



Sylwester Korga

Metoda Elementów Skończonych w prototypowaniu procesów wytłaczania metali



Lublin 2020

MONOGRAFIE

Metoda Elementów Skończonych w prototypowaniu procesów wyłaczania metali

Monografie – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
ul. Nadbystrzycka 36
20-618 LUBLIN

Sylwester Korga

Metoda Elementów Skończonych w prototypowaniu procesów wyłaczania metali



Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
Lublin 2020

Recenzent:

prof. dr hab. inż. Antoni Świć, Politechnika Lubelska

Monografia powstała na podstawie rozprawy doktorskiej pt. *Wykorzystanie Metody Elementów Skończonych w badaniach teoretyczno-doświadczalnych tarcia ślizgowego w warunkach odkształceń plastycznych*.

Obrona odbyła się 14 lipca 2016 r.

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2020

ISBN: 978-83-7947-451-6

Wydawca: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
www.biblioteka.pollub.pl/wydawnictwa
ul. Nadbystrzycka 36C, 20-618 Lublin
tel. (81) 538-46-59

Druk: DjaF – 30-092 Kraków, ul. Kmietowicza 1/1
www.djaf.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Nakład: 50 egz.

Spis treści

Wykaz ważniejszych symboli i oznaczeń	7
Streszczenie	8
1. Wstęp i cel pracy	12
2. Numeryczne i doświadczalne metody badawcze w wybranych procesach kształtowania metali	18
2.1. Metody Elementów Skończonych w teoretyczno-doświadczalnych metodach oceny oporów tarcia.....	20
2.2. Eksperymentalne metody badania oporów tarcia	26
2.3. Wpływ geometrii powierzchni na symulację numeryczną tarcia ślizgowego	42
2.4. Wpływ parametrów kinetycznych na modele tarcia ślizgowego w analizie MES	48
2.5. Modele matematyczne w analizie numerycznej procesów obróbki plastycznej	51
2.5.1. Metodyka badań numerycznych w procesach plastycznego kształtowania metali.....	59
2.5.2. Wpływ dyskretyzacji modelu węzła tarcia na efektywność rozwiązań numerycznych.....	64
2.5.3. Przyczyny błędów i różnic w odwzorowaniu rzeczywistości w symulacji numerycznej procesów plastycznego kształtowania metali.....	68
2.6. Podsumowanie przeglądu literatury.....	70
3. Oprogramowanie do symulacji numerycznych i oceny procesów obróbki plastycznej	74
3.1. Przegląd oprogramowania do symulacji numerycznych procesów obróbki plastycznej.....	74
3.2. Aplikacja komputerowa do porównania wyników laboratoryjnych i symulacyjnych.....	76
4. Wykorzystanie metod komputerowych i laboratoryjnych w badaniach zjawisk kontaktowych	82
4.1. Materiał do badań.....	82
4.2. Symulacja numeryczna tarcia ślizgowego w procesie modelowego wytłaczania w programach Deform 3D i Abaqus.....	84

4.3. Badania laboratoryjne systemu tribologicznego	98
4.3.1. Laboratoryjne stanowisko do realizacji badania tarcia w procesie modelowego wytłaczania	99
4.3.2. Metody badawcze tarcia ślizgowego	101
5. Zestawienie wyników uzyskanych dla przyjętych technik badawczych	108
5.1. Wyniki badań numerycznych uzyskanych przy zastosowaniu programu Deform 3D i Abaqus	108
5.2. Efekty badań laboratoryjnych przed i po procesie modelowego wytłaczania	123
5.3. Wyniki badań parametrów siłowych w procesie modelowego wytłaczania	136
5.4. Porównanie wyników badań laboratoryjnych i numerycznych uzyskanych w programie Deform 3D i Abaqus	139
5.5. Analiza statystyczna i dyskusja wyników badań	146
6. Podsumowanie i wnioski	149
Literatura	153
Załączniki	160

Wykaz ważniejszych symboli i oznaczeń

F_n	– siła nacisku
F_t	– siła tarcia
F_{tw}	– chwilowa siła tarcia
F_r	– siła rozciągająca próbkę
s	– poślizg
V_p	– prędkość przesuwania próbki
μ_{st}	– statyczny współczynnik tarcia
μ_k	– kinematyczny współczynnik tarcia
μ_{MES}	– współczynnik tarcia zadany w metodzie MES
μ_{LAB}	– współczynnik tarcia w badaniach doświadczalnych
x	– przemieszczenie próbki
E	– moduł sprężystości podłużnej Younga
G	– moduł sprężystości postaciowej Kirchoffa
g_r	– graniczna gęstość dyskretyzacji
ε	– odkształcenie względne próbki
γ	– odkształcenie postaciowe
σ_p	– naprężenie uplastyczniające
τ	– naprężenie styczne
α	– kąt pochylenia powierzchni roboczej narzędzi
$[K]$	– globalna macierz sztywności
$\{q\}$	– wektor przemieszczeń węzłowych
$\{Q\}$	– wektor sił węzłowych
R_a	– chropowatość powierzchni
$PI \div P4$	– oznaczenia próbek
R	– współczynnik korelacji Karla Pearsona
S_n	– nominalna powierzchnia styku
S_k	– konturowa powierzchnia styku
S_r	– rzeczywista powierzchnia styku
S	– błąd standardowy składnika losowego
$B\acute{S}K$	– błąd średniokwadratowy
$RMSE$	– procentowy błąd średniokwadratowy
WW	– warstwa wierzchnia
PMW	– proces modelowego wytłaczania

Streszczenie

Metoda Elementów Skończonych w prototypowaniu procesów wytłaczania metali

W części pracy dotyczącej przeglądu literatury dokonano klasyfikacji metod badawczych oporów tarcia w wybranych procesach obróbki plastycznej. Na tej podstawie przedstawiono i omówiono teoretyczno-doświadczalne metody oceny oporów tarcia ze szczególnym uwzględnieniem wykorzystania Metody Elementów Skończonych. Omówiono również modele geometryczne wykorzystywane do analiz zjawisk kontaktowych, fizykochemicznych i geometrii powierzchni modeli na symulację numeryczną tarcia ślizgowego oraz analizę kinematyczną modeli węzłów tarcia w procesie wytłaczania blach. Dokonano również charakterystyki metod numerycznych stosowanych do przeprowadzania symulacji procesów wytwórczych przy wykorzystaniu Metody Elementów Skończonych. Na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej określono wnioski i zdefiniowano zadania dotyczące realizacji podjętego tematu pracy.

W części pracy dotyczącej badań własnych opracowano modele geometryczne narzędzi i próbek dla określenia węzłów tarcia o charakterze ślizgowym. W rozdziale trzecim pracy opisano zasadę działania autorskiego programu komputerowego zwanego "czwartym modułem MES". Przedstawiono i opisano pięć metod obliczeniowych pozwalających ocenić wrażliwość przyjętych do badań modeli tribologicznych na zmiany zadawanych parametrów początkowych. Dla zespołów modeli próbek i narzędzi przeprowadzono analizy numeryczne zjawiska tarcia ślizgowego w warunkach odkształceń plastycznych co opisano w rozdziale czwartym. W celu porównania wyników badań numerycznych z wynikami badań laboratoryjnych zmodernizowano laboratoryjne stanowisko do przeprowadzania badań odkształceń próbek kształtowych w procesie modelowego wytłaczania (PMW).

Proces kształtowania plastycznego materiału rozpatrywano jako system tribologiczny w którym materiał i narzędzie stanowiły parę trącą. Analizę procesu modelowego wytłaczania (PMW) wykonano w oparciu o symulacje numeryczne Metodą Elementów Skończonych wykorzystując do tego programy Deform 3D oraz Abaqus. Dodatkowo w rozdziale piątym przedstawiono wybrane wyniki badań sił tarcia ślizgowego oraz pokazano rezultaty badań numerycznych i laboratoryjnych gdzie zestawiono je w postaci

charakterystyk. Wyniki badań numerycznych i laboratoryjnych przebadano pod względem statystycznym.

Z obliczeń statystycznych oraz obliczeń autorskiego programu komputerowego wynika, że uzyskano poprawną zgodność pomiędzy wynikami badań numerycznych a wynikami eksperymentów laboratoryjnych.

Na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej oraz wyników badań laboratoryjnych i numerycznych w rozdziale szóstym opisano wnioski dotyczące oceny wpływu warunków początkowych na opory tarcia ślizgowego występujące w rozpatrywanym układzie kształtowania materiału.

Stosowanie numerycznych algorytmów badawczych oraz autorskiego programu komputerowego pozwoliło dla przyjętych metod badawczych uzyskać wyniki sił tarcia o dużym przybliżeniu.

Powodem takiego stanu było między innymi zastosowanie badań równoległych i odwrotnych już na etapie określania warunków brzegowych.

W pracy sformułowano szereg wniosków o charakterze poznawczym oraz praktycznym w formie wytycznych do projektowania i przeprowadzania symulacji komputerowych z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych.

Słowa kluczowe: MES, FEM, odkształcenie metalu, prototypowanie procesów, wytłaczanie metalu.

Abstract

Finite Element Method in prototyping metal stamping processes

In the part of the thesis on the literature review, the methods of testing frictional resistance in selected plastic working processes are classified. On this basis, theoretical and experimental methods of friction resistance evaluation were presented and discussed, with particular emphasis on the use of the Finite Element Method. The geometrical models used for the analysis of contact, physicochemical and surface geometry phenomena for numerical simulation of sliding friction and kinematic analysis of friction junction models in the process of sheet metal extrusion are also discussed. The numerical methods used to simulate manufacturing processes with the use of the Finite Element Method are also characterized. On the basis of the literature analysis, conclusions were defined and tasks related to the implementation of the given topic of work were defined. In the part of the thesis on own research, geometrical models of tools and samples were developed to determine the friction nodes of a sliding nature. The third chapter of the thesis describes the operating principle of the proprietary computer program called the "fourth FEM module". Five calculation methods have been presented and described, allowing to assess the sensitivity of the tribological models adopted for testing to changes in the initial parameters. Numerical analyzes of the sliding friction phenomenon under plastic deformation conditions were carried out for the sets of sample models and tools, as described in chapter four. In order to compare the results of numerical tests with the results of laboratory tests, the laboratory stand for testing deformation of shaped samples in the process of model extrusion (PMW) was modernized. The process of shaping the plastic material was considered as a tribological system in which the material and the tool were a friction pair. The analysis of the model extrusion process (PMW) was performed based on numerical simulations with the Finite Element Method using Deform 3D and Abaqus programs. Additionally, the fifth chapter presents selected results of the sliding friction force tests and presents the results of numerical and laboratory tests, where they are

presented in the form of characteristics. The results of numerical and laboratory tests were examined statistically. The statistical calculations and calculations of the proprietary computer program show that the correct agreement was obtained between the results of numerical tests and the results of laboratory experiments. On the basis of the literature analysis and the results of laboratory and numerical tests, the sixth chapter describes conclusions concerning the assessment of the influence of the initial conditions on the sliding friction resistances occurring in the considered material shaping system. The use of numerical research algorithms and a proprietary computer program allowed for the adopted research methods to obtain the results of friction forces with a high approximation. The reason for this was, among others, the use of parallel and reverse tests already at the stage of determining the boundary conditions. The paper formulates a number of cognitive and practical conclusions in the form of guidelines for the design and performance of computer simulations using the Finite Element Method.

Keywords: MES, FEM, metal deformation, process prototyping, metal stamping.

1. Wstęp i cel pracy

Metody pomiarowe i obliczeniowe należą do nieodzownych elementów w pracy człowieka ułatwiających jego funkcjonowanie w otaczającym go świecie. Pozyskiwanie danych pomiarowych i ich przetwarzanie pozwala na poznanie zjawisk występujących w wielu dziedzinach nauki. Przez wiele lat zmieniały się metody badawcze i urządzenia pomiarowe dając tym samym możliwość uzyskiwania coraz bardziej dokładnych wyników. Wszelakie działania w tym kierunku są dla rozwoju poszczególnych gałęzi techniki niezwykle istotne. Poprawne wyciąganie wniosków na podstawie badań eksperymentalnych, jest możliwe, gdy zastosowane są odpowiednie metody badawcze a uzyskane pomiary za ich pomocą charakteryzują się oczekiwaną dokładnością. W chwili obecnej do analizy wielu zjawisk fizycznych wykorzystywane są bardzo często metody numeryczne wykorzystujące możliwości obliczeniowe komputerów. Obecny stan wiedzy przeprowadzania badań z wykorzystaniem systemów symulacji komputerowych dotyczy wielu dziedzin techniki. Rozwój technologii wytwarzania wspomaganych komputerowo dąży do możliwości uzyskiwania większej ilości danych i informacji dotyczących wielu procesów wytwórczych. Systemy symulacji komputerowych zjawisk fizycznych oparte są na różnorodnych metodach obliczeniowych. Jedną z nich jest Metoda Elementów Skończonych (MES). Problematyka przeprowadzania symulacji procesów wytłaczania blach dotyczy określenia, w jakim stopniu przeprowadzone za pomocą metody numerycznej badania między innymi tarcia ślizgowego mogą być wykorzystane do odzwierciedlenia warunków rzeczywistych.

Metoda Elementów Skończonych (z ang. FEA – *Finite Element Analysis*) jest obecnie jedną z najczęściej wykorzystywanych metod prowadzenia obliczeń inżynierskich oraz badań komputerowych o charakterze naukowym. Idea tej metody oparta jest na rezygnacji z analitycznego rozwiązania problemu na rzecz podziału obszaru ciągłego na elementy skończone. Natomiast sam proces obliczeniowy oparty jest tylko dla wyróżnionych punktów nazywanych węzłami. Wartości charakterystyczne dla punktów niebędących węzłami obliczane są na podstawie wyników otrzymanych z poszczególnych węzłów. Pierwsze wzmianki w literaturze dotyczące tej metody pochodzą z dziewiętnastego wieku. W jednej z prac Kirscha zaproponowano zastąpienie trójwymiarowego ustroju ciągłego zbiorem oddzielnych elementów prostopadłościennych, a następnie zastąpienie każdego z nich przestrzenną kratownicą. Jedną z pierwszych prac, w której opisano zastosowanie MES była praca, którą opublikował w 1943r. francuski matematyk Courant [13]. W 1956r.

został opublikowany artykuł, w którym pewien skończony fragment ciała o charakterze ciągłym nazwano elementem skończonym oraz została zaproponowana metoda rachunku wariacyjnego, jako sposób rozwiązania problemów mechaniki. Jej autorami byli Turner, Clough, Martin i Topp, a ich pracę z czasem nazwano „aktem urodzenia Metody Elementów Skończonych” [16]. Zaproponowane metody oparte były o obliczenia wykorzystujące równania równowagi układu o znacznej liczbie niewiadomych. Moc obliczeniowa ówczesnych komputerów była niewystarczająca by tego typu równania rozwiązać. Na początku lat sześćdziesiątych coraz częściej w literaturze pojawiała się nazwa *element skończony* i dotyczyła ona matematycznej metody obliczeniowej do obliczeń konstrukcyjnych. Lata sześćdziesiąte dwudziestego wieku to okres dynamicznego rozwoju MES. W okresie tym opublikowano prace Prof. Zienkiewicza oraz Prof. Przemienieckiego, w których przedstawiono metody praktycznego zastosowania MES [109]. Do dnia dzisiejszego, w dziedzinie MES, Prof. Zienkiewicz uważany jest za „ojca Metody Elementów Skończonych”. W swoich pracach wskazał możliwości praktycznego zastosowania metod obliczeniowych do rozwiązania problemów mechanicznych. Opisane rozwiązania trudno było zaimplementować do zastosowań pragmatycznych ze względu na problemy związane z mocą obliczeniową ówczesnych maszyn cyfrowych. Do lat osiemdziesiątych procesy obliczeniowe z wykorzystaniem MES dotyczyły prostych modeli geometrycznych opisanych równaniami nieliniowymi. Pod koniec lat osiemdziesiątych nastąpił znaczny rozwój prac dotyczących oprogramowania MES. Pojawiło się wiele systemów MES umożliwiających skuteczne przeprowadzenie procesów obliczeniowych dla produktów i wyrobów wprowadzanych na rynki zbytu. Rozwój Metody Elementów Skończonych był ściśle związany z rozwojem maszyn liczących i wynikał głównie z potrzeby analizy coraz bardziej złożonych problemów konstrukcyjnych. Dalszy wzrost mocy obliczeniowej komputerów datowany na lata dziewięćdziesiąte pozwolił na modelowanie i wykonywanie skomplikowanych symulacji komputerowych dotyczących obiektów trójwymiarowych. Początkowo tylko wielkie koncerny przemysłowe mogły pozwolić sobie na opracowanie i wykorzystanie systemów symulacji komputerowych. Dalszy rozwój oprogramowania do analiz inżynierskich dotyczył powstania oprogramowania hybrydowego gdzie systemy CAD i systemy CAE tworzyły spójną całość z możliwością dwustronnego przesyłania danych. Obecnie w wielu firmach produkcyjnych Metoda Elementów Skończonych (MES) jest wykorzystywana w procesie prototypowania produktów. Wstępna weryfikacja parametrów i własności wyrobów

o charakterze wirtualnym pozwala na uniknięcie problemów mogących wystąpić podczas kolejnych etapów produkcyjnych. Na podstawie obserwacji rozwoju i wykorzystania oprogramowania MES w dziedzinach inżynierskich można przypuszczać, że w niedalekiej przyszłości będzie możliwe optymalizowanie bardzo skomplikowanych konstrukcji mechanicznych o bardzo dużej liczbie elementów skończonych. Obecnie można zaobserwować znaczny wzrost liczby publikacji zajmujących się symulacjami komputerowymi z wykorzystaniem MES. Wiele z nich dotyczy metody optymalizacji mającej za zadanie znalezienie najlepszego w danych warunkach rozwiązania zadania. Zadania optymalizacyjne dotyczą wielu problemów techniki np. wyznaczenia minimalnej ilości materiału spełniającego założenia projektowe, wyznaczania dopuszczalnych naprężeń w materiale a nawet mogą określać strefy kontrolowanego pęknięcia materiału. Obliczenia tego typu wykonywane są w procesach parametrycznych i przeprowadzane na komputerach wieloprocessorowych z możliwością pracy współbieżnej [70]. Należy jednak pamiętać, że obliczenia MES są wykonane z pewnym przybliżeniem i racjonalność stosowania tej metody uzależniona jest od możliwości uzyskania wyników z określoną dokładnością. Tego typu zadania stanowią wielkie wyzwania dla technologów i informatyków. Zagadnienia te są stale aktualne i celowe jest podjęcie tematu wykorzystania MES w badaniach teoretyczno-doświadczalnych kształtowania materiałów plastycznych z uwzględnieniem zjawisk kontaktowych. W szczególności dotyczy to określenia wpływu warunków początkowych w MES dla wielu procesów obróbki plastycznej metali. Jednym z takich warunków jest określenie zmian oporów tarcia w układzie sztywno plastycznym tj. z uwzględnieniem odkształcanego plastycznie materiału.

Celowe jest więc w ramach wymienionej problematyki opracowanie specjalistycznego stanowiska badawczego i wykorzystania go do analizy i oceny procesu modelowego wytłaczania (PMW).

W projektowaniu nowoczesnych technologii obróbki plastycznej elementów maszyn i urządzeń uwzględnia się występujące zjawisko tarcia. Zjawisko to wpływa istotnie na przebieg odkształcania metalu i jakość uzyskiwanych wyrobów. Do tego typu procesów należy między innymi proces wytłaczania blach. Jedną z metod pozwalającą na określenie wpływu warunków procesowych na przebieg procesu odkształcenia plastycznego materiału jest Metoda Elementów Skończonych (MES). W związku z tym w pracy wykorzystano tę metodę do badania współczynników tarcia podczas odkształcenia plastycznego na zimno w procesie wytłaczania blach. Podjęty

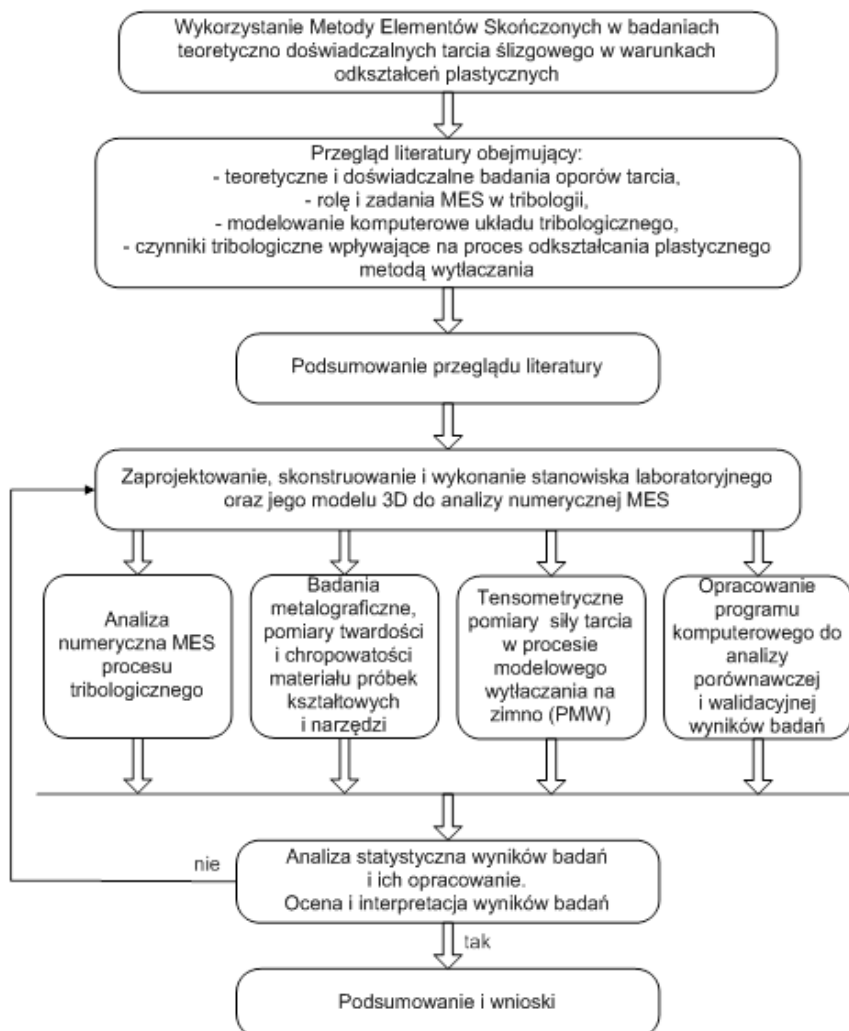
temat monografii obejmuje zagadnienia symulacyjne i wiąże się ściśle z procesami wytwarzania części maszyn i urządzeń.

W monografii zaprezentowano metodę oceny jakości modelu MES procesu wytłaczania blach na podstawie porównania z wynikami eksperymentu przy wykorzystaniu autorskiego programu komputerowego.

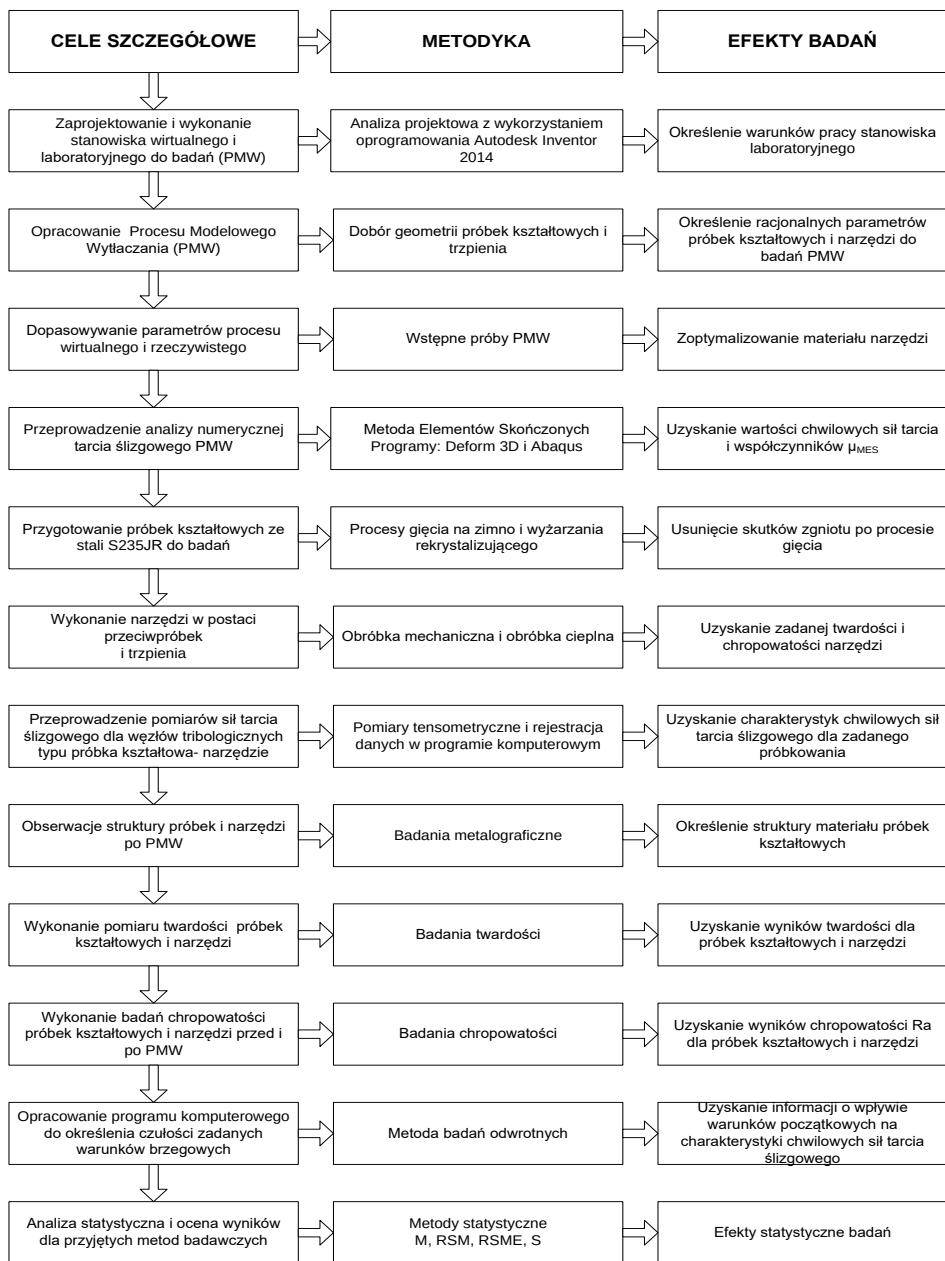
W eksperymencie o charakterze heurystycznym określono zależność oporów ruchu elementów składowych pary trącej od zadawanych w MES warunków brzegowych w przypadku tarcia ślizgowego podczas odkształcania plastycznego jednego z jej elementów.

Przeprowadzono analizę studialną literatury krajowej i zagranicznej obejmującej tematykę niniejszej pracy jak również badań własnych autora w tym możliwości wykorzystania programów komputerowych do symulacji numerycznej przy wykorzystaniu MES.

Wyniki przeprowadzonych eksperymentów mogą być wykorzystane w praktyce laboratoryjnej i przemysłowej. Schemat pracy przedstawiono na rysunku 1.1 natomiast etapy realizacji pracy na rysunku 1.2.



Rys. 1. 1. Schemat pracy



Rys. 1.2. Etapy realizacji pracy z wyszczególnieniem celów, metodyki i efektów badań

2. Numeryczne i doświadczalne metody badawcze w wybranych procesach kształtowania metali

Postęp w rozwiązaniach konstrukcyjnych maszyn i urządzeń opiera się na znajomości podstaw teoretycznych oraz wyników badań eksperymentalnych. Dotyczy on opracowania nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych o wysokich własnościach eksploatacyjnych oraz prawidłowości i oceny występujących zjawisk towarzyszących ich współpracy. Elementy maszyn i urządzeń rozpatruje się, jako systemy tribologiczne [5, 11, 59, 66, 73]. Pojęcie systemu tribologicznego zostało wprowadzone przez Czichosa [17] w 1978 roku a następnie było rozwijane i uzupełniane przez kolejnych badaczy [31, 54, 90]. Przyjmuje się, że system tribologiczny to zbiór elementów połączonych ze sobą funkcjonalnie i strukturalnie, który opisuje następującą zależność:

$S = \{A, P, R\}$ gdzie:

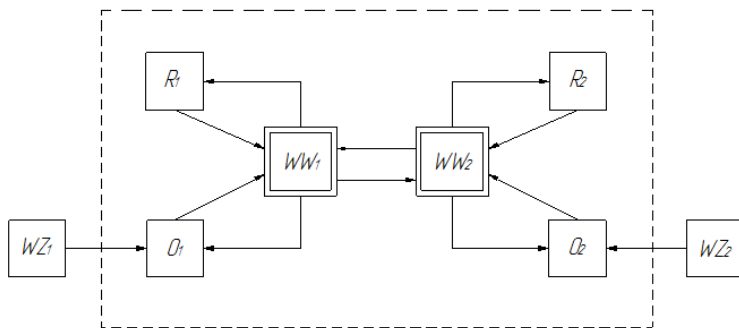
S – struktura systemu tribologicznego

A – elementy zbioru

P – właściwości elementów

R – relacje między elementami

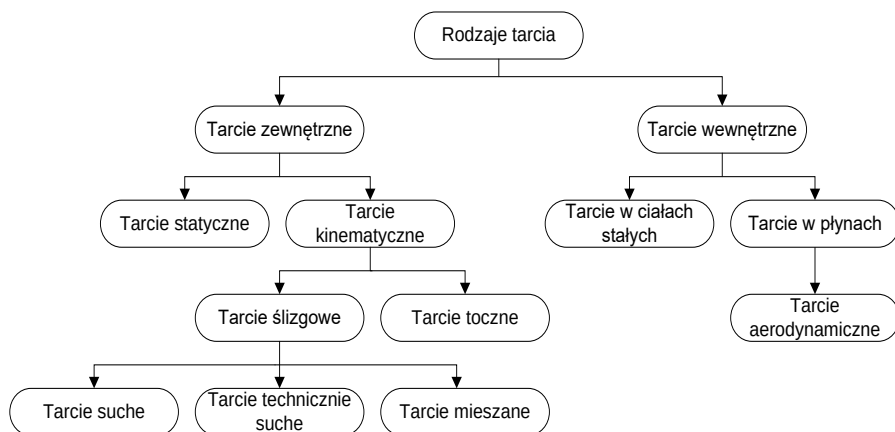
System tribologiczny ulega transformacji w wyniku współpracy warstw wierzchnich w strefie styku – rys.2.1.



