



POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY
KATEDRA MECHANIKI TECHNICZNEJ
I WYTRZYMAŁOŚCI MATERIAŁÓW

dr inż. Agnieszka Kułakowska

AUTOREFERAT

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

Koszalin, 2016

1. CHARAKTERYSTYKA HABILITANTKI

1.1. Uzyskane stopnie i tytuły naukowe

- **2006 – stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn**, Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, promotor: prof. dr hab. inż. Leon Kukielka, temat pracy doktorskiej: *Wpływ odchyłek zarysu regularnych nierówności powierzchni po obróbce toceniem na wybrane właściwości warstwy wierzchniej wyrobu nagniatanego*. Rozprawa doktorska **obroniona z wyróżnieniem**.
- **2003 – tytuł zawodowy inżyniera kierunku Mechanika i Budowa Maszyn**, Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, specjalność Inżynierskie Zastosowania Komputerów, promotor: prof. dr hab. inż. Leon Kukielka, temat pracy inżynierskiej: *Numeryczna analiza wpływu odchyłek zarysu nierówności na stan odkształceń i naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu nagniatanego*.
- **2001 – tytuł zawodowy magistra kierunku Ekonomia** Politechnika Koszalińska, Wydział Ekonomii i Zarządzania, specjalność Ekonomia Menedżerska, promotor: prof. nadzw. dr hab. Tadeusz Waściński, temat pracy magisterskiej: *Przydatność Internetu w działalności gospodarczej przedsiębiorstwa na przykładzie firmy Agora S.A.*

1.2. Przebieg pracy zawodowej

| | |
|--------------------------|--|
| od 1.03.2007 do dziś | Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów, praca na stanowisku adiunkta . |
| 1.03.2006 - 28.02.2007 | Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Maszyn Roboczych, praca na stanowisku asystenta . |
| 17.10. 2005 – 31.03.2006 | Politechnika Koszalińska, Park Naukowo-Technologiczny. Praca na stanowisku asystenta managera projektu pt. "Tworzenie Regionalnego Systemu Innowacji" |
| 01.10.2001 – 28.02.2006 | Politechnika Koszalińska. Pełnienie obowiązków doktoranta w Katedrze Maszyn Roboczych Wydziału Mechanicznego |

1.3. Osiągnięcia naukowe przed uzyskaniem stopnie doktora

Prace naukowo-badawcze dotyczące obróbki nagniataniem tocznym prowadzone są w Katedrze Maszyn Roboczych (obecnie Katedra Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów) Politechniki Koszalińskiej od 1987 roku pod kierownictwem prof. dr hab. inż. Leona Kukielki przez wieloosobowy zespół pracowników z uczelni i przemysłu. W pracach zespołu uczestniczę od roku 2000 – jako studentka, doktorantka a następnie pracownik naukowy katedry.

W badaniach zespołu i innych naukowców nie uwzględniano wpływu odchyłek zarysu nierówności powierzchni po obróbkach poprzedzających na jakość technologiczną wyrobu nagniatanego. W wielu przypadkach odchyłki te były powodem powstawania niezamierzonych niejednorodności właściwości warstwy wierzchniej kształtowanej nagniataniem. Poznanie wpływu odchyłek wysokości i odstępów nierówności powierzchni ma nie tylko istotne

znaczenie poznawcze, ale również duże znaczenie dla poprawy dokładności kształtowania jakości technologicznej wyrobu. Jest to również istotne dla opracowania i rozwoju nowych, bardziej efektywnych i dokładniejszych metod przygotowania powierzchni do nagniatania. Problemy te rozwiązywano w rozprawie doktorskiej pt. ” *Wpływ odchyłek zarysu regularnych nierówności powierzchni po obróbce toczeniem na wybrane właściwości warstwy wierzchniej wyrobu nagniatanego*”, pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Leona Kukielki, która została obroniona z wyróżnieniem.

Ponadto przed uzyskaniem stopnia doktora moja działalność naukowo-badawcza obejmowała również współautorstwo 10 publikacji naukowych oraz uczestnictwo w 8 konferencjach naukowych.

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 wskazuję monografię:

KUŁAKOWSKA AGNIESZKA: *Modelowanie, analiza i prognozowanie cech i wyników procesu nagniatania naporowego tocznego warstwy wierzchniej o zdeterminowanej strukturze geometrycznej powierzchni.*

Monografia Wydziału Mechanicznego nr 307, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2016, ISSN 0239-7129, ISBN 978-83-7365-410-5.

Wskazana monografia mojego autorstwa uzyskała pozytywne recenzje wydawnicze prof. dr. hab. inż. Tadeusza Burakowskiego z Instytutu Mechaniki Precyzyjnej w Warszawie oraz dr. hab. inż. Kazimierza Zaleskiego, profesora Politechniki Lubelskiej. Zawiera ona ogółem 170 stron druku zwartego, w tym 12 tabel, 104 rysunki, streszczenie w języku polskim, angielskim i niemieckim oraz wykaz oznaczeń i literatury liczący 160 pozycji.

2.1. Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników przedstawionych w monografii

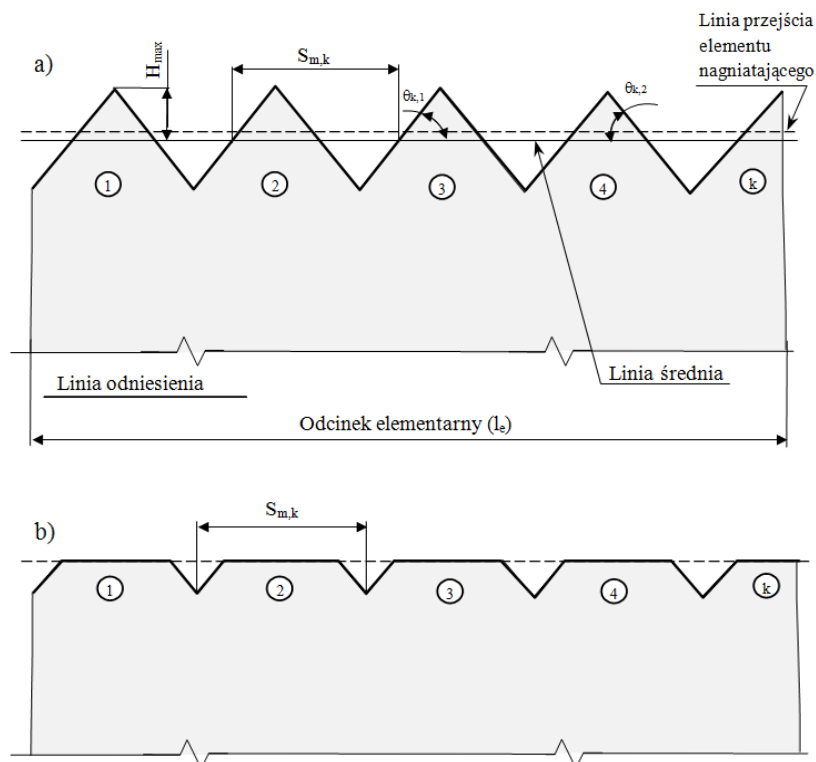
Podstawowym problemem współczesnych technik wytwarzania jest kształtowanie wyrobu o z góry określonych właściwościach eksploatacyjnych. Na jakość technologiczną wyrobu największy wpływ ma warstwa wierzchnia i jej właściwości. Podczas obróbki wykończeniowej zostają ostatecznie ukształtowane podstawowe właściwości warstwy wierzchniej, które w określonych warunkach eksploatacyjnych decydują o trwałości i niezawodności części maszyn.

Jedną z metod obróbki wykończeniowej części maszyn, pozwalającej uzyskać warstwę wierzchnią o korzystnych właściwościach, jest obróbka nagniataniem. Polega ona na wykorzystaniu miejscowego odkształcenia plastycznego, zachodzącego w warstwie wierzchniej przedmiotu wskutek określonego termodynamicznego działania twardego i gładkiego elementu nagniatającego, w kształcie rolki, krążka, kulki lub koła zębatego, na nierówności powierzchni obrabianej. Odkształcenia plastyczne wywołane tą metodą obróbki powstają w wyniku działania układu sił wywołujących, w przedmiocie obrabianym, naprężenia przekraczające wartość naprężenia uplastyczniającego. Daje to możliwość otrzymania przedmiotu o dużej gładkości powierzchni połączonej z umocnieniem mechanicznym warstwy wierzchniej oraz konstytuowania w niej naprężeń ściskających, powodując zwiększenie odporności na zużycie w warunkach eksploatacyjnych.

Różnorodność przeznaczenia części oraz różnorodność warunków ich eksploatacji powodują, że wymagania odnośnie do stanu warstwy wierzchniej i dokładności wymiarowo-kształtowej są zróżnicowane. Parametrami warstwy wierzchniej, kształtowanej w obróbkach poprzedzających, które istotnie wpływają na jakość technologiczną wyrobu nagniatanego są: zarys nierówności (np. trójkątny, trapezowy, łukowy itd.) i jego parametry oraz odchyłki wysokości i odstępu. Dobierając odpowiednie parametry zarysu po obróbkach poprzedzających możliwe jest sterowanie następującymi parametrami warstwy wierzchniej wyrobu nagniatanego: odległością wgłębień nierówności, wysokością nierówności, kształtem wgłębień nierówności, zarysem i profilem chropowatości części nośnej nierówności oraz wartością i rozkładem naprężeń oraz głębokością ich zalegania. Pomijanie tych parametrów prowadziło do istotnych rozbieżności w otrzymywanych wynikach badań oraz powodowało trudności wytwarzania wyrobu o założonej jakości technologicznej. Było to jedną z głównych przyczyn niedostatecznego zastosowania obróbki nagniataniem w przemyśle krajowym.

Na podstawie analizy stanu wiedzy stwierdzono, że:

- Najkorzystniejszym profilem powierzchni przed nagniataniem jest profil zdeterminowany, okresowy i symetryczny. Po nagniataniu takiego profilu uzyskuje się powierzchnię również zdeterminowaną (rys. 1). Jakość technologiczna wyrobu zależy nie tylko od sposobu i warunków realizacji procesu nagniatania, ale również od jakości półwyrobu po obróbkach poprzedzających (w tym kątów wierzchołkowych trójkątnych regularnych nierówności, odchyłek zarysu nierówności powierzchni i in.).



Rys. 1. Przykładowe, zdeterminowane profile chropowatości po obróbce poprzedzającej (a) i po nagniataniu (b)

- Uzyskanie po obróbkach poprzedzających zarysu zgodnego z teoretycznym jest pożądane, jednak trudne do uzyskania. Przeprowadzone badania eksperymentalne kształtowania zarysu zdeterminowanego toczeniem wykazały, że rzeczywiste wartości parametrów geometrycznych takiego zarysu różnią się od teoretycznych,

co spowodowane jest występowaniem zjawisk losowych w trakcie zarówno obróbek poprzedzających jak i nagniatania.

- Często stan przedmiotu przed operacją nagniatania jest niezbyt dogłębnie sprawdzany. Analizy sprowadzają się do określenia i podania stopnia twardości HRC lub HV i jednego parametru chropowatości powierzchni Ra lub Rz. Natomiast charakterystyka naprężeń nie odzwierciedla faktycznego stanu z powodu istotnej trudności jej dokonania znanymi metodami (niszczące i nieniszczące), jak i różnorodności stosowanych metodyk pomiaru.
- Duża liczba występujących czynników oraz złożoność zjawisk fizycznych jest przyczyną trudności w opracowaniu uniwersalnych modeli zależności pomiędzy stanem przedmiotu po obróbkach poprzedzających i warunkami procesu nagniatania a jakością technologiczną wyrobu.
- Tylko nieliczne prace poświęcone są zagadnieniom kompleksowego badania jakości technologicznej i użytkowej wyrobu, z wykorzystaniem efektywnych metod planowania eksperymentu i metod statystycznego opracowania wyników. Modele statystyczno-dochodzące, choć opracowane prawidłowo nie są modelami uniwersalnymi. Mają one ograniczone zastosowanie do identycznych (jak podczas badań) warunków obróbki. Ponadto w analizie czynnikowej pomijano oddziaływanie wielu parametrów istotnie wpływających na jakość technologiczną wyrobu. Prace takie zazwyczaj zakończone są na poziomie opracowania modelu matematycznego bez dalszej analizy takiego modelu np. optymalizacji.
- Mimo wielu lat rozwoju metod analizy numerycznej obiektów sprężysto-plastycznych z szybkozmiennymi obciążeniami zauważa się w niektórych pracach znaczne uproszczenia. Dotyczy to zwykle wprowadzania istotnych uproszczeń w stosowanym modelu teoretycznym. Zaniedbuje się wpływ dynamicznych właściwości materiałowych, m.in. wpływ prędkości odkształcenia plastycznego, traktując go najczęściej jako ciało idealnie sztywno-plastyczne. Ponadto w analizach tych dąży się do poprawy właściwości eksploatacyjnych poprzez odpowiedni dobór parametrów technologicznych obróbki. Uwzględnia się regularne, zdeterminowane symetryczne zarysy nierówności powierzchni powstałe w obróbkach poprzedzających, jednak nie analizuje się wpływu ich parametrów geometrycznych oraz występujących po obróbkach poprzedzających, odchyłek takich zarysów czy występowania powrotu sprężystego materiału. Przeprowadzenie analiz i symulacji numerycznych stanowi cenne narzędzie ułatwiające i przyspieszające prace nad procesem nagniatania.
- Zbadanym problemem jest wpływ zadanych parametrów obróbki na chropowatość powierzchni czy dokładność, rozumianą jako odchyłkę kształtu, odchyłkę położenia, a także tolerancję wymiarową. Natomiast brak jest szczegółowych opracowań dotyczących właściwości warstwy wierzchniej obrabianych przedmiotów (a zwłaszcza wpływu kąta wierzchołkowego nierówności, odchyłek wysokości i odstępów chropowatości powierzchni, i in.) półwyrobu po obróbkach poprzedzających na przebieg procesu nagniatania.
- Dotychczas nie opracowano efektywnych aplikacji numerycznych w dostępnych specjalistycznych programach MES, pozwalających prognozować jakość technologiczną wyrobu nagniatanego, z wymaganą dokładnością, z uwzględnieniem występujących nieliniowości (geometrycznej i fizycznej) oraz wszystkich istotnych czynników (związanych z materiałem obrabianym, warunkami obróbki poprzedzającej, obróbki nagniataniem, historii odkształceń i prędkości odkształceń itd.) oraz warunkami

początkowo-brzegowymi lub określić warunki realizacji obróbki poprzedzającej i nagniatania w celu otrzymania zadanej a priori jakości wyrobu. Ostatni problem jest zadaniem odwrotnym, niemożliwym do rozwiązywania metodami tradycyjnymi.

