematyka, dynamika, mechanika zderzeń;
- *wytrzymałością materiałów*: analizy wytrzymałościowe układów mechanicznych, analityczne i eksperymentalne badania zjawisk zachodzących w materiałach konstrukcyjnych i konstrukcjach;
- *budową i eksploatacją pojazdów samochodowych*: teoria ruchu, analiza praw rządzących ruchem samochodu, budowa podwozi i nadwozi pojazdów samochodowych;
- *optymalizacją*: optymalizacja konstrukcji, komputerowe wspomaganie optymalizacji;
- *statystyką*: statystyka inżynierska, badania operacyjne, planowanie eksperymentu.

Biorę czynny udział w opracowywaniu siatek i programów studiów oraz w pracach Krajowych Ram Kwalifikacji z przedmiotów: *Modelowanie zjawisk fizycznych, Modelowanie i optymalizacja konstrukcji, Modelowanie konstrukcji, Badania symulacyjne konstrukcji*. Odebrałem dwa staże krajowe: 1.10.2004 - 1.10.2005 r. staż naukowy w Katedrze Maszyn Roboczych Wydział Mechaniczny, Politechnika Koszalińska, asystent stażysta oraz staż naukowy na Politechnice Warszawskiej na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych (18.11.2013 ÷ 21.02.2014 r.).

Odebrałem dwa staże w zagraniczym w ośrodku akademickim Technical University of Ostrava w ramach Programu CEEPUS III w terminie 23 - 30.05.2015 r. oraz w terminie 02.05.2016 – 06.05.2016 r. Podczas pobytu realizowałem zajęcia dydaktyczne na uczelni związane z zagadnieniami eksperymentalnej i symulacyjnej analizy zjawisk fizycznych zachodzących w procesach technologicznych, optymalizacji konstrukcji, projektowaniem procesów wytwarzania. Nawiązałem współpracę z Dziekanem wydziału prof. Jánem Valíčkiem, w wyniku której konsultuję prace inżynierskie, magisterskie i doktorskie związane z moimi zainteresowaniami naukowymi na realizowane wydziale.

W ramach stażu odbytego na Politechnice Warszawskiej (17.11.2013 - 17.02.2014 r.) przeprowadziłem dla pracowników wydziału, studentów i doktorantów Samochodów i Maszyn Roboczych kurs obsługi programu ANSYS LS-DYNA w wymiarze 15 godzin. W ramach kursu zapoznano się z opcjami programu i przeprowadzono symulacje zjawisk fizycznych zachodzących podczas procesów mechanicznych i technologicznych.

W latach 2010 ÷ 2017 ośmiokrotnie otrzymałem nagrody indywidualne i zespołowe JM Rektora Politechniki Koszalińskiej za działalność naukową oraz organizacyjno-dydaktyczną:

- Nagroda JM Rektora Politechniki Koszalińskiej – indywidualna II stopnia za uzyskanie stopnia naukowego doktora nauk technicznych – 2010;
- Nagroda JM Rektora Politechniki Koszalińskiej – indywidualna III stopnia za dorobek naukowy za lata 2009 – 2011;
- Nagroda JM Rektora Politechniki Koszalińskiej – indywidualna II stopnia za dorobek naukowy w roku 2012;
- Nagroda JM Rektora Politechniki Koszalińskiej – indywidualna III stopnia za dorobek naukowy w roku 2013;
- Nagroda JM Rektora Politechniki Koszalińskiej – indywidualna II stopnia za dorobek naukowy w roku 2014;
- Nagroda JM Rektora Politechniki Koszalińskiej – indywidualna II stopnia za dorobek naukowy w roku 2015;
- Nagroda JM Rektora Politechniki Koszalińskiej – indywidualna III stopnia za dorobek naukowy w roku 2016;
- Nagroda JM Rektora Politechniki Koszalińskiej – zespołowa III stopnia za osiągnięcia organizacyjne w roku 2016.

Bohdal