Rys. 2.1. Elementarny system tribologiczny: WZ₁, WZ₂ – wymuszenie zewnętrzne nr 1 i nr 2, R₁, R₂ – rdzenie materiałowe, O₁, O₂ – otoczenie zewnętrzne, WW₁, WW₂ – warstwy wierzchnie przedmiotów

W systemie tribologicznym narzędzia i materiały to zbiór elementów współpracujących przyjmowanych, jako para tarcza, której wyniki współpracy uzależnione są głównie od parametrów technologicznych procesu. Zawiera on

zbiór zjawisk fizycznych traktowanych, jako proces przeciwdziałający ruchowi względnemu narzędzi i materiałów, pomiędzy którymi występuje między innymi tarcie ślizgowe. Zjawisko tarcia występujące powszechnie w wyniku współpracujących par trących można podzielić przyjmując za kryterium lokalizację i rodzaj ruchu. Rodzaje tarcia sklasyfikowane według tych kryteriów przedstawiono na schemacie (rys. 2.2).



Rys. 2.2. Podział tarcia ze względu na kryterium lokalizacji i ruchu [59]

Proces tarcia w układach trących powoduje rozproszenie energii w wyniku zużywania powierzchni części współpracujących oraz wzrost temperatury w miejscu ich styku. Dlatego poprzez odpowiedni dobór parametrów procesu tribologicznego dąży się do zmniejszenia negatywnych ich efektów. Jednak całkowite wyeliminowanie tarcia w procesach eksploatacyjnych lub wytwórczych (np. przy obróbce plastycznej metali) jest niemożliwe.

Występujące w układach tribotechnicznych zjawisko tarcia jest przyczyną strat energetycznych i strat ekonomicznych wywołanych zużyciem materiału. Jednym z najważniejszych wyzwań, jakie stawia obecnie przemysł obróbki plastycznej metali jest podwyższenie jakości i dokładności wykonania wyrobów przy ograniczeniu kosztów produkcyjnych. W związku z tym występuje coraz większe zapotrzebowanie na wyroby wykonywane przy zastosowaniu technologii obróbki plastycznej charakteryzujące się dużą dokładnością i powtarzalnością wymiarów. Do procesów obróbki plastycznej realizowanych w przemyśle i dziedzinie budowy maszyn zaliczane są procesy kształtowania plastycznego materiału na zimno, w których występują złożone procesy tribologiczne [21, 27, 61, 65, 74].

Jednym z głównych zagadnień obróbki plastycznej na zimno jest dobór parametrów technologicznych, pozwalających na zmniejszenie poniesionych kosztów przy zapewnieniu wysokiej jakości wyrobów. Związane jest to z odpowiednim dobraniem metod i narzędzi obliczeniowych (w tym numerycznych). Zastosowanie tych metod pozwala na przyjęcie odpowiednich parametrów do obliczeń i symulacji złożonych procesów obróbki plastycznej takich jak np. wytlaczanie blach.

Na obecnym etapie rozwoju dziedziny kształtowania metali w zakresie opracowań zróżnicowanych procesów technologicznych jednym z kierunków zapewniających szybkie i efektywne poznanie zmiennych procesów jest wykorzystanie standardowych obliczeń numerycznych. Jak wynika z przeglądu literatury [1, 4, 18, 31, 50, 77, 85] jest wiele opracowań w zakresie badań tribologicznych jednak ze względu na różnorodność danych nie są one w pełni określone i przydatne dla modelowania procesów wytłaczania. Stąd aktualną potrzebą jest analiza możliwości wykorzystania MES dla warunków, w których realizowany jest proces technologiczny. W celu realizacji takiego zadania należy w badaniach uwzględnić:

- zmienności stanu warstwy wierzchniej oraz rozkładu odkształceń materiału na jego grubości, jako efektów powiązanych z oporami tarcia w procesie wytłaczania,
- wpływ przyjętych warunków brzegowych na wynik końcowy analizy numerycznej,
- porównanie wyników symulacji analizowanego procesu z wynikami obliczeń laboratoryjnych.

2.1. Metody Elementów Skończonych w teoretyczno-doświadczalnych metodach oceny oporów tarcia

Wybór metody badawczej węzła tarcia uwarunkowany jest prawidłowym jego zdefiniowaniem i oceną problemu badawczego. Dostępnych jest wiele urządzeń do badania zjawiska tarcia (różnych procesów tribologicznych), których część wykorzystuje się w przypadku procesów z uwzględnieniem odkształcenia plastycznego materiału [6, 19, 48, 54]. Wybrana metoda badawcza powinna odtwarzać określone rzeczywiste warunki pracy badanego węzła tarcia. Charakter odwzorowania badań określa ich rodzaj, warunki otoczenia, sposoby pomiarów, parametry zadane i inne. Występujące podobieństwo funkcjonalne między rzeczywistymi warunkami odkształceń materiału a odpowiednio dobranym węzłem tarcia jest konieczne do realizacji badania z wysoką wiarygodnością otrzymanych wyników. W procesie

kształtowania plastycznego wyrobu metodą wytłaczania dotyczy to specyficznego zjawiska – przemieszczania się odkształcanego materiału po powierzchni narzędzia.

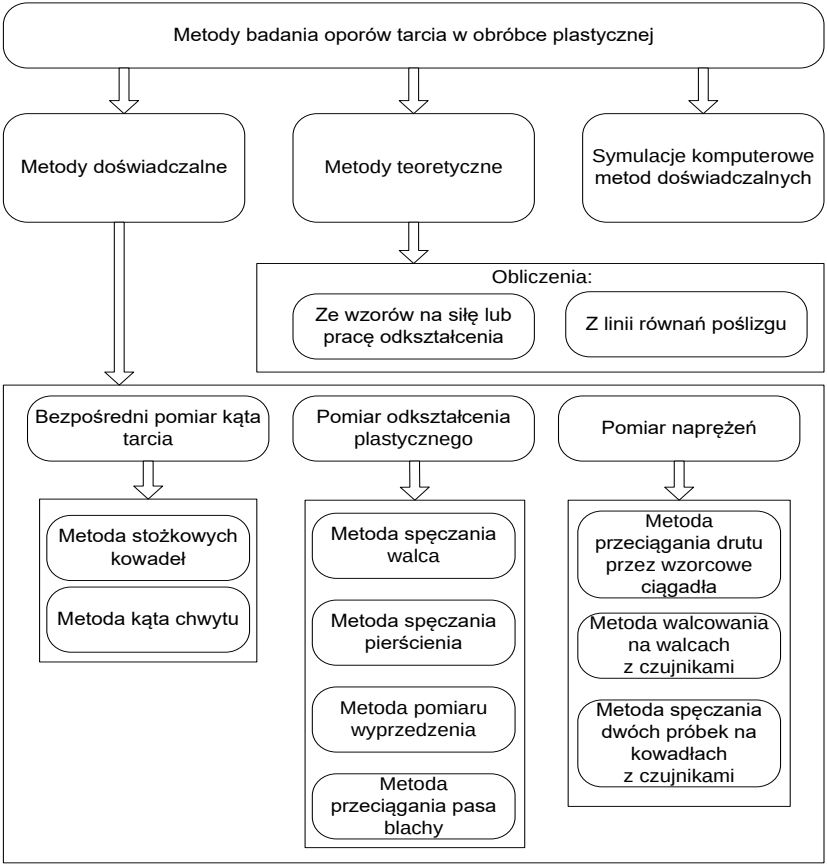
W wielu pozycjach literaturowych [19, 21, 31, 56, 57, 102] stwierdzono, że w procesach wytwórczych skutki oddziaływania sił tarcia, jako sił niekorzystnych – powodują zwiększone zużycie narzędzi, konieczność stosowania większych sił oraz nierównomierność odkształceń w wyrobach końcowych. W niektórych przypadkach niewłaściwy dobór parametrów tribologicznych może uniemożliwić przebieg całego procesu. Jednak w procesach obróbki plastycznej można też wskazać pozytywny wpływ tarcia na powierzchni kontaktu materiał odkształcany – narzędzie np. w procesie tłoczenia blach na powierzchni kontaktu stempel-materiał odkształcany. Wpływ oporów tarcia na realizację procesów plastycznego kształtowania metali rozpatrywany jest w ścisłym powiązaniu z danymi parametrami procesów technologicznych. Ocenę wielkości współczynników tarcia przy wykorzystaniu metod numerycznych np. Metody Elementów Skończonych można realizować poprzez analizowanie modeli zdyskretyzowanych. W większości takie badania dotyczą oceny układów przyjętych, jako: układ sztywno plastyczny lub układ sztywno sprężysty. Stąd też aktualną tematyką są badania nad coraz szerszym wykorzystaniem MES do analizy układów sztywno – plastycznych, związanych m.in. z badaniami zjawiska tarcia w procesie wytłaczania blach [40, 41, 50, 71].

Uzyskanie wyników z określoną dokładnością analiz dotyczących badania współczynników tarcia podczas realizacji procesów obróbki plastycznej wymusza konieczność doboru odpowiednich metod badawczych. Zastosowanie odpowiedniej metody badawczej do określenia oporów tarcia w warunkach odkształceń plastycznych jest utrudnione z następujących powodów:

- współczynnik tarcia wyznaczany jest za pomocą metod pośrednich, co związane jest z dokładną analizą współzależnych wielkości, które zmieniają się dynamicznie w czasie,
- występuje wiele hipotez oraz modeli opisujących zjawisko tarcia, dla których stosuje się różne sposoby obliczeń uwzględniających różnorodne czynniki środowiskowe,
- istnieje trudność w wyznaczeniu wartości i zmienności współczynnika tarcia dla różnych par materiałowych,
- występuje trudność wyznaczenia nominalnej powierzchni styku pary trącej.

W metodach teoretycznych opory tarcia wyznaczane są w sposób pośredni z zależności opisujących różne modele tarcia. Przy tego typu podejściu stosuje się wiele uproszczeń począwszy od geometrii węzła tarcia po siłę odkształcenia, co powoduje uzyskanie uogólnionego wyniku. Poza tym przy analizie

teoretycznej najczęściej rozpatrywane są pojedyncze parametry wybranego modelu tarcia, co w konsekwencji daje jeden wynik dla całego rozpatrywanego procesu. W rzeczywistości wartości mierzone dla węzła tarcia powinny być rozpatrywane dynamicznie w funkcji czasu. Zarówno współczynnik tarcia jak i siły tarcia zmieniają swoje wartości podczas tego procesu i przyjmują różne wartości dla badanych cykli czasowych. Stosowane w tribologii metody wyznaczania tych parametrów można ze względu na przedmiot badań podzielić na metody teoretyczne, doświadczalne i komputerowe w których mieszczą się badania laboratoryjne i eksploatacyjne (rys. 2.3) [24, 27].



Rys. 2.3. Metody badania oporów tarcia w obróbce plastycznej

W literaturze [24, 59] podzielono metody badań zjawiska tarcia na: eksploatacyjne, stanowiskowe i laboratoryjne lub laboratoryjne, półeksploatacyjne i stanowiskowe. Uzyskiwanie poprawnych rezultatów uwarunkowane jest przeprowadzeniem weryfikacji wyników uzyskanych wybranymi metodami badawczymi z wynikami z otrzymanymi w warunkach procesów rzeczywistych. Dobranie metod walidacyjnych i zastosowanie badań równoległych np. w postaci badań odwrotnych pozwala na określenie niepewności obliczeń w relacji zmienności pomiędzy wynikami obliczeń symulacyjnych a efektami badań w warunkach rzeczywistych.

W badaniach wielkości tribologicznych wykorzystywanych jest wiele metod i technik pomiarowych stosowanych do badania procesów tarcia. Metody te pozwalają na określenie sił i współczynników tarcia w procesach tarciovych.

Pomimo wielu prac teoretycznych, wykorzystujących symulację matematyczną przy zastosowaniu technik komputerowych jak też licznych prac doświadczalnych mających na celu prognozowanie wyników procesów tarcia występują duże trudności w modelowaniu procesów tarcia uwzględniającym odkształcenia plastyczne materiału.

Jednym z celów modelowania zjawisk tarcia jest wyjaśnienie wpływu wybranych parametrów procesu na opory tarcia. Wiele procesów tribotechnicznych w znacznym stopniu zależy od charakteru powierzchni oraz występujących warunków tarcia. Właściwe określenie parametrów tarcia jest niezbędne do prawidłowego modelowania procesów tribologicznych. Opis i prognozowanie tego zjawiska stanowiło i stanowi jeden z podstawowych problemów rozpatrywanych w technice. Modele i prawa dotyczące tarcia uzupełniano w miarę odkrywania nowych zjawisk wpływających na opory ruchu. Obecnie nie ma jednego uniwersalnego modelu tarcia sprawdzającego się w każdych warunkach badawczych. Badania o charakterze tribologicznym w literaturze najczęściej dzielone są na modelowe, numeryczne i eksploatacyjne. Badania eksploatacyjne wykorzystują pełnowymiarowe urządzenia w rzeczywistych warunkach pracy. Natomiast badania modelowe dotyczą odwzorowania rzeczywistości np. maszyn i warunków, które są odpowiednikiem badań rzeczywistych. Dla badań teoretycznych i doświadczalnych niezwykle istotne jest prawidłowe określenie warunków rzeczywistych i warunków brzegowych. Dotyczą one zarówno szeregu czynników bezpośrednich jak i pośrednich określanych, jako środowiskowe. Opisy badań tribologicznych wymagają uwzględnienia czynników dynamicznych, kinematycznych, obciążeniowych, zespołu cech materiałowych. Dlatego też w literaturze można spotkać różne modele tarcia i różne podejścia do sposobu opisu zjawisk tribologicznych.

Przykładowo model I. Kragielskiego dotyczy zjawisk mechanicznych i molekularnych. Model ten wykorzystywany jest w badaniach makroskopowych przy analizie oddziaływań mechanicznych.

M. Gierzyńska w swoich pracach [24, 25, 26] przytacza hipotezy wielu badaczy jednak podkreśla, że charakter pracy współpracujących powierzchni jest losowy i dynamiczny oraz zależy od sił nacisku. Podobne spostrzeżenia można spotkać w pracy F. Bowdena [10]. Znaczący udział zjawisk kontaktowych np. w procesach odkształceń plastycznych sprawia, iż w symulacji numerycznej procesów obróbki plastycznej jednym z istotnych parametrów jest współczynnik tarcia. Uwzględnienie oporów tarcia w obliczeniach numerycznych jest szczególnie istotne w przypadku procesów kinematycznego kontaktu przedmiot obrabiany – narzędzie. Analiza zjawisk tarciovych musi być poprzedzona podaniem założeń, które wynikają z rzeczywistej realizacji procesów a dotyczą relacji skojarzeń narzędzi i materiału. W literaturze tego typu skojarzenia materiałowe nazywane są skojarzeniami sztywno sprężystymi lub sztywno plastycznymi. Skojarzenie takie charakteryzuje się tym, że powierzchnie narzędzi nie ulegają odkształceniu w sensie geometrycznym natomiast odkształceniom ulega materiał wejściowy. Różnorodność procesów obróbki plastycznej sprawia, że w każdym z nich ruch odbywa się przy różnych wartościach odkształceń, różnym stanie naprężeń i przy zróżnicowanych prędkościach odkształcenia.

Różnorodność procesu wytłaczania blach sprawia, że ruch kształtowanego materiału wymaga specyficznych parametrów prowadzenia procesu, które w szczególności związane są z oporami tarcia. W literaturze pierwsze wzmianki dotyczące teorii tarcia przypisuje się Leonardowi da Vinci [63]. Wprowadził on nazwę "siła tarcia" i sformułował dwa prawa dotyczące tego zjawiska. Pierwsze prawo mówi o proporcjonalnej zależności występującej pomiędzy siłą tarcia a naciskiem wywieranym na badane przedmioty. Natomiast drugie prawo mówi o tym, że siła tarcia jest niezależna od powierzchni tarcia. Na podstawie tych praw badania przeprowadzał G. Amontons około dwustu lat później a następnie opisał je równaniem (1) [3]:

$$T = \mu \cdot N \quad (1),$$

gdzie: T – siła tarcia, μ – współczynnik tarcia, N – siła nacisku.

Do dziś model matematyczny procesu tarcia opracowany w postaci równania konstytutywnego G. Amontonsa jest najczęściej wykorzystywanym modelem w badaniach tribologicznych. Ze wzoru (1) wynika, że współczynnik tarcia zależy od obciążenia normalnego N . W rzeczywistości współczynnik tarcia zależy od obciążenia oraz mechanicznych, geometrycznych i chemicznych

właściwości powierzchni trących [24, 31]. Współczynnik tarcia statycznego rośnie ze wzrostem czasu styku powierzchni tarcia ciał stałych [24].

Wartość współczynnika tarcia jest szczególnie duża przy współdziałaniu materiałów plastycznych i półplastycznych, gdyż pod wpływem obciążenia zewnętrznego występują plastyczne odkształcenia stykających się nierówności, a zatem rośnie powierzchnia rzeczywistego styku. Siły adhezji zwiększają wówczas wartość współczynnika tarcia, czego nie uwzględnia wzór G. Amontonsa. Należy zwrócić uwagę, że według niego siła tarcia nie zależy od nominalnej powierzchni styku. G. Amontons twierdził, że siła tarcia znajduje się w złożonej zależności od nacisku jednostkowego, czasu i prędkości ślizgania przy tarcu ruchowym. Prawo G. Amontonsa traktuje trące ciała, jako idealnie sztywne. Hipoteza G. Amontonsa wyraża liniową zależność siły tarcia od siły normalnej, co oznacza, że współczynnik tarcia ma stałą wartość i nie zależy od siły nacisku. Ch. A. Coulomb pod koniec XVIII wieku opracował model tarcia suchego i wyraził go za pomocą zależności (2) [12]:

$$T = \mu \cdot N + A \quad (2),$$

gdzie: A – parametr adhezji oznaczający część siły tarcia zależnej od molekularnego oddziaływania powierzchni trących.

Coulomb przyjął parametr A jako stałą dla wszystkich rodzajów powierzchni nie uzależniając go od nacisku normalnego i innych parametrów powierzchni.

Natomiast model T. Karmana [100], przedstawiony w postaci zależności (3) jako:

$$\tau = \mu \cdot p \quad (3),$$

gdzie: τ – jednostkowa siła tarcia, μ – współczynnik tarcia, p – naprężenie normalne.

zakłada, że wraz ze wzrostem naprężenia normalnego wzrasta powierzchnia rzeczywistego styku [100]. Hipoteza G. Amontonsa jest słuszna dla odkształceń sprężystych. Przy odkształceniu plastycznym zmienia się powierzchnia rzeczywista styku wraz ze wzrostem nacisków jednostkowych i hipoteza G. Amontonsa nie daje możliwości dokładnego opisu zjawisk kontaktowych. Dlatego też do przeprowadzenia badań numerycznych konieczny jest dobór modelu matematycznego przybliżającego warunki rzeczywiste.

Model E. Siebła [82] zakłada, że przy odkształceniu plastycznym próbkę opór tarcia określa naprężenie styczne opisane zależnością (4):

$$\tau = m \cdot k \quad (4),$$

gdzie: τ – naprężenie styczne, m – stały współczynnik proporcjonalności (czynnik tarcia), k – granica plastyczności przy ścinaniu.

Według E. Siebła opory tarcia nie zależą od nacisku jednostkowego, ale są liniową funkcją granicy plastyczności. Badania nad modelem G. Amontonsa i E. Siebła kontynuowali T. Wanheim i N. Bay [101].

Badania tribologiczne zjawisk tarciovych przeprowadzał również F. P. Bowden, który określił, że badane powierzchnie charakteryzują się pewną różnorodnością ze względu na występowanie niepowtarzalnych warstw wierzchnich materiałów [10]. Dlatego też w literaturze przyjmuje się pewne uproszczenia. Według F. Bowdena powierzchnie ciał stałych są zawsze chropowate a przy ich współpracy występuje styk wyłącznie między najwyższymi pikami obu powierzchni. Bowden stwierdził, że naciski, jakie może przenieść określony metal nie zależą od wielkości chropowatości, ale są jego charakterystyczną cechą. Według F.P. Bowdena podczas tarcia tworzą się mostki tarciove, które podczas ruchu ulegają niszczeniu, przy czym opór tarcia jest warunkowany odpornością na ścinanie tych połączeń.

Na podstawie tego twierdzenia Bowden dokonał podziału połączeń tarciovych na cztery grupy:

- o niższej wytrzymałości niż metale pary trącej,
- bardziej wytrzymałe od jednego z metali pary trącej,
- bardziej wytrzymałe od obu metali pary trącej,
- połączenia występujące przy tarcia tych samych metali.

Przedstawione modele matematyczne procesu tarcia powierzchni gładkich nie zawsze uwzględniają podstawowe parametry współpracujących materiałów jak np. własności mechanicznych materiałów. Najczęściej stosowanym modelem tarcia w badaniach symulacyjnych MES jest model Coulomba, który też jest wybierany do analizy zjawisk kształtowania plastycznego metali na zimno.

2.2. Eksperymentalne metody badania oporów tarcia

Badania doświadczalne oporów tarcia w warunkach laboratoryjnych lub eksploatacyjnych prowadzone są na modelach par trących. Dla modeli badawczych określone są: kinematyka ruchu skojarzenia, dynamika obciążenia, geometria styku, prędkości ruchu, naciski jednostkowe stan powierzchni materiału itp. Zasadniczą zaletą tego rodzaju badań jest możliwość uzyskania odpowiedzi układu przy zadanych warunkach początkowych i niskich nakładach finansowych.

Ze względu na kryterium rodzaju mierzonych wielkości procesu tarcia metody badań doświadczalnych można podzielić na wiele grup np:

- metody bezpośredniego pomiaru kąta tarcia, do których można zaliczyć metodę stożkowych kowadeł E. Siebla lub metodę kąta chwytu przy procesie walcowania,
- metody określające odkształcenie materiału, do których zalicza się metodę spęczania walca S. I. Gubkina, lub metodę spęczania pierścienia,
- metody pomiarów naprężeń normalnych i stycznych w strefie styku odkształcanej próbki i narzędzia.

Większość metod doświadczalnych pozwala na określenie średniej wartości współczynnika tarcia. Na poszczególnych obszarach rzeczywistej powierzchni styku występują różne wartości tego współczynnika. Zmiany oporu tarcia podczas doświadczalnych procesów odkształcenia materiału spowodowane są następującymi czynnikami:

- różnorodnym stanem powierzchni,
- wadami materiałowymi,
- niedokładnym odwzorowaniem prędkości procesu według warunków rzeczywistych i dynamiką obciążenia,
- różnorodnym rozkładem sił i wartościami temperatur w węźle tarcia,
- zużyciem objętościowym i masowym próbek i przeciwpróbek.

Wymienione czynniki istotnie wpływają na wyniki badań teoretyczno-doświadczalnych, które mogą być obarczone błędami wynikającymi ze stosowania uproszczeń modeli oraz błędami urządzeń pomiarowych. Metody teoretyczne dają możliwość wyznaczenia uśrednionych i pojedynczych parametrów charakterystycznych procesu. Współczynnik tarcia oraz występujące siły tarcia w procesie odkształcenia plastycznego nie są stałe, dlatego dobór metody i aparatury doświadczalnej powinien uwzględniać możliwość ciągłego zapisu badanych parametrów w czasie. Do tego typu grupy metod można zaliczyć metody doświadczalne z cyklicznym zapisem mierzonych wartości. W tym celu do zbadania zmian wartości oporów tarcia przy odkształceniach plastycznych metali wykorzystuje się układy badań modelowych wyposażone w próbkujące systemy akwizycji danych. Do często stosowanych doświadczalnych metod pomiaru współczynnika tarcia należą metody pomiaru oparte na zasadzie wprawiania w ruch pod działaniem siły nieruchomej próbki. Przemieszczenie i odkształcenie próbki jest proporcjonalne do siły lub momentu tarcia w badanym skojarzeniu materiałowym. Przebieg procesu tarcia zależy nie tylko od kształtu przedmiotu i sposobu odkształcenia próbki, ale również od wielkości i działania sił tarcia oraz od prędkości odkształcania materiału. Charakterystyki typowych tribotesterów

wykorzystywanych do badania materiałów współpracujących i środków smarnych zostały umieszczona w tabeli 2.1.

Tab. 2. 1. Charakterystyka tribotesterów [112]

Nazwa tribotestera	Zastosowanie	Badane wielkości	Układ próbek i przeciwpróbek
1	2	3	4
T - 01M	Materiały konstrukcyjne	Odporność na zużycie, współczynnik tarcia	
T - 02U	Środki smarowe	Właściwości przeciwzatarciowe i przeciwużyciowe oraz twardość powierzchni	
T - 03	Środki smarowe	Wpływ na powierzchniowe zużycie zmęczeniowe (pitting)	
T - 04	Materiały konstrukcyjne	Odporność na zużycie, współczynnik tarcia	
T - 05	Środki smarowe, materiały konstrukcyjne	Odporność na zużycie, współczynnik tarcia	
T - 07	Materiały konstrukcyjne	Odporność na zużycie ściernie	

c.d. Tabeli 2.1.

1	2	3	4
T - 09	Środki smarowe, materiały konstrukcyjne	Właściwości przeciwzatarciowe, odporność na zużycie	
T - 10	Cienkie powłoki, materiały ceramiczne, konstrukcyjne	Odporność na zużycie, współczynnik tarcia	
T - 11	Środki smarowe, materiały konstrukcyjne	Odporność na zużycie, współczynnik tarcia, do temp. 300°C	
T - 12U	Środki smarowe	Odporność na zacieranie, odporność na pitting	
T - 13	Środki smarowe	Właściwości przeciwzużyciowe	
T - 14	Farby, lakiery, cienkie powłoki, materiały konstrukcyjne	Odporność na zarysowanie	
T - 15	Materiały konstrukcyjne, polimery, środki smarowe	Odporność na zużycie, współczynnik tarcia, do temp. 300°C	

c.d. Tabeli 2.1.

1	2	3	4
T - 17	Biomateriały, polimery, materiały konstrukcyjne	Odporność na zużycie, współczynnik tarcia	
T - 18	Ciecze chłodząco-smarujące, cienkie powłoki na narzędziach skrawających	Współczynnik tarcia w połączeniach śrubowych	
T - 20	Cienkie powłoki, materiały konstrukcyjne	Odporność na zużycie ściernie, współczynnik tarcia	
T - 21	Materiały konstrukcyjne o wysokiej odporności termicznej	Odporność na zużycie, współczynnik tarcia, w temperaturze do 750°C	

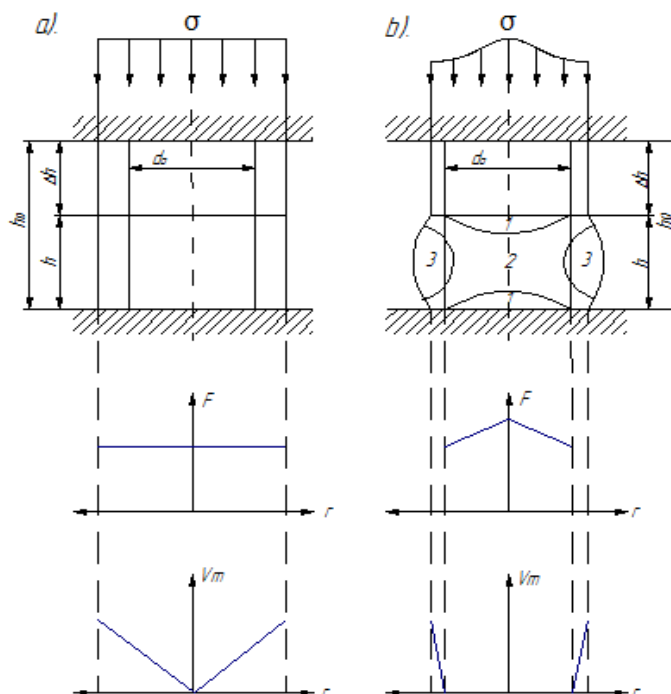
Do typowych metod wykorzystujących modelowanie do określenia oporów tarcia w warunkach odkształceń plastycznych na zimno należą:

- próby spęczania walca za pomocą płaskich kowadł,
- próby spęczania walca pomiędzy stożkowymi kowadłami,
- próby spęczania pierścienia,
- próby spęczania próbek pomiędzy klinowymi kowadłami,
- próby spęczania i przesuwania próbki między płaskimi kowadłami.

Modelowanie numeryczne próby spęczania walca za pomocą płaskich kowadł:

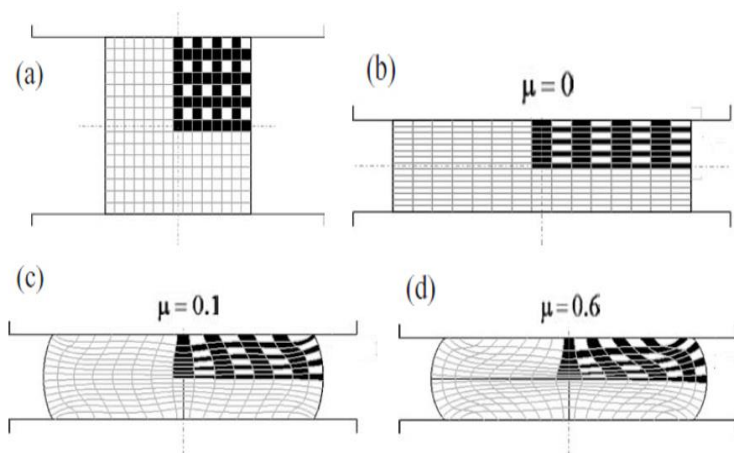
Jedną z podstawowych metod stosowanych do określania współczynnika tarcia jest metoda S. I. Gubkina. Polega ona na ściskaniu walcowych próbek między kowadłami o równoległych powierzchniach roboczych. Dla próbek spełniających zależność $h/d \leq 2,5$ możliwe jest określenie podstawowych

własności plastycznych badanych materiałów. Przebieg tego procesu w głównej mierze zależy od sił tarcia występujących na powierzchni odkształcanego materiału – narzędzie. Gdyby siły tarcia nie występowały materiał byłby odkształcany jednorodnie z prędkością rosnącą liniowo w kierunku promienia, a nacisk materiału na narzędzie miałby stałą wartość. W rzeczywistym procesie spęczania promieniowe przemieszczanie się cząsteczek materiału jest utrudnione, ponieważ występuje tarcie materiału o powierzchnię narzędzia (rys. 2.4) [50].