Rozwiązane problemy naukowe

Wnioski wyciągnięte z analizy literatury dotyczące przygotowania powierzchni w obróbkach poprzedzających oraz stanu badań w zakresie procesu nagniatania i jego modelowania stanowiły podstawę do sformułowania problemów badawczych, które rozwiązano na drodze badań eksperymentalnych i analiz numerycznych, w tym:

- Opracowano efektywne modele numeryczne, w oparciu o które możliwa jest analiza zjawisk występujących w trakcie procesu nagniatania powierzchni chropowatych o zdeterminowanych, regularnych zarysach trójkątnych. Przy czym model ten powinien być uniwersalny i mógł być zastosowany do innych rodzajów powierzchni ukonstytuowanych w obróbkach poprzedzających. Stanowi to cenne narzędzie, przy użyciu którego możliwe jest m. in. określenie stanów przemieszczeń, odkształceń, naprężeń, siły głównej nagniatania, powrotu sprężystego materiału, uwzględnienie odchyłek zarysu nierówności powierzchni po obróbkach poprzedzających, warunków początkowych dla przemieszczeń, odkształceń i naprężeń itd.
- Opracowano model procesu nagniatania tocznego w ujęciu metod wariacyjnych i metody elementów skończonych z uwzględnieniem chropowatości powierzchni po obróbkach poprzedzających. Poznanie procesów zachodzących podczas nagniatania oraz występujących przemieszczeń i odkształceń (sprężystych, lepkich i plastycznych) oraz naprężeń stanowi podstawę do określania właściwości warstwy wierzchniej wyrobu, a zatem i do prognozowania jego jakości technologicznej i użytkowej.
- Określono wpływ obróbki poprzedzającej na jakość wyrobu nagniatanego na drodze eksperymentu. Znalezione zależności pomiędzy wybranymi parametrami geometrycznymi powierzchni po obróbce poprzedzającej, a m.in. chropowatością powierzchni, udziałem nośnym materiałowym, strukturą warstwy wierzchniej wyrobu nagniatanego i mikrotwardością.
- Analizowano powierzchnie po obróbce nagniataniem w skali nano, co przy tendencji do minimalizacji (np. rozmiarów) urządzeń, aparatury, sprzętu staje się niezbędne w celu zapewnienia odpowiedniej jakości komponentów nagniatanych. Określono wartości wysokości subnierówności oraz ich ułożenia.
- Podjęto próby ilościowego określenia wartości powrotu sprężystego materiału po procesie nagniatania w drodze analizy numerycznej i badań eksperymentalnych.
- Opracowano jakościowe zależności wpływu kątów wierzchołkowych zdeterminowanych, regularnych trójkątnych nierówności powierzchni po obróbce toczeniem na: chropowatość powierzchni, mikrotwardość, odkształcenia, naprężenia, odchyłkę wysokości i odstępu, czy powrotu sprężystego materiału wyrobu.
- Opracowano wytyczne stosowania odpowiednich kątów wierzchołkowych zdeterminowanych, regularnych trójkątnych nierówności powierzchni po obróbce toczeniem ze względu na pożądaną chropowatość powierzchni i/lub mikrotwardość WW po nagniataniu.
- Opracowano aplikacje numeryczne w komercyjnym programie wykorzystującym metody MES, do kompleksowej analizy zjawisk fizycznych towarzyszących procesowi nagniatania, w dowolnej chwili trwania procesu i w dowolnym punkcie obiektu,

powierzchni o zdeterminowanej strukturze po obróbkach poprzedzających. W efekcie możliwe będzie zarówno prognozowanie jakości wyrobu po nagniataniu dla zadanych warunków realizacji obróbki poprzedzającej i warunków nagniatania dowolnych materiałów o dowolnym stanie lub określenie wymaganych warunków realizacji procesów obróbki poprzedzającej i nagniatania w aspekcie wymaganej jakości wyrobu (zadanie odwrotne).

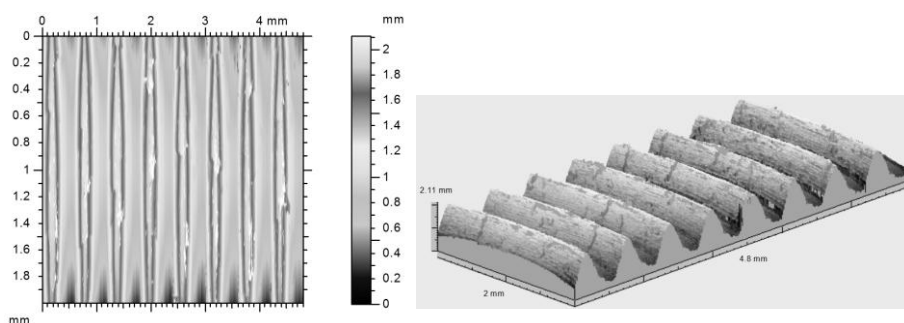
Badania własne prowadzono w dwóch kierunkach:

- teoretyczno-analitycznym (obejmującym zastosowanie opisu przyrostowego w modelowaniu procesu nagniatania oraz analizy i symulacje komputerowe zjawisk fizycznych zachodzących podczas nagniatania zdeterminowanych, regularnych, trójkątnych nierówności powierzchni z wykorzystaniem MES),
- doświadczalnym (obejmującym charakterystykę otrzymywanych powierzchni oraz wybranych parametrów warstwy wierzchniej po nagniataniu).

SYNTETYCZNY OPIS UZYSKANYCH WYNIKÓW:

1. *Określenie znaczenia struktury geometrycznej powierzchni przedmiotu do nagniatania tocznego na podstawie danych literaturowych oraz badań własnych* w tym:

- opisanie wymagań dotyczących struktury geometrycznej powierzchni do nagniatania, z których wynika, że stan przedmiotu po obróbce poprzedzającej wpływa na jakość technologiczną wyrobu nagniatanego. Istnieje korelacja pomiędzy stanem przedmiotu po obróbce poprzedzającej a jakością technologiczną wyrobu. Na przykład pomiędzy wyjściowym zarysem nierówności, a stanem naprężeń i zmianą wymiarów części po nagniataniu. Natomiast sterowanie właściwościami kształtowanej nagniataniem warstwy wierzchniej umożliwia dostosowanie jakości technologicznej wyrobu do zróżnicowanych warunków eksploatacji, co stwarza możliwość szerokiego wykorzystania tej metody obróbki w praktyce.
- przeprowadzenie analiz wybranych cech powierzchni przygotowanych do nagniatania różnymi metodami obróbki. Spośród analizowanych metod przygotowania powierzchni do nagniatania o zdeterminowanym profilu chropowatości najczęściej stosowaną metodą jest obróbka toczaniem. Przykładowy obraz komputerowy widoku z góry oraz aksonometrii ciągłej powierzchni po toczeniu na tokarce konwencjonalnej przedstawiono na rysunku 2.

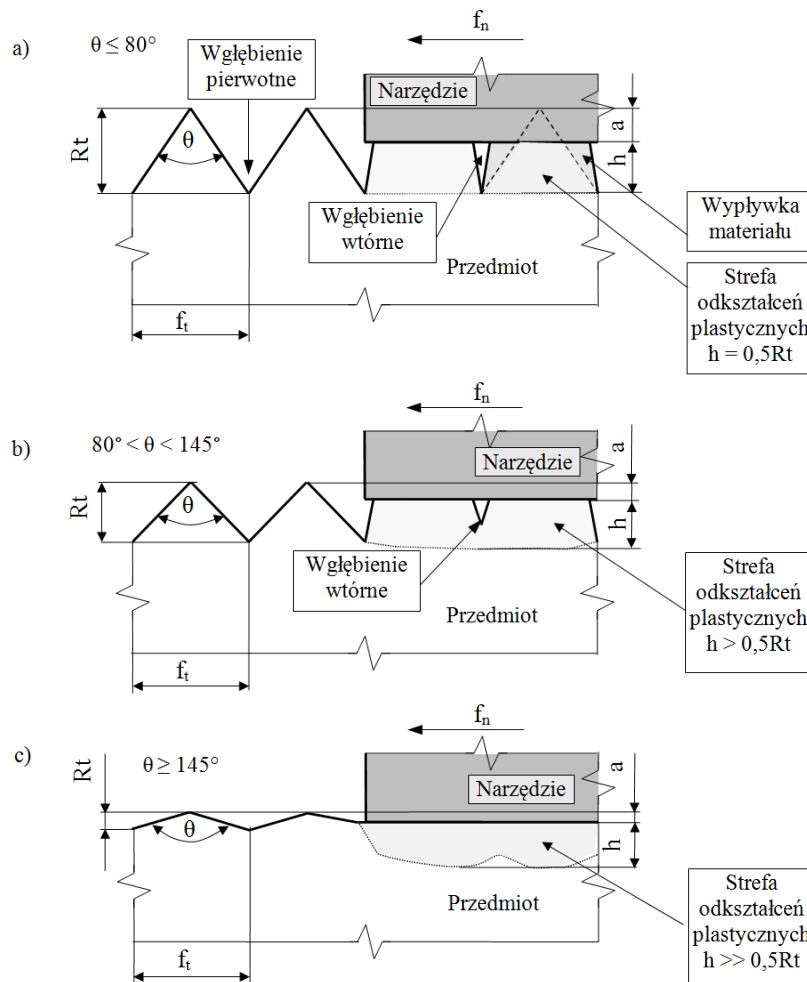


Rys. 2. Obraz komputerowy widoku z góry oraz aksonometria ciągła powierzchni po toczeniu na tokarce konwencjonalnej

Badania dotyczące kształtowania zarysu zdeterminowanego toczaniem wykazały, że rzeczywista wysokość chropowatości jest różna od teoretycznej, gdyż ta ostatnia nie uwzględnia: drgań układu OUPN, właściwości materiału obrabianego i materiału ostrza,

szczerbatości krawędzi, zużycia ostrza, odkształceń plastycznych zachodzących podczas skrawania i zależnych również od prędkości skrawania, wpływu odkształceń sprężystych, rysowania powierzchni przez wiór, chłodzenia (jeśli ma ono miejsce). Dokładność obróbki poprzedzającej nagniatanie ma zawsze wpływ na ostateczne wymiary obrabianego przedmiotu, szczególnie wtedy, gdy docisk elementów nagniatających do przedmiotu jest elastyczny. Zwiększenie dokładności obróbki poprzedzającej, np. podczas toczenia na centrach obróbkowych i tokarkach CNC stwarza szansę na szersze stosowanie nagniatania w obróbce dokładnych części maszyn, w tym także części hartowanych. W obróbce poprzedzającej nagniatanie uzyskać można nie tylko regularność zarysu, lecz również odpowiedni kąt wierzchołkowy θ kształtowanych nierówności. Wartości kąta wierzchołkowego θ nierówności, jak i wartość posuwu f_t w obróbce poprzedzającej należy dobierać każdorazowo dla typu części obrabianej i jej przeznaczenia.

- analiza wpływu kąta wierzchołkowego nierówności powierzchni do nagniatania na stan deformacji warstwy wierzchniej w procesie nagniatania. Przy założeniu, że nierówność powierzchni po obróbkach poprzedzających jest regularna, symetryczna i trójkątna, w literaturze, wyodrębniono trzy jakościowo różne przypadki płynięcia materiału w WW przedmiotu w procesie nagniatania zależne jedynie od kąta wierzchołkowego θ nierówności (rys. 3).

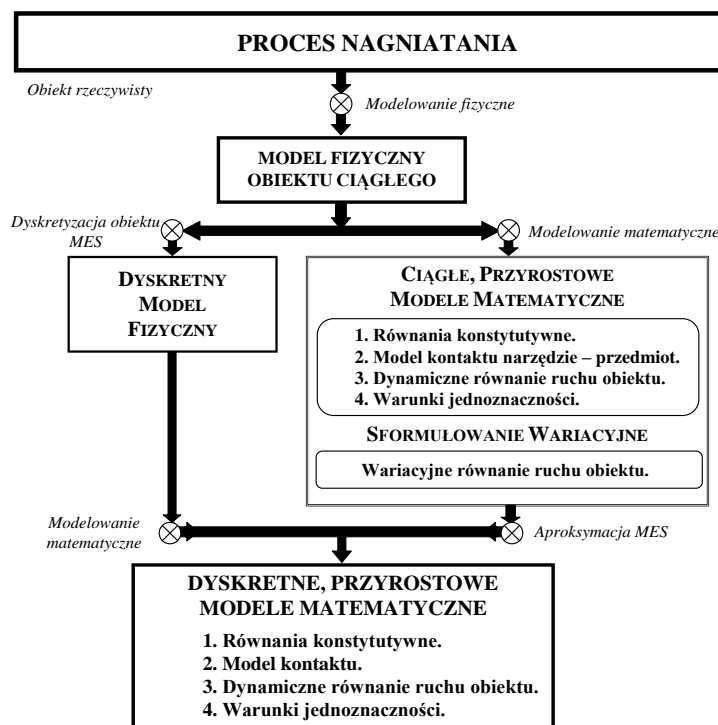


Rys. 3. Wpływ kąta wierzchołkowego symetrycznej nierówności trójkątnej na głębokość zalegania odkształceń i profil chropowatości powierzchni po nagniataniu

- zdefiniowanie odchyłek zarysu nierówności powierzchni po obróbce poprzedzającej nagniatanie

2. Metodyka modelowania procesu nagniatania tocznego, uwzględniająca:

- algorytm modelowania i analizy procesu nagniatania tocznego przy zastosowaniu metod wariacyjnych i elementów skończonych (rys. 4),
- 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 nagniatania tocznego,
- implementację numeryczną rozwiązywania dyskretyzowanych równań ruchu.



Rys. 4. Schemat modelowania procesu nagniatania

Proces nagniatania naporowego tocznego 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 przypadku nagniatania naporowego tocznego 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.

Zastosowane w autorskich aplikacjach modele materiałowe, pozwalają obliczać stany przemieszczeń, odkształceń i naprężeń w dowolnym punkcie obiektu i w dowolnej chwili

trwania procesu. Istotnym elementem, wykraczającym poza standardowe podejście do zagadnień modelowania procesu nagniatania, jest możliwość uwzględnienia warunków początkowych dla odkształceń i naprężeń. W praktyce, ze względu na brak możliwości bezinwazyjnego określania tych stanów, pomija się je lub eliminuje poprzez stosowanie obróbki cieplnej odprężającej. W przyszłości modele te mogą być wykorzystane do określenia wymaganych stanów odkształceń i naprężeń przedmiotu po obróbkach poprzedzających w celu zapewnienia wymaganego przebiegu zjawisk fizycznych w procesie nagniatania ze względu na pożądane właściwości warstwy wierzchniej wyrobu.