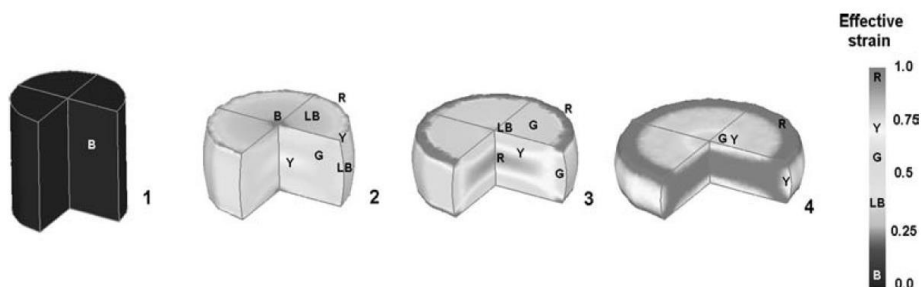
Rys. 2.4. Przekrój poprzeczny próbki cylindrycznej dla operacji spęczania: a) bez uwzględnienia sił tarcia, b) z uwzględnieniem sił tarcia; V_m – prędkość ruchu odkształcanego materiału [50]

Metody numeryczne dotyczące wykorzystania Metody Elementów Skończonych pozwoliły na wykonanie omawianej próby i określenie wpływu oporów tarcia na proces odkształcenia materiału. Przykład wpływu różnych współczynników tarcia na deformację siatki modelu pokazano na rysunku 2.5.



Rys. 2.5. Siatka modelu spęczanego walca dla różnych współczynników tarcia: a) model siatki przed deformacją b) dla $\mu=0$, c) dla $\mu=0,1$, d) dla $\mu=0,6$ [83]

Wpływ siły nacisku na kształt spęczanej próbki przedstawiono na rysunku 2.6.

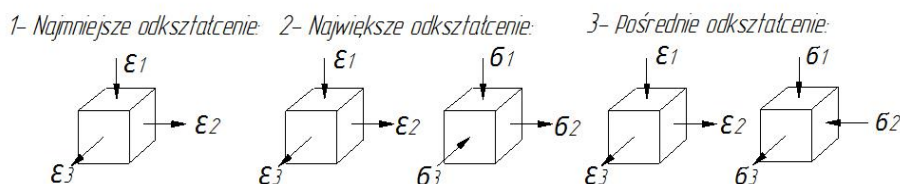
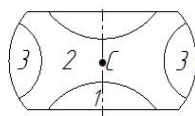


Rys. 2.6. Rozkład odkształcenia plastycznego ε w próbce walcowej wybranych nacisków dla czterech kroków analizy numerycznej [83]

Wyniki badań laboratoryjnych i analiz obliczeń numerycznych przedstawionych w literaturze [22, 51, 73, 76] pozwalają stwierdzić, że w trakcie odkształcenia średnice przekrojów poprzecznych elementu spęczanego w pobliżu zetknięcia z powierzchniami narzędzia powiększają się znacznie wolniej niż średnice przekrojów bardziej oddalonych od tych powierzchni. W rezultacie spęczany przedmiot przyjmuje kształt beczki.

W odkształconej plastycznie próbce można wyodrębnić trzy charakterystyczne obszary (rys. 2.7):

- Obszary stożków (1) przylegające podstawami do obu powierzchni narzędzia. W obszarze tym materiał przemieszcza się razem z narzędziem nie doznając odkształceń plastycznych.
- Obszar najbardziej intensywnego płynięcia materiału w kierunku promieniowym (2), znajdujący się pomiędzy wymienionymi stożkami. W obszarze tym następuje przemieszczanie się cząstek materiału na zewnątrz.
- Obszar zewnętrznego pierścienia (3) znajdujący się dookoła obszaru 2. Występują w nim obwodowe naprężenia rozciągające.



Rys. 2.7. Obszary odkształceń 1, 2, 3, przy rozpatrywanym procesie tarcia oraz schematy odkształceń i naprężeń dla rozpatrywanych stref

Przemieszczenie odkształcanego materiału po narzędziu jest zależne od zewnętrznych sił tarcia, których oddziaływanie zanika w miarę oddalania się od powierzchni styku materiał-narzędzie. W centralnej części walca w osi symetrii istnieje punkt neutralny (C), w którym prędkość przemieszczania się materiału jest równa zero. W trakcie procesu spęczania walca na zimno naciski jednostkowe osiągają wartość naprężenia uplastyczniającego σ_p badanego materiału. Następuje wówczas wzrost naprężenia i odkształcenia, czego wynikiem jest umocnienie odkształceniowe materiału. W pierwszej fazie odkształcenia materiału umocnienie jest nasilone, lecz wraz ze wzrostem odkształcenia maleje. Podczas procesu spęczania wartość nacisków jednostkowych jest większa niż wartość naprężenia uplastyczniającego ze względu na występujące siły tarcia. Zmniejszenie wysokości próbki i zwiększenie jej wymiarów poprzecznych powoduje zwiększenie powierzchni styku i sił tarcia materiału o narzędzie a tym samym wzrost nacisków jednostkowych.

Naciski jednostkowe wyliczane są ze wzoru (5):

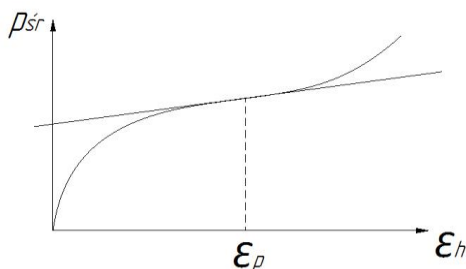
$$p_{sr} = \frac{F_N}{A} \quad (5),$$

gdzie: F_N – siła normalna, A – uśrednione pole przekroju próbki.

Do określenia zmian naprężenia uplastyczniającego i sił odkształcenia służy charakterystyka procesu spęczania. Na rysunku 2.8 przedstawiono zależność nacisku jednostkowego p_{sr} od wskaźnika odkształcenia ϵ_h . Wskaźnik gniotu ϵ_h obliczany jest ze wzoru (6):

$$\epsilon_h = \ln \frac{h_1}{h_0} \quad (6),$$

gdzie: h_1 – wysokość próbki po spęczeniu, h_0 – wysokość próbki przed spęčeniem.

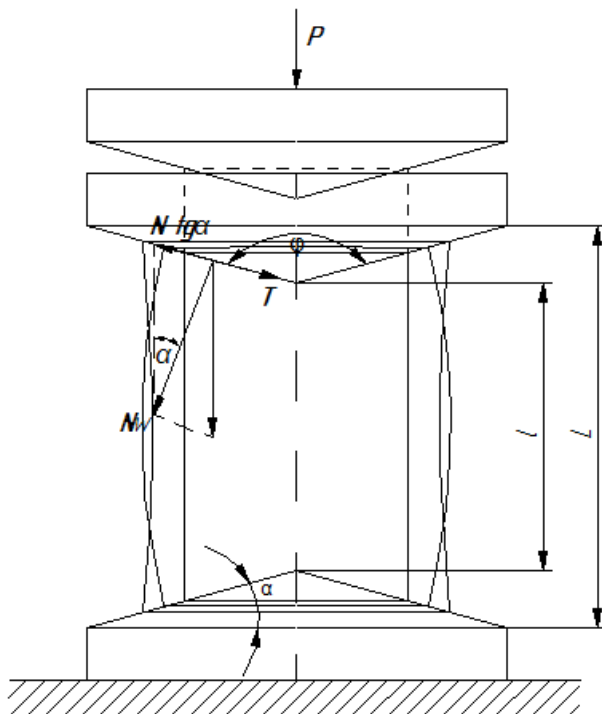


Rys. 2.8. Zależności nacisku jednostkowego od stopnia odkształcenia

Styczna do krzywej spęczania wskazuje na występowanie punktu przegięcia ϵ_p który określa zmianę stanu naprężenia z jednoosiowego do przestrzennego. Po przekroczeniu punktu ϵ_p w procesie odkształcenia materiału następuje wzrost nacisków jednostkowych. Podczas odkształcania plastycznego próbki do momentu osiągnięcia punktu przegięcia strefy nieruchome w materiale są od siebie oddalone. Po przekroczeniu punktu przegięcia strefy zaczynają na siebie oddziaływać a naciski jednostkowe rosną. Współrzędna ϵ_p wskazuje zakres odkształcenia materiału, po przekroczeniu, którego następuje znaczny wzrost oporów odkształcenia.

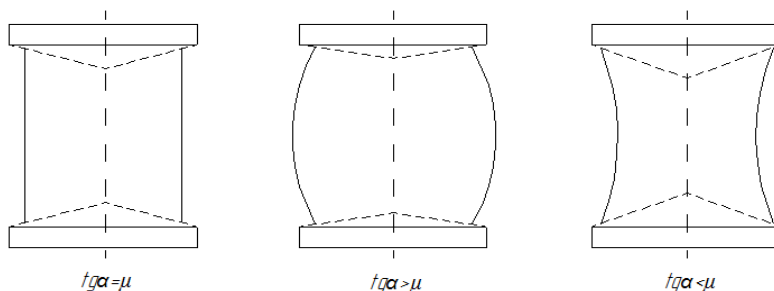
Modelowanie próby spękania walca pomiędzy stożkowymi kowadłami:

Jedną z metod wyznaczania współczynnika tarcia podczas kształtowania plastycznego materiału jest metoda E. Siebla i A. Pompa polegająca na spęczeniu cylindrycznej próbki między stożkowymi kowadłami (rys.2.9).



Rys. 2.9. Spękanie walca za pomocą kowadeł stożkowych; P – siła nacisku, α – kąt pomiędzy podstawą a tworzącą stożka kowadła, L – odległość pomiędzy podstawami stożków, l – odległość pomiędzy wierzchołkami stożków, T – siła tarcia, N_w – siła wypadkowa [53]

Modelowanie próby polega na doborze stożkowego kowadła o takim kącie α aby próbka po jej spęczeniu zachowała kształt walca – rys. 2.9. Kowadło dobierane jest tak aby $\tan \alpha$ był równy współczynnikowi tarcia μ wówczas zostanie zachowana równość sił $N=T$. Jeśli $\tan \alpha < \mu$ wówczas próbka po procesie spęczenia przyjmie kształt beczkowaty. Dla $\tan \alpha > \mu$ próbka przyjmie wklęsły kształt dla ściany bocznej zgodnie z rysunkiem 2.10.

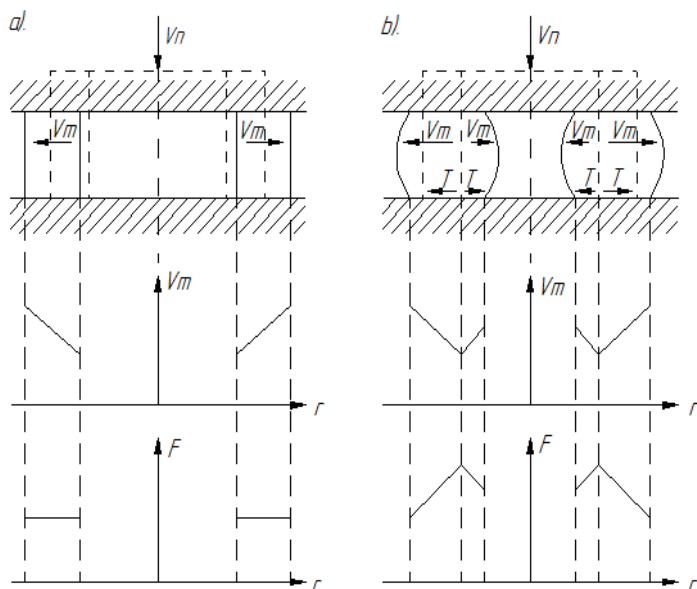


Rys. 2.10. Wygląd spęczonych próbek walcowych dla kowadeł o różnym kącie α [73]

W metodzie tej występuje nierównomierny rozkład nacisków normalnych i sił stycznych na powierzchni tarcia, co wykazał w swojej pracy W. Dobrucki [19]. Maksymalnym naciskom jednostkowym odpowiadają małe wartości sił stycznych, natomiast duże naprężenia styczne występują w obszarze dużych przemieszczeń. Metoda Gublika może być wykorzystywana dla próbek, których stosunek ich wysokości do średnicy mieści się w przedziale od 2 do 2,5.

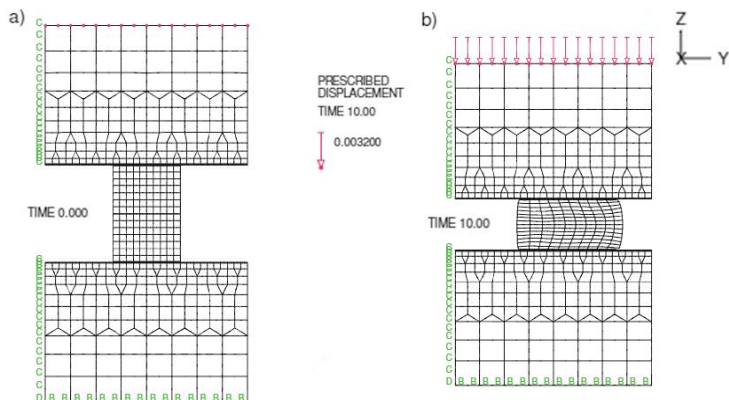
Modelowanie komputerowe próby spęczania pierścienia:

Metoda ta polega na spęczaniu pierścienia między kowadłami. Po procesie spęczania dla oceny zależności współczynnika tarcia od geometrii próbki dokonywany jest pomiar jej średnicy wewnętrznej i wysokości. Podczas procesuspęczania próbki z udziałem sił tarcia materiał przemieszcza się zarówno w kierunku jej osi jak również na zewnątrz. Przy modelowaniu spęczania bez uwzględnienia oporów ruchu przemieszczenia wycinków materiału byłyby proporcjonalne do ich odległości od osi symetrii pierścienia. Natomiast modelowanie próby spęczania pierścienia z uwzględnieniem oporów tarcia powoduje zachowanie próbki jak na rysunku 2.11.



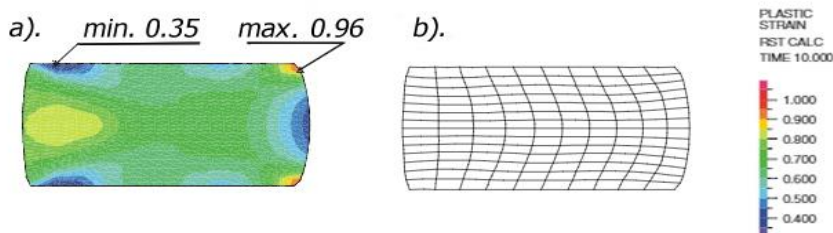
Rys. 2.11. Schemat oddziaływania sił tarcia, rozkład nacisków i prędkości w procesie spęczania pierścienia: a) bez tarcia, b) przy dużych oporach tarcia; V_n – prędkość ruchu narzędzia, V_m – prędkość ruchu odkształcanego materiału [50]

Występujące tarcie w strefie styku materiał-narzędzie zakłóca proces spęczania i jest przyczyną wystąpienia beczkowatości zarówno zewnętrznej jak i wewnętrznej, co obrazują wyniki badań MES – rys. 2.12 i 2.13.



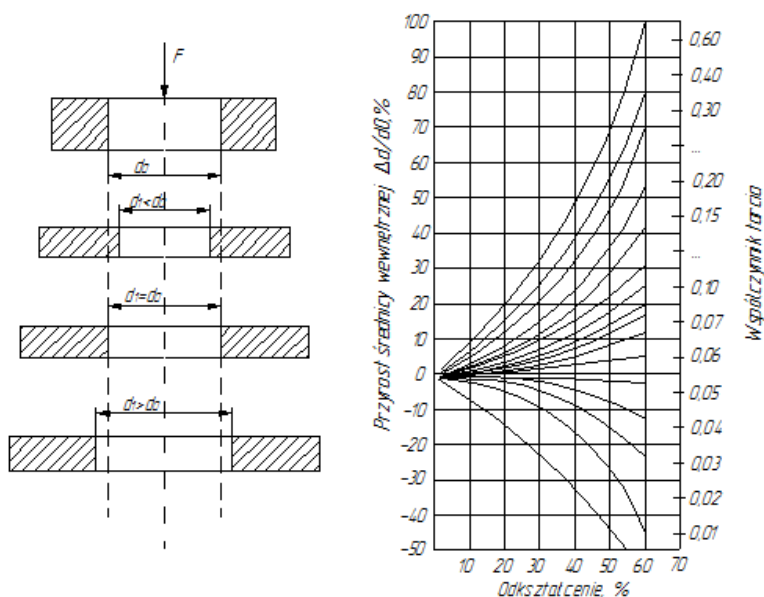
Rys. 2.12. Siatka elementów skończonych dla wycinka pierścienia: a) przed procesem spęczania, b) po procesie spęczania [57]

W określonej odległości od środka próbki występuje płaszczyzna, gdzie prędkość przemieszczania się materiału próbki względem narzędzia równa się zero. W tym obszarze występują największe naciski jednostkowe.



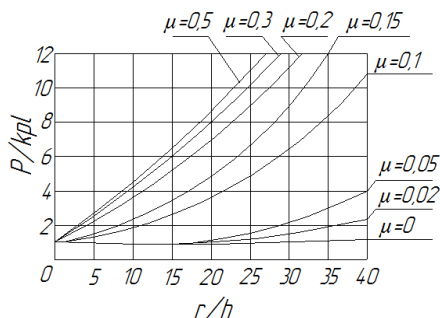
Rys. 2.13. Rozkład odkształceń plastycznych dla a) przekroju pierścienia, b) siatki płynięcia materiału [57]

Dla stopnia odkształcenia próbki wyrażonego w % wyznaczany jest współczynnik tarcia na podstawie grupy wykresów wzorcowych (rys. 2.14). Dla dużych sił tarcia średnica otworu pierścienia ulega zmniejszeniu. Dla pewnej wartości siły tarcia średnica pozostaje bez zmian natomiast dla małej siły tarcia średnica otworu nieznacznie się powiększa.



Rys. 2.14. Zmiana wymiarów próbki dla różnych warunków tarcia oraz wykres wyznaczania oporów tarcia dla metody spęczania pierścienia [50]

Istotnym czynnikiem w modelowaniu procesu spęczania pierścienia mającym wpływ na wartość nacisków jednostkowych jest stosunek promienia do wysokości spęczanego pierścienia (rys. 2.15).

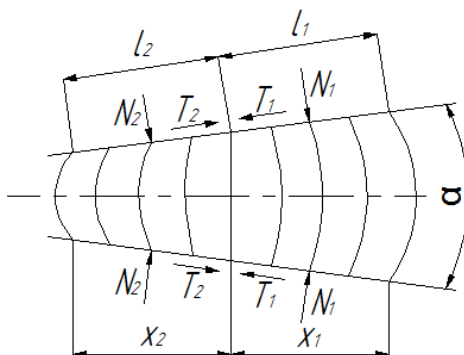


Rys. 2.15. Zależność nacisków od wymiarów próbki i współczynnika tarcia [86]

Przy wykorzystaniu analiz numerycznych spęczania pierścienia współczynnik tarcia może być wyznaczony na podstawie wymiarów gabarytowych odkształconego modelu próbki co daje szerokie zastosowanie tej metody w procach technologicznych i badawczych [55].

Modelowanie próby spęczania próbek pomiędzy klinowymi kowadłami:

Jedną z metod należących do grupy badań polegających na bezpośrednim pomiarze kąta tarcia jest metoda spęczania płaskich próbek pomiędzy klinowymi kowadłami. Na boczną powierzchnię próbki nanoszone są równoległe oznaczenia liniowe, które po spęczeniu ulegną zakrzywieniu- rys. 2.16. Zastosowane kowadła do modelowania próby spęczania próbek ustawiane są pod kątem pochylenia 7° .



Rys. 2.16. Próba spęczania próbki za pomocą klinowych kowadeł [19]

Dla znanych wartości kąta pochylenia kowadeł α i odległości krawędzi próbki od osi neutralnej wyznaczany jest współczynnik tarcia. Ze względu na niejednorodny rozkład nacisków jednorodnych na powierzchniach styku klinów i próbki tego typu wyliczenie jest przybliżone. Suma rzutów sił na płaszczyznę kowadła jest w równowadze, więc jest równa zero zgodnie ze wzorem (7):

$$2N_1 \sin \frac{\alpha}{2} + 2N_2 \sin \frac{\alpha}{2} - 2\mu N_1 \cos \frac{\alpha}{2} + 2\mu N_2 \cos \frac{\alpha}{2} = 0 \quad (7),$$

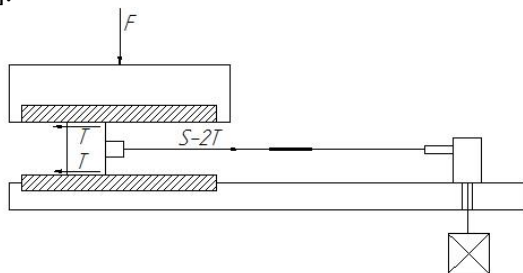
Dzięki czemu istnieje możliwość wyznaczenia współczynnik tarcia (8):

$$\mu = \frac{x_1 + x_2}{x_1 - x_2} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \quad (8),$$

Metoda ta jest rzadko stosowana ze względu na zbyt duże błędy, którymi obarczone są wyniki pomiarów w dużej mierze zależne od doboru kąta α [19].

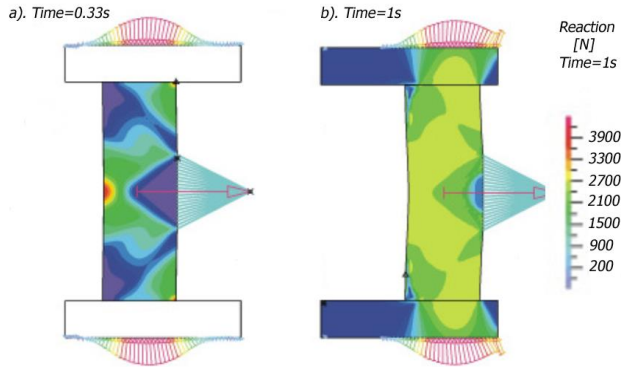
Modelowanie próby spęczania i przesuwania próbki między płaskimi kowadłami:

Modelowanie próby spęczania i przesuwania próbki między płaskimi kowadłami polega na bezpośrednim pomiarze sił i współczynnika tarcia w strefie styku spęczanych próbek. W zależności od rozwiązań konstrukcyjnych oprzyrządowania prasy próbki mogą być w kształcie pręta lub płaskownika. Na próbkę znajdującą się między dwoma kowadłami działa siła powodująca jej ruch. Schemat rozwiązania konstrukcyjnego dla próbek w kształcie prostopadłościanu zaproponowany przez W. Dobrudzkiego został pokazany na rysunku 2.17 [19].



Rys. 2.17. Próba spęczania ruchomej próbki zaproponowana przez W. Dobrudzkiego;
 F - siła nacisku, T - siła tarcia, S - siła naciągu [19]

Badania tego typu na specjalnie skonstruowanym przyrządzie przeprowadzono dla różnego rodzaju próbek. Wyniki próby tarcia metodą W. Dobrudzkiego dla próbki między dwoma płaskimi kowadłami przy wykorzystaniu analizy numerycznej zostały pokazane na rysunku 2.18.

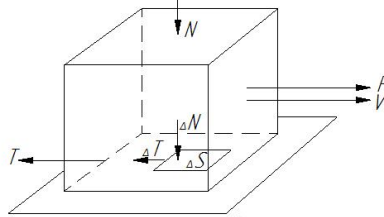


Rys. 2.18. Wyniki symulacji numerycznej próby spęczania ruchomej próbki z zaznaczonymi reakcjami kowadeł. Metoda zaproponowana przez Dobrudzkiego a) rozkład naprężeń uplastyczniających dla czasu 0.33s, b) rozkład naprężeń zredukowanych dla czasu 1s [57]

Dzięki tej metodzie możliwe jest badanie wpływu siły normalnej na statyczny i kinematyczny współczynnik tarcia (rys.2.19). Wyznaczony współczynnik tarcia (9) jest wypadkowy dla dwóch powierzchni styku:

$$\mu = \frac{2T}{F_N} \quad (9),$$

gdzie: $2T$ – siła tarcia na powierzchni, F_N – siła nacisku.



Rys. 2.19. Działanie sił tarcia dla wycinka materiału ruchomej próbki

Lokalne opory tarcia definiowane są, jako jednostkowa siła tarcia zwana naprężeniem tarcia σ_{yx} (10).

$$\sigma_{yx} = \pm \frac{\Delta T}{\Delta S} ; S \rightarrow 0 \quad (10),$$

gdzie: ΔT – siła tarcia działająca na elemencie powierzchni ΔS , y – kierunek prostopadły do powierzchni kontaktowej, x – kierunek wektora prędkości próbki V względem narzędzia.

2.3. Wpływ geometrii powierzchni na symulację numeryczną tarcia ślizgowego

Czynnikami wpływającymi na przebieg procesu odkształcenia plastycznego metali są własności warstw wierzchnich i geometria obszarów styku trących powierzchni.

Proces tarcia występujący podczas ruchu w skojarzeniu elementów bez środków smarnych nazywany jest tarciem suchym ślizgowym. Opisane jest ono prawami, opartymi na wielu teoriach i hipotezach [10, 31, 59, 82]. Według Z. Lawrowskiego tarcie jest rezultatem wzajemnego oddziaływania sił międzycząsteczkowych, występujących na trących się powierzchniach [59]. Według teorii Bowdena – Tabora proces tarcia jest wynikiem powstawania i zrywania mikro spoin, występujących w punktach styku mikro nierówności. Sumaryczna siła tarcia F_t określana jest następującą zależnością (11):

$$F_t = F_s + F_w \quad (11),$$

gdzie: F_s – siła ścinania połączeń adhezyjnych; F_w – siła wyciskania bruzdy w miękkim materiale.

Dla metali o dużej twardości wartość siły wyciskania bruzdy (12) jest pomijalna i można przyjąć, że:

$$F_t = F_s, \quad F_t = s \cdot \tau_{pt} \quad (12),$$

gdzie: s – powierzchnia rzeczywistego styku τ_{pt} – wytrzymałość na ścinanie materiału miękkiego, ponieważ powierzchnia rzeczywistego styku (13):

$$s = \frac{F_N}{R_e} \quad (13),$$

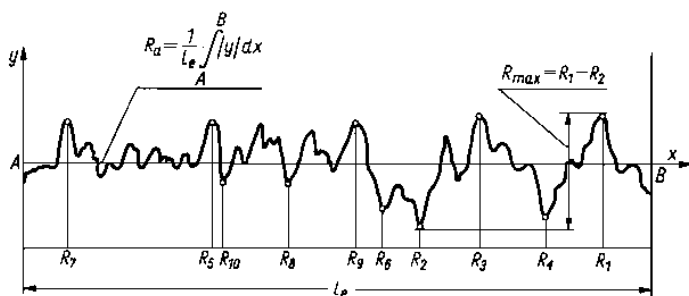
gdzie: F_N – nacisk normalny, R_e – granica plastyczności materiału miękkiego, więc można przyjąć, że siła tarcia (14) przyjmuje postać:

$$F_t = N \cdot \frac{\tau_{pt}}{R_e} \quad (14),$$

Kolejnym czynnikiem wpływającym na stan warstwy wierzchniej jest chropowatość powierzchni R_e będąca zbiorem drobnych nierówności na rzeczywistej płaszczyźnie styku określona umownie, jako zbiór odchyłek profilu tej powierzchni. Fraktografia powierzchni rzeczywistej tego typu nierówności charakteryzuje się znacznie większą wartością stosunku wysokości nierówności do odległości pomiędzy wierzchołkami niż parametr falistości. Graniczna wartość tego stosunku wynosi 1/40. W zależności od procesu obróbki wysokość nierówności powierzchni mieści się w zakresie od 0,01 do 200 μm .

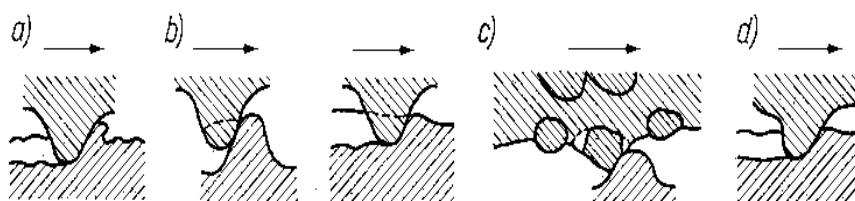
Nierówności płaszczyzn trących określane są, jako zbiór stożków ściętych z parametrem wysokości lub głębokości względem płaszczyzny neutralnej.

Podstawą zapisu graficznego zarysu chropowatości są wyniki badań profilografometrycznych lub mikroskopowych profilu powierzchni (rys. 2.20) [59].



Rys. 2.20. Schemat profilu chropowatości powierzchni [59]

Zazębienia, bruzdy i nierówności, jako geometria stref styku wywołują opór przeciwdziałający siłom wprawiającym materiał w ruch oraz wpływają na umocnienie warstwy wierzchniej materiału. Obszary przypowierzchniowe par trących w warunkach odkształcenia plastycznego zmieniają się dynamicznie co jest wynikiem zmieniających się powierzchni styku, stref poślizgu oraz wpływem stref przywierania (rys. 2.21). Wynikiem tych zjawisk jest ścinanie nierówności warstwy wierzchniej oraz zmiana charakteru powierzchni styku.



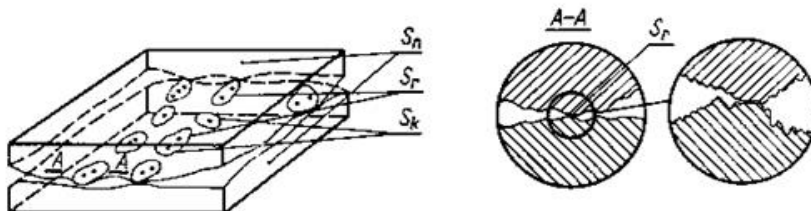
Rys. 2.21. Zmiana powierzchni styku poprzez: a) bruzdowanie, b) ścinanie nierówności, c) ścinanie nierówności ścierniwem przez wypiękły kształt, d) odkształcanie plastyczne materiału [59]

Warstwa wierzchnia materiału (rys. 2.22) rozpatrywana jest, jako zbiór punktów materialnych zawartych między jego powierzchnią zewnętrzną a powierzchnią umowną, będącą granicą zmian wartości cech stref podpowierzchniowych powstałych w wyniku działania czynników zewnętrznych.

Dla rzeczywistych oddziaływań współpracujących powierzchni par trących określone są następujące stany nierówności:

- S_n – nominalna powierzchnia styku rozumiana, jako zbiór wszystkich możliwych powierzchni styku.
- S_k – konturowa powierzchnia styku, jako powierzchnia stanowiąca obrys rzeczywistych pól styku; wartość jej zależy od błędów kształtu, położenia i falistości powierzchni oraz od obciążenia.
- S_r – rzeczywista powierzchnia styku stanowiąca pole sumy elementarnych powierzchni styku; rzeczywista powierzchnia styku występuje w miejscu fizycznego styku na wierzchołku nierówności.

Dla powyższych stanów rozpatrywanych powierzchni zachodzi relacja:
 $S_n < S_k < S_r$

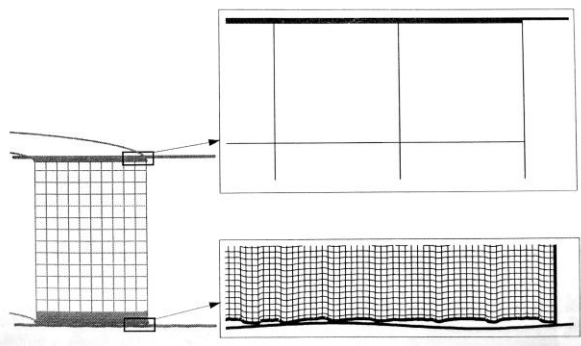


Rys. 2.22. Strefy styku i poślizgu współpracujących powierzchni przy tarcia ślizgowym [59]

W procesie tarcia ślizgowego odbywającego się w warunkach rzeczywistych powierzchnie elementów trących pokryte są błonkami tlenków metali, cząstkami substancji ciekłych lub gazowych. W niektórych przypadkach występowanie przylegających plastycznych warstewek tlenków zabezpiecza powierzchnie trące przed stykiem metalicznym zmniejszając adhezję i opory tarcia. Jednak twarde i kruche cząsteczki tlenków mogą pełnić funkcję materiału ściernego. Podczas tarcia ślizgowego w węźle tarcia dla połączeń metalicznych z udziałem tlenków metali występują procesy tworzenia się i usuwania utlenionej warstwy metalu, czego następstwem jest odsłonięcie powierzchni pozbawionej tlenków. Następnie wykruszone tlenki ponownie biorą udział w procesie tarcia ślizgowego. Im większa jest wartość współczynnika twardości tlenku tym jest on bardziej kruchy i mniej wytrzymały. Łatwiej on ulega uszkodzeniu podczas tarcia i w mniejszym stopniu zapobiega adhezji. Powstawanie w procesie tarcia ślizgowego warstewek tlenków w warstwie wierzchniej wskutek utleniania dyfuzyjnego jest zależne od warunków tarcia.

Tego typu zjawiska powodują, że stan rzeczywistej powierzchni styku jest trudny do określenia i odwzorowania. Jest to przyczyną tego, że podczas

modelowania komputerowego zjawisk kontaktowych najczęściej wybieranym stanem powierzchni jest stan nominalny. Podczas modelowania procesów tribologicznych traktowany jest, jako stan nominalny (S_n). Próbkę modelowania zjawisk występujących w strefie styku o charakterze uproszczonej chropowatości podejmuje w swoich pracach P. Lacki [50, 56, 93]. Opisuje on problematykę i trudność odwzorowania stref styku dla symulacji numerycznych oraz porównuje zachowanie się materiałów dla strefy nominalnej i konturowej (rys. 2.23). W procesach odkształceń plastycznych materiału styk może mieć charakter punktowy, liniowy lub najczęściej występujący- powierzchniowy. Kształt powierzchni styku i właściwości fizycznych materiałów trących wpływają na rodzaj i stan naprężeń w warstwie wierzchniej materiału jak również na wartość sił potrzebnych do realizacji procesu.



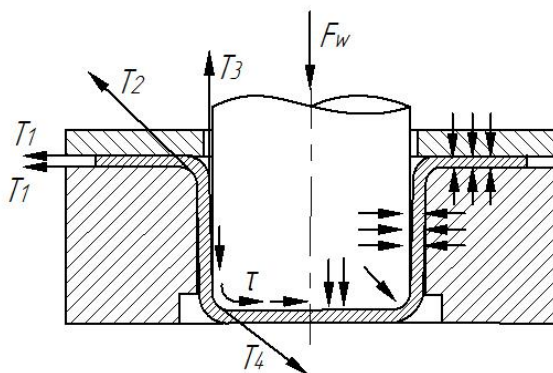
Rys. 2.23. Strefy styku i poślizgu powierzchni przy tarcii ślizgowym [50]

Mimo wielu prac badawczych nie opracowano dotychczas uniwersalnego modelu matematycznego zapisu warstwy wierzchniej. W literaturze można spotkać prace wykorzystujące opis statystyczny profilu geometrycznego badanych powierzchni. Jednak z prac Bowdena i Tabora [10] wynika, że chropowatość wpływa na współczynnik tarcia dla poszczególnych materiałów. Stąd też celowe jest w badaniach dotyczących układów uwzględniających odkształcenie plastyczne materiałów np. modelujących proces wytłaczania uwzględniać ocenę stanu chropowatości powierzchni materiału jak i jego zmiany w analizowanym procesie. Wraz ze wzrostem chropowatości wzrasta współczynnik tarcia. Nie jest znana natomiast dokładna korelacja między chropowatością, falistością a współczynnikiem tarcia i nie jest ona uwzględniana w matematycznych modelach tarcia. Ze względu na uproszczenie zarysu powierzchni, cech geometrycznych i wymiarów w obszarach mikro i makroskopowych uzyskiwane wyniki badań powierzchniowych mają charakter uogólniony.

Tarcie zewnętrzne występujące pomiędzy powierzchnią roboczą narzędzia a odkształcanym plastycznie materiałem wywiera istotny wpływ na przebieg odkształcenia plastycznego jak również na własności użytkowe wyrobu.

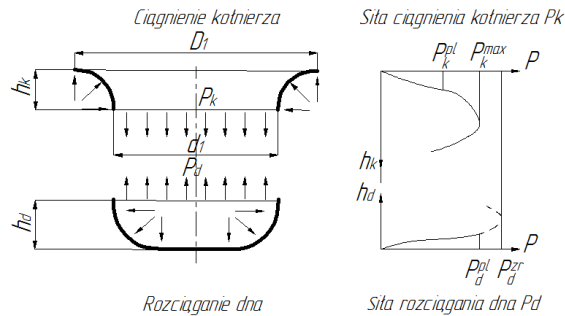
Można przyjąć np. dla procesu wytłaczania, że materiał blachy doznaje odkształceń plastycznych, podczas gdy narzędzie traktowane, jako sztywne (nie doznaje odkształceń lub nieznacznie odkształca się sprężysto). W procesach kształtowania plastycznego na zimno z uwzględnieniem tarcia ślizgowego występują zróżnicowane warunki tarcia obszarów na powierzchniach styku.

Przykładem występowania tego typu zjawiska jest proces wytłaczania polegający na odkształcaniu blach w wytłoczkę, jako wyrób o powierzchni nierozwijalnej. Występujące w tym procesie zróżnicowane warunki tarcia można zaobserwować po obu stronach przekroju odkształcanej blachy (rys. 2.24) [24, 106].



Rys. 2.24. Schemat rozkładu sił tarcia i nacisków na powierzchni blachy w procesie wytłaczania [24, 106]

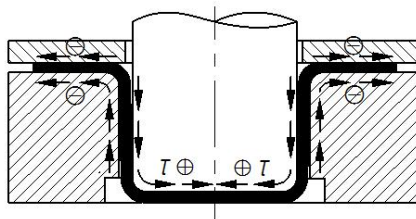
Odształcenie plastyczne i rozkład sił tarcia zależy w dużej mierze od odległości pomiędzy powierzchnią zewnętrzną stempla i wewnętrzną matrycy. Oddziałujące w tej przestrzeni siły tarcia mają wpływ na pole i stan naprężeń w odkształcanym materiale a szczególnie w jego warstwach wierzchnich przylegających do roboczych powierzchni narzędzi. Pole naprężeń wpływa na przebieg odkształcenia metalu a przez to na ruch jego powierzchni względem powierzchni roboczych narzędzia. Przebieg procesu wytłaczania zależy od rozpatrywanych obszarów, do których można zaliczyć obszar ciągnięcia i rozciągania. Wzajemne oddziaływanie sił na te obszary zostało pokazane na rysunku 2.25. Zależności siły ciągnięcia kołnierza P_k i siły rozciągającej P_d w funkcji h_k i h_d pokazano na rysunku 2.25.



Rys. 2.25. Schemat oddziaływania sił tarcia w procesie wytłaczania z dociskaczem [22]

W wyniku hamującego oddziaływania sił tarcia zewnętrznego pole naprężeń w odkształcanym plastycznie metalu nie jest jednorodne, co powoduje powstanie niejednorodnych odkształceń w całej objętości kształtowanego wyrobu. Dlatego w wyniku działania sił tarcia podczas kształtowania plastycznego materiału można zaobserwować strefy o różnym stopniu odkształcenia [52, 74].

W zależności od schematu procesu i warunków technologicznych siły tarcia w procesach odkształceń plastycznych mogą wywierać wpływ zarówno dodatni jak i ujemny. Tarcie odkształcanej blachy o powierzchnię pierścienia ciągowego wpływa na wzrost nacisku wywieranego przez stempel i zwiększa niebezpieczeństwo oderwania dna. Powoduje to zwiększenie siły potrzebnej do prowadzenia procesu wytłaczania. Jednak występujące tarcie odkształcanej blachy o powierzchnię stempla i jego wzrost wpływa korzystnie na parametry siłowe procesu i jego przebieg (rys. 2.26). Oznacza to, że występujące tarcie przeciwdziała przesuwaniu się materiału po powierzchni stempla.



Rys. 2.26. Rozkład sił na powierzchni blachy wyłoczki A [24]

Ocena wpływu współdziałania układu matryca-materiał odkształcany (blacha) - stempel pozwala na opisanie go, jako uproszczonego modelu.

Przyjmuje się w nim, że pomiędzy współpracującymi powierzchniami podczas kształtowania blachy występują opory tarcia. Przy czym im są one mniejsze na powierzchniach styku między matrycą a odkształcanym materiałem tym bardziej korzystne są warunki przebiegu procesu. Natomiast w układzie stempel-materiał odkształcany wzrost oporu tarcia wpływa pozytywnie na zwiększenie możliwości przebiegu procesu. Analiza rysunków 2.24, 2.25 i 2.26 pozwala stwierdzić, że prędkość płynięcia odkształcanego materiału od strony stempla jest w przybliżeniu równa zero. Materiał odkształcany od strony matrycy posiada określoną prędkość płynięcia zależną oprócz własności materiałowych od prędkości stempla, siły jego nacisku i siły tarcia.

Tłoczność materiału związana jest z jego klasą jak również z granicznym współczynnikiem tłoczenia m , który jest różny w zależności od zastosowanej klasy. Do najodpowiedniejszych materiałów blach dla procesów wytłaczania zaliczane są materiały o klasach: głębokotłoczne – G, bardzo głęboko tłoczne – B oraz blachy na skomplikowane wytłoczki – SB, [PN-EN 10130+A1:1999]. W przemyśle do obróbki plastycznej stosowane są również blachy konstrukcyjne o zwiększonej podatności do kształtowania na zimno. Do tej grupy blach można zaliczyć blachy np.: S235JR, S235JRG2, S275JR, S355J2G3 według PN-EN 10025.

2.4. Wpływ parametrów kinetycznych na modele tarcia ślizgowego w analizie MES

Istotnymi czynnikami branymi pod uwagę w obliczeniach numerycznych mającymi wpływ na opis przebiegu procesu tarcia ślizgowego w warunkach odkształceń plastycznych jest prędkość ruchu materiału i narzędzi w obszarze ich styku. Wpływ parametrów ruchowych takich jak prędkość przesuwu próbki V_p , prędkość przesuwu narzędzia V_n oraz rozkład nacisków pomiędzy współpracującymi elementami wpływają na wartości współczynnika tarcia oraz realizację procesu tarcia ślizgowego. Zależność współczynnika tarcia i prędkości poślizgu opisuje w swoich pracach W.I. Kostecki (rys. 2.27) [46]. W.I. Kostecki dzieli proces tarcia ślizgowego na trzy etapy:

I etap – patologiczny proces tarcia, zużycie przez szepianie, opisany zależnością:

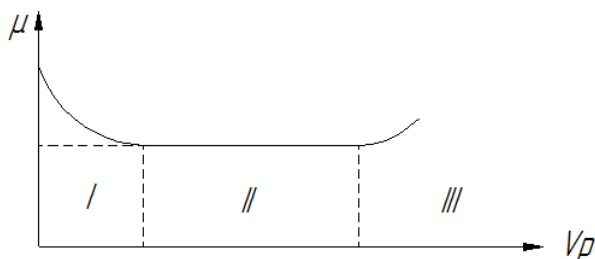
$$0 < v < v'_{kr}; \mu \neq \text{const},$$

II etap – tarcie normalne, struktury wtórne, opisany zależnością:

$$v'_{kr} \leq v < v''_{kr}; \mu = \text{const}.$$

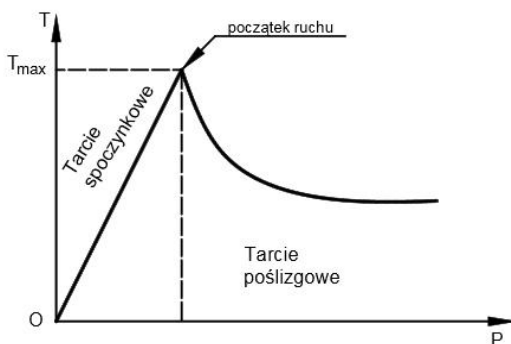
III etap – patologiczne tarcie, szepianie II rodzaju, opisany zależnością:

$$v \gg v'_{kr} ; \mu \neq \text{const.}$$



Rys. 2.27. Schemat zmiany współczynnika tarcia w funkcji względnej prędkości tarcia [46]

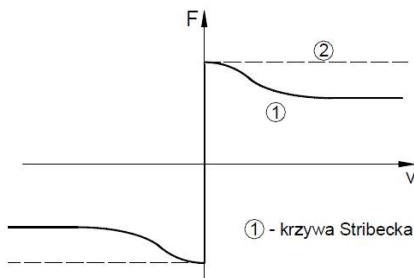
W badaniach numerycznych procesów kształtowania metali z uwzględnieniem tarcia ślizgowego zależność prędkości przemieszczenia materiału od wartości współczynnika tarcia nie jest jednoznacznie określona. W wielu swoich badaniach Kostecki wykazał, że dla różnych zadanych prędkości istnieją zróżnicowane przebiegi współczynnika tarcia z różnymi minimami oraz maksymami funkcji opisującej. Natomiast współczynnik tarcia przy zmieniających się prędkościach poślizgu monotonicznie maleje lub jego wartość jest niezmienna w czasie. Częściowo jest to spowodowane przejściem procesu tarcia ze stanu statycznego w stan kinetyczny (rys.2.28).



Rys. 2.28. Zmiana siły tarcia przy zmianie tarcia spoczynkowego w ruchowe dla modelu Coulomba [12]

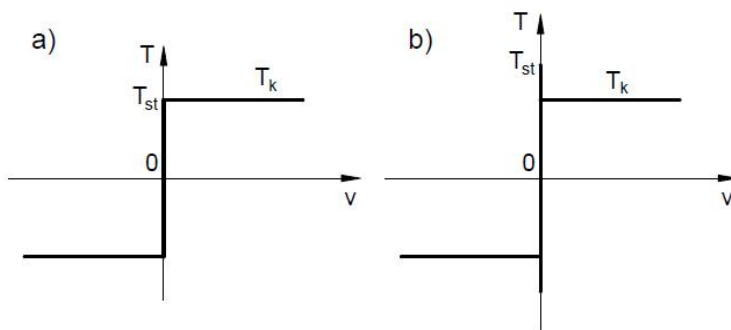
W badaniach teoretyczno doświadczalnych i symulacjach komputerowych dotyczących procesów tribologicznych w warunkach tarcia suchego pomimo zmian kształtu powierzchni w obszarach styku przyjmuje się, że siła tarcia dla badanego procesu jest określona jednoznacznie. W literaturze [12] znajdują się

zależności w postaci charakterystyk między zadanymi prędkościami przesuwu materiału i narzędzia a odpowiedziami układu w postaci oporów tarcia dla wybranych par trących. Według R. Stribeck'a wraz ze wzrostem prędkości względnej ciał następuje zmniejszenie siły tarcia – rysunek 2.29 funkcja 1, natomiast do obliczeń przyjmuje się stałą siłę tarcia – rysunek 2.29 funkcja 2.



Rys. 2.29. Siły tarcia w funkcji prędkości – krzywa Stribeck, krzywa dla analizy MES [12]

Przyjęcie stałej wartości oporów tarcia dla zjawiska tarcia suchego w badaniach tribologicznych powoduje uzyskanie uogólnionej odpowiedzi układu ze względu na nieciągłości w opisie tego zjawiska. Dla uproszczonego modelu Coulomba zależność siły tarcia od prędkości względnej stykających się ciał przedstawiono na rysunku 2.30.



Rys. 2.30. Zależność siły tarcia od prędkości względnej ciał: a) Uproszczony model Coulomba
 b) Model Coulomba uwzględniający wpływ prędkości na siłę tarcia, T_{st} – tarcie statyczne, T_k – tarcie kinematyczne [12]

R. Stribeck przyjął, że dla Coulombowskiego modelu tarcia opory tarcia opisane są zależnością (15):

$$T = N \cdot \mu \cdot \text{sign}(\dot{x}) \quad (15),$$

gdzie: $(\dot{x}) = v(t)$ – prędkość względna współpracujących powierzchni,
 μ – współczynnik tarcia, N – siła nacisku

Podczas procesu tarcia statycznego funkcja signum nie jest rozpatrywana a siła tarcia przyjmuje wartość (16):

$$T_s = N \cdot \mu_{st} \quad (16),$$

W badaniach numerycznych dotyczących procesu kształtowania metali na zimno najczęściej stosowany jest model Amontonsa - Coulomba. Rozszerzone przez Coulomba prawo Amontonsa opisuje zależność siły tarcia od obciążenia normalnego i sił międzycząsteczkowych.

Wartość sił międzycząsteczkowych (ujętych w parametrze A) jest znikomo mała w porównaniu z iloczynem $\mu \cdot N$ i w oprogramowaniu MES jest pomijana.

Natomiast definiując określone warunki brzegowe można uwzględnić wpływ dodatkowych czynników np. zmianę warunków tarcia w funkcji czasu lub własności materiałowe.

Poszczególne modele opisujące zjawiska tribologiczne mogą być obarczone znacznym błędem ze względu na przyjmowanie w nich stałej lub uśrednionej wartości współczynnika tarcia, który w warunkach rzeczywistych zmienia się dynamicznie podczas trwania procesu odkształcenia materiału.

Omówione w niniejszej pracy modele tarcia, jako przybliżone nie uwzględniają specyfiki różnych procesów a w związku z tym parametrów technologicznych. Mimo powyższych ograniczeń model Columbowski jest najczęściej stosowany do opisu zjawisk tarcia ślizgowego dla obliczeń z zastosowaniem Metody Elementów Skończonych. Dotyczy to takich procesów jak procesy tłoczenia blach. Natomiast do analizy procesów obróbki objętościowej częściej stosowany jest model Tresca. Model ten oparty jest na założeniu, że w stanie ścinania nierówności materiału maksymalne naprężenie ścinające we wszystkich punktach ośrodka jest takie samo i jest równe połowie naprężenia przy ścinaniu [17, 57, 101].

2.5. Modele matematyczne w analizie numerycznej procesów obróbki plastycznej

Metoda Elementów Skończonych stała się powszechnie stosowanym narzędziem komputerowego wspomagania obliczeń i analiz inżynierskich. Badane zjawiska mogą być rozpatrywane na drodze doświadczalnej lub z zastosowaniem metod matematycznych i związanych z nimi technikami obliczeniowymi MES. Pierwsze prace na temat metody aproksymacyjnego

rozwiązywania równań różniczkowych pojawiły się ok 1870r. L. Rayleigh opublikował pracę "On the Theory of Resonance" która miała charakter matematyczny [80]. Pierwsze wzmianki w literaturze dotyczące wykorzystania MES, jako metody dla maszyn liczących pojawiły się latach czterdziestych ubiegłego wieku i dotyczyły narzędzi dla przemysłu lotniczego [13]. Wyniki obliczeń numerycznych pozwoliły na określeniu stanu naprężenia i odkształcenia lekkich konstrukcji lotniczych o bardzo prostej geometrii.

Dynamiczny rozwój metod numerycznych przypada na lata sześćdziesiąte kiedy to Claough w swojej publikacji [16] wprowadza pojęcie elementu skończonego dla płaskiego stanu naprężeń. Opracowano również pierwszy program komputerowy NASTRAN służący do obliczeń Metodą Elementów Skończonych. Dalszy rozwój MES w ujęciu wspomagania komputerowego przypada na lata siedemdziesiąte, kiedy MES zaczęto stosować do rozwiązywania problemów nieliniowych, ale dalej dla obiektów o prostej geometrii jedno i dwuwymiarowych czyli tzw. prymitywów geometrycznych. Z uwagi na możliwości ówczesnych komputerów o ograniczonej mocy obliczeniowej tylko taki rozwój metody MES był możliwy. Ograniczenia obliczeniowe pojedynczych jednostek centralnych spowodowały rozwój komputerów typu mainframe.

Duży wkład w rozwój i rozpropagowanie Metody Elementów Skończonych miał polski profesor O. C. Zienkiewicz z Uniwersytetu Walijskiego w Swansea. Jego książka pt. „Metoda elementów skończonych” [109] została przetłumaczona na język polski w 1972 r. [108].

Moc obliczeniowa budowanych komputerów w latach osiemdziesiątych umożliwiła rozwój przestrzennej grafiki komputerowej oraz dała możliwość przechowywania i archiwizowania zbiorów danych niezbędnych dla obliczeń inżynierskich. W latach dziewięćdziesiątych wraz z dalszym rozwojem sprzętu komputerowego powstało wiele systemów wykorzystywanych do modelowania i przeprowadzania symulacji komputerowych, dzięki czemu skomplikowane obliczenia przeprowadzano z większą dokładnością.

Współcześnie, MES jest jedną z podstawowych metod wykorzystywanych w pracy inżynierów, projektantów i technologów dającą możliwość analizy stanu naprężeń i odkształceń badanych zespołów modelowych. Mimo tego, że MES znajduje zastosowanie od lat sześćdziesiątych ubiegłego stulecia do obliczeń i symulacji komputerowych obróbki plastycznej metali to dopiero od kilkunastu lat obserwuje się wykorzystanie jej do obliczeń i symulacji zjawisk tribologicznych. Wcześniej była ona pomijana a w wielu systemach występowały ograniczenia dotyczące ustaleń tribologicznych warunków brzegowych. Obecnie modelowe badania tribologiczne realizowane są, jako badania modeli o różnym stopniu uproszczenia, badania skojarzeń podstawowych jak również badania całych urządzeń laboratoryjnych np. tribotesterów [20, 42, 49, 54].

Zdefiniowanie zjawisk kontaktowych i dobór parametrów tarcia w programach komputerowych stosowanych do analizy procesów obróbki plastycznej jest niezwykle trudne ze względu na ograniczony wybór modeli tarcia oraz dynamiczne zmiany zjawisk procesu jak np.: zmiana nacisków kontaktowych, zmiana rzeczywistej powierzchni styku, zmiana prędkości narzędzi i materiałów, zmienność odkształceń plastycznych itp. W wielu przypadkach analiz komputerowych właściwości tribologiczne materiału są uśredniane do jednego reprezentatywnego czynnika określanego współczynnikiem tarcia. Określenie warunków analizy w ten sposób oparte jest na doświadczeniu i intuicji osób wykonujących analizy numeryczne, co może mieć istotny wpływ na wynik końcowy.

Ciągły rozwój MES powoduje coraz to większą możliwość wykorzystania tej metody do określenia charakteru i przebiegu badanych zjawisk. Dostosowanie warunków brzegowych zazwyczaj odbywa się przy wykorzystaniu badań odwrotnych, co może zapewniać wymaganą jakość wyników jak również dokładne odpowiedzi badanych układów.

Oznacza to, że dążenie do coraz większej dokładności otrzymywanych danych metodą MES powinno być połączone z badaniami odwrotnymi dającymi możliwość próbkowania i dopasowania procesów ciągłych.

Uzyskanie danych za pomocą MES o akceptowalnej dokładności determinuje stosowanie badań doświadczalnych dotyczących zmienności własności odkształcanego materiału, zmian wielkości fizycznych np. chropowatości, twardości jak również jego odkształcenia. Dlatego też ważnym jest, aby podczas procesu badawczego za pomocą MES wybrać oprogramowanie komputerowe, które będzie umożliwiała wprowadzenie danych dla badanych zjawisk odkształceń plastycznych umożliwiające weryfikację wyników z wynikami badań doświadczalnych.

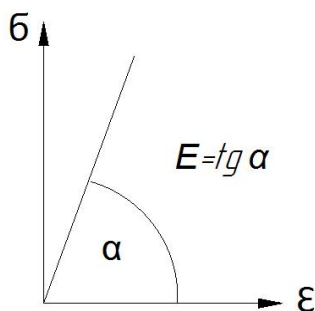
Oznacza to, że taka tematyka jest istotna i związana jest z podjęciem próby zdefiniowania warunków tarcia w procesach obróbki plastycznej przy wykorzystaniu komputerowych metod obliczeniowych dla dostępnych w oprogramowaniu modeli i hipotez tarcia [67, 68, 88].

Procesy symulacyjne i obliczeniowe zjawisk dotyczących odkształceń materiałów w zależności od dynamiki badanego zjawiska oparte są na algorytmach obliczeniowych typu implicit i explicit. Algorytm implicit ujmuje numeryczne całkowanie niejawne równań liniowych. Metoda ta nie uwzględnia zmian parametrów w czasie. Natomiast algorytm explicit polega na numerycznym całkowaniu jawnym równań liniowych i wykorzystuje się go w przypadku szybkozmiennych zjawisk o dużej nieliniowości. Jak wynika z danych przedstawionych w literaturze [18, 71, 73, 83] procesy obróbki plastycznej opisywane i wyliczane są za pomocą algorytmu implicit.

Rozwiązanie zagadnień odkształcenia plastycznego materiału przy wykorzystaniu MES realizowane jest w następujących krokach obliczeniowych:

Struktura modelu typu kontinuum poddana procesowi dyskretyzacji ulega zredukowaniu do układu połączonych ze sobą punktów zastępczych, czyli układu węzłów. Do połączeń węzłowych wprowadzane są siły węzłowe, które oddziałują na element skończony związkami klasycznej teorii sprężystości.

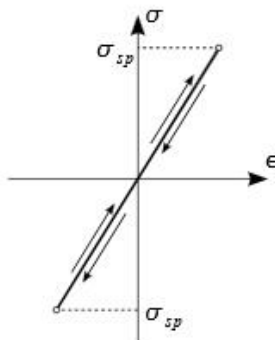
Dla materiałów liniowo sprężystych analiza układu dotyczy małych przemieszczeń i odkształceń. Analiza liniowa modelu układu określa zależność pomiędzy przyłożonym obciążeniem a odkształceniem dla badanej próbki metalu (rys. 2.31). Oznacza to, że obliczenia dla macierzy sztywności i macierzy odwrotnej wykonywane są tylko raz. Dla liniowej zależności układu w przypadku wystąpienia innego obciążenia mogą być wyliczone przez pomnożenie wektora obciążeń przez odwróconą macierz sztywności. Odpowiedź układu o charakterze liniowym jest sumą uzyskanych rozwiązań dla kolejnych przypadków obciążenia z ewentualnym uwzględnieniem mnożników skalujących. Można założyć, więc, że warunki brzegowe są niezmiennie dla wszystkich przypadków takiego obciążenia.



Rys. 2.31. Zależność pomiędzy naprężeniem i odkształceniem dla materiałów liniowych

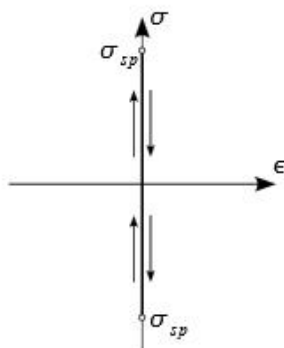
Analiza liniowa jest dużym uproszczeniem pod względem skomplikowania i szybkości obliczeń jednak jest nieodpowiednia dla analizy wielu zespołów modelowych w tym dynamicznych procesów obróbki plastycznej.

Materiał o charakterystyce liniowo sprężystej przenosi naprężenia ściskające jak i rozciągające. Charakterystyka materiału liniowo sprężystego została pokazana na rysunku 2.32.



Rys. 2.32. Charakterystyka materiału liniowo sprężystego

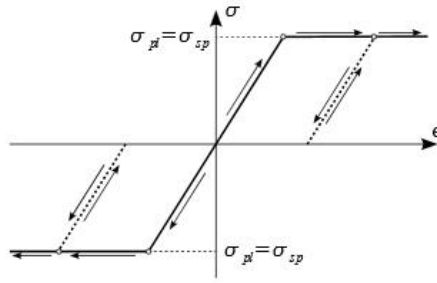
Szczególnym przypadkiem materiału linowo sprężystego jest materiał sztywny. Charakteryzuje się on wartościami modułów Younga i Kirchoffa dążącymi do nieskończoności. Charakterystyka materiału sztywnego została pokazana na rysunku 2.33.