Nowym aspektem jest również uwzględnienie możliwości odkształceń sprężystych po odciążeniu. Pozwala to określać zmianę zarysu nierówności oraz wymiaru części wywołane tzw. zjawiskiem powrotu sprężystego. Wartość tych odkształceń może być także podstawą określenia wartości korekcyjnego dosunięcia elementów nagniatanych ze względu na wymaganą dokładność wymiarową wyrobu.

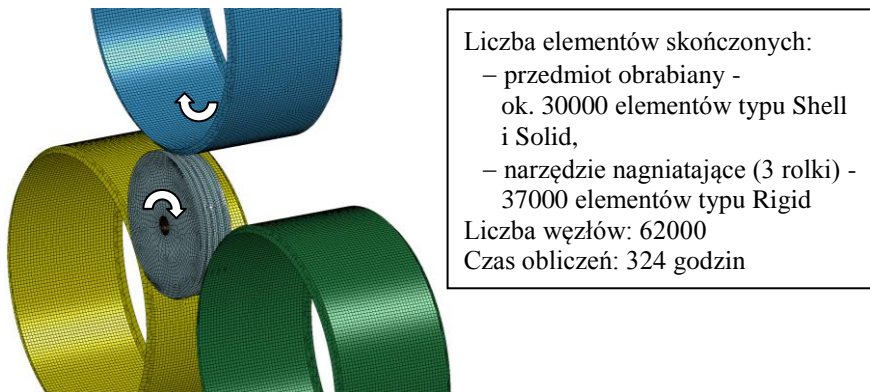
Metoda elementów skończonych z jawnym całkowaniem równań ruchu jest popularnym narzędziem w wielu zastosowaniach praktycznych, jak np. analiza konstrukcji poddanych obciążeniom uderzeniowym, symulacja procesów nagniatania, tłoczenia, cięcia, walcowania, wygniatania, symulacja procesów dynamicznych i inne. Przedstawione sformułowania teoretyczne zostały zaimplementowane we własnej aplikacji numerycznej. Możliwości zostaną przedstawione w aplikacjach zawartych w monografii. Jawny schemat całkowania dyskretnych równań ruchu, względem czasu, zakłada spełnienie równań ruchu na początku kroku czasowego i ekstrapoluje rozwiązanie w czasie Δt . Zaletą metod jawnych jest niewielki koszt wyznaczenia nowego przybliżenia (w kolejnej chwili czasu). Kolejne wartości poszukiwanych funkcji uzyskuje się bezpośrednio poprzez rozwiązanie układu równań otrzymanych po zastosowaniu schematów różnicowych. Rozwiązanie jawne jest szczególnie łatwe jeśli zastosuje się diagonalizację macierzy mas. Wówczas układ równań MES rozprzęga się i nie ma potrzeby, kosztownego numerycznie, odwracania macierzy dla wyznaczenia rozwiązania układu równań algebraicznych. W przypadku dużych modeli zalety metod jawnych przeważają nad ich wadami i niedogodnościami, co sprawia, że są chętnie wykorzystywane w praktyce do analizy zagadnień inżynierskich, prowadzących do dużych modeli obliczeniowych.

Zastosowany układ równań dyskretnych pozwala na ich podział na dwa bloki, dzięki temu, z pierwszego bloku określa się składowe nieznanego wektora przyrostu przemieszczeń węzłów, natomiast z drugiego – siły jednostkowe w obszarze kontaktu narzędzia z przedmiotem. Są to zagadnienia podstawowe, niemożliwe do określenia innymi metodami, np. eksperymentalnymi. Pozwalają również obliczać składowe siły nagniatania oraz analizować wpływ różnych czynników (warunków obróbki) na parametry siłowe.

3. Opracowanie metodyki analizy i symulacji numerycznej procesu nagniatania tocznego z uwzględnieniem jakości powierzchni po obróbce poprzedzającej, w tym:

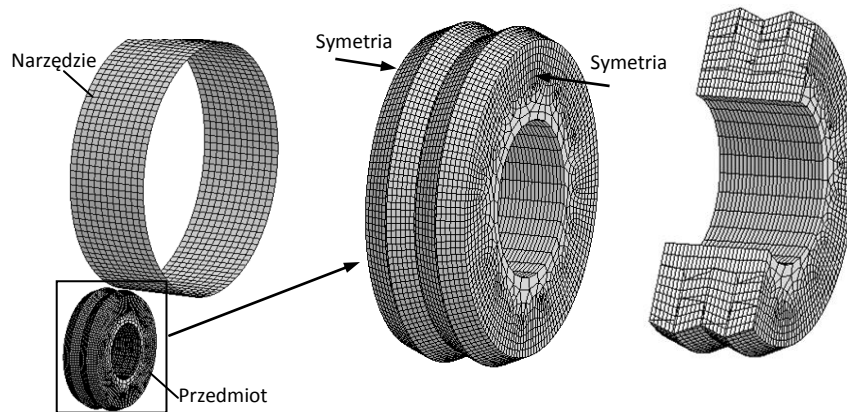
- opracowanie autorskich aplikacji numerycznych NAGNIATANIE 3D (rys. 5), do analizy złożonych zjawisk fizycznych w procesach nagniatania powierzchni po obróbkach poprzedzających w dowolnej chwili trwania procesu umożliwiających:
 - ✓ efektywny schemat rozwiązania,
 - ✓ różnorodne modele konstytutywne,
 - ✓ możliwość analizy przemieszczeń w dowolnym punkcie obiektu,
 - ✓ możliwość analizy różnorodnych problemów fizycznych: odkształceń, prędkości odkształceń i naprężeń,

- ✓ możliwość ustalania różnorodnych warunków brzegowych i początkowych,
- ✓ efektywny algorytm analizy zagadnienia kontaktowego,
- ✓ określenie wymiarów części oraz parametrów struktury geometrycznej powierzchni,
- ✓ określenie geometrii półfabrykatu oraz parametrów zarysu nierówności w czasie trwania procesu nagniatania, po odciążeniu sprężystym, a także geometrii części w trakcie i po procesie nagniatania,
- ✓ określenie stanów naprężeń i odkształceń w dowolnym punkcie obiektu (półfabrykatu i narzędzia) i w dowolnej chwili trwania procesu,
- ✓ lokalizacja odkształceń i naprężeń maksymalnych – możliwość pęknięcia i łuszczenia warstwy wierzchniej,
- ✓ określenie wymaganej siły głównej nagniatania,
- ✓ określenie jednostkowych sił kontaktowych, wymuszających i tarcia,
- ✓ określenie obszarów kontaktu, poślizgu i przylegania.



Rys. 5. Model geometryczny z siatką elementów skończonych (aplikacja NAGNIATANIE 3D-I)

- przeprowadzenie analizy wrażliwości w wyniku której opracowano efektywny model procesu nagniatania naporowego tocznego (rys. 6). Efektywny model komputerowy (NAGNIATANIE 3D-II) procesu w skali rzeczywistej charakteryzował się możliwością zmiany m.in.: kąta wierzchołkowego nierówności, jej odchyłki wysokości (Δh_i) i odstępów (Δs_i), warunków brzegowych, modelu materiałowego, prędkości obrotowej i współczynników tarcia. Opracowane efektywne modele dyskretne oraz algorytmy numeryczne, pozwalają na automatyczne zagęszczanie siatki tylko w obszarach o dużej krzywiznie i dużych gradientach odkształceń. W procesie nagniatania wałek poddany jest złożonemu procesowi odkształcania, charakteryzującemu się dużymi lokalnymi przemieszczeniami i dużymi odkształceniami. W modelu numerycznym przedmiot jest dyskretyzowany przestrzennymi elementami skończonymi. Elementy skończone użyte do dyskretyzacji przedmiotu powinny dobrze modelować złożony stan odkształcania, a jednocześnie muszą się charakteryzować dużą efektywnością obliczeniową. Oddanie zmian zarysu nierówności wymaga odpowiednio drobnej siatki elementów skończonych. Zastosowanie bardzo drobnej siatki elementów skończonych dla całego wałka i w trakcie całego procesu doprowadziłoby do modelu numerycznego o bardzo dużej liczbie niewiadomych, wymagającego długich czasów obliczeń.

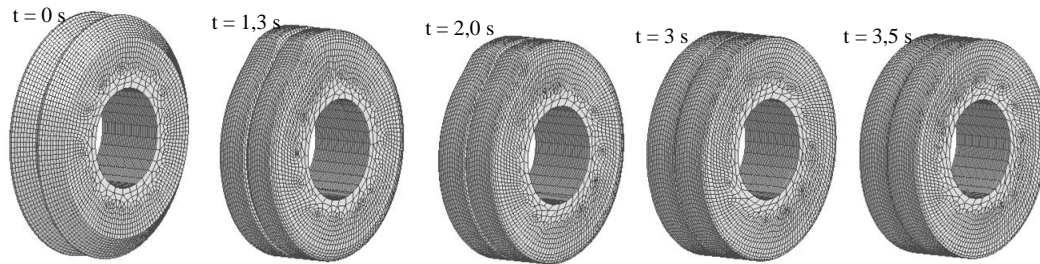


Rys. 6. Przykładowy model geometryczny ($\theta = 105^\circ$) z siatką elementów skończonych aplikacji NAGNIATANIE 3D-II

Chociaż rozwiązania niejawne uznawane są za dokładniejsze niż rozwiązania jawne, porównanie różnych rozwiązań jawnych i niejawnych z wynikami eksperymentalnymi pokazuje, że rozwiązania jawne nie ustępują dokładnością rozwiązaniom niejawnym. W przypadku dużych zagadnień zalety metod jawnych, takie jak wysoka efektywność rozwiązania dla pojedynczego kroku, nienieiteracyjny schemat rozwiązania oraz małe wymagania pamięci przeważają nad wadami tych metod, jak np. warunkowa stabilność i sprawiają, że metody jawne dominują w komercyjnych programach do symulacji procesów dynamicznych.

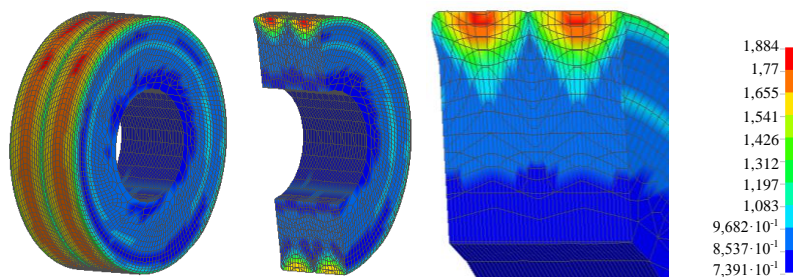
Modelowanie odkształcenia materiału w procesie nagniatania wymaga stosowania odpowiednich modeli konstytutywnych. Wywołane w trakcie nagniatania odkształcenie sprawia, że właściwości materiału wałka cechują się umocnieniem, które musi być uwzględnione w sformułowaniu teoretycznym.

- analiza deformacji nierówności. Opracowane aplikacje w systemach MES umożliwiły analizę procesu nagniatania z uwzględnieniem jakości powierzchni po obróbce poprzedzającej w dowolnej chwili czasowej. Przykładowe wyniki deformacji modelu i siatki elementów skończonych w kolejnych krokach czasowych przedstawiono na rysunku 7. Pierwszy rzut obrazuje przykładowy obiekt, który przygotowano pod obróbkę nagniataniem. Widoczne są dwie trójkątne, regularne nierówności naniesione na powierzchni wałka, które stanowią wycinek rzeczywistej powierzchni przygotowanej do obróbki. Następnie widoczny jest moment, kiedy narzędzie dosunęło do obracającego się fragmentu wałka i nastąpiło jego zagłębienie oraz deformacja wierzchołków nierówności. Dalsze zagłębienie narzędzia (aż do osiągnięcia wartości równej połowie wysokości nierówności) i obrót wałka powodują coraz większy zgniot nierówności, aż do całkowitego wygładzenia. Ciekawym osiągniętym rezultatem jest widok płynięcia materiału na boki (wypływka materiału w kierunku osiowym) podczas trwania procesu. Po odsunięciu narzędzia nagniatającego widoczne są wygładzone nierówności powierzchni wejściowej. Dalszy wzrost zagłębienia powyżej $k > 1$ spowoduje powstanie fali.

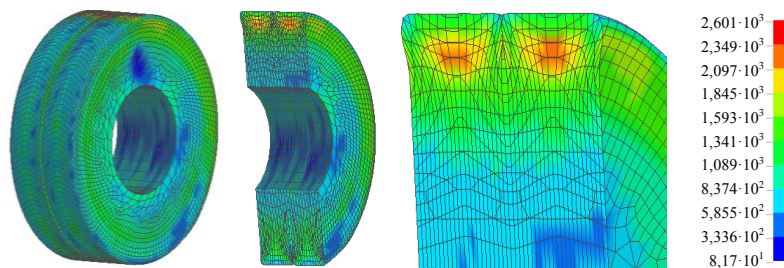


Rys. 7. Deformacja powierzchni wałka i siatki elementów skończonych w kolejnych krokach czasowych

– analiza odkształceń i naprężeń zredukowanych w warstwie wierzchniej przedmiotu podczas nagniatania tocznego. Przykładowe wyniki przedstawiono na rysunkach 8 i 9.