Rys. 2.33. Charakterystyka materiału sztywnego

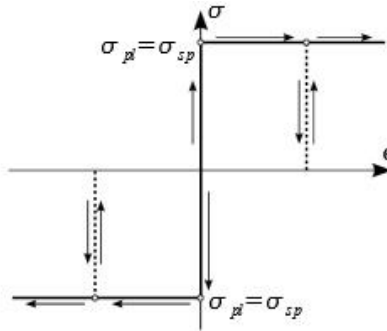
Materiał plastyczny to materiał, który doznaje trwałych odkształceń plastycznych. Szczególnym przypadkiem takiego modelu jest model idealnie plastyczny. W tym modelu granica plastyczności jest równa granicy sprężystości. Można rozróżnić dwa rodzaje modeli idealnie plastycznych:

- model sprężysto idealnie plastyczny – rys. 2.34,
- model sztywno idealnie plastyczny – rys. 2.35.



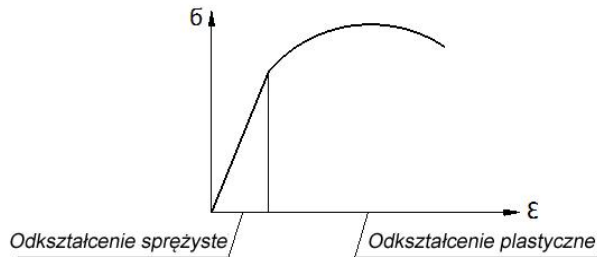
Rys. 2.34. Charakterystyka materiału sprężysto idealnie plastycznego

Dla takiego modelu materiału odkształcenie wypadkowe składa się z odkształcenia plastycznego ϵ_{pl} oraz odkształcenia sprężystego ϵ_{sp} . Dla odkształcenia sprężystego $\epsilon_{sp}=0$ materiał ma charakter sztywno idealnie plastyczny.



Rys. 2.35. Charakterystyka materiału sztywno idealnie plastycznego

Większość układów rozpatrywanych za pomocą metod numerycznych ma charakter nieliniowy gdzie uwzględniana jest zmiana sztywności konstrukcji podczas jej deformacji – rys. 2.36.



Rys. 2.36. Charakterystyka materiału nieliniowego

Sztywność układu zależna jest od jego przemieszczenia, dlatego wyniki początkowych obliczeń nie mogą być stosowane w dalszych obliczeniach dla

kolejnego obciążenia. Dla analizy nieliniowej proces obliczeniowy dla macierzy sztywności i macierzy odwrotnej musi być realizowany wielokrotnie. Taki proces obliczeniowy solvera powoduje, że metoda ta jest bardziej skomplikowana i czasochłonna w porównaniu do procesu obliczeń liniowych. Obliczenia układu dla kolejnych wyników obciążeń nie są rozpatrywane, jako ich algebraiczna suma. Każdy kolejny układ obciążenia musi być od nowa zdefiniowany i rozpatrywany, jako osobne obliczenie.

Dla każdego elementu skończonego układu wyznaczana jest macierz sztywności na podstawie przyjętej funkcji kształtu. Funkcja kształtu (17) określa wpływ przemieszczenia i – tego węzła na przemieszczenie elementu w przestrzeni:

$$u^e = \sum_{i=1}^{LWE} N_i(\xi) u_i \quad (17),$$

gdzie: LWE – liczba węzłów, N_i – funkcja kształtu, ξ – współrzędna lokalna, u_i – wartość węzłowa funkcji w elemencie.

Macierz sztywności jednego elementu skończonego określana jest wzorem (18):

$$[k]_e * \{q\}_e = \{Q\}_e \quad (18),$$

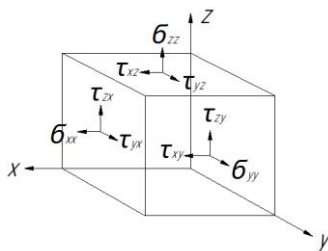
gdzie: $[k]_e$ – macierz sztywności jednego elementu, $\{q\}_e$ – macierz jednowymiarowa jednego elementu, $\{Q\}_e$ – wektor sił węzłowych.

Macierz $[k]_e$ zawiera w sobie współczynniki proporcjonalności określające zależności pomiędzy siłami i przemieszczeniami elementu skończonego. Rozmiar wektora $\{q\}_e$ elementu skończonego uzależniony jest od ilości swobody wszystkich jego węzłów zgodnie ze wzorem (19):

$$l_{sse} = l_{we} * l_{ssw} \quad (19),$$

gdzie: l_{sse} – liczba stopni swobody elementu, l_{we} – liczba węzłów elementu, l_{ssw} – liczba stopni swobody węzła.

Rozkład sił w siatce modelu traktowany jest, jako rozkład naprężeń. Natomiast stan naprężenia działającego na element o nieskończenie małych wymiarach poddanego działaniu obciążenia opisany jest za pomocą układu współrzędnych, jako macierz. Macierz ta nazywana jest tensorem stanu naprężeń σ . Naprężenia σ i τ to składowe tensora naprężeń (rys. 2.37):



Rys. 2.37. Naprężenia działające na element o nieskończenie małych wymiarach

Budowa globalnej macierzy sztywności dla całego układu materiał – narzędzie odbywa się za pomocą iteracyjnych procesów zwanych agregacją układu. Pętla iteracyjna wykonywana jest tyle razy ile w układzie znajduje się elementów skończonych. Dla każdego elementu skończonego budowana jest macierz $[k]_e$ i umieszczana w macierzy globalnej $[K]$. Siły węzłowe oddziałujące na element skończony umiejscowione są w wektorze sił węzłowych $\{Q\}$, który powiązany jest z niewiadomym wektorem przemieszczeń węzłowych $\{q\}$. Pomiędzy tymi wektorami dla metody przemieszczeń istnieje liniowa zależność (20) zgodna ze wzorem:

$$[K] \cdot \{q\} = \{Q\} \quad (20),$$

gdzie: $[K]$ – globalna kwadratowa macierz sztywności, $\{q\}$ – wektor przemieszczeń węzłowych, $\{Q\}$ – wektor sił węzłowych.

Macierz $[K]$ zawiera współczynniki sztywności określające zależności pomiędzy wszystkimi współrzędnymi wektora $\{q\}$ i wszystkimi współrzędnymi wektora $\{Q\}$. Większość tych współczynników jest równa 0. Obliczenia MES oparte na metodzie przemieszczeń polegają na obliczeniu macierzy sztywności konstrukcji $[K]$.

Wektor przemieszczeń węzłowych traktowany jest, jako niewiadomy. Podstawowe równanie statyki dla zagadnień liniowych opisane jest w formie macierzowej (21) w następujący sposób:

$$[M][\ddot{u}] + [C][\dot{u}] + [K][u] = [F] \quad (21),$$

gdzie:

$[M]$ – macierz bezwładności układu elementów skończonych równa sumie macierzy bezwładności poszczególnych elementów,

$[C]$ – macierz tłumienia elementów skończonych równa sumie macierzy tłumienia poszczególnych elementów,

$[K]$ – macierz sztywności układu elementów skończonych równa sumie macierzy sztywności poszczególnych elementów,

$[u'']$ – macierz kolumnowa przyspieszeń poszczególnych węzłów układu,

$[u']$ – macierz kolumnowa prędkości poszczególnych węzłów układu,

$[u]$ – macierz kolumnowa przemieszczeń poszczególnych węzłów układu,

$[F]$ – macierz kolumnowa sił przyłożonych do ciała w węzłach układu.

Określenie warunków brzegowych dotyczy ustalenia parametrów początkowych procesu w postaci warunków kinetycznych i kinematycznych. Do warunków kinetycznych zaliczane są siły czynne i odkształcenia, które

zapisywane są w wektorze obciążeń $\{Q\}$. Warunki kinematyczne w postaci przemieszczeń zapisywane są w macierzy $[K]$.

Rozwiązanie globalnego układu równań - metodą macierzową polega na obliczeniu poszukiwanych wielkości fizycznych (przemieszczenia, naprężenia) na podstawie przyjętych funkcji kształtu. Liczba równań do obliczenia jest równa iloczynowi liczby węzłów i liczby stopni swobody w węźle.

Analiza wyników postprocesingu polega na interpretacji uzyskanych wyników analiz numerycznych. Postprocesor opisuje wyniki w postaci szeregu informacji o zachowaniu się obiektu badań w przestrzeni. Jest to odpowiedź na zadane wcześniej warunki początkowe [95].

2.5.1. Metodyka badań numerycznych w procesach plastycznego kształtowania metali

Metoda Elementów Skończonych zwana także Metodą Elementu Skończonego jest jednym z podstawowych narzędzi komputerowego wspomagania prac i analiz inżynierskich. Wykorzystywana jest ona do rozwiązywania problemów dotyczących doboru geometrii konstrukcji układu z uwzględnieniem działania czynników zewnętrznych oraz do modelowania procesów kształtowania metali gdzie następuje zastąpienie obiektów rzeczywistych modelami dyskretnymi. Metoda Elementów Skończonych oparta jest na metodzie otrzymywania rozwiązań przybliżonych za pomocą aproksymacji równań różniczkowych cząstkowych. Proces badawczy wraz z matematycznym modelem obliczeń opisany jest za pomocą równań funkcji położenia i czasu dla poszczególnych węzłów układu. Opracowanie poszczególnych modeli lub ich zespołów oraz określenie warunków brzegowych odbywa się przy wykorzystaniu programów komputerowych do analizy MES [7, 84].

Metodyka badań numerycznych z zastosowaniem systemów komputerowych, do analizy numerycznej procesów kształtowania metali wykorzystuje trzy podstawowe moduły:

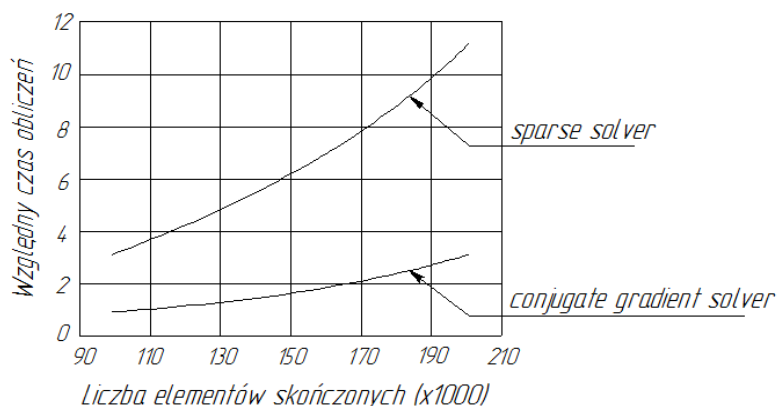
- moduł preprocesora,
- moduł procesora,
- moduł postprocesora.

W module preprocesora następuje definiowanie obszaru obliczeniowego, określenie rodzaju i zadań dla modeli badawczych oraz ich dyskretyzacja. Polega to na opracowaniu modeli trójwymiarowych w technologii stereolitograficznej (STL) będących uogólnionym odzwierciedleniem układu rzeczywistego oraz ich zaimportowaniu i pozycjonowaniu w przestrzeni. Definiowanie przestrzenne obiektów dotyczy określenia typu oraz charakteru ich współpracy np. sztywny-sztywny, plastyczny-plastyczny lub sztywno-plastyczny. Nadanie modelom cech fizycznych i materiałowych wymaga

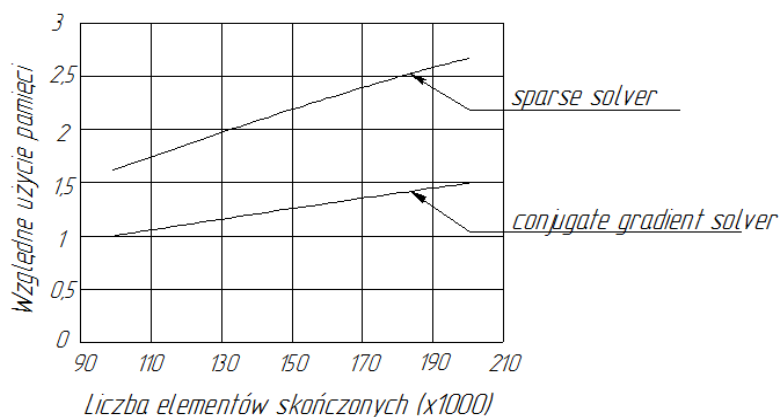
wskazania materiału z bazy danych programu oraz zdefiniowania wartości temperatury dla rozpatrywanego zjawiska. Analizowany układ ciągły poddawany jest procesowi dyskretyzacji i dzielony jest na pewną skończoną liczbę elementów. Zakłada się, że te elementy połączone są ze sobą w skończonej liczbie punktów znajdujących się na obwodach. Najczęściej są to punkty narożne zwane węzłami. W ten sposób model przybiera postać przestrzennej siatki, która w miarę potrzeb jest zagęszczana. Na podstawie równań MES przeprowadzany jest proces asemblacji układu równań. Całkowita liczba równań w układzie jest równa iloczynowi liczby węzłów i liczby stopni swobody węzłów, czyli liczby niewiadomych dotyczących pojedynczego węzła. Zachowanie obiektów w przestrzeni trójwymiarowej definiuje się, poprzez nadanie i odebranie stopni swobody poszczególnym modelom oraz określenie rodzaju i charakteru ruchu zgodnie z wartościami zadanymi. Określenie warunków brzegowych dotyczących działających sił, prędkości, charakteru kontaktu oraz warunków tarcia. Do tak utworzonego układu równań wprowadzane są warunki brzegowe. Wpisanie ich następuje poprzez wykonanie odpowiednich modyfikacji prawych stron równania oraz macierzy jego współczynników.

Moduł procesora odpowiedzialny jest za definiowanie parametrów obliczeniowych i symulacyjnych. W tym module określane są typy geometrii obiektów oraz typy symulacji. Dla procesów obróbki plastycznej często wykorzystywanym typem symulacji jest Lagrangian Incremental (z ang. przyrosty Lagranża). Długość i wiarygodność obliczeń macierzy układów równań liniowych są zależne od liczby przyjętych kroków symulacyjnych oraz stałego przemieszczenia modeli ruchomych względem jednego kroku. Rozmiar kroku i parametry próbkowania mogą być określane za pomocą współczynnika czasu lub współczynnika przemieszczenia. Całkowite przemieszczenie obiektu jest iloczynem przemieszczenia jednego kroku i liczby kroków. Z analiz literaturowych [48, 67, 83, 84, 97] wynika, że dla zaokrąglonych krawędzi i naroży modeli oraz procesów charakteryzujących się dużymi odkształceniami przemieszczenie węzła nie powinno przekraczać 1/10 odległości międzywęzłowej. Próbkowanie procesu obliczeniowego może być realizowane za pomocą trzech podstawowych metod: definiowane przez użytkownika, określane automatycznie przez system oraz przez zmiany temperaturowe (dla procesów obróbki cieplnej). Dodatkowo moduł preprocesora wymaga, aby określić model podstawowy, dla którego przyporządkowana jest maksymalna wartość przemieszczenia w przestrzeni, co ma bezpośrednie przełożenie na skrócenie czasu pracy solvera podczas obliczeń. Czas pracy obliczeń zależy od wyboru metody obliczeniowej solvera. Dla procesów obróbki plastycznej stosowany jest Conjugate - Gradient solver metod (z ang. metoda obliczeń sprzężonego gradientu), dla którego czas obliczeń jest wydłużony natomiast wyniki są bardziej wiarygodne. Obliczenie deformacji materiału z wykorzystaniem

Sparse solver method (z ang. metoda rzadkich obliczeń) daje możliwość kilkukrotnego przyspieszenia obliczeń natomiast związane jest z mniejszą wiarygodnością uzyskanych wyników. Stosowanie solvera Sparse uzasadnione jest dla przypadków analizy skomplikowanych i złożonych układów o dużej liczbie węzłów. Szczególnie istotne jest to dla komputerów o małej mocy obliczeniowej, ponieważ wymagania wykorzystania 1GB pamięci RAM odnoszą się w przybliżeniu do 380000 elementów. Zależności między wyborem solvera a czasem obliczeń i wykorzystaniem pamięci komputera pokazano na rysunkach 2.38 i 2.39 [84].



Rys. 2.38. Względny czas obliczeń solverów w funkcji liczby elementów skończonych [84]



Rys. 2.39. Względne użycie pamięci komputera w funkcji liczby elementów skończonych [84]

Wybór solvera nie może być całkowicie uzależniony od względnego czasu obliczeń i ograniczeń sprzętowych, lecz w głównej mierze powinien uwzględniać rodzaj i typ procesu obróbki plastycznej. Dobór solvera względem typu procesu odkształceń plastycznych metali opisano w tabeli 2.2.

Tab. 2. 2. Dobór solvera dla procesów plastycznego kształtowania metali [83]

Model danych	Rodzaj solvera		
	Zalecany do użycia	Możliwy do użycia	Niezalecany do użycia
1	2	3	4
Powszechne modelowanie z obiektami sztywno-plastycznymi	CG, DI	NR, SP	
Powszechne modelowanie z obiektami elasto-plastycznymi	SP, NR, STD		DI
Matryce o charakterze sprężystym	SP		CG
Matryce kontrolowane siłą	SP		CG
Oddziaływanie cieplne na modele elasto-plastyczne dla siatkowania tetragonalnego	SP, NR, MIX	CG, NR	
Oddziaływanie cieplne na modele elasto-plastyczne dla siatkowania sześciennego	SP, NR,	CG, NR	
Obiekty deformowane plastyczny+plastyczny (dla dużych odkształceń)	SP, DI, CC	CG	
Obiekty deformowane plastyczny+plastyczny (dla małych odkształceń)	SP, NR, PEN	DI	
Obiekty deformowane elasto- plastyczne	SP, NR, PEN		DI, CC
Modele matryc z naprężeniami, modele elastyczno-elastyczne	SP, NR	CG	
Modele obrotowe i symetryczne, obiekty elasto-plastyczne	SP, NR, PEN		CG, CC
Modele obrotowe i symetryczne, obiekty plastyczne	SP, DI, CC	CG, NR	
Modele z przenikaniem ciepła	CG	NR	

Rozwinięcie nazw solverów:

NR – *Newton Raphson*,

DI – *Direct Iteration*,

SP – *Sparse Solver*,

CG – *Conjugate Gradient Solver*,

STD – *Elasto-Plastic Standard Formulations*,

MIX – *Elasto-Plastic Mixed Formulations*,

CC – *Conformal Coupling*,

PEN – *Penalty based contact constraints*.

Dostosowanie solvera deformacji do obliczeń wymaga wyboru metody iteracyjnej, dzięki której wynik solvera będzie konwergentny względem wyniku rzeczywistego. Najczęściej stosowaną metodą iteracyjną dla procesów obróbki plastycznej jest metoda Newtona – Raphsona. Oparta jest ona na metodzie iteracyjnej macierzy Jakobiego, która określa przybliżone rozwiązania zbliżone do wyniku rzeczywistego.

Obliczenia solvera MES dla procesorów wielordzeniowych mają zazwyczaj charakter pracy współbieżnej poprzez wykorzystanie dostępnych sprzętowo rdzeni procesora. W chwili obecnej do obliczeń MES wykorzystuje się maksymalnie osiem rdzeni procesora. Praca równoległa pozwala uzyskać wyniki obliczeń w znacznie krótszym czasie.

Określone w ten sposób warunki brzegowe i parametry obliczeniowe dają możliwość wygenerowania pliku bazodanowego i uruchomienia procesu obliczeniowego, którego wyniki dostępne będą w postprocesorze.

Moduł postprocesora służy do graficznej prezentacji uzyskanych wyników. Interpretacja numeryczna i graficzna oparta jest na wcześniej określonych krokach obliczeniowych [33, 38, 69, 91, 92, 107]. Wyniki obliczeń w postaci danych numerycznych zawierają:

- zdeformowaną geometrię przedmiotu oraz ruchy narzędzi i zdeformowaną siatkę dla każdego kroku obliczeniowego,
- charakterystyki naprężeń, odkształceń, przemieszczeń dla poszczególnych kroków w funkcji czasu,
- wartości wektorowe dotyczące kierunków i prędkości przemieszczenia wszystkich rozpatrywanych węzłów,
- wykresy zmian wartości badanych zmiennych określanych przy warunkach brzegowych dla każdego kroku obliczeniowego,
- gradienty naprężeń, odkształceń i przemieszczeń dla przekrojów badanych modeli,
- analizy stanów przejściowych, maksymalnych i minimalnych dla warunków zadanych względem wybranych węzłów,
- czasy kontaktu dla współpracujących obiektów,
- zmiany mikrostruktury, procesy umocnienia materiałowego i przemian fazowych,
- wyniki symulacji zmian pól naprężeń i energii,
- i inne.

2.5.2. Wpływ dyskretyzacji modelu węzła tarcia na efektywność rozwiązań numerycznych

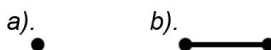
Proces obliczeniowy solvera dotyczący plastycznego kształtowania modeli geometrycznych węzłów tarcia w dużej mierze zależy od liczby elementów skończonych, liczby stopni swobody oraz geometrii i kształtu elementów. Istotą procesu dyskretyzacji jest podział tzw. ciała kontinuum obiektu rzeczywistego na proste figury geometryczne zawierające węzły oraz funkcje interpolacyjne zwane również węzłowymi lub kształtu służące do opisu rozkładu analizowanej wielkości w jego wnętrzu i na jego bokach. W zależności od rodzaju elementu skończonego węzły mogą znajdować się w jego wierzchołkach lub na jego bokach i we wnętrzu.

Ze względu na stopień jednorodności w procesie dyskretyzacji wyróżnia się siatki:

- regularne, w których siatka dyskretyzacji charakteryzuje się dużym stopniem jednorodności i dopasowywana jest do geometrii badanego obiektu,
- niejednorodne, w których siatka dyskretyzacji charakteryzuje się małym stopniem jednorodności i zagęszczana jest tylko miejscowo.

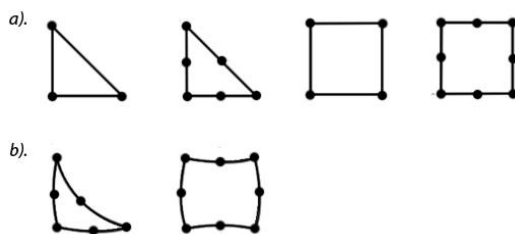
Ze względu na kryterium wymiaru i geometrii elementu w przestrzeni trójwymiarowej w procesie modelowania procesów obróbki plastycznej występują następujące rodzaje elementów skończonych:

- Jednowymiarowe, które występują w przestrzeni jednowymiarowej i praktycznie nie są wykorzystywane do symulacji procesów obróbki plastycznej (rys. 2.40).



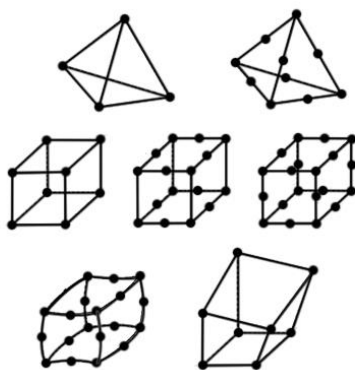
Rys. 2.40. Przykłady elementów skończonych jednowymiarowych: a) punktowy, b) liniowy

- Dwuwymiarowe- stosowane do opisu przestrzeni dwuwymiarowej w celu analizy płaskiego stanu naprężenia lub odkształcenia. Do elementów dwuwymiarowych zaliczane są elementy trójkątne i czworokątne, które przedstawiono na rysunku 2.41. Przestrzenne przemieszczenia węzłów należących do elementu skończonego opisywane są za pomocą funkcji liniowych lub wielomianów wyższych rzędów. Zastosowanie równań liniowych determinuje zapis liniowo zmieniających się wartości przemieszczeń, odkształceń i naprężeń w całym obszarze elementu, co niekorzystnie wpływa na dokładność procesu obliczeniowego. Dlatego też w symulacji procesów obróbki plastycznej stosuje się zapis wykorzystujący funkcje kwadratowe. Tego typu funkcje opisują przemieszczenia zmienne kwadratowo oraz odkształcenia i naprężenia zmienne liniowo.



Rys. 2.41. Przykłady dwuwymiarowych elementów skończonych o aproksymacji: a) liniowej, b) kwadratowej

- Trójwymiarowe zwane bryłowymi wykorzystuje się w analizie modeli przestrzennych. Mają one trzy stopnie swobody w każdym węźle. Do rodzaju elementów trójwymiarowych zaliczane są elementy czworosienne i prostopadłosienne (rys. 2.42).



Rys. 2.42. Przykłady trójwymiarowe elementów skończonych

Kolejnym kryterium podziału elementów skończonych w procesach komputerowej analizy plastycznego kształtowania metali jest kryterium liczby węzłów opisujących element skończony.

Ze względu na sposób rozmieszczenia węzłów wyróżnia się następujące elementy skończone:

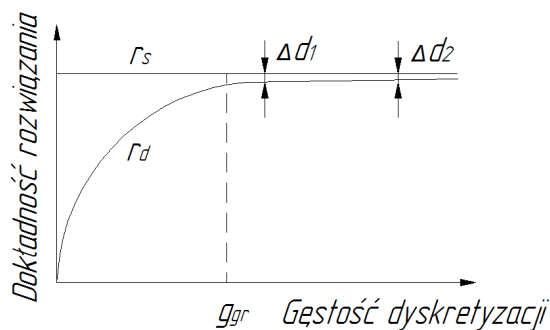
- pierwszego rzędu, w których węzły znajdują się tylko w narożach elementu,
- drugiego rzędu, w których węzły umieszczone są w narożach i na środkach krawędzi elementów,
- trzeciego rzędu, w których węzły znajdują się w narożach, na krawędziach elementu oraz jego środku,
- wyższych rzędów, w których rząd elementu jest zawsze równy rzędowi funkcji interpolacyjnych, czyli funkcji kształtu.

Niezbędnym warunkiem otrzymania prawidłowych wyników obliczeń numerycznych jest dobranie funkcji dostatecznie odwzorowującej rzeczywisty kształt elementu. Stosowanie wielomianów, których stopień jest wyższy od trzeciego pozwala z reguły zwiększyć tylko w niewielkim stopniu dokładność wyników i dodatkowo jest bardzo czasochłonne.

Zmniejszenie wymiarów elementów skończonych prowadzi do zwiększania liczby poszukiwanych funkcji węzłowych, co również powoduje wydłużenie czasu obliczeń. Rozwiązanie tego problemu spotykanym w literaturze [73, 74, 94] to zagęszczenie siatki w miejscach gdzie poszukiwana funkcja zmienia się gwałtownie oraz rozrzedzenie siatki elementów tam gdzie funkcja zmienia się łagodnie. Istotnym zagadnieniem dyskretyzacji badanych węzłów tarcia poddawanych odkształceniom plastycznym jest możliwość odbudowy siatki (z ang. remeshing). Polega ono na modyfikowaniu przez moduł solvera siatki na podstawie zewnętrznego jej zarysu zdeformowanej geometrii. Jeżeli odkształcenie plastyczne modelu jest tak duże, że jakość odkształconych elementów nie pozwala na kontynuowanie analizy, solver ustala nową siatkę o poprawionej geometrii na odkształconym już modelu dyskretnym a następnie na tę siatkę nakłada nowo obliczone wartości. Realizacja symulacji numerycznej w badaniach odkształcanych plastycznie węzłów tarcia wymaga doboru odpowiednich warunków brzegowych, mających istotny wpływ na wyniki końcowe. Stąd też stale aktualnym problemem jest zagadnienie ustalania i przyjmowania odpowiednich warunków brzegowych odzwierciedlających warunki rzeczywiste w analizowanym procesie. Oznacza to, że warunkiem uzyskania poprawnych obliczeń MES jest, aby w fazie rozpoczęcia obliczeń prawidłowo określono ich dane wejściowe.

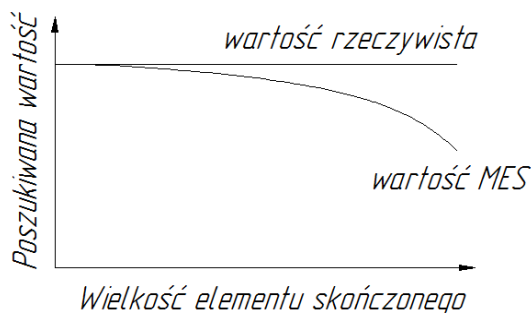
Każde obliczenie MES dotyczy rozpatrywanego modelu fizycznego znajdującego się w lokalnym lub globalnym układzie współrzędnych. Jest to obszar obliczeniowy zdefiniowany za pomocą równań różniczkowych cząstkowych. Każdy z rozpatrywanych elementów zdyskretyzowanych węzłów tarcia w przestrzennym obszarze obliczeniowym zawiera krawędzie i rozpatrywany jest, jako element skończony. Tribologiczny model bryłowy dzielony jest na podobszary o prostych kształtach [7, 34, 71].

Liczba funkcji kształtu w pojedynczym elemencie skończonym jest równa liczbie jego węzłów. Funkcje kształtu są zawsze tak opisane, aby w węzłach, których dotyczą, ich wartości wynosiły jeden, a w pozostałych węzłach przyjmowały wartość zero. Zwiększenie gęstości siatki powoduje wydłużenie czasu obliczeń i jednocześnie zwiększa dokładność przeprowadzanej symulacji. Dla większości analizowanych przypadków występuje pewien reprezentatywny stopień zagęszczenia siatki i jest on wystarczający do realizacji obliczeń. Z analizy literaturowej [73, 84] wynika, że nadmierne zwiększanie liczby elementów skończonych zwiększa czas obliczeń nie wpływając na ich dokładność (rys. 2.43).



Rys. 2.43. Wpływ gęstości siatki na dokładność obliczeń MES [73]

Dokładność rozwiązania symulacji procesu zależy przede wszystkim od dokładności aproksymacji wielkości fizycznych wewnątrz elementu za pomocą funkcji interpolacyjnych nazywanych funkcjami kształtu oraz wielkości elementu skończonego (rys.2.44).