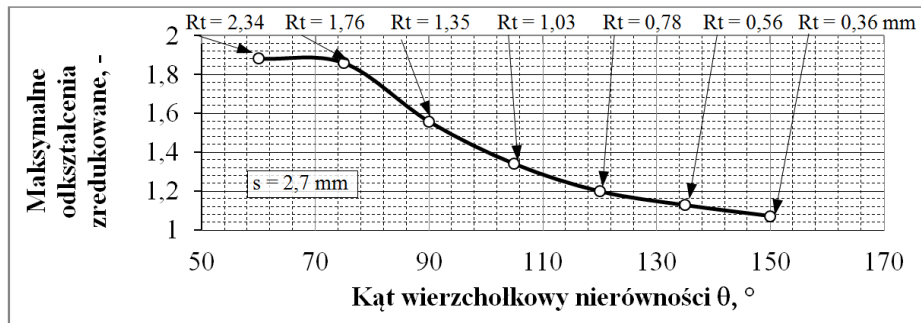


Rys. 8. Mapy odkształceń zredukowanych w warstwie wierzchniej przedmiotu podczas nagniatania powierzchni po toczeniu o trójkątnym zarysie (kąt wierzchołkowy $\theta = 60^\circ$)

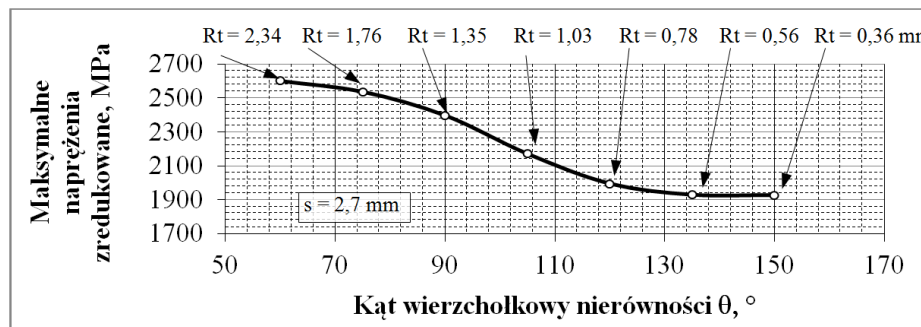


Rys. 9. Mapy naprężeń zredukowanych σ_z MPa w warstwie wierzchniej przedmiotu podczas nagniatania powierzchni po toczeniu o trójkątnym zarysie i kącie wierzchołkowym $\theta = 60^\circ$

Uzyskane wyniki pozwoliły na sporządzenie wykresu obrazującego wpływ kąta wierzchołkowego nierówności powierzchni po toczeniu na maksymalne wartości odkształceń $\varepsilon_{z,max}$ i naprężeń $\sigma_{z,max}$ zredukowanych w warstwie wierzchniej wyrobu (rys. 9). Stwierdzono, że wraz ze wzrostem kąta wierzchołkowego nierówności po toczeniu zarówno maksymalne odkształcenia jak i naprężenia zredukowane w warstwie wierzchniej wyrobu maleją.

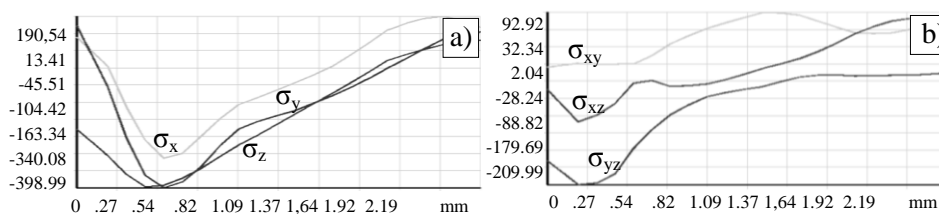


Rys. 10. Zależność maksymalnych odkształceń zredukowanych w warstwie wierzchniej przedmiotu po nagniataniu od kąta wierzchołkowego nierówności powierzchni po obróbce poprzedzającej



Rys. 11. Zależność maksymalnych naprężeń zredukowanych $\sigma_{z,max}$ w warstwie wierzchniej po nagniataniu od kąta wierzchołkowego nierówności powierzchni po obróbce poprzedzającej

- analiza rozkładu naprężeń wynikowych w warstwie wierzchniej przedmiotu po nagniataniu tocznym. Na bazie symulacji komputerowych opracowano wykresy przedstawiające rozkład składowych naprężeń normalnych σ_x , σ_y , σ_z oraz składowych stycznych σ_{xy} , σ_{xz} , σ_{yz} tensora naprężeń, występujących w trakcie procesu nagniatania tocznego w zależności od głębokości ich zalegania. Przykładowe wyniki przedstawiono na rysunku 12.

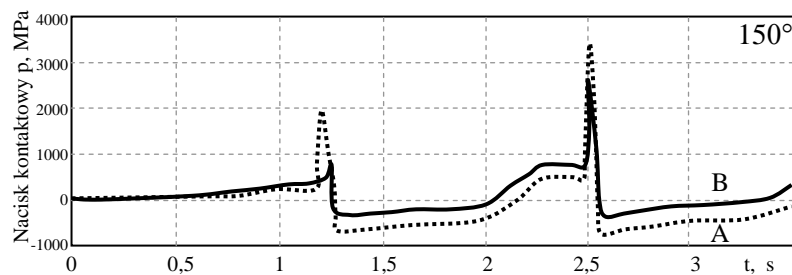


Rys. 12. Rozkład składowych normalnych (a) oraz rozkład składowych stycznych tensora naprężeń (b) uzyskanych na podstawie symulacji procesu nagniatania powierzchni chropowatej o trójkątnym zarysie po toczeniu (kąt wierzchołkowy nierówności $\theta = 150^\circ$)

Konsekwencją uzyskanych wyników przygotowania powierzchni do nagniatania w procesie toczenia jest możliwość zastosowania obróbki nagniataniem jako obróbki wykończeniowej wyrobu. Przeprowadzone symulacje numeryczne procesu nagniatania potwierdziły możliwość sterowania rozkładem naprężeń własnych. Przy czym wykazano możliwość sterowania nie tylko wartością i rozkładem naprężeń wynikowych, ale i głębokością ich zalegania. W zależności od kąta wierzchołkowego nierówności i parametrów geometrycznych, głębokość zalegania naprężeń ściskających wynosi

od 0,4 mm, aż do 2,5 mm. Bardzo przydatnym dla praktycznych zastosowań są wyniki symulacji potwierdzających możliwość nagniatania nierówności kształtowanych w procesie toczenia, w jednym przejściu narzędzia. Dotychczas, przy wielokrotnym nagniataniu, występowało często zjawisko łuszczenia warstwy wierzchniej, a w konsekwencji jej zniszczenie. Spowodowane to było niewłaściwym doбором parametrów technologicznych procesu, co powodowało przekroczenie dopuszczalnych naprężeń w warstwie wierzchniej, w wyniku kumulacji naprężeń o tym samym znaku.

- analiza sił kontaktowych i składowej normalnej siły nagniatania. Oddziaływanie kontaktowe między wałkiem a rolkami odgrywa kluczową rolę w procesie nagniatania. W trakcie procesu zmieniają się warunki geometryczne kontaktu. Algorytm kontaktu powinien efektywnie wykrywać kontakt oraz określać wartość sił oddziaływania kontaktowego w kierunku stycznym i normalnym. Algorytm analizy kontaktu implementowany w programie NAGNIATANIE (I i II) daje bardzo dobre wyniki w symulacji nagniatania (rys. 13). Uzyskane wyniki różnią się od dostępnych w literaturze nawet 2-3-krotnie. Wzrost nacisków prowadzi do wzrostu sił nagniatania i uszkodzenia, rozerwania głowicy ze sztywnym dociskiem elementów nagniatających. Zatem uzyskane rezultaty stanowią cenne narzędzie w trakcie doboru parametrów siłowych, ale również w projektowaniu głowic nagniatających.

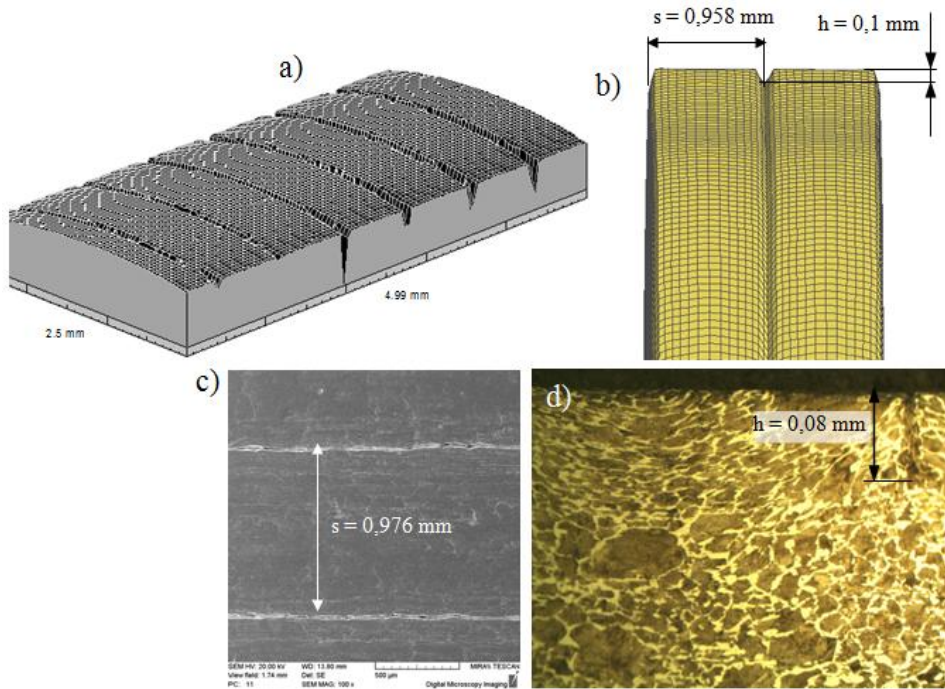


Rys. 13. Zmiana nacisków kontaktowych w trakcie procesu nagniatania regularnych, trójkątnych nierówności powierzchni wejściowych o kątach wierzchołkowych $\theta = 60^\circ \div 150^\circ$

- prognozowania jakości przedmiotu nagniatanego tocznie. Wdrożenie opracowanego modelu i aplikacji do projektowania procesu nagniatania pozwoli na rozwiązanie ważnych problemów, takich jak prognozowanie stanu odkształceń i naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotów nagniatanych oraz poprawić jakość wyrobu przy jednoczesnym zwiększeniu wydajności obróbki. Przykładowe wyniki zamieszczono na rysunku 14.

Prognozowanie obejmowało również określenie składowej normalnej siły nagniatania, zmian naprężeń własnych od głębokości ich zalegania, po nagniataniu powierzchni wejściowej o określonym kącie wierzchołkowym. Wyniki walidowano w badaniach eksperymentalnych uzyskując zbieżność rezultatów.

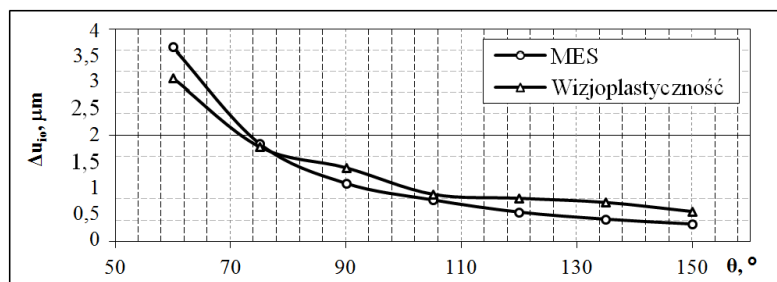
Proces projektowania technologii może być przez to istotnie rozszerzony, unowocześniony i ulepszony poprzez wykorzystanie nowoczesnych metod modelowania procesu oraz zastosowanie metod numerycznych i techniki komputerowej. Dzięki wynikom uzyskanym w symulacji można zoptymalizować projektowany proces technologiczny, skrócić cykl projektowania oraz zmniejszyć koszty związane z uruchomieniem produkcji.



Rys. 14. Aksonometria ciągła powierzchni po nagniataniu z widocznymi wgłębieniami wtórnymi (a), wynik symulacji komputerowej (b), zdjęcie mikroskopowe powierzchni po nagniataniu (c), zdjęcie metalograficzne warstwy wierzchniej (d)

4. Opis zjawiska powrotu sprężystego po procesie nagniatania toczonego. Podjęto próbę opisu zjawiska powrotu sprężystego po procesie nagniatania toczonego na materiale modelowym, rzeczywistym i z wykorzystaniem symulacji komputerowych, w tym:

- określono wartość powrotu sprężystego w zależności od kąta wierzchołkowego nierówności na materiale modelowym (rys. 15)

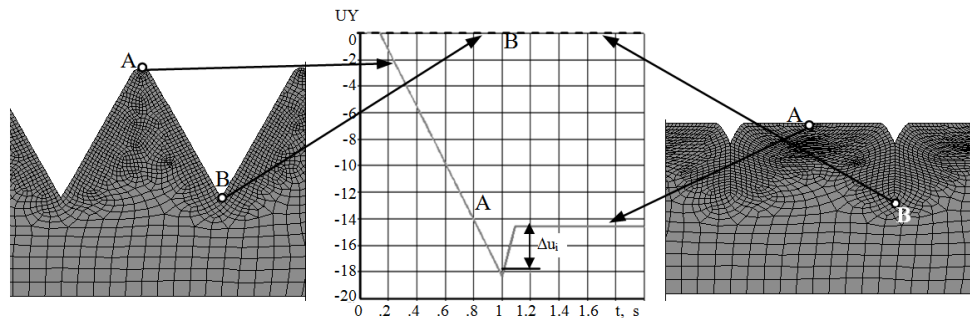


Rys. 15. Wpływ kąta wierzchołkowego nierówności powierzchni θ na powrót sprężysty materiału Δu_{10}

- opracowano metodykę określania zjawiska powrotu sprężystego w zależności od kąta wierzchołkowego nierówności na drodze symulacji komputerowych (rys. 16).

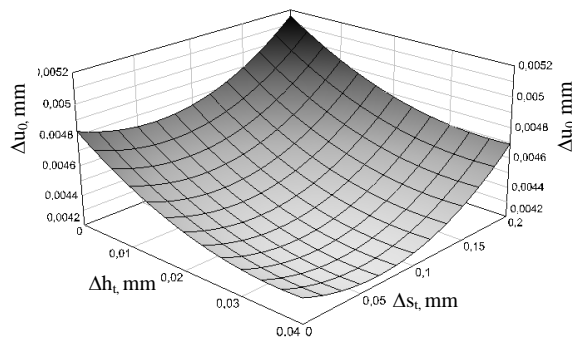
Symulacje komputerowe umożliwiły obserwację oraz ilościowe określenie wielkości powrotu sprężystego materiału podczas procesu zgniatania. Potwierdzono, że wraz ze wzrostem wartości kąta wierzchołkowego nierówności powierzchni, wartość powrotu sprężystego materiału jest mniejsza. Ponadto, przy użyciu opracowanego modelu numerycznego możliwe jest jakościowe i ilościowe określenie, o ile podnoszą się dna pomiędzy nierównościami po wierzchni w procesie ich zgniatania. W przypadkach, gdy kąty wierzchołkowe nierówności wynosiły $\theta=60^\circ$ i $\theta=75^\circ$, wgłębienia nierówności

(dna) nie podnoszą się, a rdzeń materiału pozostał nieodkształcony, zaś przy całkowitym odkształceniu widoczne są zdeformowane nierówności oddzielone od siebie szczelinami (płaszczyznami nieciągłości) o głębokości $a = 0,5Rt$. W zakresie kątów wierzchołkowych $\theta = 90^\circ \div 135^\circ$ potwierdziło się, że strefa odkształceń plastycznych zwiększyła się, obejmując rdzeń materiału. Wgłębienia pomiędzy nierównościami (dna) podnoszą się, a przy całkowitym odkształceniu, widoczne są szczeliny, jednak o mniejszej głębokości. Dla kąta $\theta = 150^\circ$ następują odkształcenia nierówności i rdzenia materiału, a wgłębienia pomiędzy nierównościami (dna) podnoszą się całkowicie.