Rys. 2.44. Zależność dokładności obliczeń od wielkości elementu skończonego [73]

Z pojedynczych funkcji kształtu budowane są funkcje bazowe dla większych obszarów obliczeniowych. Rozwiązanie przy wykorzystaniu modułu solvera MES jest kombinacją liniową funkcji bazowych. Zbiór wszystkich kombinacji funkcji bazowych stanowi zbiór wszystkich możliwych rozwiązań analizowanego problemu. Dla tego zbioru i funkcji bazowych wykonywane są obliczenia dla dowolnego punktu z rozpatrywanej przestrzeni. Dzięki dyskretyzacji modelu ciągłego na model siatkowy możliwe jest uzyskiwanie wyników dla dowolnych węzłów z badanego obszaru. W ten sposób tworzone są macierze układu równań liniowych zwanych macierzami sztywności. Dzięki funkcjom bazowym większość wartości w macierzy to zera. Biorąc pod uwagę, że moduł solvera MES nie oblicza wartości zerowych to rozwiązanie macierzy funkcji liniowych może przebiegać z dużą prędkością [6, 15, 32].

2.5.3. Przyczyny błędów i różnic w odwzorowaniu rzeczywistości w symulacji numerycznej procesów plastycznego kształtowania metali

Wyniki symulacji procesów kształtowania metali przeprowadzonych za pomocą MES opisują zachowanie się układu w przestrzeni w sposób przybliżony i zawsze obarczone są pewnym błędem. Istnieje wiele przyczyn powstawania końcowego błędu rozwiązania i jego wielkości. Końcowy wynik obarczony błędem obliczeń jest algebraiczną sumą poszczególnych błędów składowych. Do głównych przyczyn niedokładności obliczeń MES można zaliczyć [8, 43]:

- pominięcie lub nieprawidłowe określenie właściwości materiałowych modeli,
- niewłaściwie dobrany rodzaj solvera dla rozpatrywanego zjawiska,
- nieprawidłowo dobrane uproszczenia dotyczące rzeczywistych zjawisk fizycznych węzłów tarcia,
- zbyt małą dokładność odwzorowania geometrii obszarów styku oraz istotnych jej szczegółów (np. chropowatości i falistości powierzchni),
- zbyt małą gęstość dyskretyzacji modeli tribologicznych oraz niewłaściwy rodzaj i typ elementów skończonych,
- zbyt dużą wartość kroku próbkowania analizy kontaktu węzła tarcia,
- brak weryfikacji doświadczalnej dla przyjętych modeli oraz założonych warunków brzegowych.

Wymienione przyczyny generują następujące błędy składowe:

Niedokładność modelowania (zastosowany model matematyczny nie odzwierciedla dokładnie rzeczywistości)- polega na nie w pełni dokładnym odwzorowaniu obszaru obliczeniowego a co za tym idzie nie odpowiada dokładnie rzeczywistemu obszarowi zajmowanemu przez analizowany obiekt. Błąd modelowy w układach tribologicznych dotyczy uproszczeń generowania warstw wierzchnich, które jako rzeczywiste zapisywane i analizowane są, jako warstwy nominalne. Własności i charakterystyka współpracujących powierzchni modeli w analizie numerycznej uwzględniana jest przez współczynnik tarcia. Zawierające błędy kształtu powierzchnie zewnętrzne modeli rzeczywistych zapisywane są matematycznie, jako powierzchnie idealnie płaskie. Przy takim uproszczeniu nie są też brane pod uwagę zaadsorbowane cząstki środowiska i tlenki metali znajdujące się na powierzchniach współpracujących materiałów. Komputerowe modele węzła tarcia posiadają z reguły charakter izotropowy natomiast większość metali posiada anizotropię struktury, co może być powodem niedokładności modelowania.

Odchylenie wartości współczynników wynika z rozbieżności pomiędzy określonymi warunkami brzegowymi a przyjętymi na jej podstawie wartościami współczynników równań różniczkowych cząstkowych.

Niedokładności tym powodowane powstają w fazie przygotowania danych do rozwiązywanego problemu. Wprowadzane w ten sposób dane dotyczą interakcji badanego układu z otoczeniem zewnętrznym, czego wynikiem może być powstanie błędów systematycznych. Mogą dotyczyć one np. nieprawidłowo dobranych modułów (np. E, G, V) z baz materiałowych programów CAE. Niewłaściwie dobrane współczynniki sztywności i modeli tarcia bezpośrednio wpływają na błędny charakter nieliniowości rozpatrywanego układu tribologicznego. Od rodzaju sztywności układu zależą przemieszczenia poszczególnych obiektów w przestrzeni pracy. Związane jest to z deformacją siatki w poszczególnych krokach iteracyjnych, adaptacją funkcji kształtu jak również z końcowym efektem rozwiązania.

Niedokładność odwzorowania obszaru polega na nieprawidłowym odwzorowaniu obszaru obliczeniowego, który nie odpowiada rzeczywistemu obszarowi zajmowanemu przez analizowany model tribologiczny. Błąd odwzorowania obszaru może być wynikiem nie tylko błędnego wprowadzenia geometrii danych wejściowych przy definicji problemu, ale również jego przyczyną może być błędne generowanie siatki MES. Zbyt duże wielkości elementów skończonych powodują rozbicie geometrii linii krzywoliniowych na łamane. Tego typu uproszczenia odwzorowania obszarów modeli powodują nakładające się błędy obliczeń wynikające z wielokrotnych przybliżeń przetwarzanych wartości szczególnie dla metod iteracyjnych. Dla modeli składających się np. z kilkuset tysięcy elementów i posiadających charakter nieliniowy upraszczanie ich geometrii powoduje kumulowanie się błędów obliczeniowych. Istotną przyczyną powstawania tego rodzaju błędów mogą być również uproszczenia dotyczące nadawania i odbierania stopni swobody węzłom w elementach dla poszczególnych krawędzi i powierzchni.

Niedokładność numeryczna dotyczy powstania błędu obliczeń MES w stosunku do rozwiązania dokładnego w wyniku zastosowania metody aproksymacji. MES, jako metoda aproksymacji, w zdecydowanej większości zastosowań związana jest z błędami numerycznymi. Błąd numeryczny rozumiany jest, jako różnica pomiędzy dokładnym rozwiązaniem równania różniczkowego cząstkowego i przybliżonym rozwiązaniem MES. Istotna jest również wielkość różnicy pomiędzy błędami badań numerycznych i doświadczalnych. Zbyt duża rozbieżność pomiędzy wynikami rzeczywistymi a wynikami MES wymusza zastosowanie automatycznego lub manualnego procesu adaptacyjnego polegającego na cyklicznej modyfikacji siatki i związanej z nią funkcji kształtu. Zdecydowana większość programów typu CAE zawiera wbudowane mechanizmy adaptacji. Wykorzystanie systemów adaptacji polega na roboczym rozwiązaniu zadania, obliczeniu popełnionego błędu numerycznego, a następnie modyfikacji procesu i ponownym jego rozwiązaniu.

Przybliżenie zaokrągleń jest charakterystyczne dla komputerowej realizacji algorytmów MES i dotyczy zastosowania przybliżonych dokładności reprezentacji liczb w procesie obliczeniowym. Błąd tego typu jest wynikiem niedokładności zastosowanych metod analizy i najczęściej dotyczy błędu aproksymacji funkcji. Związany jest on z zaokrągleniami i ogólnie przyjętą precyzją obliczeń. W mniejszym lub większym stopniu dotyczy on wszystkich solverów i jest on niezależny od zastosowanej metody analizy, przez co uzyskane rozwiązanie obciążone jest błędem zaokrąglenia względem rozwiązania rzeczywistego. Uniknięcie błędów zaokrągleń związane jest z umiejętnie dobraną geometrią, jej dyskretyzacją oraz odpowiednio dobranym algorytmem solvera, co istotnie przekłada się na dokładność wyników końcowych. Z powyższych rozważań wynika, że otrzymane rozwiązania za pomocą systemów CEA nie powinny być końcem procedury badania problemu. Po uzyskaniu rozwiązania numerycznego badane układy tribologiczne powinny być poddane procesowi estymacji błędów i walidacji modeli np. za pomocą badań odwrotnych. Wówczas wyniki badanych procesów analizy CAE uznaje się za poprawne a dotyczące ich błędy za pomijalnie małe [34, 36, 89].

2.6. Podsumowanie przeglądu literatury

Na podstawie przeprowadzonych studiów literaturowych dotyczących wykorzystania MES w modelowaniu procesów tribologicznych w warunkach kształtowania plastycznego metali określono wnioski i zdefiniowano zadania dotyczące realizacji podjętego tematu:

- Metoda Elementów Skończonych jest wykorzystywana do analizy różnorodnych procesów wytwórczych, do których między innymi zaliczane są procesy obróbki plastycznej.
- Analizując dane literaturowe opisujące wykorzystanie symulacji komputerowych w odniesieniu do procesów kształtowania metali można stwierdzić, że istnieje duża różnorodność prowadzonych badań i wykorzystania modeli opisujących opory tarcia [2, 14, 38, 42, 44, 54].
- W zakresie wykorzystania MES w dziedzinie obróbki plastycznej a w szczególności procesu wytłaczania blach jeszcze nie w pełni określone są dane dotyczące badań oporów tarcia.
- Złożoność procesów obróbki plastycznej a w szczególności procesu wytłaczania wymaga uwzględnienia i dopasowania określonych warunków brzegowych do procesów obliczeniowych. W związku ze złożonością zjawisk występujących w procesach wytłaczania celowe jest wykorzystanie badań doświadczalnych dla korekty i uzyskania odpowiednich danych dla przyjmowanych określonych parametrów symulacji numerycznych MES.

- Dla uzyskania wytycznych i właściwego doboru warunków brzegowych możliwe jest wykorzystanie badań odwrotnych. Symulacje numeryczne wykorzystujące MES i badania odwrotne umożliwiają osiągnięcie wyników, których uzyskanie w sposób analityczny byłoby wyjątkowo trudne lub wręcz niemożliwe.
- Zastosowanie badań współbieżnych rozumianych, jako badania równoległe MES i badań laboratoryjnych związane jest z doбором określonego modelu tribologicznego i tribometru, umożliwiającego przeprowadzenie badań laboratoryjnych ocenianego węzła tarcia. Odształcenia plastyczne materiału w procesach wytłaczania oraz charakter zachodzących zmian związane są ze specyfiką oddziaływania oporów tarcia układów matryca-materiał odształcany i stempel - materiał odształcany.
- Odształcenia plastyczne na przekroju wytłaczanej blachy związane z parametrami procesu i współpracą z narzędziami wymagają ich potwierdzenia, co do zmian własności warstwy wierzchniej np. za pomocą badań twardości lub chropowatości. Realizacja symulacji MES kształtowania wyrobów jest zdeterminowana doбором odpowiednich parametrów procesu, do których zalicza się parametry materiałowe [8, 15, 24, 40, 74].
- Na podstawie przeanalizowanych prac można zauważyć, że opory tarcia występujące w procesach kształtowania plastycznego metali mają istotny wpływ na kinematykę płynięcia odształcanego materiału co w głównej mierze wpływa na efekty końcowe procesu [9, 19, 27, 61, 98].
- W literaturze przedmiotu pojawia się wiele prac przedstawiających wyniki badań dotyczących zjawiska tarcia dla określonych procesów badawczych. Rzadziej spotyka się w literaturze badania oporów tarcia dotyczące jednocześnie analizy wpływu oporów tarcia na przebieg procesu wytłaczania z uwzględnieniem charakteru odształceń plastycznych materiału blach. W opisywanych badaniach tribologicznych wykorzystujących MES występują znaczne różnice w wynikach procesów symulacji, co można tłumaczyć różnymi warunkami brzegowymi dobieranymi do poszczególnych analiz [27, 71, 87, 104].
- Przy analizie numerycznej procesów wytłaczania istnieje zależność między warunkami tarcia, a warunkami geometrycznymi, kinematycznymi i dynamicznymi w danym procesie technologicznym. Warunki te przy realizacji symulacji określone są, jako uproszczone i reprezentatywne dla procesu. Ich dobór związany jest jednak bardzo często z intuicją prowadzącego badania [5, 76, 105].
- Przy realizacji procesów odształceń plastycznych pomiędzy materiałami i narzędziami dominuje tarcie ślizgowe, natomiast rzeczywiste

powierzchnie styku materiał - narzędzie są rozpatrywane, jako nominalne [92, 99].

- Podczas odkształcania materiału opory tarcia w obszarze styku hamują swobodne płynięcie odkształcanego metalu, w wyniku, czego w objętości odkształcanego elementu można wyróżnić strefy o różnym stopniu odkształcenia [68, 72].
- Ze względu na złożoną rolę tarcia w procesach obróbki plastycznej można wykazać obszary, w których oddziaływanie sił tarcia ma charakter pozytywny i negatywny. Daje to możliwość zmniejszenia oporów tarcia tam, gdzie jego działanie jest niekorzystne i wykorzystanie pozytywnego wpływu tarcia w tych obszarach materiału, gdzie jest ono pożądane [4, 14, 25].
- Jakość uzyskanych wyników symulacji procesów tribologicznych zależy od warunków brzegowych procesu, geometrii badanego obszaru, jego sposobu dyskretyzacji, liczby i kształtu elementów skończonych oraz własności fizycznych badanego obiektu [29, 40, 56].
- Opisane i omówione w części literaturowej teoretyczne modele tarcia oraz warunki brzegowe rozpatrywane podczas analizy MES nie uwzględniają wszystkich parametrów i cech warstw wierzchnich materiałów, dlatego też wyniki badań numerycznych powinny być weryfikowane doświadczalnie. Związane jest to z koniecznością ustalenia wielkości, wpływu doboru i zadawanych warunków brzegowych na wyniki końcowe symulacji MES [40, 41, 49, 50].
- Najczęściej wykorzystywanym modelem tarcia podczas komputerowych analiz numerycznych jest rozbudowany model Coulomba natomiast w badaniach teoretycznych wykorzystywany jest model Amontonsa [50].
- Przy komputerowej analizie MES procesów odkształceń plastycznych stan geometrii powierzchni materiału, jej chropowatość uwzględniana jest za pomocą współczynnika tarcia, co nie zawsze pokrywa się z podejściem teoretycznym [20, 99].
- Analizowane materiały modeli badawczych wykorzystywanych w symulacjach komputerowych mają charakter izotropowy natomiast materiał rzeczywisty często ma charakter anizotropowy [28, 37]. Oznacza to, że badania twardości, chropowatości i struktury materiału przed i po procesie mogą być pomocne przy przyjmowaniu warunków brzegowych w obliczeniach numerycznych.
- MES umożliwia przeprowadzenie analiz systemów tribologicznych podczas odkształceń plastycznych materiałów przy niskich nakładach finansowych z możliwością szybkiego otrzymania wyników badań [64, 107].

- Uzyskanie wiarygodnych wyników analizy numerycznej obliczeń procesora (solvera) zależy od parametrów dyskretyzacji modelu. Zaleca się dobranie wartości bliskiej granicznej gęstości dyskretyzacji, co umożliwia uzyskanie poprawnych wyników przy możliwie najkrótszym czasie obliczeń [73, 83].
- Badania procesów wytłaczania w większości dotyczą parametrów procesów oraz oporów tarcia i są realizowane dla wyrobów o grubościach blach od 0,1÷2mm. Natomiast mniej jest badań dla materiałów o grubościach przekraczających grubość blachy 2mm. Problemem w tych zagadnieniach jest głębokość i rozkład wartości odkształceń według grubości blachy od strony matrycy i stempla. Związane jest to z wpływem i zmiennością występujących oporów tarcia.

Zastosowanie MES umożliwia obliczenie i wskazanie miejsc występowania gradientów naprężeń i odkształceń w układach materiał odkształcany - narzędzie sztywne. Niewiele prac w literaturze odwołuje się do analiz materiałowych np.: badań metalograficznych, badań chropowatości, badań twardości czy badań tribologicznych w powiązaniu z MES. Natomiast warunki materiałowe a w szczególności kontaktowe wpływają w istotny sposób na niepewność uzyskiwanych wyników symulacji komputerowych. Poznanie zależności pomiędzy wpływem wymienionych warunków traktowanych, jako warunki początkowe a odpowiedzią układu w postaci wyniku symulacji umożliwi dokładniejsze odwzorowanie rzeczywistych procesów badawczych. Spowoduje to również zmniejszenie błędów obliczeniowych mieszczących się w obszarze założonej dokładności obliczeń.

Rozwój dalszych badań teoretycznych jest jednym z istotnych czynników warunkujących realizację badań doświadczalnych i komputerowych w dziedzinie plastycznego kształtowania metali. Dlatego poszukiwane są metody i środki umożliwiające dokładniejsze modelowanie zjawisk w strefie styku materiałów. Duże znaczenie dla rozwoju Metody Elementów Skończonych będzie miało rozbudowanie i wdrożenie algorytmów zagadnień kontaktowych do programów symulacyjnych [30, 47, 48, 54, 59, 85, 103].

3. Oprogramowanie do symulacji numerycznych i oceny procesów obróbki plastycznej

3.1. Przegląd oprogramowania do symulacji numerycznych procesów obróbki plastycznej

Do opracowania modelu numerycznego oraz przeprowadzenia analiz numerycznych można wykorzystać wiele rodzajów oprogramowania inżynierskiego. Programy z grupy CAD/CAE wspomagają realizację procesów prototypowania i umożliwiają prawidłowe zdefiniowanie warunków brzegowych w obszarze materiału odkształcanego – narzędzie. Dlatego są to programy wykorzystywane w instytucjach naukowo badawczych i przemyśle do analizy i rozwiązywania złożonych problemów inżynierskich dotyczących zachowania się materiałów pod wpływem działania różnorodnych warunków otoczenia.

Wdrożenie oprogramowania MES w procesie wytwórczym daje korzyści w następujących obszarach:

- Pozwala na przyspieszenie czasu projektowania przedmiotu.
- Daje możliwość wykonania wizualizacji produktów.
- Przyspiesza wdrażanie produktu do produkcji.
- Zwiększa produktywność zakładu/przedsiębiorstwa.
- Umożliwia wdrożenie lub usprawnienie automatyzacji procesu produkcji.
- Usprawnia zarządzanie systemem produkcyjnym.
- Zwiększa ilość informacji dotyczących systemu produkcyjnego.
- Zwiększa moce produkcyjne firmy.
- Pomaga wyeliminować wąskie gardła produkcyjne.
- Skraca cykle jednostkowe i produkcyjne.
- Zmniejsza marnotrawstwo materiałów i surowców.
- Zmniejsza ilość odpadów produkcyjnych powstałych na skutek błędów procesowych.
- Redukuje ilość papierowej dokumentacji procesów produkcyjnych.

Opracowanie specjalnych procedur w badaniach symulacyjnych mających znaczący wpływ na proces badanego odkształcenia związane jest z doбором oprogramowania oraz solvera dobranego do badanego procesu badawczego. Charakterystykę wybranych programów symulacyjnych oraz ich solverów przedstawiono w tabeli 3.1.

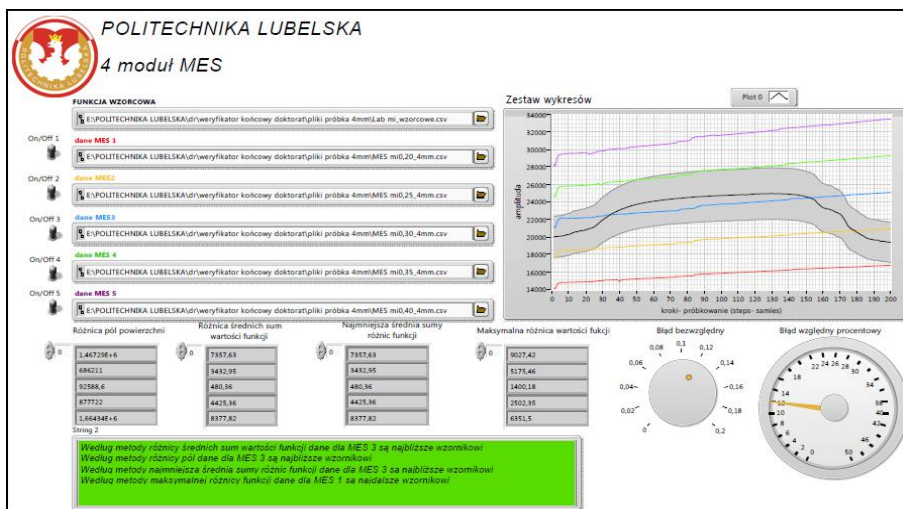
Tab. 3.1. Charakterystyka tabelaryczna wybranych programów MES.

Nazwa programu	Nazwa producenta	Wymagana platforma	Rodzaj wbudowanego solvera	Współpraca z innymi solverami
Abaqus	Simulia	Windows, Linux	iteracyjny	nie
ANSYS	Ansys	Windows, Linux, Unix, Solaris	PCG, AMG, DSPARSE, AUTODYN	tak
Algor	Autodesk	Windows, Linux	SPARSE, AMG ITER, SKYLINE,	tak
Inventor	Autodesk	Windows	B.D.	tak
Calculix	Open-source	Linux	Linear/nonlinear	tak
CATIA	Dassault Systemes	Windows, Linux	ELFINI, Lanczos	tak
Deform 3D	SFTC	Windows	CG solver	tak
Femap	Siemens	Windows, Linux	NX Nastran	tak
NASTRAN	EC Engineering	Windows, Linux	NEi Nastran Engin	tak
Patran	EC Engineering	Windows, Linux	Cgg	tak
SolidWorks	SolidWorks Corporation	Windows.	DSPARSE lub FFEPlus	tak
Z88	Frank Rieg and Team	Windows, Linux, MacOS, Unix	direkt Cholesky solver	tak

Zastosowanie odpowiednich solverów podczas obliczeń numerycznych pozwala na zalgorytmizowanie procedur obliczeniowych ściśle powiązanych z zachowaniem materiałów w warunkach rzeczywistych. Obliczenia parametrów symulacyjnych oparte są o zastosowanie solverów dedykowanych do grup materiałowych, zjawisk fizycznych jak również metod obliczeniowych. Przeprowadzenie symulacji i analiz numerycznych dla procesów kształtowania metali pozwala na uzyskanie informacji dotyczących zjawisk występujących na zmieniającej się powierzchni styku, rozkładu naprężeń i odkształceń próbki jak również zmian rozkładu nacisków w warstwie wierzchniej. Dlatego też dobór rodzaju solvera determinowany jest doborem oprogramowania CAD/CAE.

3.2. Aplikacja komputerowa do porównania wyników laboratoryjnych i symulacyjnych

Dobór warunków początkowych dla analizy MES odnoszącej się do obliczeń symulacyjnych zjawisk tribologicznych związany jest z ustaleniem i przyjęciem reprezentatywnych parametrów procesu. Parametry te jak również warunki brzegowe dobierane są zazwyczaj na podstawie wstępnych obliczeń i doświadczeń osoby prowadzącej badanie. Z przeprowadzonych analiz literaturowych [16, 35, 50] wynika, że poszczególne parametry analizy numerycznej charakteryzują się zróżnicowanymi czułościami pomiarowymi, które mają różnorodny wpływ na wyniki postprocesora. W ten sposób zrealizowane badania numeryczne mają charakter parametryczny, co powoduje uzyskiwanie różnorodnych wyników pomimo poprawnie wykonanych obliczeń solvera. Aby określić wpływ parametrów brzegowych i ich wpływ na końcowe rozwiązanie badanego procesu autor pracy opracował matematyczny algorytm oraz wykonał aplikację komputerową – 4 moduł MES. Program służy do oceny możliwości wykorzystania MES do badania zjawisk tribologicznych oraz daje możliwość rozpatrywania badanego zjawiska w systemie całościowym z możliwością skutecznego i elastycznego reagowania na zmienność czynników badawczych. Matematyczna analiza sformułowania problemu pozwala na uzyskanie odpowiedzi na pytanie – jak wrażliwy jest badany model na zmiany zadanych parametrów i w jaki sposób zmiany parametrów wpływają na zmianę rozwiązania końcowego. Widok panelu frontowego programu wraz z przykładowymi danymi analizy MES został pokazany na rysunku 3.1.



Rys. 3.1. Widok panelu frontowego programu- 4 moduł MES

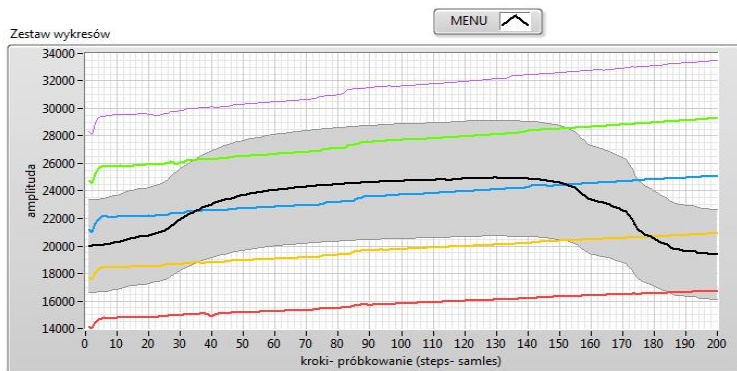
Opracowany program komputerowy pozwalający na interpretację zachowań badanego modelu tribologicznego posiada następujące funkcje:

- **Funkcja kryterialna** - Opracowany program jest programem typu CAS (z ang. Computer Algebra System) - wykonuje on operacje na zbiorach danych tabelarycznych zapisanych w postaci plików *.CSV Excel, co jest kompatybilne z zapisem danych dla różnych programów MES z uwzględnieniem programu Deform 3D. Pięć ścieżek dostępu dla danych pomiarowych pozwala na wczytanie pięciu plików dla różnie ustalonych parametrów początkowych (rys. 3.2). Pozwala to na praktyczne zastosowanie programu do analizy i weryfikacji uzyskiwanych danych pomiarowych dla analiz numerycznych.



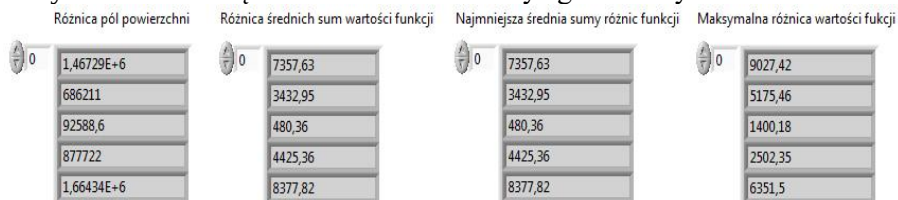
Rys. 3.2. Kontrolki dla ścieżek dostępu dla pliku z wynikami wzorcowymi i plików z wynikami badań numerycznych

- **Funkcja demonstracyjna** – ułatwia zrozumienie mechanizmu działania badanego modelu obliczeniowego, co sprzyja formułowaniu trafnych i wiarygodnych wniosków, dzięki czemu wyjaśniona jest istota analizowanego problemu (rys. 3.3).



Rys. 3.3. Wyświetlacz wykresów wczytanych funkcji

- **Funkcja obliczeniowa** dotyczy wykonania obliczeń dla procesów badawczych i pozwala na określenie wpływu czułości zmian warunków brzegowych na rezultat końcowy. Program komputerowy uwzględnia odcięcie zerowych wyników sił tarcia z początkowych indeksów macierzy przechowującej dane pomiarowe, dzięki czemu proces niwelowania luzów w tribotesterze nie jest brany pod uwagę podczas analizy porównawczej. Pozwala to na późniejszą analizę charakterystyk badanych wielkości bez występowania przesunięć czasowych. Algorytm funkcji sprawdza zawartość wczytanych macierzy (pliki excela) względem występowania zer w ich początkowych wierszach. Znalezione wartości równe zero są usuwane natomiast wartości różne od zera są ustawiane na ich pozycjach. Tego typu operacje matematyczne pozwalają na pominięcie początkowych etapów badanych procesów gdzie usuwane były luzy konstrukcyjne urządzenia. Wyniki obliczeń są zestawiane do macierzy zgodnie z rysunkiem 3.4.



Rys. 3.4. Zestawienie macierzy dla czterech metod obliczeniowych

Algorytm działania programu - (załącznik nr 1) oparty jest na następujących pięciu metodach obliczeniowych:

Metoda 1: Różnica pól powierzchni:

Metoda ta polega na obliczeniu pola pod wykresem funkcji wzorcowej – $f_w(x)$ oraz pól pod wykresami funkcji: $f_1(x)$, $f_2(x)$, $f_3(x)$, $f_4(x)$, $f_5(x)$, na przedziale $(1; n)$. Idea tej metody oparta jest na minimalizowaniu różnicy między polami pod wyżej wymienionymi wykresami czyli funkcji wzorcowej $f_w(x)$ i funkcji $f_j(x)$, dla $j = 1, 2, 3, 4, 5$. Do obliczenia różnicy pól pod wykresami funkcji została użyta metoda całkowania Simpsona na przedziale $(1; n)$ co można opisać wzorami (22 i 23):

$$\begin{aligned}
 g_1(x, \Theta) &= f_1(x) \\
 g_2(x, \Theta) &= f_2(x) \\
 g_3(x, \Theta) &= f_3(x) \quad \text{dla } \Theta = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (22) \\
 g_4(x, \Theta) &= f_4(x) \\
 g_5(x, \Theta) &= f_5(x)
 \end{aligned}$$

$$I_{1j} = \int_{t_0}^{t_n} |f_w(x) - f_j(x)| dx \quad \text{gdzie: } j=1,2,3,4,5 \quad (23)$$

Metoda 2: Maksymalna różnica średnich sum wartości funkcji:

Metoda ta polega na minimalizowaniu różnicy między średnimi wartościami funkcji wzorcowej (24) i średnimi wartościami pięciu funkcji powstałych z pomiarów (25).

$$\hat{S}_w = \frac{\sum_{i=1}^n f_w(x_i)}{n} \quad (24)$$

$$\hat{S}_j = \frac{\sum_{i=1}^n f_j(x_i)}{n} \quad \text{gdzie: } j=1,2,3,4,5 \quad (25)$$

Zatem maksymalna różnica średnich sum wartości funkcji wyrażona jest wzorem (26):

$$I_{2j} = \max_{i \in \{1,2,3,4,5\}} |\hat{S}_w - \hat{S}_j| \quad (26)$$

Metoda 3: Najmniejsza średnia sumy różnic funkcji:

Metoda ta polega na minimalizowaniu średniej sumy obliczonej z różnicy funkcji: wzorcowej $f_w(x)$ i $f_j(x_i)$ dla $i=1 \div n$. Metodę najmniejszej średniej sumy różnic funkcji określa wzór (27):

$$I_{3j} = \min_{i \in \{1,2,3,4,5\}} \frac{\sum_{i=1}^n |f_w(x_i) - f_j(x_i)|}{n} \quad \text{dla } i=1 \div n \quad (27)$$

Metoda 4: Maksymalna różnica wartości funkcji:

Metoda ta polega na wyeliminowaniu tych charakterystyk, które posiadają największe różnice wartości funkcji dla zrealizowanych pomiarów. Podczas obliczeń sprawdzane jest – której funkcji wartości najbardziej odbiegają od funkcji wzorcowej. Obliczenia te przeprowadzane są dla każdej z pięciu grup danych pomiarowych zgodnie ze wzorem (28).

$$I_{4j} = \max_{i \in \{1,2,3,4,5\}} |f_w(x_i) - f_j(x_i)| \quad (28)$$

Dla punktów $1 \div n$ obliczane są różnice wartości pięciu funkcji i umieszczane w macierzy 1×5 . W ten sposób w macierzy znajduje się pięć wartości będących różnicami wartości funkcji wzorcowej i analizowanej.