Rys. 15. Wykres przemieszczenia po osi Y wybranych węzłów nierówności o kącie wierzchołkowym $\theta = 60^\circ$ w procesie zgniatania płaskim stemplem: A – wierzchołek nierówności, B – dno pomiędzy nierównościami

- określono wpływ odchyłek zarysu nierówności powierzchni na powrót sprężysty materiału w drodze badań eksperymentalnych i symulacji komputerowych (rys. 16)



Rys. 16. Wykres przestrzenny powrotu sprężystego Δu_0 materiału wyrobu po nagniataniu w funkcji odchyłki wysokości (Δh_1) i odstepu (Δs_1) regularnej, trójkątnej nierówności powierzchni po toczeniu, opracowany w oparciu o wyniki symulacji komputerowych

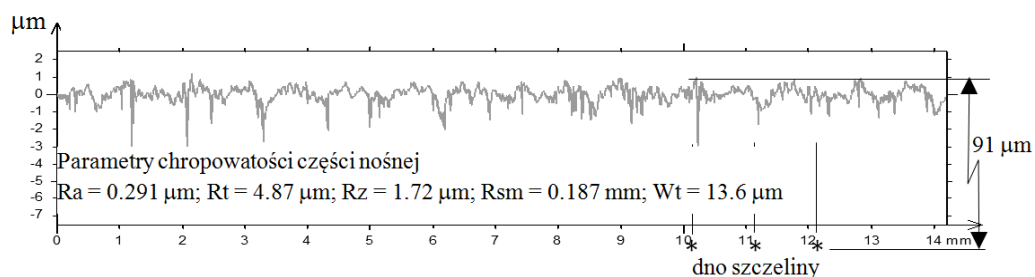
Zjawisko powrotu sprężystego materiału podczas obróbki nagniataniem jest zagadnieniem bardzo skomplikowanym. Przedstawione wyniki badań modelowych, symulacyjnych i analiz nie oddają poziomu komplikacji problemu. Potwierdzają, że zjawisko to występuje oraz istnieją metody za pomocą których można próbować ilościowo określić zależność powrotu sprężystego od np.: kąta wierzchołkowego, czy odchyłek zarysu nierówności powierzchni do nagniatania. W przeprowadzanych analizach uwzględniano tylko powrót sprężysty materiału nagniatanego. Pominięto powrót sprężysty występujący w materiale narzędzia, traktując narzędzie jako idealnie sztywne. Należałoby także zwrócić uwagę na fakt, że także w trakcie obróbek poprzedzających nagniatanie najprawdopodobniej również zachodzi zjawisko powrotu sprężystego. Nie ma możliwości ciągłego pomiaru powrotu sprężystego w trakcie trwania badań modelowych czy eksperymentalnych.

Opracowany model symulacyjny nagniatania naporowego wykorzystujący przyrostowy model kontaktu daje taką możliwość. Badania modelowe i symulacje komputerowe są tańszym sposobem niż przeprowadzanie każdorazowo badań eksperymentalnych. Dają wskazówkę, aby podczas projektowania procesu nagniatania uwzględniać powrót sprężysty materiału (Δu_0), szczególnie w przypadku obróbki dokładnościowej. Należałoby wówczas przy obliczaniu głębokości nagniatania zwiększyć jej wartość o powrót sprężysty materiału. Jest to ważne zagadnienie, które powinno być każdorazowo uwzględniane w procesie projektowania procesu.

5. *Badania eksperymentalne procesu nagniatania naporowego tocznego regularnych, trójkątnych nierówności powierzchni po obróbce toczeniem, gdzie:*

- określono wpływ kąta wierzchołkowego nierówności powierzchni po toczeniu na chropowatość powierzchni po obróbce nagniataniem. Po procesie nagniatania powierzchni o zdefiniowanym profilu uzyskuje się również powierzchnię o profilu zdefiniowanym. Dlatego też badaniami objęto zdefiniowane, okresowe, symetryczne, regularne, trójkątne nierówności powierzchni przygotowane toczeniem do nagniatania wraz z oszacowaniem dokładności ich przygotowania. Uwzględniano wartości odchyłek zarysu nierówności powierzchni po obróbkach poprzedzających i po nagniataniu. Duży nacisk położono na określenie wpływu kąta wierzchołkowego nierówności powierzchni zdefiniowanych, regularnych trójkątnych nierówności powierzchni po obróbce toczeniem na wybrane właściwości warstwy wierzchniej wyrobu nagniatanego. Wraz ze zmianą kąta wierzchołkowego nierówności zmienia się charakter krzywych udziału materiałowego. W przypadku, gdy kąt nierówności wynosił $\theta = 60^\circ$ po obróbce toczeniem, po nagniataniu uzyskano wyraźnie progresywną krzywą materiałową. Im nierówności powierzchni przygotowane w obróbce poprzedzającej były niższe tym krzywe materiałowe miały charakter bardziej proporcjonalny niż progresywne.

W procesie nagniatania jest wiele czynników wpływających na jakość powierzchni obrabianej, np. materiał, z którego wykonany jest obrabiany element, sposób nagniatania, liczba przejść narzędzia nagniatającego, siła docisku narzędzia do powierzchni przedmiotu (nagniatanie z dociskiem sprężystym) lub głębokość nagniatania (nagniatanie z dociskiem sztywnym), operacja poprzedzająca proces nagniatania (toczenie, frezowanie, szlifowanie, wygniatanie), prędkość i posuw nagniatania oraz geometria i jakość wykonania narzędzia nagniatającego. Przy założeniu, że $f_t = f_n$, dla danego materiału części i nagniataniu naporowo tocznym krążkiem dwutoroidalno-walcowym, rodzaj otrzymanej struktury geometrycznej powierzchni po nagniataniu zależy głównie od kąta wierzchołkowego nierówności powierzchni po toczeniu oraz od głębokości nagniatania.



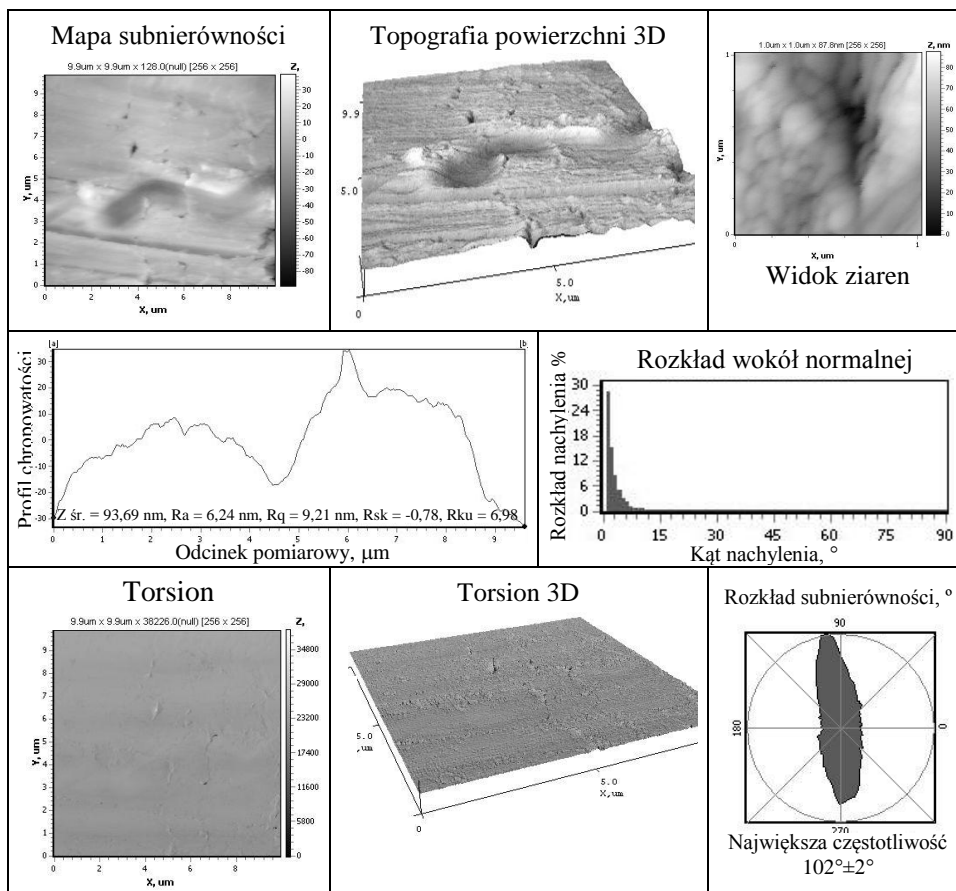
Rys. 17. Poprzeczne profilogramy chropowatości po nagniataniu wałka ze stali C45, którego powierzchnia po toczeniu posiadała nierówności trójkątne o kącie wierzchołkowym $\theta = 135^\circ$

W zakresie kątów $\theta = 60 \div 150^\circ$ otrzymuje się powierzchnię o płaskich wierzchołkach tzw. zarys plateau, rozdzielonych wgłębieniami wtórnymi dla głębokości nagniatania

$a_n < 0,5 R_t$, lub szczelinami dla $a_n = 0,5 R_t$, w odstępach równych odstępowi nierówności po toczeniu. Głębokość dna nierówności wynosi około $0,5 \cdot R_t$, przy czym w zakresie kątów $\theta = 75 \div 135^\circ$ następuje częściowe podnoszenie się den nierówności ku powierzchni, a od kąta granicznego $\theta = 150^\circ$, następuje całkowite wygładzenie powierzchni – brak wgłębień wtórnych. Zatem kąt wierzchołkowy nierówności powierzchni po procesie toczenia stanowi kolejny parametr wpływający na strukturę geometryczną powierzchni i wartość parametrów chropowatości powierzchni nagniatanej. Stwarza to możliwość doboru warunków toczenia i nagniatania w celu otrzymania wyrobu o wymaganej strukturze geometrycznej, ze względu na za przewidywane zastosowanie wyrobu. Opracowano wykresy zależności wybranych, podstawowych parametrów chropowatości powierzchni po obróbce toczeniem i po nagniataniu, od kąta wierzchołkowego nierówności. Wraz ze wzrostem kąta wierzchołkowego nierówności powierzchni po toczeniu parametry chropowatości powierzchni zmniejszyły się. Analogicznie, po procesie nagniatania, im większy kąt wierzchołkowy nierówności po toczeniu tym mniejsze wartości parametrów chropowatości po nagniataniu.

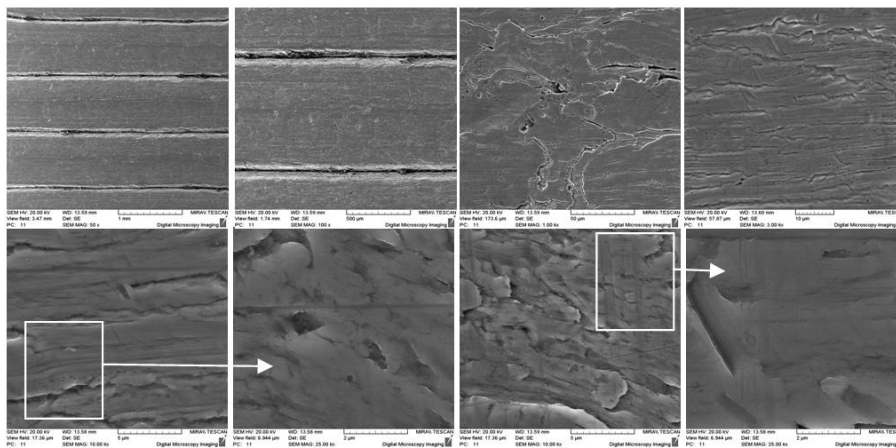
- analizowano nanochropowatość powierzchni po obróbce nagniataniem i udział materiałowy powierzchni nagniatanej tocznie. W obecnych czasach, kiedy w technice dąży się do minimalizacji (np. rozmiarów) urządzeń, aparatury, sprzętu, niezbędne staje się analizowanie powierzchni w skali nano w celu zapewnienia odpowiedniej jakości komponentów nagniatanych, które mogą być w nich zastosowane.

Tab. 1. Wyniki pomiarów na mikroskopie NT 206 powierzchni próbki ze stali C45 po nagniataniu (kąt wierzchołkowy nierówności po obróbce toczeniem $\theta = 60^\circ$)



W przypadku analizowanych powierzchni w skali nano zauważalne jest, że w każdym przypadku krzywe materiałowe mają charakter mieszany – degresywno-progresywne. Uzyskane kształty krzywych materiałowych są korzystne z punktu widzenia obciążalności i ścieralności oraz odporności powierzchni na przenoszenie obciążeń kontaktowych.

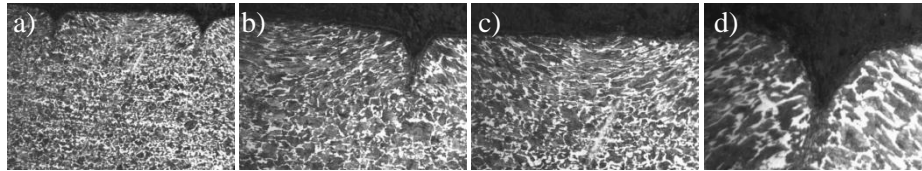
- przeprowadzono mikroskopową analizę stanu powierzchni nagniatanej. Nagniatanie powierzchni z regularnymi, zdeterminowanymi, symetrycznymi nierównościami powoduje powstanie nowej struktury. Wykonane z różnymi powiększeniami fotografie mikroskopowe przedstawiają strukturę materiału uwidaczniając różnej wielkości szczeliny pozostałe po obróbce, co związane jest z różnymi wartościami kątów wierzchołkowych nierówności powierzchni po obróbce poprzedzającej (toczeniem). Największe odkształcenia plastyczne zachodzą w obszarze wierzchołków regularnych, zdeterminowanych, trójkątnych nierówności powierzchni.



Rys. 18. Zdjęcie mikroskopowe powierzchni warstwy wierzchniej po nagniataniu; powierzchnia do nagniatania o kącie wierzchołkowym nierówności $\theta = 60^\circ$

Przejście narzędzia nagniatającego spowodowało deformację mikronierówności powierzchni. Wyraźnie widać, że uzyskano po nagniataniu powierzchnię ukierunkowaną z mikroszczelinami oraz obszarami wskazującymi na zawalcowania. Przeprowadzone badania pozwoliły na ocenę wpływu kąta wierzchołkowego θ nierówności po obróbce toczeniem, na jakość powierzchni po nagniataniu naporowo tocznym. Stwierdzono, że zwiększanie wartości kąta nierówności powierzchni w procesie toczenia, wpływa na jakość powierzchni po procesie nagniatania. Zauważyć można, że w przypadku kąta wierzchołkowego $\theta = 150^\circ$, gdzie chropowatość powierzchni była najmniejsza, struktura charakteryzuje się dużą liczbą mikropęknięć i szczelin.