Po wykonaniu działań i zapełnieniu macierzy wybierana jest z niej wartość maksymalna. W ten sposób uzyskiwana jest informacja o najbardziej oddalonych wartościach funkcji od funkcji wzorcowej.

Metoda 5: Metoda tuby błędów pomiarowych:

Metoda ta polega na określeniu przedziału, w którym zawierałyby się prawie wszystkie wartości funkcji powstałej z pomiarów. Środkiem tego przedziału jest funkcja wzorcowa a konkretniej jej wartości, które liczone są w punktach $1 \div n$. Dzięki tej metodzie możliwe jest określenie i dopasowanie błędu procentowego, jaki popełniany jest dla każdej z pięciu funkcji. Tubę błędów pomiarowych można opisać wzorami (29 i 30):

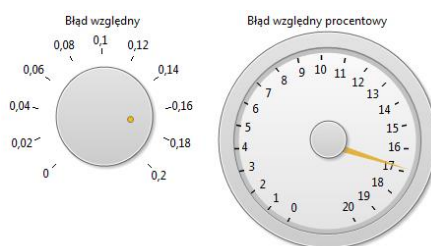
$$I_{5j} = f_i(x_i) \quad (29)$$

$$I_i(x_i) \in (f_w(x_i) - r_{100\%}; f_w(x_i) + r_{100\%}) \quad (30)$$

Matematyczny opis charakterystyk w postaci graficznej pozwala oszacować jak duży jest błąd bezwzględny pomiędzy funkcją wzorcową a uzyskanymi funkcjami z analizy MES oraz w jaki sposób można go zmniejszyć.

■ Funkcja pomiaru błędu względnego:

Wykorzystując w obliczeniach metodę "tuby pomiarowej" program pozwala uzyskać informacje czy dane obarczone pewnym błędem wynikłym z założeń upraszczających mogą być reprezentatywne oraz czy rozwiązanie MES wystarczająco dokładnie opisuje badane zjawisko. Użytkownik za pomocą pokrętła (rys. 3.5) może określić błąd względny, który będzie obliczany z górną i dolną odchyłką dla funkcji wzorcowej. Funkcja wzorcowa z odchyleniem górnym i dolnym jest wyświetlana, jako tuba pomiarowa. Obserwacja przebiegu charakterystyk uzyskanych za pomocą badań numerycznych dla różnorodnych wartości warunku brzegowego daje możliwość określenia, które z otrzymanych charakterystyk mieszczą się w przyjętych granicach błędu względnego.



Rys. 3.5. Pokrętło błędu względnego oraz wyświetlacz błędu względnego procentowego

- **Funkcja informacyjna** programu pozwala określić za pomocą pięciu metod obliczeniowych, które wartości wyników badań symulacyjnych są najbliższe a które najdalsze względem wyników wzorcowych. Sprawdzanie wyników odbywa się przez funkcję przeszukiwania macierzy jednowymiarowych oraz wskazanie najbardziej zbliżonych i oddalonych względem funkcji wzorcowej indeksów. Numery wyszukanych indeksów sterują instrukcją wielokrotnego wyboru typu case (z ang. przypadek), która przekazuje na wyświetlacz (rys. 3.6) informację rezultatach obliczeń.

*Według metody różnicy średnich sum wartości funkcji dane dla MES 3 są najbliższe wzorcowi
 Według metody różnicy pól dane dla MES 3 są najbliższe wzorcowi
 Według metody najmniejsza średnia sumy różnic funkcji dane dla MES 3 są najbliższe wzorcowi
 Według metody maksymalnej różnicy funkcji dane dla MES 1 są najdalsze wzorcowi*

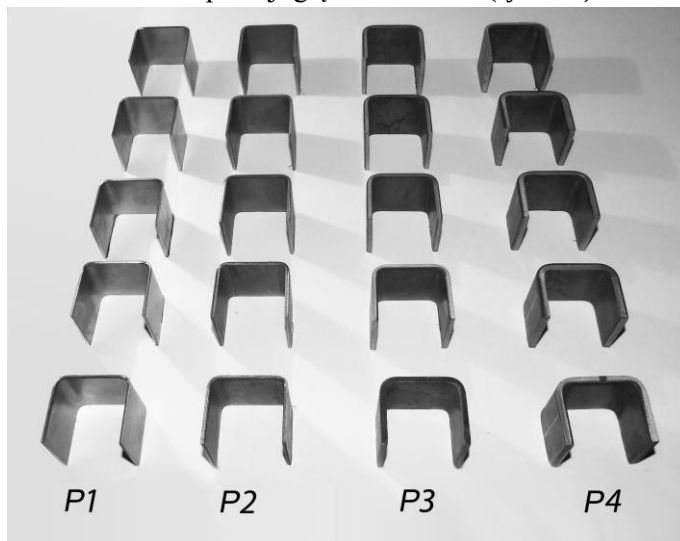
Rys. 3.6. Wyświetlacz programu z przykładowym zestawem wyników obliczeń

Biorąc pod uwagę fakt, iż matematyczna analiza modelu generuje wyniki badawcze na wysokim poziomie wiarygodności program może służyć, jako narzędzie badawcze do sprawdzania wcześniej postawionych hipotez- np. dla badań odwrotnych. Pozwala on na prognozowanie efektów wyników badań, trudnych do uzyskania przy alternatywnych metodach badawczych. Prognozowanie przyszłych stanów badanych modeli oraz ich weryfikacja określa słuszność przyjętych zakresów zmian. Opracowany program może być traktowany, jako czwarty moduł MES oraz może być wykorzystywany do szybkiego zbierania informacji dotyczących czułości ustalanych parametrów i warunków brzegowych symulacji i ich wpływu na wyniki końcowe analizy.

4. Wykorzystanie metod komputerowych i laboratoryjnych w badaniach zjawisk kontaktowych

4.1. Materiał do badań

Badania laboratoryjne procesu tarcia podczas prób odkształcenia na zimno w procesie PMW przeprowadzono na próbkach kształtowych w postaci odcinków ceowników o grubości 1,5mm, 2mm, 3mm i 4mm wykonanych z blach ze stali konstrukcyjnej S235JR (dotychczasowe oznaczenie St4) otrzymanych z procesu przemysłowego - tab.4.1. Próbkę kształtową o długości 30mm wykonano z blach w operacji gięcia na zimno (rys. 4.1).



Rys. 4.1. Próbkę kształtową do prób modelowego wytłaczania na zimno wykonane z blach o grubości: P1 – 1,5mm, P2 – 2mm, P3 – 3mm, P4 – 4mm

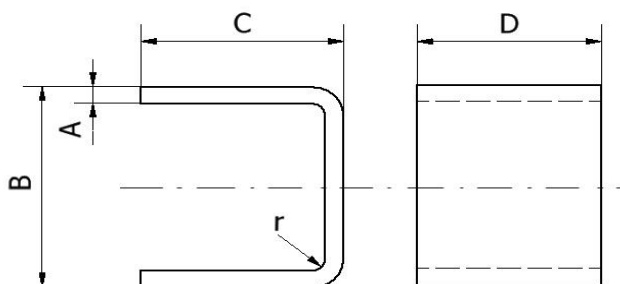
Skład chemiczny materiału blach przedstawiono w tabeli 4.1.

Tab. 4.1. Skład chemiczny stali konstrukcyjnej S235JR według PN-EN10025:2002

Oznaczenie stali	Stężenie pierwiastków %wag						
	C	Si	Mn	P	S	N	Cu
StalS235 JR	0,17	–	1,4	0,045	0,065	0,009	0,1

Dla usunięcia skutków odkształcenia plastycznego powstałego podczas operacji gięcia na zimno próbki kształtowe wyżarzono rekrystalizująco w temperaturze 650°C w czasie jednej godziny. Tak przygotowane ceowniki stanowiły próbki kształtowe do badań procesu tarcia w warunkach PMW na

zimno. Kształt i wymiary próbek do badań procesu tarcia przedstawiono na rysunku 4.2 i w tabeli 4.2.

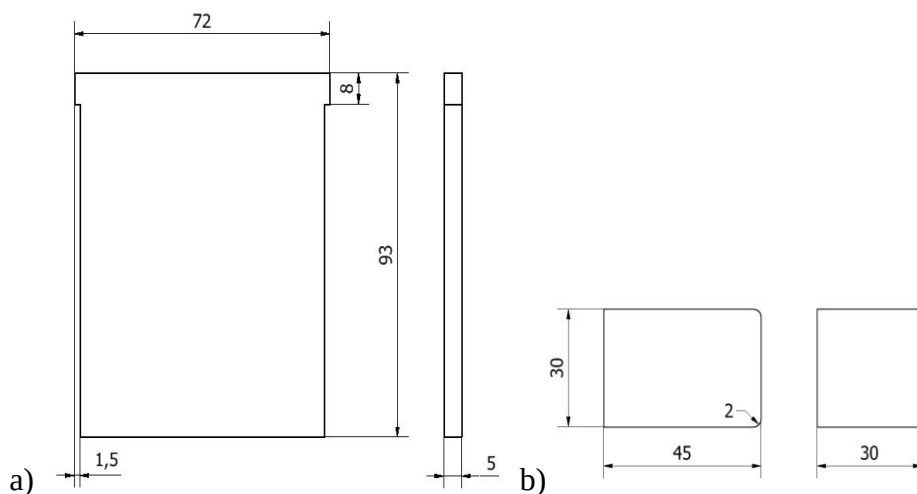


Rys. 4.2. Kształt i oznaczenia wymiarów próbek do badań laboratoryjnych PMW

Tab. 4.2. Oznaczenia i wymiary próbek kształtowych do prób PMW na zimno

Oznaczenie próbki kształtowych	Wymiary próbki ceowej [mm]				
	A	B	C	D	r
P1	1,5	33	31,5	30	2
P2	2	34	32	30	2
P3	3	36	33	30	2
P4	4	38	34	30	2

W urządzeniu, w którym przeprowadzono operację PMW z pomiarem siły tarcia, przeciwpróbkę stanowiło kowadło górne i dolne a elementem przemieszczającym próbkę kształtową w tej operacji był trzpień (rys. 4.3).



Rys. 4.1. Kształt i wymiary: a) przeciwpróbki górnej i dolnej, b) trzpienia

Przeciwpróbkę górną i dolną oraz trzpień wykonano ze stali do ulepszenia cieplnego gatunku 41Cr4 (nr 1.7035) stosowanej w przemyśle na części maszyn silnie obciążane tj.: wały, korbowody, tuleje, tarcze ściernie, stemple oraz korpusy przyrządów. Skład chemiczny materiału zastosowanego na narzędzia przedstawiono w tabeli 4.3.

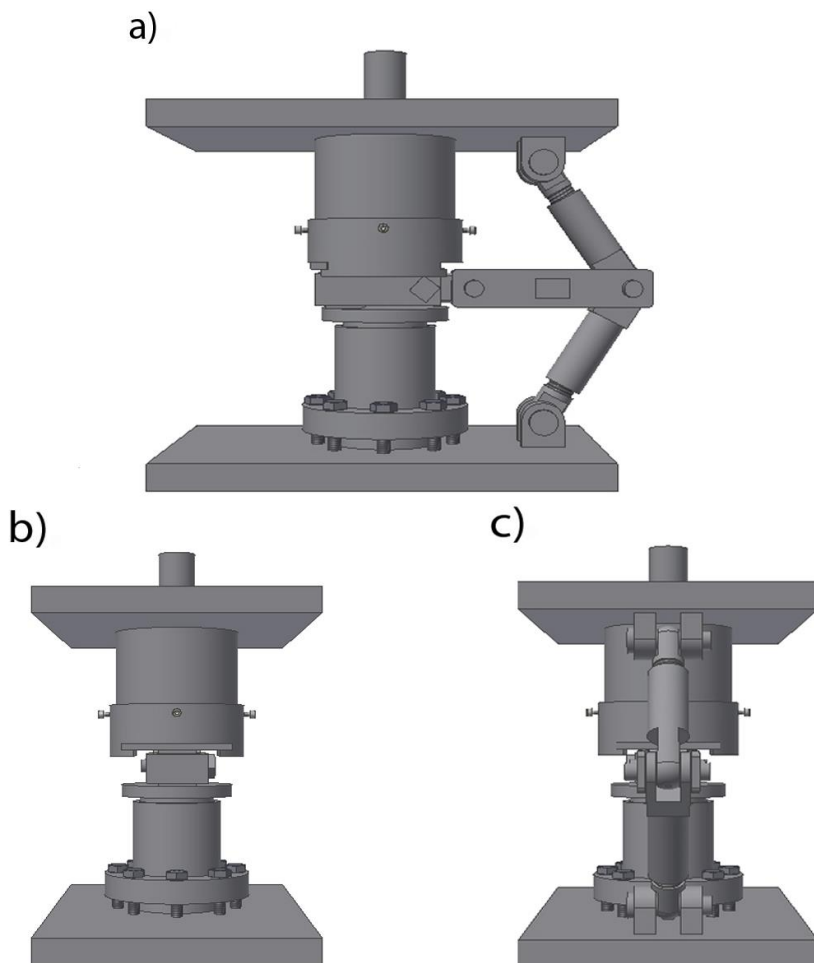
Tab. 4.3. Skład chemiczny stali 41Cr4 do ulepszenia cieplnego według PN-EN 10083-1,2,3:2003

Oznaczenie stali	Stężenie pierwiastków %wag										
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	W	V	Cu
41Cr4	0,36-0,45	0,5-0,9	0,1- 0,3	maks 0,035	maks 0,035	0,8-1,2	maks 0,3	maks 0,1	maks 0,2	maks 0,05	maks 0,25

Przeciwpróbki wykonano z blachy o grubości 8mm a trzpień z wałka o średnicy $\phi 45\text{mm}$ w stanie znormalizowanym dostarczonych zgodnie z PN. Dla zapewnienia wysokiej twardości w PMW narzędzia typu płyta dolna, płyta górna i trzpień poddano hartowaniu w oleju z temperatury 850°C i odpuszczaniu w temperaturze 200°C . Po obróbce cieplnej narzędzia szlifowano na obrabiarce do płaszczyzn – SPC 20a.

4.2. Symulacja numeryczna tarcia ślizgowego w procesie modelowego wytłaczania w programach Deform 3D i Abaqus

Modele przestrzenne próbek i narzędzi zostały złożone w taki sposób, aby tworzyły wirtualne odzwierciedlenie stanu rzeczywistego stanowiska badawczego. Podobieństwo między zestawem modelowym obiektów a rzeczywistym układem tribologicznym przejawia się w podobieństwie ich budowy oraz odpowiada reakcjom na zewnętrzne oddziaływania i wymuszenia. Zmodelowane urządzenie (rys. 4.4) umożliwia badanie procesów tarcia w warunkach zbliżonych do panujących w urządzeniu laboratoryjnym. Zapewnia ono możliwość prowadzenia badań i analizy procesu w warunkach nacisku normalnego i przesuwania materiału po narzędziu.



Rys. 4.2. Widok perspektywiczny wirtualnego stanowiska badawczego do badania tarcia ślizgowego w warunkach odkształceń plastycznych: a) widok z przodu, b) widok z lewej, c) widok z prawej strony

Przeprowadzenie analiz numerycznych dla badanych węzłów tarcia nie wymagało zastosowania całego stanowiska badawczego lecz tylko elementów biorących bezpośrednio udział w procesie tarcia próbek i narzędzi. Celem przyjętych uproszczeń było zmniejszenie liczby niezbędnych obliczeń wykonywanych przez moduł procesora. Występowanie podobieństwa strukturalnego obiektów jest konieczne do zachowania podobieństwa funkcjonalnego zespołu badawczego, dzięki czemu możliwa jest realizacja procesu badawczego z wysoką wiarygodnością otrzymywanych wyników.

W dziedzinie badań symulacyjnych jest to zalecane i w pełni uzasadnione, co zostało opisane w części teoretycznej niniejszej pracy.

Kształty i wymiary modelowych próbek oraz narzędzi przygotowanych do procesu symulacji odpowiadają kształtom i wymiarom zastosowanych w badaniach eksperymentalnych – zgodnie z założeniami badań równoległych.

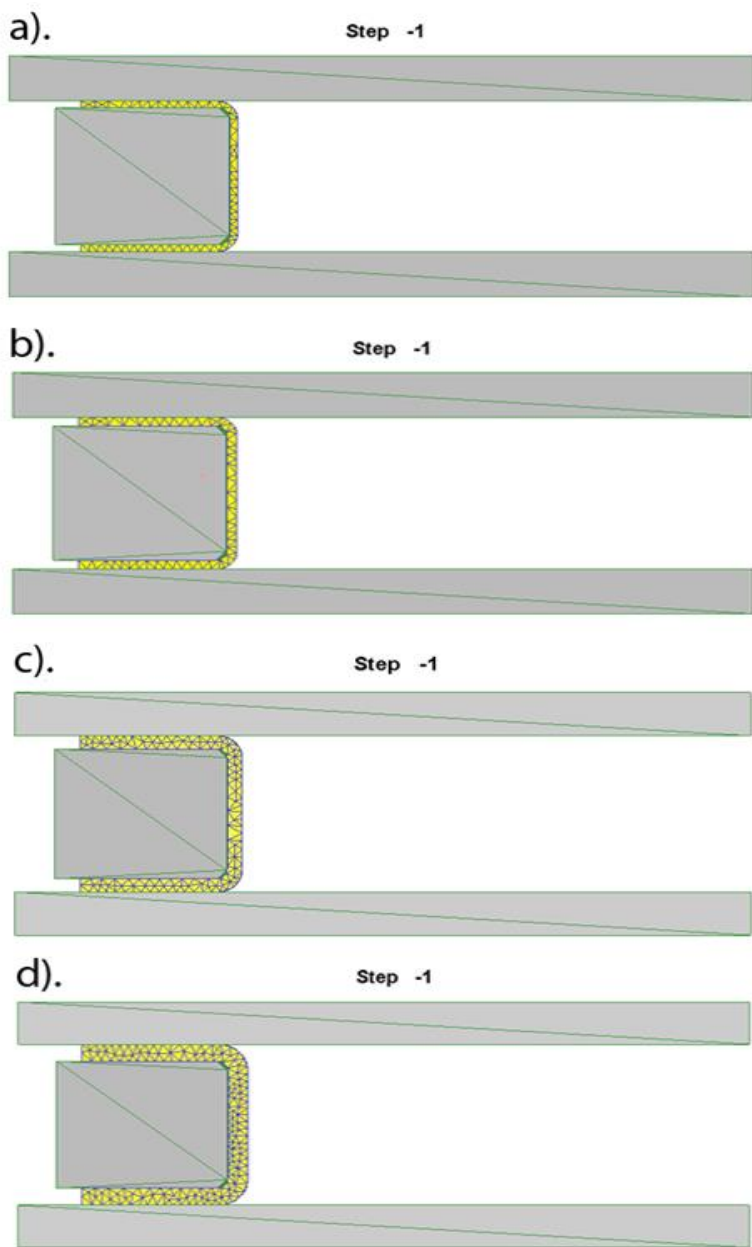
Na tej podstawie opracowano postać geometryczną modelu numerycznego stanowiska laboratoryjnego służącego do badania jego reakcji na wymuszenia i czynniki zewnętrzne. W ramach realizacji przyjętego celu pracy opracowano cztery uniwersalne węzły tarcia z różniącymi się grubościami próbek kształtowych. Zastosowanie różnorodnych grubości blach pozwoliło rozpatrywać zjawisko tarcia ślizgowego w PMW względem zachowania się materiału próbek rozpatrywanego w przekroju poprzecznym.

Opracowane węzły tribologiczne poddano analizie numerycznej z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych. Elementy składowe poszczególnych węzłów tarcia opisano w tabeli 4.4.

Tab. 4.4. Typy obiektów wirtualnego stanowiska badawczego

Węzeł tribologiczny P1	Węzeł tribologiczny P2	Węzeł tribologiczny P3	Węzeł tribologiczny P4
Płyta górna – model sztywny	Płyta górna – model sztywny	Płyta górna – model sztywny	Płyta górna – model sztywny
Płyta dolna – model sztywny	Płyta dolna – model sztywny	Płyta dolna – model sztywny	Płyta dolna – model sztywny
Trzpień działania poziomego – model sztywny	Trzpień działania poziomego – model sztywny	Trzpień działania poziomego – model sztywny	Trzpień działania poziomego – model sztywny
Próbka kształtowa o grubości blachy A=1,5mm model plastyczny	Próbka kształtowa o grubości blachy A=2mm model plastyczny	Próbka kształtowa o grubości blachy A=3mm model plastyczny	Próbka kształtowa o grubości blachy A=4mm model plastyczny

Wykorzystanie uproszczonych modeli węzłów tarcia pozwoliło wyznaczyć występujące między próbkami i narzędziami opory tarcia jak również pola naprężeń i odkształceń. Do analizy numerycznej i wyznaczenia sił tarcia ślizgowego w warunkach odkształceń plastycznych wykorzystano oprogramowanie do analizy procesów obróbki plastycznej Deform 3D V10.0 (rys. 4.5).



Rys. 4.3. Modele geometryczne węzłów tarcia przyjętych do badań symulacyjnych w programie Deform 3D dla próbek o grubości: a) 1,5mm, b) 2mm, c) 3mm, d) 4mm

Opracowane modele zestawów kontaktowych pozwoliły uwzględnić procesy tarciaowe charakterystyczne dla poszczególnych analizowanych

węzłów tribologicznych. Zastosowane uproszczenia modeli były przyczyną mniejszej ich podatności na działanie czynników zewnętrznych z otoczenia, dlatego też konieczne było ustalenie i zastosowanie odpowiednich warunków brzegowych.

Wykorzystanie MES w badaniach tribologicznych w warunkach PMW traktowane jest, jako wykorzystanie narzędzia do bezinwazyjnej symulacji procesów technologicznych. Zaletą wirtualnego modelu stanowiska badawczego jest możliwość wielokrotnego eksperymentowania z różnymi warunkami brzegowymi. Z analizy literaturowej [35, 97, 105, 106] wynika, że nie można przyjmować takich samych warunków brzegowych dotyczących określania warunków pracy analizowanego układu tribologicznego dla podobnych procesów kształtowania metali. Dlatego też konieczny jest indywidualny dobór warunków początkowych do każdego procesu badawczego. Założenie to wynika z faktu, iż każdy układ poddawany analizom MES jest inny oraz występują znaczne różnice warunków środowiskowych, w których jest analizowany. Warunkiem niezbędnym do potwierdzenia wiarygodności wyników symulacji procesów jest weryfikacja metod i stanowisk badawczych. Dlatego też przed wykonaniem prób analiz MES dokonano kalibracji stanowiska laboratoryjnego i numerycznego poprzez przeprowadzenie próby spęczania próbki w kształcie walca. Analiza badanego procesu nie wymagała modelowania całego urządzenia wraz z jego wyposażeniem. Procesowi symulacji poddano wirtualny model układu badawczego, dla którego określono następujące warunki brzegowe:

- Do analizy numerycznej przygotowano modele próbek i narzędzi typu stereolitograficznego o wysokiej rozdzielczości w formacie ASCII z odchyłkami powierzchni zgodnymi z tabelą 4.5:

Tab. 4.5. Zestawienie odchyłek płaszczyzn dla modeli STL

	Próbka 1,5mm	Próbka 2mm	Próbka 3mm	Próbka 4mm	Płyta dolna	Płyta górna	Trzpień
Odchyłka płaszczyzny modelu STL [μm]	0,89	1,72	1,28	1,18	0,5	0,5	0,5

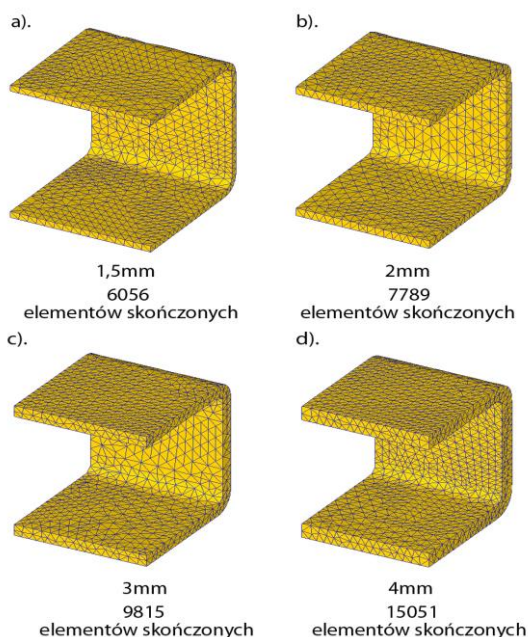
- Modele próbek i narzędzi zaimplementowano do preprocesora programu Deform 3D v 10.0. gdzie dokonano procesu złożenia zespołu badawczego z zerowym luzem. System jednostek miar preprocesora ustalono, jako system międzynarodowy – SI. Procesowi dyskretyzacji poddano tylko próbki natomiast narzędzia zostały ustalone, jako elementy nieodkształcalne. Podejmowane były próby zwiększenia liczby elementów skończonych poprzez zagęszczenie siatki jednak znacznie wydłużały one czas obliczeń a uzyskiwane wyniki oporów tarcia były zbliżone. Zgodnie

z założeniami opisanymi w niniejszej pracy ustalono graniczną gęstość dyskretyzacji zgodnie z tabelą 4.6.

Tab. 4.6. Parametry dyskretyzacji dla próbek i narzędzi

	Próbka 1,5mm	Próbka 2mm	Próbka 3mm	Próbka 4mm	Płyta dolna	Płyta górna	Trzpień
Elementy skończone	6056	7789	9815	15051	x	x	x
Liczba węzłów	1981	2234	2609	3641	x	x	x
Współczynnik wielkości	2	2	2	2	x	x	x

Do procesu dyskretyzacji wybrano elementy skończone typu czworosiennego. Modele geometryczne próbek poddane procesowi dyskretyzacji pokazano na rysunku 4.6.



Rys. 4.4. Próbkę kształtowe z widoczną siatką elementów skończonych: a) 1,5mm, b) 2mm, c) 3mm, d) 4mm przygotowane do analizy numerycznej w programie Deform 3D

- Warunki brzegowe określają wymuszenie procesu, których skutkiem jest zjawisko odkształcenia plastycznego badanych próbek bez odkształceń narzędzi. W opracowanym modelu numerycznym uniwersalnego węzła tarcia przyjęto model mechaniczny sztywno plastyczny gdzie typ obiektów badanych określono, jako plastyczny natomiast typ narzędzi, jako sztywny

i nieodkształcalny. Skojarzenia materiałowe modeli układu badawczego zostały określone zgodnie z materiałami zastosowanymi w badaniach modeli rzeczywistych. Wartości cech materiałowych poszczególnych części urządzenia zostały pobrane z wewnętrznych baz danych programu. Materiałowi dolnej i górnej płyty roboczej oraz trzpieniowi nadano charakter sztywny odpowiadający zachowaniu się materiału 41Cr4 podczas prób PMW. Natomiast na materiał badanych próbek wybrano z bazy materiałowej programu stal AISI – 1015 – (20-1200°C) o charakterze plastycznym, co jest odpowiednikiem stali S235JR. Model materiału próbek określono, jako model izotropowy i przypisano mu hipotezę Hubera – Misesa – Hencky'ego [73].

- Zagadnienia kontaktowe w opracowanym modelu numerycznym węzła tarcia zostały opisane przyjmując przypadek kontakt typu powierzchnia - powierzchnia. Jako model tribologiczny symulacji wybrano model Coulomba [12]. W celu określenia oporów tarcia pomiędzy powierzchniami styku w modelowym węźle tarcia zdefiniowana została zależność pomiędzy wartościami nacisku i prędkościami ruchu płyty górnej oraz trzpienia poziomego a wartościami współczynników tarcia. Wielkości współczynników tarcia i prędkości narzędzi do oprogramowania Deform 3D wprowadzono w formie danych tabelarycznych. Każda z czterech grup próbek została poddana analizie dla warunków brzegowych opisanych w tabeli 4.7.