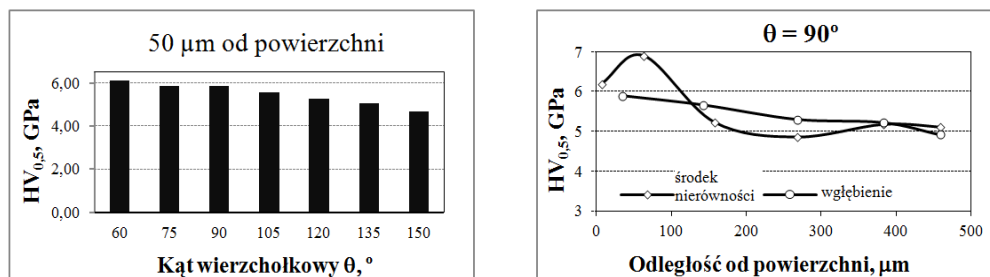
- określono strukturę metalograficzną warstwy wierzchniej po nagniataniu w zależności od kąta wierzchołkowego nierówności po toczeniu. Budowa warstwy wierzchniej wyrobu nagniatanego zależy od struktury materiału po obróbce poprzedzającej. Dla stali o strukturze perlityczno-ferrytycznej obserwuje się strefę silnie odkształconych oraz rozdrobnionych i ukierunkowanych ziarn, tworzących teksturę, wykazującą zmienione cechy mechaniczne. Głębokość zalegania odkształceń plastycznych i kierunek maksymalnego wydłużenia ziarn, dla materiału o danych własnościach plastycznych, istotnie zależą od: parametrów profilu chropowatości po obróbce poprzedzającej w przekroju osiowym oraz zarysu powierzchni czynnej elementu nagniatającego oraz kąta wierzchołkowego nierówności uzyskanych w wyniku obróbki poprzedzającej.



Rys. 19. Zdjęcie struktury metalograficznej warstwy wierzchniej po nagniataniu w przekroju poprzecznym; powierzchnia do nagniatania o kącie wierzchołkowym nierówności $\theta = 60^\circ$; pow. $100\times$ (a), $200\times$ (b), $200\times$ (c), $400\times$ (d)

W wyniku oddziaływania krążka nagniatającego na powierzchnię stali przygotowanej do nagniatania z różnymi kątami wierzchołkowymi nierówności w obróbce poprzedzającej toceniem, powstała silnie zdeformowana i steksturowana warstwa wierzchnia różniąca się od materiału pierwotnego. Przeprowadzone badania potwierdzają możliwość świadomego oddziaływania na stan i właściwości uzyskiwanych warstw wierzchnich poprzez odpowiedni dobór kąta wierzchołkowego zdeterminowanych, regularnych, trójkątnych nierówności powierzchni toczonych.

- określono mikrotwardości warstwy wierzchniej po nagniataniu zdeterminowanych, trójkątnych nierówności przygotowanych przez toczenie,

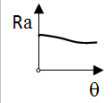
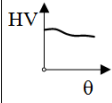
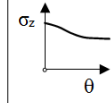
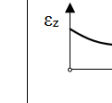
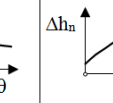
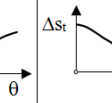
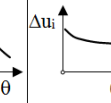


Rys. 20. Mikrotwardość nagniatanej warstwy wierzchniej w zależności od kąta wierzchołkowego nierówności toczonych w obróbce poprzedzającej, dla odległości od powierzchni $50\ \mu\text{m}$ oraz typowy rozkład mikrotwardości dla warstwy wierzchniej po nagniataniu powierzchni o kącie wierzchołkowym $\theta = 90^\circ$ po toczeniu

Nagniatanie zdeterminowanych, regularnych trójkątnych nierówności powierzchni pozwala uzyskać symetryczny rozkład ziarn w warstwie wierzchniej oraz ustalony rozkład mikrotwardości powierzchni. Analiza wyników wzdłuż linii rozpoczynającej się od wgłębienia między nierównościami pozwala stwierdzić, że w miejscu wgłębienia początkowa wartość mikrotwardości jest wyższa niż w obszarze bezpośredniego oddziaływania narzędzia nagniatającego na powierzchnię. Zauważyć można, że maksymalne wartości mikrotwardości w warstwie wierzchniej wyrobu po nagniataniu zmniejszają się wraz ze wzrostem wartości kąta wierzchołkowego nierówności po toczeniu.

- opracowano jakościowe zależności wpływu obróbki poprzedzającej na efekty po nagniataniu. Jakościowe zależności wpływu technologicznych warunków nagniatania tocznego na efekty obróbki przedstawiono są znane. Opracowano natomiast jakościowe zależności wpływu obróbki poprzedzającej na efekty po nagniataniu (tab. 2), co stanowi podsumowanie prowadzonych badań i analiz numerycznych.

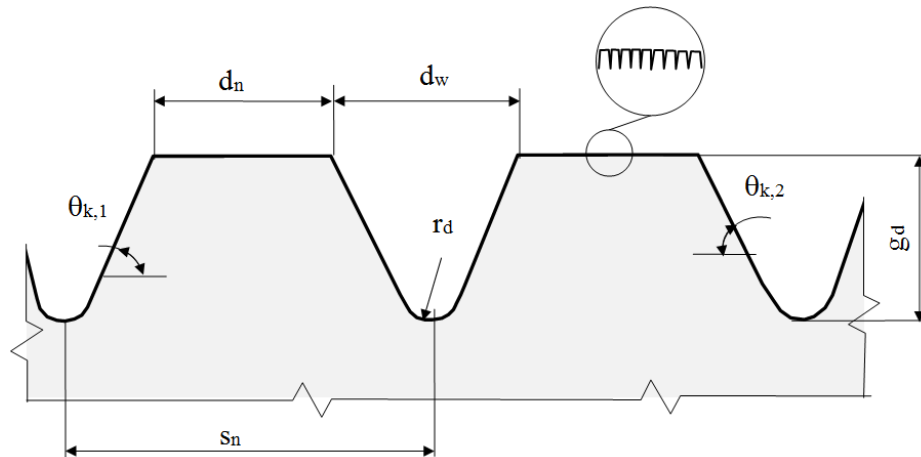
Tab. 2. Jakościowe zależności wpływu kąta wierzchołkowego nierówności po toczeniu na efekty po nagniataniu

| Parametr chropowatości Ra | Mikro-twardość | Naprężenia zredukowane | Odształcenia zredukowane | Odchyłka wysokości | Odchyłka odstęp | Powrót sprężysty |
|---|---|---|---|---|--|---|
|  |  |  |  |  |  |  |

6. Opracowanie możliwości sterowania parametrami struktury geometrycznej powierzchni nagniatanej oraz zastosowania proponowanej metody. Wyniki analiz numerycznych oraz badań eksperymentalnych wskazują na możliwość szerokiego zastosowania proponowanej metody obróbki w praktyce, zarówno w procesie produkcji jak i regeneracji części maszyn.

W zależności od warunków realizacji obróbki toczeniem oraz głębokości nagniatania naporowo tocznego krążkiem dwutoroidalno-walcowym istnieje możliwość sterowania następującymi parametrami profilu chropowatości powierzchni wyrobu:

- odległością den nierówności po nagniataniu (s_d) – poprzez zmianę posuwu toczenia; kąt wierzchołkowy nierówności $\theta < 150^\circ$,
- promieniem zaokrąglenia den nierówności po nagniataniu (r_d) – poprzez zmianę promienia zaokrąglenia ostrza noża; kąt wierzchołkowy nierówności $\theta < 150^\circ$,
- długością części nośnej nierówności (d_n) – poprzez zmianę posuwu toczenia, geometrii ostrza noża i głębokości nagniatania; kąt wierzchołkowy nierówności $\theta < 150^\circ$,
- długością wgłębienia wtórnego (d_w) – poprzez zmianę posuwu toczenia, geometrii ostrza noża i głębokości nagniatania; kąt wierzchołkowy nierówności $\theta < 150^\circ$,
- kątem pochylenia boków wypływek nierówności ($\theta_{k,1}, \theta_{k,2}$) – poprzez dobór warunków toczenia, głębokości nagniatania oraz rodzaju i stanu materiału obrabianego oraz warunków tarcia w strefie kontaktu krążka z nierównością,
- głębokością den nierówności (g_d) – poprzez zmianę kąta wierzchołkowego nierówności po toczeniu i głębokości nagniatania. Im większy jest kąt wierzchołkowy nierówności tym mniejsza jest głębokość dna. Dla $\theta \geq 150^\circ$ oraz głębokości nagniatania $a_n = R_t/2 + u^{(E)}$ wgłębienia wtórne nie występują, gdzie $u^{(E)}$ jest przemieszczeniem sprężystym układu przy zadanym zagłębieniu krążka $R_t/2$,
- występowaniem lub nie wgłębień wtórnych lub szczelin (płaszczyzn nieciągłości) – poprzez zmianę kąta wierzchołkowego nierówności po toczeniu i głębokości nagniatania, przy czym dla $\theta = 60^\circ \div 135^\circ$, wgłębienia wtórne występują, jednak ich głębokość zmniejsza się wraz ze wzrostem kąta wierzchołkowego, natomiast dla kątów $\theta \geq 150^\circ$ następuje całkowite wygładzenie powierzchni, brak wgłębień wtórnych,
- profilem części nośnej nierówności – poprzez dobór profilu powierzchni czynnej krążka,
- średnicą wyrobu – poprzez dobór warunków toczenia i nagniatania,
- stopniem utwardzenia WW wyrobu – poprzez dobór warunków toczenia i nagniatania.



Rys. 21. Schemat możliwość sterowania parametrami profilu chropowości powierzchni wyrobu

Zatem dobór warunków realizacji toczenia i nagniatania będzie determinowany przeznaczeniem części, głównie warunkami jej eksploatacji. Dla części obciążonych zmęczeniowo należy dobierać takie warunki, które eliminują powstawanie karbów powierzchniowych w postaci wgłębień wtórnych lub szczelin. Natomiast dla części tworzących węzły tribologiczne – pary trące – obciążone siłami tarcia i przenoszącymi duże naciski powierzchniowe należy stosować takie warunki obróbki, które zapewniają otrzymanie zarysu plateau, przy jednoczesnym kształtowaniu naprężeń ściskających i umocnieniu WW.

2.2. Znaczenie naukowe i użytkowe osiągnięcia

Opracowane algorytmy i aplikacje komputerowe w systemach MES powodują, że proces projektowania technologii nagniatania naporowego może być istotnie rozszerzony i ulepszony przez wykorzystanie możliwości, jakie stwarza wprowadzenie metod numerycznych do obliczeń przemieszczeń, odkształceń, naprężeń w przedmiocie obrabianym. Możliwa jest analiza czasowa procesu nagniatania oraz określanie pól naprężeń, odkształceń i przemieszczeń materiału w warstwie wierzchniej czy powrotu sprężystego materiału z uwzględnieniem np. odchyłek nierówności po obróbce toczeniem, a zatem i prognozowanie ich wpływu na jakość technologiczną wyrobu. Zwiększa to możliwości ingerencji inżyniera w przebieg procesu projektowania technologii nagniatania oraz właściwy dobór parametrów i warunków do obróbki.

Wyprowadzone na podstawie badań numerycznych i eksperymentalnych funkcje regresji stanowią podstawę do określania powrotu sprężystego materiału w procesie nagniatania zdeterminowanych, regularnych, trójkątnych nierówności powierzchni. Wykazano, że kąt wierzchołkowy regularnych nierówności powierzchni po obróbce toczeniem istotnie wpływają na parametry zarysu powierzchni oraz na stany naprężeń i odkształceń, powrót sprężysty w warstwie wierzchniej wyrobu nagniatanego naporowo tocznie czy też mikrotwardość powierzchni.

Wdrożenie opracowanego modelu, algorytmów i aplikacji w systemach MES do projektowania procesu nagniatania naporowego tocznego pozwoli na rozwiązanie ważnych problemów, takich jak prognozowanie stanu odkształceń i naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotów nagniatanych naporowo oraz poprawić jakość wyrobu przy jednoczesnym zwiększeniu wydajności obróbki. Możliwe jest dla zadanych warunków toczenia i nagniatania prognozowanie, przy pomocy opracowanych aplikacji numerycznych, jakości (technologicznej i użytkowej) wyrobu z większą niż dotychczas dokładnością.

Możliwe jest również rozwiązanie (niemożliwego dotychczas) zadania odwrotnego - dla wymaganej jakości technologicznej wyrobu określenie optymalnych warunków realizacji obróbki toczeniem i nagniataniem. Są to zagadnienia podstawowe przy projektowaniu procesu technologicznego obróbki wykończeniowej części.

Otrzymane wyniki mają istotne znaczenie dla sterowania właściwościami kształtowanej warstwy wierzchniej w procesie nagniatania zdeterminowanych, regularnych, trójkątnych nierówności powierzchni po obróbce poprzedzającej, gdyż stwarzają możliwość skuteczniejszej ingerencji w projektowanie procesu technologicznego i dostosowanie jakości technologicznej do odpowiednich warunków eksploatacyjnych przedmiotu.

Konsekwencją uzyskanych wyników przygotowania powierzchni do nagniatania w procesie toczenia jest możliwość zastosowania obróbki nagniataniem jako obróbki wykończeniowej wyrobu. Przeprowadzone symulacje numeryczne procesu nagniatania potwierdziły możliwość sterowania rozkładem naprężeń własnych. Przy czym wykazano możliwość sterowania nie tylko wartością i rozkładem naprężeń wynikowych, ale i głębokością ich zalegania.

Bardzo przydatnym dla praktycznych zastosowań są wyniki symulacji potwierdzających możliwość nagniatania nierówności kształtowanych w procesie toczenia, w jednym przejściu narzędzia. Dotychczas, przy wielokrotnym nagniataniu występowało często zjawisko łuszczenia warstwy wierzchniej, a w konsekwencji jej zniszczenie. Spowodowane to było niewłaściwym doбором parametrów technologicznych procesu, co powodowało przekroczenie dopuszczalnych naprężeń w warstwie wierzchniej, w wyniku kumulacji naprężeń o tym samym znaku.

Wdrożenie opracowanego modelu i aplikacji do projektowania procesu nagniatania pozwoli na rozwiązanie ważnych problemów, takich jak prognozowanie stanu odkształceń i naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotów nagniatanych oraz poprawić jakość wyrobu przy jednoczesnym zwiększeniu wydajności obróbki. Dzięki wynikom uzyskanym w symulacji można zoptymalizować projektowany proces technologiczny, skrócić cykl projektowania oraz zmniejszyć koszty związane z uruchomieniem produkcji.

2.3. Inne osiągnięcia naukowo-badawcze

Po obronie rozprawy doktorskiej (2006 r.) rozszerzono badania dotyczące dokładności przygotowania powierzchni pod obróbkę nagniataniem. Rozważano w dalszym ciągu obróbkę toczeniem, jednak uwzględniano wpływ ograniczonej liczby czynników wejściowych, zwiększając za to znacznie ich zakresy. Opracowano histogramy wskazujące na poziomy odchyłek wysokości i szerokości występujących po obróbce poprzedzającej nagniatanie. Jednak główne zadania i zainteresowania skupiają się na wokół wpływu odchyłek zarysu nierówności powierzchni po toczeniu na właściwości warstwy wierzchniej. Bardzo duży nacisk położono na zastosowanie najnowocześniejszych metod komputerowych, wykorzystujących Metodę Elementów Skończonych do rozwiązania problemu. Uzyskane wyniki publikowano w artykułach naukowy.

W swoich badaniach naukowych podejmuję próbę kompleksowego i łącznego ujęcia procesów przygotowania powierzchni w obróbkach poprzedzających i nagniatania, co stanowi całkiem nowe podejście do tematu. W tym celu zastosowałam model procesu nagniatania tocznego w ujęciu metod wariacyjnych i metody elementów skończonych. Jest to niezbędne do kompleksowej analizy stanów odkształceń, naprężeń i sił kontaktowych w strefie obróbki. Duży nacisk w dalszym ciągu położono na określenie wpływu odchyłek zarysu regularnych nierówności powierzchni po obróbce toczeniem na wybrane właściwości

warstwy wierzchniej wyrobu nagniatanego tocznie. Dlatego też w modelu procesu nagniatania uwzględnia rzeczywiste warunki obróbki takie jak: dynamiczne właściwości materiałów, nieliniowość geometryczna i fizyczna procesu, warunki tarcia w obszarach kontaktu narzędzia z przedmiotem itp. Dla takich warunków, poznanie procesów zachodzących podczas nagniatania oraz występujących odkształceń (sprężystych, lepkich i plastycznych) i naprężeń stanowi podstawę do określania właściwości warstwy wierzchniej wyrobu, a zatem i do prognozowania jego jakości technologicznej i użytkowej. Stosuję nowoczesne algorytmy badania nieliniowych zagadnień mechaniki kontaktu. Rozwiązuję dyskretne równania ruchu i deformacji obiektu w procesach z wykorzystaniem jawnych i niejawnych metod całkowania. Opracowane aplikacje w dostępnych systemach komercyjnych (np. ANSYS) umożliwią kompleksową analizę czasową stanów przemieszczeń, odkształceń i naprężeń występujących w obiekcie, składającym się z przedmiotu i narzędzia. Takie podejście powoduje także, że możliwe jest numeryczne obliczanie procesu obróbki bez konieczności wykonywania drogich i czasochłonnych badań eksperymentalnych. Opracowane zaś przyrostowe modele matematyczne ruchu obiektu oraz algorytmy numeryczne ich rozwiązania pozwalają na kompleksową analizę zjawisk zachodzących w trakcie procesu nagniatania naporowego przy założeniu liniowego modelu tłumienia, a na ich podstawie prognozowanie 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 nagniatania naporowego tocznego. Możliwe staje się wówczas prowadzenie różnorodnych analiz numerycznych dotyczących stanów przemieszczeń, prędkości przemieszczeń, przyspieszeń, odkształceń, prędkości odkształceń i naprężeń w dowolnej chwili trwania procesu. W analizie uwzględniam takie subtelne, lecz istotne dla zwiększenia jakości technologicznej wyrobu zjawiska jak: odchyłki wysokości i odstępu nierówności powierzchni po obróbce poprzedzającej, czy zjawisko powrotu sprężystego materiału po nagniataniu. Opracowany model symulacyjny 3D nagniatania naporowego wykorzystujący przyrostowy model kontaktu, pozwala określić jego obciążenie w dowolnej chwili realizacji procesu, a także badać wpływ: rodzaju, stanu i geometrii nierówności, warunków tarcia, przylegania i poślizgu itp.

Zastosowanie nagniatania jest problemem bardzo złożonym, gdyż w celu uzyskania wymaganej jakości wyrobu oraz minimalizacji kosztów produkcji konieczne jest optymalne sterowanie procesem we wszystkich fazach jego realizacji. Natomiast niewłaściwy dobór warunków realizacji procesu jest przyczyną powstawania wielu wad. Rozwiązanie takiego problemu wymaga interdyscyplinarnej wiedzy z następujących dziedzin: podstaw mechaniki (nieliniowa mechanika ośrodków ciągłych, badania eksperymentalne), podstaw informatyki (komputery, sprzęt i urządzenia zewnętrzne, oprogramowanie specjalistyczne np. ANSYS), matematyki (rachunek wariacyjny i tensorowy) i metod numerycznych rozwiązywania problemów techniki (metoda elementów skończonych, analiza wrażliwości, algorytmy optymalizacyjne), co wykorzystuję, opracowując innowacyjną teorię procesu nagniatania, zweryfikowaną eksperymentalnie. Prowadzone badania oraz opracowane nowoczesne algorytmy modelowania przestrzennego 3D pozwalają analizować zjawiska fizyczne zachodzące w dowolnej chwili czasowej i dowolnym miejscu wyrobu nagniatanego, których badanie lub obserwowanie było dotychczas bardzo pracochłonne i kosztowne lub wręcz niemożliwe. Umożliwia to także analizę wpływu odchyłek zarysu nierówności powierzchni po obróbce poprzedzającej, kąta wierzchołkowego nierówności, zmiany parametrów materiałowych na takie zjawiska jak odchyłki zarysu nierówności powierzchni

po nagniataniu, powrót sprężysty materiału, stany naprężeń i odkształceń. W swoich badaniach zwróciłam uwagę na dotąd nierozwiązany jeszcze problem powrotu sprężystego materiału, pojawiający się w trakcie obróbki nagniataniem. Jest to zagadnienie skomplikowane i jak dotąd nierozwiązane. Opracowanie nowych podstaw procesu przyczyni się także do zwiększenia zastosowania obróbki nagniatania w praktyce, a głównie przyczyni się do opracowania wysokoefektywnych technologii.

Stosowanie nowoczesnych algorytmów badań nieliniowych zagadnień mechaniki kontaktu, pozwalają na wyjaśnienie wielu zjawisk fizycznych w dowolnym miejscu i w dowolnej chwili trwania procesu nagniatania. Sam proces nagniatania z uwzględnieniem stanu powierzchni po obróbkach poprzedzających jest z punktu widzenia mechaniki problemem wielokrotnie nieliniowym z nieznanymi warunkami brzegowo-początkowymi. Modelowanie procesu przeprowadzane jest z zastosowaniem metod wariacyjnych i elementów skończonych. Do opisu zjawisk na typowym kroku przyrostowym wykorzystuje uaktualniony opis Lagrange'a oraz skokowo-współobrotowy układ współrzędnych. Stany odkształcenia i prędkości odkształcenia opisuje zależnościami nieliniowymi bez żadnych linearyzacji. Stosuję adekwatne miary przyrostu odkształceń i przyrostu naprężeń w tym opisie, tj. przyrost tensora odkształceń Greena-Lagrange'a i przyrost drugiego symetrycznego tensora naprężeń Pioli-Kirchhoffa. Opis nieliniowości materiału dokonuję modelem przyrostowym z uwzględnieniem wpływu historii odkształceń i prędkości odkształceń. Przedmiot traktuję, jako ciało, w którym mogą wystąpić odkształcenia sprężyste (w zakresie odkształceń odwracalnych) oraz lepkie i plastyczne (w zakresie odkształceń nieodwracalnych), z nieliniowym umocnieniem. Do budowy modelu materiałowego stosuję nieliniowy warunek plastyczności Hubera-Misesa-Hencky'ego, stowarzyszone prawo płynięcia oraz wzmocnienie mieszane (izotropowo-kinematyczne). Uwzględniam również stan materiału po obróbkach poprzedzających przez wprowadzenie początkowych stanów: przemieszczeń, naprężeń, odkształceń i ich prędkości. Opracowany przyrostowy model kontaktowy obejmuje siły kontaktowe, sztywność kontaktową, kontaktowe warunki brzegowe oraz warunki tarcia w tym obszarze. Model matematyczny uzupełniony jest przyrostowymi równaniami ruchu obiektu oraz warunkami jednoznaczności. Opracowany funkcjonal przyrostowy w postaci całkowitej energii układu, wykorzystany został do wyprowadzenia wariacyjnych, nieliniowych równań ruchu i deformacji obiektu dla typowego kroku przyrostowego. Równanie to rozwikłane zostało przestrzennej dyskretyzacji metodą elementów skończonych. W efekcie otrzymano dyskretne układy równań ruchu i deformacji obiektu w analizowanych procesach. Rozwiązanie dyskretnych równań ruchu i deformacji obiektu w procesach realizuje z wykorzystaniem jawnych metod całkowania. Dla tych metod opracowane będą adekwatne algorytmy rozwiązania równań ruchu i deformacji, przy założeniu występowania tłumienia. Opracowane aplikacje w dostępnych systemach (np. ANSYS) umożliwiają kompleksową analizę czasową stanów przemieszczeń, odkształceń i naprężeń występujących w obiekcie, składającym się z przedmiotu i narzędzia. Takie podejście powoduje, że możliwe jest numeryczne obliczanie procesu obróbki nagniatania bez konieczności wykonywania drogich i czasochłonnych badań eksperymentalnych. Takie nowoczesne podejście do problemu ma istotne znaczenie dla sterowania właściwościami wyrobu, gdyż stwarza możliwość skuteczniejszej ingerencji w projektowanie procesu technologicznego i dostosowanie jakości technologicznej do odpowiednich warunków eksploatacyjnych oraz pozwala na wyjaśnienie wielu zjawisk fizycznych w dowolnym miejscu i w dowolnej chwili trwania procesu. Uzyskane wyniki badań modelowania w 3D wpłyną na dalszy ewidentny postęp nauki związany z podnoszeniem efektywności procesów obróbki, ich projektowaniem, rozwojem i wdrażaniem.

Ponadto wśród zagadnień podejmowanych przeze mnie w pracy naukowej wymienić mogę:

- **Zastosowanie przyrostowego opisu zjawisk nieliniowych i MES do optymalizacji konstrukcji (topologicznej i parametrycznej).** Przykładowo w pracy *„Topologiczna optymalizacja konstrukcji na przykładzie widłaka wału przegubowego”* przeprowadzono optymalizację topologiczną do określenia najlepszego rozłożenia materiału jednorodnego izotropowego w obszarze projektowym w oparciu o zastosowanie do rozwiązania zadania kryterium minimum podatności układu. Takie podejście aktualnie znajduje zastosowanie w projektowaniu układów mechanicznych, dla których wartość odkształcenia występuje jedynie w zakresie proporcjonalności. Praca zawiera rozważania i podstawowe wiadomości dotyczące optymalizacji topologicznej ośrodków ciągłych. Optymalizacja topologiczna jest tylko jednym z początkowych etapów współczesnego podejścia do projektowania konstrukcji. Kolejnym etapem powinno być opracowanie sparametryzowanego modelu geometrycznego z wprowadzonymi zmianami wynikającymi z optymalizacji topologicznej, następnie przeprowadzenie w zależności od wymagań; obliczeń statycznych, dynamicznych, analizę modalną i harmoniczną oraz obliczenia odporności na zużycie zmęczeniowe i na ich podstawie opracowanie geometrii spełniającej wszystkie stawiane warunki wytrzymałościowych. Opracowana sparametryzowana konstrukcja jest podstawą do ostatniego etapu projektowania tj. optymalizacji parametrycznej, gdzie dla opracowanych funkcji celu oraz założeń i ograniczeń uzyskuje się optymalne wartości parametrów konstrukcji
- **Obliczenia zmęczeniowe z zastosowaniem modelowania komputerowego i symulacji zjawiska** na przykład w pracach: *„Prognozowanie wytrzymałości zmęczeniowej korbowału silnika spalinowego”*, *„Analiza zmęczeniowa zaczepu kulowego”*, *„Analiza zmęczeniowa resoru piórowego”*, *„Analiza zmęczeniowa sprężyny zawieszenia typu McPherson”*, *„Numeryczne obliczenia odporności na zużycie zmęczeniowe wału korbowego”*, gdzie do modelowania zastosowano przyrostowy, uaktualniony opis Lagrange'a oraz adekwatne miary przyrostów naprężeń i odkształceń. Symulacje komputerowe przeprowadzono w systemie wykorzystującym MES. Otrzymano wyniki stanu naprężeń zredukowanych, odkształceń zredukowanych, trwałości i współczynnika bezpieczeństwa. Prognozowanie wytrzymałości zmęczeniowej może się odbywać na drodze analiz otrzymanej krzywej Wöhlera.
- **Analiza rozkładu pól temperatur** – w pracach *„Rozkład pól temperatur w procesie nagniatania gładkościowego”*, *„Analiza numeryczna procesu nagrzewania się tarczy hamulcowej podczas hamowania”* zastosowano modelowanie i symulację komputerową do określenia rozkładu pól temperatur podczas procesu nagniatania gładkościowego oraz tarczy hamulcowej.
- **Analiza wpływu obciążeń dynamicznych** – w pracy *„Analiza wpływu obciążeń dynamicznych na stan naprężeń w zaczepie kulowym samochodu osobowego”* przeprowadzono analizy wpływu obciążeń dynamicznych na stan naprężeń i odkształceń w zaczepie kulowym przystosowanym do samochodu osobowego marki Skoda Octavia. Wykonano analizy numeryczne wpływu masy ciągnionej przyczepy, prędkości pojazdu oraz przewidywanej strefy zgniotu na wytrzymałość zaczepu podczas zderzenia pojazdu ze stałą przeszkodą.
- **Obliczenia harmoniczne** – w pracy *„Numeryczna analiza drgań tarczy hamulcowej”*, gdzie zwrócono uwagę, że w celu poprawnego zaprojektowania tarcz hamulcowych poza obliczeniami wytrzymałościowymi oraz termicznymi należy przeprowadzić analizy modalne i harmoniczne, które mają na celu wyznaczenie częstotliwości i postaci drgań

własnych raz wyznaczenie zmian przemieszczeń, odkształceń oraz naprężeń występujących w obiekcie pod wpływem zmiennych cyklicznych zmian obciążenia.

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 przygotowaniem powierzchni w obróbkach poprzedzających, a następnie ich nagniatanie z uwzględnieniem m.in. wpływu odchyłek zarysu nierówności powierzchni po obróbkach poprzedzających na wybrane parametry warstwy wierzchniej wyrobu nagniatanego. Dorobek ten należy do dyscypliny naukowej Budowa i Eksploatacja Maszyn.

| Ilościowy wykaz najważniejszych osiągnięć naukowo-badawczych | | | |
|---|----------------|---------------|---------|
| Wykaz osiągnięć | Przed doktorem | Po Doktoracie | Łącznie |
| Publikacje ogółem | 10 | 87 | 97 |
| Publikacje w czasopismach wyróżnionych w <i>Journal Citation Reports®</i> indeksowanych przez <i>Thomson Reuters® Web of Knowledge®</i> | – | 11 | 11 |
| Autorstwo monografii | – | 1 | 1 |
| Autorstwo/współautorstwo dokumentacji prac badawczych, ekspertyz | – | 10 | 10 |
| Sumaryczny <i>impact factor</i> według listy <i>JCR</i> | | 3,023 | |
| Liczba cytowań publikacji według bazy <i>Web of Science</i> | | 30 | |
| Liczba cytowań publikacji według bazy <i>Google Scholar</i> | | 93 | |
| Indeks Hirsha opublikowanych publikacji według bazy <i>Web of Science</i> | | 2 | |
| Indeks Hirsha opublikowanych publikacji według bazy <i>Google Scholar</i> | | 5 | |
| Udział w projektach międzynarodowych | – | 1 | 1 |
| Udział w projektach krajowych | – | 8 | 8 |
| Międzynarodowe/krajowe nagrody za działalność naukową | – | 1/6 | 7 |
| Międzynarodowe/krajowe stypendia | – | 2/1 | 3 |

| | | | |
|--|---|----|----|
| Wygłoszenie referatów na międzynarodowych konferencjach tematycznych | – | 11 | 11 |
| Wygłoszenie referatów na krajowych konferencjach tematycznych | 8 | 17 | 25 |
| Zgłoszenia patentowe | – | 2 | 2 |

Dorobek obejmuje autorstwo oraz współautorstwo łącznie 97 publikacji naukowych, w tym: 11 publikacji w czasopismach wyróżnionych w Journal Citation Reports (JCR) oraz 4 kolejnych przyjętych do druku, 4 publikacji zagranicznych niewyróżnionych w JSR, 40 prac naukowych opublikowanych w krajowych czasopismach naukowych i naukowo-technicznych niewyróżnionych w JCR, 28 w krajowych wydawnictwach monograficznych, 6 publikacji w materiałach konferencyjnych zagranicznych i 4 krajowych. Ponadto w latach 2002-2005 w ramach publikacji wyników pracy doktorskiej opublikowano 10 artykułów.

| Liczba publikacji z uwzględnieniem miejsca publikacji | |
|---|----|
| Publikacje w czasopismach naukowych i naukowo-technicznych wyróżnionych w <i>Journal Citation Reports</i> ® indeksowanych przez Thomson Reuters® Web of Knowledge® | 11 |
| Publikacje w czasopismach naukowych i naukowo-technicznych wyróżnionych w <i>Journal Citation Reports</i> ® (w druku) | 4 |
| Publikacje w zagranicznych czasopismach naukowych i naukowo-technicznych niewyróżnionych w <i>Journal Citation Reports</i> ® nieindeksowanych przez Thomson Reuters® Web of Knowledge® | 4 |
| Publikacje w krajowych czasopismach naukowych i naukowo-technicznych niewyróżnionych w <i>Journal Citation Reports</i> ® nieindeksowanych przez Thomson Reuters® Web of Knowledge® | 40 |
| Prace opublikowane w krajowych wydawnictwach monograficznych | 28 |
| Prace opublikowane w materiałach konferencji międzynarodowych | 6 |
| Prace opublikowane w materiałach konferencyjnych konferencji krajowych | 4 |

Publikacje stanowią 97 (Załącznik 3) opracowań naukowych. Index Hirsha według WoS wynosi H=2 (Załącznik 6), liczba cytowań 30, zaś sumaryczny Impact Factor 3,023. Natomiast według Harzing's Publish or Perish H=5, zaś liczba cytowań 93, według Scopus H=2.

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 powierzchniowej metali.

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

- *Computer Methods in Materials Science,*
- *Pomiary, Automatyka, Kontrola,*
- *Mechanik,*
- *Logistyka,*
- *Autobusy. Technika, eksploatacja, systemy transportowe,*
- *Annual Set The Environment Protection,*
- *Technika Transportu Szybowego,*
- *Inżynieria Rolnicza,*
- *Journal PAMM,*
- *Steel Research International,*
- *Proceedings of WMSCI, International Institute of Informatics and Systemics,*
- *Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics,*
- *Proceedings of International Symposium on Plasticity,*
- *Applied Mechanics and Materials,*
- *Proceedings of 8th International Congress of Croatian Society of Mechanics.*

Artykuł: *Numerical Modeling and simulation of movable contact tool-workpiece and application in technological processes* – uznany został za najlepszy artykuł w sesji Session's Best Paper Award podczas 5th International Symposium on Management, Engineering and Informatics USA, Orlando, 2009.

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

Syntetyczna charakterystyka dorobku dydaktycznego, popularyzatorskiego oraz współpracy międzynarodowej obejmuje (Załącznik 5):

| Wykaz osiągnięć | Liczba osiągnięć | Łącznie |
|--|------------------|---------|
| Uczestnictwo w programach europejskich i innych programach międzynarodowych lub krajowych | 6 | 6 |
| Udział w międzynarodowych/krajowych konferencjach naukowych | 11/22 | 33 |
| Udział w komitetach organizacyjnych krajowych konferencji naukowych | 2 | 2 |
| Udział w komitetach programowych międzynarodowych/krajowych konferencji naukowych | 5/1 | 6 |
| Otrzymane nagrody i wyróżnienia | 1 | 1 |
| Udział w konsorcjach i sieciach badawczych | 2 | 2 |
| 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 | 2 | 2 |
| Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze promotora pomocniczego | 1 | 1 |

| | | |
|--|------|----|
| Staże w zagranicznych ośrodkach naukowych lub akademickich | 11 | 11 |
| Wykonanie ekspertyz lub innych opracowań na zamówienie przedsiębiorców | 6 | 6 |
| Udział w zespołach eksperckich | 1 | 1 |
| Recenzowanie projektów krajowych | 8 | 8 |
| Recenzowanie publikacji w czasopismach międzynarodowych/krajowych | 15/6 | 21 |

Wyniki badań prezentowano w formie referatów (11 zagranicznych i 25 krajowych) (Załącznik 4) na konferencjach międzynarodowych (USA, Japonia, Meksyk, Chorwacja, Szwajcaria, Niemcy) i krajowych (Załącznik 5). Zyskały one uznanie w międzynarodowym gronie. Podczas 5th International Symposium on Management, Engineering and Informatics USA w Orlando pełniłam funkcję Przewodniczącego Sesji. Od tamtej pory współpracuję z organizatorami jako recenzent, a w latach 2010, 2012 – do teraz jako członek komitetu naukowego tego cyklu konferencji. W roku 2004 współorganizowałam konferencję „Obróbka kształtująca i powierzchniowa nagniataniem” w Osiekach. W 2015 roku jako członek komitetu naukowego i organizacyjnego współuczestniczyłam w XII Konferencji Studentów i Młodych Pracowników Nauki, Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej.

Recenzowałam również artykuły naukowe dla takich czasopism jak: *Mechanik* (4), *Applied Mechanics and Materials* (2), *Management, Engineering and Informatics, in the Context of The World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Conference Reviewing* (8), *Autobusy* (2), *Metrology and Measurement Systems* (2), *Engineering review* (1). Współpracuję również z Narodowym Centrum Badań i Rozwoju jako recenzent projektów badawczych.

Jestem również współtwórcą 2 zgłoszeń patentowych:

- Zgłoszenie P.410198 pt. „Urządzenie do Kształtowania Regularnych Nierówności na Powierzchni Próbkki Przeznaczonej do Badań Procesu Deformacji”;
- Zgłoszenie P.415557 pt. „Odejmowalny hak holowniczy do pojazdów samochodowych, zwłaszcza samochodów osobowych i dostawczych”.

W latach 2007-2015 brałam czynny udział w 7 projektach krajowych jako główny wykonawca, kierownik, asystent menedżera projektu, wykładowca (Załącznik 4) oraz w 1 jako ekspert branżowy. Natomiast w 2014 r. brałam udział w projekcie międzynarodowym w zakresie: Mikroskop Sił Atomowych w temacie Tribologii, szczególnie pomiarów topografii, zużycia i mikrozużycia powierzchni współpracujących; Mikroskopu Sił Atomowych – praca w trybie kontaktowym i bezkontaktowym, Nanoindentacja, micro- and nano twardość; kompleksowe metody pomiaru sprężystości, plastyczności, płynięcia, adhezji materiałów twardych – jako stypendystka, uczestniczka stażu naukowego w Białoruskiej Akademii Nauk.

Czynnie współpracuję z przedsiębiorstwami wykonując m.in.: badania właściwości materiałów, badania przyczyn wystąpienia korozji wżerowej stwierdzonej w rurze ze stali austenitycznej, badania właściwości mechanicznych, analizę patentową dotyczącą odejmowalnych haków holowniczych, opracowanie nowej konstrukcji odejmowalnego haka holowniczego do pojazdów samochodowych, zwłaszcza samochodów osobowych i dostawczych, obliczenia numeryczne złożenia łożyskowego, określenie wytrzymałości

zmęczeniowej i badania zaworów kulowych, analizy wytrzymałościowe i symulacje komputerowe, obliczenia analityczne w maszynach rolniczych.

Brałam również udział jako główny wykonawca w realizacji projektów badawczych:

- *Eksperymentalne i numeryczne badania operacji kształtowania regularnych nierówności i ich nagniatania gładkościowego w aspekcie jakości technologicznej wyrobu* – Nr N503 029 32/3951, KBN,
- *Badania i sprawozdanie z prac badawczych realizowanych w ramach projektu: Eksperymentalne i numeryczne badania innowacyjnej technologii hybrydowego nagniatania w aspekcie kształtowania naprężeń własnych w warstwie wierzchniej wyrobu* – Nr N503193737, MNiSW,
- *Badania i sprawozdanie z prac badawczych: Wariantowe obliczenia wyjściowych wskaźników technicznych i parametrów pracy układów napędowych, roboczych i nośnego automatycznej wirowej zaprawiarki porcjowej*, realizowanych w ramach projektu: *Zaprawiarka nowej generacji z systemem sterowania i diagnostyki z wykorzystaniem transmitowanych danych siecią internetową*, INNOTECH ścieżka A, ID projektu: 227418.

W latach 2010-2012 otrzymałam stypendium habilitacyjne, zaś w 2009 z Ministry of Education, Research, Youth and Sport, Department for European Affairs and Bologna Secretariat w Bukareszcie oraz 2010 roku z Ministry of Education and Science w Podgoricy – stypendia wyjazdowe.

Od roku 2009 czynnie uczestniczę w programach europejskich CEEPUS – wyjeżdżając na staże zagraniczne, programu Erasmus – prowadząc kursy dla studentów zagranicznych, którzy podjęli naukę w Politechnice Koszalińskiej, Erasmus Plus – jako koordynator wydziałowy, ZPORR – jako uczestnik szkoleń: *Wsparcie różnych form współpracy przemysłu z jednostkami naukowymi - transfer wiedzy, definicja potrzeb. wykorzystanie i komercjalizacja wyników prac badawczych* oraz *Jak prowadzić projekt w ramach działania 2.6 ZPORR* a także jako wykładowca „Nowoczesne ekologiczne źródła energii w każdym domu 'DOMEKOL'”.

W roku 2013 – za szczególne osiągnięcia dla oświaty i wychowania, otrzymałam Medal Komisji Edukacji Narodowej nadany przez Ministerstwo Edukacji Narodowej.

Od 2009 roku jestem członkiem Stowarzyszenia naukowego: International Institute of Informatics and Systemics, a od 2010 Polskie Towarzystwo Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej Oddział Koszaliński, gdzie jestem członkiem Zarządu i pełnię funkcję skarbnika.

Decyzją Rady Wydziału Mechanicznego z dnia 9.09.2014 r. pełnię funkcja promotora pomocniczego we wszczętym przewodzie doktorskim w obszarze nauk technicznych, w dziedzinie nauki techniczne, dyscyplina budowa i eksploatacja maszyn, mgr inż. Michała Szcześniaka pod tytułem: *Modelowanie i analiza zgniatania płaskim stemplem regularnych nierówności o zarysie trójkątnym na powierzchniach części stalowych*.

Odbyłam staże w zagranicznych ośrodkach akademickich (11) w University of Montenegro (2), Technical University of Cluj-Napoca (1), Technical University of Ostrava (3), Jan Evangelista Purkyne University in Usti nad Labem (2), University of Rijeka (2) i Białoruska Akademia Nauk.

Od 2006 roku prowadzę zajęcia dydaktyczne (wykłady, ćwiczenia, laboratoria, projekty, prace przejściowe i seminaria) na kierunku kształcenia Mechanika i Budowa Maszyn,

Technika Rolnicza i Leśna, Transporcie oraz na Studiach Doktoranckich na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej, zarówno na studiach stacjonarnych jak i niestacjonarnych, inżynierskich i magisterskich. Prowadzę również prace przejściowe i dyplomowe na Wydziale Mechanicznym, a także jestem recenzentem prac dyplomowych. Jestem autorką wielu opracowań powstałych dla potrzeb dydaktyki w tym np. artykułu *Wirtualne laboratorium obróbki nagniataniem*.

Od roku 2015 powołana jestem na koordynatora wydziałowego (dla kierunku Mechanika i Budowa Maszyn oraz Studiów Doktoranckich) programu Erasmus+, wspierającego edukację, szkolenia, inicjatywy młodzieżowe oraz sportowe w całej Europie.

Czynnie uczestniczę również w pracach na rzecz Politechniki Koszalińskiej pełniąc funkcję sekretarza Komisji do Spraw Stopni Naukowych przy Radzie Wydziału Mechanicznego, Pełnomocnika Dziekana ds. Osób Niepełnosprawnych, członka Wydziałowej Komisji ds. Współpracy Międzynarodowej oraz byłam członkiem Wydziałowej Komisji Rekrutacyjnej dla kandydatów na I rok studiów stacjonarnych.