Tab. 4.7. Wybrane warunki brzegowe procesu analizy numerycznej dla czterech grup próbek

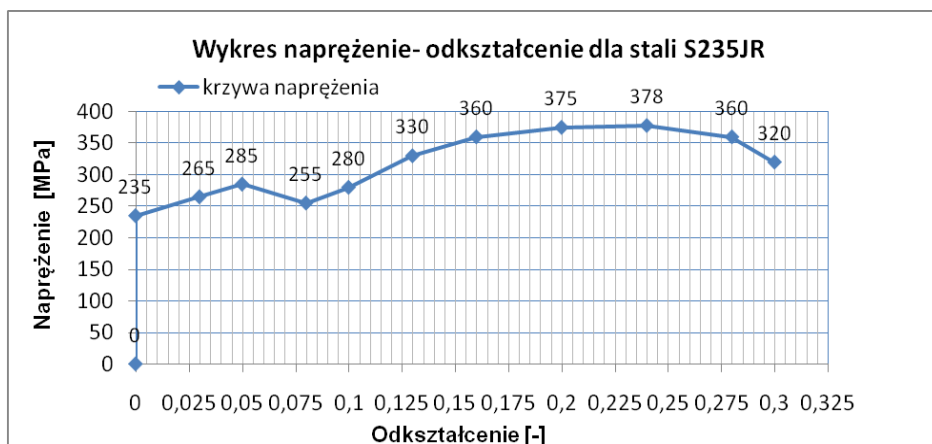
	Grupa próbek 1,5mm (P1)	Grupa próbek 2mm (P2)	Grupa próbek 3mm (P3)	Grupa próbek 4mm (P4)
Siła nacisku płyty górnej [kN]	0–70	0–80	0–90	0–100
Współczynnik tarcia μ MES [-]	0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40	0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40	0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40	0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40
Czas [s]	5	5	5	5

Ruch próbek i narzędzi w przestrzeni został zrealizowany zgodnie z rodzajem i charakterem ruchu kinematycznego układu rzeczywistego za pomocą odebranych i nadanych stopni swobody. Płyce górnej i trzpieniowi nadano stopnie swobody zgodnie z kierunkami osi globalnego układu współrzędnych natomiast płycie dolnej odebrano wszystkie stopnie swobody. Ruch ślizgowy próbki realizowany był przy równoczesnym nacisku narzędzia górnego. W przeprowadzonych symulacjach przyjęto interwał czasowy próbkowania 0,025 sekundy co odpowiada wartości próbkowania układu tensometrycznego przez multimetr na stanowisku laboratoryjnym. W ten sposób badanie chwilowych sił tarcia ślizgowego określono dla 5 sekund, co

dało 200 wartości próbkowanych. Prędkość przesuwu trzpienia działania poziomego równą 5mm/s określono na podstawie zarejestrowanej prędkości przemieszczenia przekładni kolanowej tribotestera.

Do obliczeń symulacyjnych procesora wybrano metodę iteracyjną typu Direct oraz solver wykorzystujący metodę gradientu sprzężonego – zgodnie z tabelą 2.2. Do obliczeń wykorzystano cztery rdzenie procesora. Czas obliczeń w zależności od rodzaju próbki wynosił od 8 do 22 minut. Wyniki symulacji numerycznych badanych procesów zostały przedstawione w rozdziale 5.

Do analizy zjawiska tarcia ślizgowego w warunkach odkształceń plastycznych wykorzystano oprogramowanie Abaqus 6.10 firmy Dassault Systemes. Przygotowanie zespołów modelowych, ich analiza i wizualizacja wyników zostały zrealizowane w poszczególnych modułach programu. W module preprocesora "Part" zdefiniowano geometryczne parametry modeli próbek i narzędzi. Narzędziom nadano charakterystykę materiału sztywnego typu "Rigid" i przypisano punkty referencyjne. Wymiary próbek i narzędzi dobrano zgodnie z wymiarami rzeczywistych elementów im odpowiadających. W module Property zdefiniowano charakterystyki materiałowe dla stali S235JR i 41Cr4. Właściwości fizyczne stali S235JR dla etapu odkształceń sprężystych określono na podstawie modułu Younga $E = 210000$ MPa i współczynnika Poissona $\nu = 0,33$ według normy PN-EN10025:2005. Sprężysto plastyczne zachowanie stali S235JR określono na podstawie statycznej próby rozciągania zgodnie z rysunkiem 4.7 i tabelą 4.8 [110].



Rys. 4.5. Wykres ogólny statycznej próby rozciągania dla stali S235JR

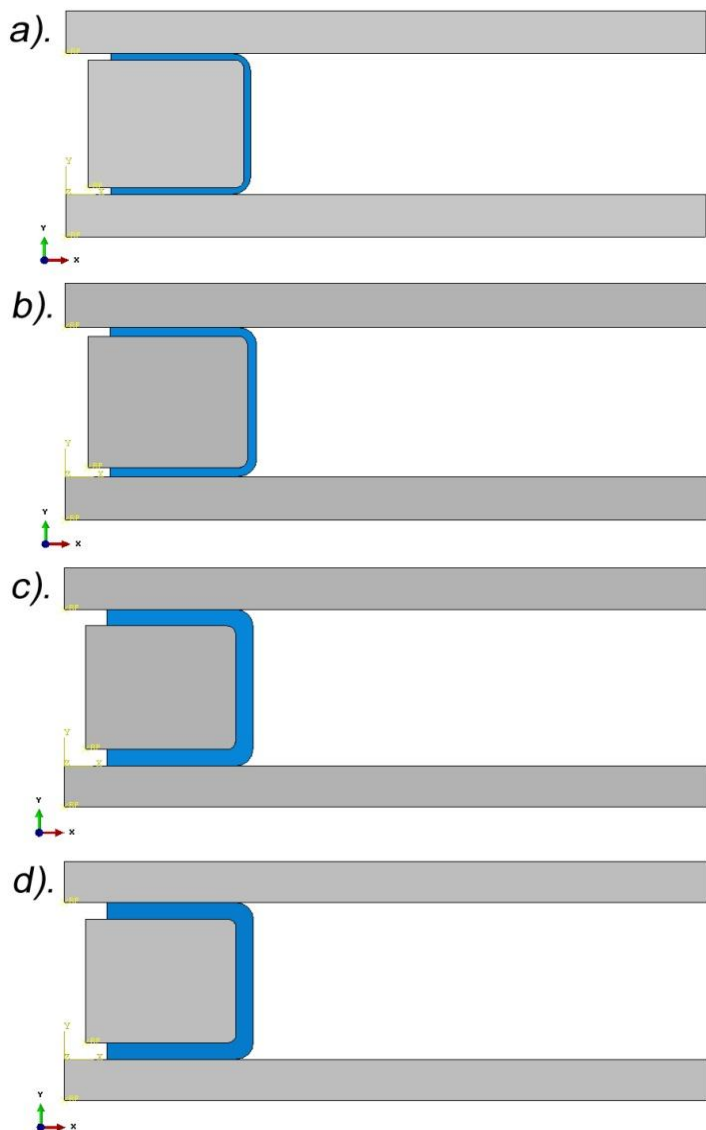
Tab. 4.8. Tabela zależności naprężenia i odkształcenia dla stali S235JR

Lp.	Naprężenie σ [MPa]	Odkształcenie ε [-]
1	235	0
2	265	0,03
3	285	0,05
4	255	0,08
5	280	0,1
6	330	0,13
7	360	0,16
8	375	0,2
9	378	0,24
10	360	0,28
11	320	0,3

Ustalono zgodnie z danymi literaturowymi [110] zależności dotyczące naprężenia i odkształcenia dla stali S235JR pozwoliły na określenie zachowania się materiału po przekroczeniu granicy plastyczności i trwałej zmiany kształtu oraz wymiarów pod wpływem nacisku narzędzi.

Dla stali 41Cr4 określono moduł Younga $E=210000$ MPa oraz współczynnik Poissona $\nu=0,3$. Wszystkie materiały modeli przygotowanych do analizy ustalono, jako izotropowe [111].

W module Assembly dokonano złożenia czterech zespołów części uzyskując modele obliczeniowe zgodnie z rysunkiem nr 4.8.



Rys. 4.6. Widok złożeń zespołów modelowych dla próbek: a) P1 b) P2 c) P3 d) P4
w programie Abaqus 6.10

W module Interaction zdefiniowano warunki interakcji kontaktów pomiędzy próbkami a narzędziami. Dla kroków obliczeniowych wskazano pary kontaktowe zgodnie z tabelą 4.9 oraz określono dla nich współczynnik tarcia $\mu = 0,2$. Do analizy przyjęto model tarcia typu Coulomba.

Tab. 4.9. Tabela interakcji kontaktów pomiędzy próbką i narzędziami

Nazwa połączenia	Krok Inicjujący	Krok obliczeniowy
Płyta górna – próbka kształtowa	Stworzony	Propagowany
Trzpień – próbka kształtowa	Stworzony	Propagowany
Płyta dolna – próbka kształtowa	Stworzony	Propagowany

Uwzględniając charakter ruchów narzędzi w przestrzeni 3D urządzenia [62] przyjęto warunki brzegowe zgodnie z tabelą 4.10.

Tab. 4.10. Warunki brzegowe dotyczące odebrania stopni swobody badanym modelom

Nazwa modelu	Warunki brzegowe
Płyta górna	$U1 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0$
Trzpień	$U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0$
Płyta dolna	$U1 = U2 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0$

Opis stopni swobody dla tabeli 3.7:

U1 – ruch postępowy wzdłuż osi X,

U2 – ruch postępowy wzdłuż osi Y,

U3 – ruch postępowy wzdłuż osi Z,

UR1 – ruch obrotowy względem osi X,

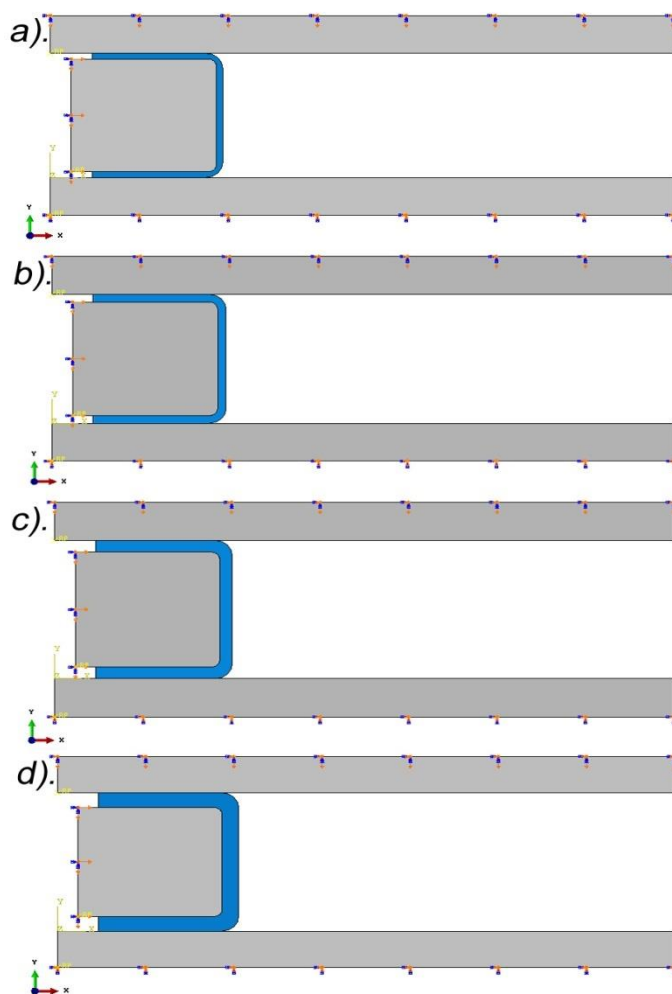
UR2 – ruch obrotowy względem osi Y,

UR3 – ruch obrotowy względem osi Z.

Na podstawie odebranych stopni swobody (tab. 4.10) nadano modelom możliwość przemieszczeń w następujących kierunkach:

- Płyta górna – możliwość ruchu względem osi Y.
- Trzpień – możliwość ruchu względem osi X oraz Y.
- Płyta dolna – brak możliwości ruchu względem wszystkich osi.
- Próbkę kształtowa – możliwość ruchu względem wszystkich osi.

Zakresy prędkości i siły nacisku trzpienia i przeciwpróbek wynikały z analizy kinematycznej stanowiska do PMW. Badania numeryczne w programie Abaqus zostały przeprowadzone w warunkach tarcia suchego w temperaturze 20°C.



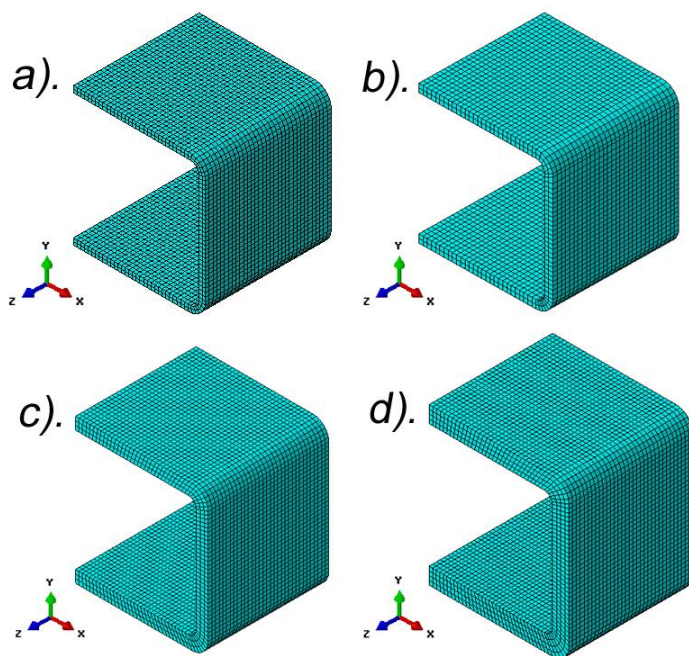
Rys. 4.7. Widok zespołów modelowych z zaznaczonymi stopniami swobody dla narzędzi
odpowiednio dla próbek: a) P1, b) P2, c) P3, d) P4

Ponieważ wszystkie rodzaje połączeń stosowane w zespołach modelowych są zależne, siatkę utworzono na poziomie parametrów geometrycznych części a nie na zespole modelowym. Ze względu na zaokrąglenia występujące w miejscach zgięcia próbek oraz zaokrąglone naroża trzpienia siatka elementów skończonych dla tych elementów została opracowana z wykorzystaniem algorytmu dopasowania. Parametry dyskretyzacji zespołów modelowych zostały opisane w tabeli nr 4.11.

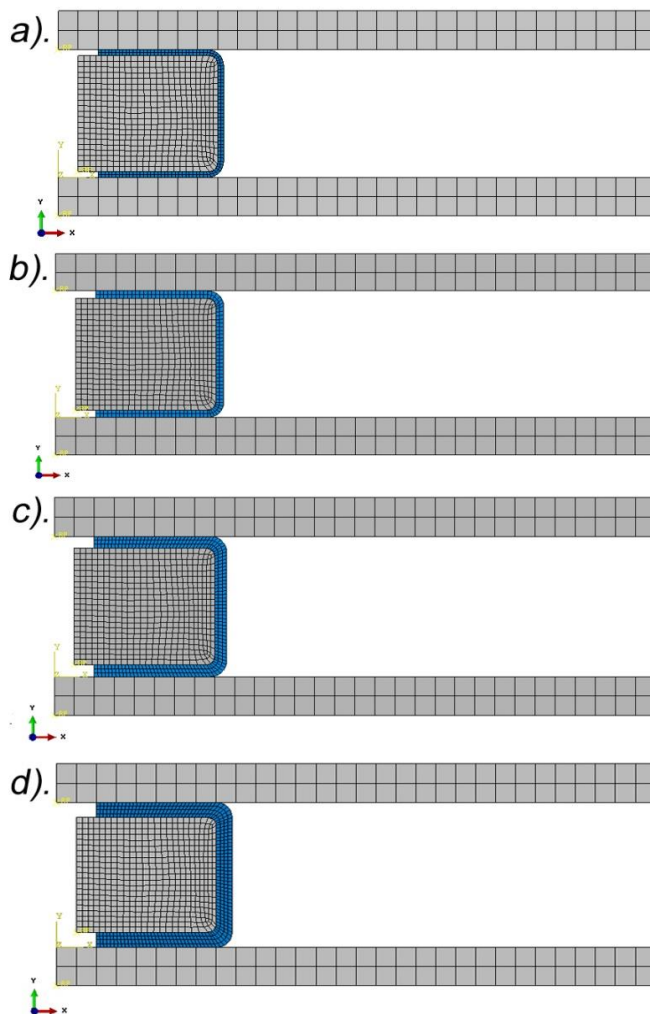
Tab. 4.11. Opis tabelaryczny warunków dyskretyzacji dla zespołów modelowych

Nazwa modelu	Typ elementu skończonego	Rodzaj elementu skończonego	Ilość węzłów	Ilość elementów
P1 – 1,5mm	Heksagonalny- standardowy	C3D8R	8 węzłowy liniowy	6864
P2 – 2mm				5700
P3 – 3mm				10791
P4 – 4mm				14388
Płyta górna				720
Płyta dolna				720
Trzpień				10400

Widok próbek kształtowych poddanych procesowi dyskretyzacji pokazano na rysunku 4.10. Zdyskretyzowane zespoły modelowe składające się z płyty dolnej, górnej oraz próbki kształtowej na trzpieniu pokazano na rys. 4.11.



Rys. 4.8. Widok siatek po dyskretyzacji dla próbek kształtowych: a) P1, b) P2, c) P3, d) P4

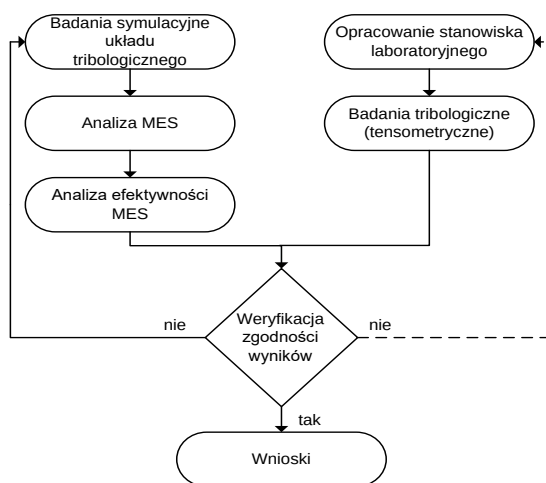


Rys. 4.9. Widok siatek zespołów modelowych dla próbek: a) P1, b) P2, c) P3, d) P4
w programie Abaqus 6.10

Tak przygotowane zespoły modelowe zostały poddane procesom symulacji numerycznych w module JOB znajdującego się w procesorze programu Abaqus. Ze względu na nieliniowy charakter analizy do obliczeń wybrano solver typu Direct oraz metodę obliczeniową typu Full Newton. Wyniki badań numerycznych z wykorzystaniem programu Abaqus zostały opisane w rozdziale 5.1.

4.3. Badania laboratoryjne systemu tribologicznego

Przeprowadzenie badań tribologicznych PMW w warunkach przestrzeni symulacyjnej dało możliwość analizy tych procesów przy wykorzystaniu wirtualnych modeli. Ważnym aspektem zastosowania modelowanych obiektów była możliwość ich współpracy z Metodą Elementów Skończonych. Wykonanie analizy numerycznej pozwoliło na indywidualne rozpatrywanie badanego zjawiska z uwzględnieniem korekty warunków brzegowych dla uzyskania zgodności z efektami badań laboratoryjnych. W celu potwierdzenia zgodności modelu numerycznego z modelem rzeczywistym dla badanego zjawiska tarcia ślizgowego w warunkach odkształceń plastycznych porównano wyniki oporów tarcia dla obu modeli. Do tego celu wykorzystano metodę badań równoległych, której zasadę przedstawiono na schemacie (rys. 4.12).



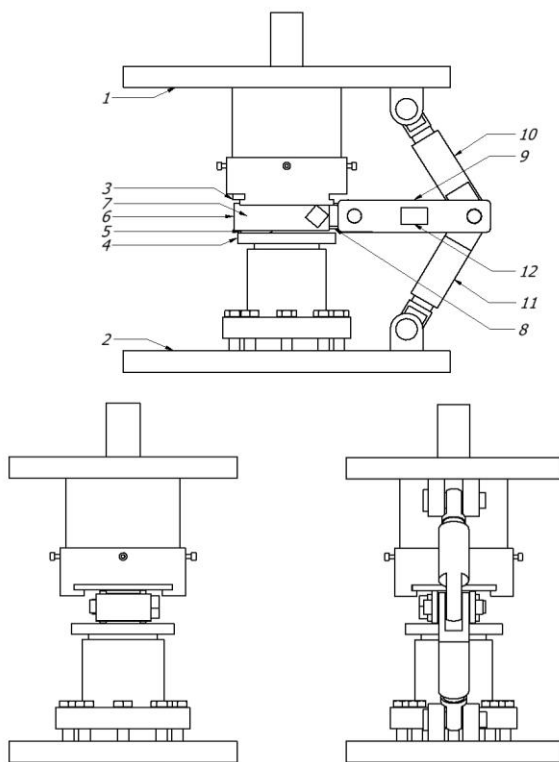
Rys. 4.10. Schemat blokowy uwzględnienia spójności pomiarowej stanowisk oparty na metodzie badań odwrotnych

W analizach porównawczych dwóch metod badawczych dotyczących badań symulacyjnych i laboratoryjnych została uwzględniona spójność stanowiskowa, jako cecha charakterystyczna wzorów odniesienia oddziaływania warunków środowiskowych na próbkę. Podczas budowy stanowisk badawczych i systemów akwizycji danych pomiarowych podjęto działania mające na celu dostosowanie stanowisk badawczych w odniesieniu do parametrów technologicznych by utrzymać zbliżone warunki przebiegu badanych procesów. Pozwoliło to na uzyskanie spójności pomiarowej analizowanych procesów tribologicznych, co w efekcie pozwoliło na wiarygodne porównanie wyników badań dla przyjętych metod badawczych [64].

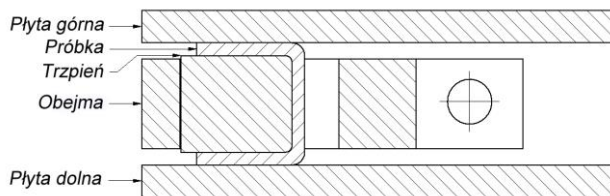
4.3.1. Laboratoryjne stanowisko do realizacji badania tarcia w procesie modelowego wytłaczania

Proces kształtowania plastycznego materiału w operacji PMW z jednoczesnym badaniem oporu tarcia ślizgowego zrealizowano przy użyciu stanowiska laboratoryjnego zaprojektowanego i skonstruowanego na Politechnice Lubelskiej [39, 42, 62]. Schemat całego stanowiska został pokazany na rysunku 4.13 natomiast przekrój części roboczej urządzenia pokazano na rysunku 4.14.

Urządzenie składa się z dwóch płyt (1) i (2), do których mocowane są wymienne płytki (3) i (4), pomiędzy którymi badany wycinek próbki kształtowej (5) otoczony jest obejmą (6) w której znajduje się poziomy trzpień (7). Obejma połączona jest poprzez przegub (8) z wymiennymi cięgłami (9). Śruby (10) i (11) połączone przegubowo z cięgłem (9) oraz płytami (1) i (2) tworzą przekładnię kolanową. Na cięgło (9) zamontowano układ tensometryczny (12) do rejestracji zmian siły tarcia podczas odkształcenia materiału w PMW.



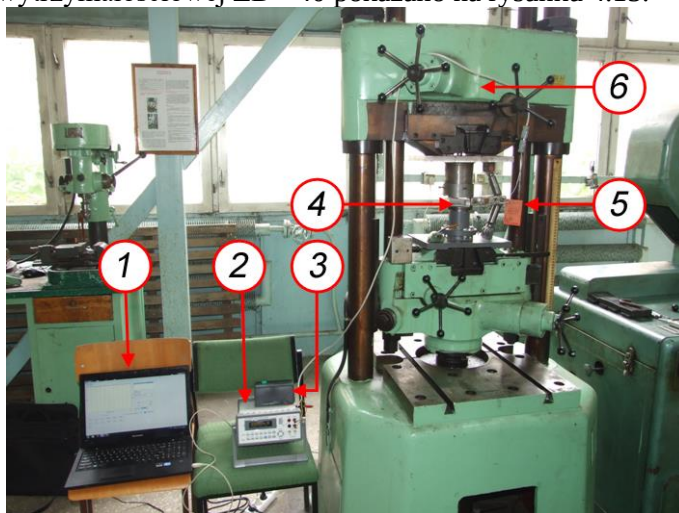
Rys. 4.11. Schematy urządzenia do realizacji procesu odkształcenia próbki i badania tarcia ślizgowego



Rys. 4.12. Przekrój części roboczej stanowiska laboratoryjnego

W urządzeniu podczas pracy płyta górna (1) i dolna (2) są ściskane osiowo w maszynie wytrzymałościowej z jednocześnie realizowanym PMW poprzez przemieszczenie próbki kształtowej umieszczonej między płytkami (6) i (7).

Siły oporu tarcia pomiędzy próbką kształtową a przeciwpróbką odpowiadają siłom działającym w urządzeniu na elementy (9). Zmiany siły tarcia w czasie trwania procesu w urządzeniu określano za pomocą układu tensometrów (12) oraz rejestrowano za pomocą aparatury pomiarowej o dużej czułości. Szybkość wysuwania próbki (5) podczas PMW ustalano za pomocą dwóch układów śrubowych (10) i (11) oraz cięgna (9). Urządzenie zaopatrzone w zestaw płytek (3) i (4) mocowanych w płytach (1) i (2), umożliwiające pomiary sił tarcia ślizgowego. Podczas nacisku prasy ruch posuwisty próbki został wymuszony przez układ cięgien i łączników przymocowanych do dolnej i górnej płyty. Na cięgnach znajdują się tensometry rejestrujące zmiany napięcia w układzie pomiarowym wywołane zmianą siły pokonującej opory tarcia i wymuszającej ruch poziomy próbki. Stanowisko laboratoryjne PMW zamontowane na maszynie wytrzymałościowej ZD – 40 pokazano na rysunku 4.15.



Rys. 4.13. Widok stanowiska badawczego do badań tribologicznych w warunkach odkształceń plastycznych: 1 – komputer, 2 – multimetr, 3 – zasilacz, 4 – urządzenie do realizacji PMW, 5 – układ tensometryczny, 6 – maszyna wytrzymałościowa

Zaprezentowane urządzenie służy do przeprowadzenia PMW, podczas którego realizowane jest badanie oporów tarcia ślizgowego. Korzystnym aspektem procesu badawczego jest to, że urządzenie umożliwia badanie oporów tarcia w warunkach zbliżonych do panujących w procesach obróbki plastycznej np. wytłaczania blach. Wykorzystane urządzenie zapewnia badanie sił tarcia w warunkach realizowania nacisku normalnego z jednoczesnym przesuwaniem materiału po przeciwpróbce. Przedstawione urządzenie umożliwia określenie nacisków i przemieszczeń podczas działania siły normalnej i stycznej w operacji odkształcenia. Regulowany układ przekładni kolanowej umożliwia zmianę prędkości przesuwania poziomego próbki pomiędzy przeciwpróbkami w modelowanych procesach obróbki plastycznej. Dzięki takiemu rozwiązaniu konstrukcyjnemu stanowiska możliwe jest przeprowadzenie badań przy zróżnicowanych prędkościach przesuwu i odkształceniach próbki kształtowej.

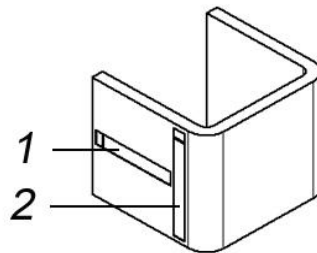
4.3.2. Metody badawcze tarcia ślizgowego

Dla przeprowadzenia procesu badawczego wykorzystano doświadczalne techniki badawcze i komputerowe metody obliczeniowe.

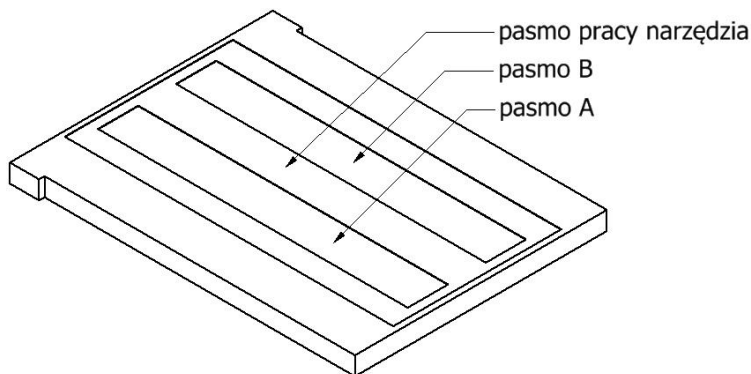
W zakresie badań materiału próbek kształtowych, płyt górnej i dolnej oraz trzpienia przeprowadzono:

- badania metalograficzne mikroskopowe,
- badania twardości,
- badania chropowatości

Badania metalograficzne mikroskopowe przeprowadzono w celu określenia struktury i geometrii ziaren próbek kształtowych, przeciwpróbek i trzpienia poddanych procesowi PMW. Zgłady do badań metalograficznych wycięto z obszarów próbek i przeciwpróbek oddziałujących na siebie w PMW – rys. 4.16. Badanie struktury narzędzi przeprowadzono na zgładach wzdlużnych rys. 4.17. Wycięte próbki zatopiono w durakrylu 5, szlifowano mechanicznie na papierach o zróżnicowanej granulacji ścierniwa oraz polerowano wodną zawiesiną Al_2O_3 . Szlifowanie i polerowanie zgładów zrealizowano wykorzystując szlifierko – polerkę firmy Struers – Austria. Dla ujawnienia struktury zgłady poddano trawieniu 4% roztworem kwasu azotowego w alkoholu etylowym. Badania metalograficzne prowadzono przy użyciu mikroskopu świetlnego typu OLYMPUS DP71 umożliwiającego elektroniczną dokumentację wyników. Obserwację struktury realizowano przy powiększeniu od 50x do 2000x, w polu jasnym oraz w świetle spolaryzowanym wykorzystując kontrast Nomarskiego.



Rys. 4.14. Schemat wycięcia próbek: 1 – do pomiarów twardości i 2 – do badań metalograficznych

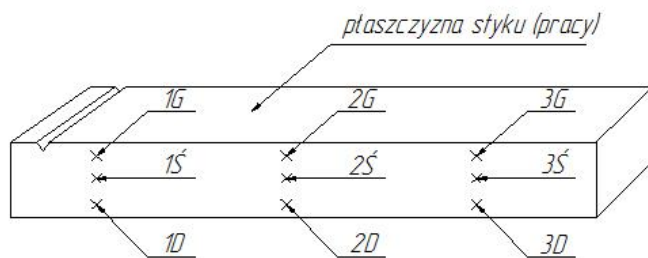


Rys. 4.15. Schemat wycięcia próbek z przeciwpróbki (kowadła)

Obserwacja zmian topografii powierzchni, jako skutków procesu odkształcenia plastycznego dała możliwość wnikliwego poznania występujących zjawisk w obszarach styku próbka-narzędzie. Przeprowadzone na próbkach badania pozwoliły na ocenę zmian mikroobszarów na grubości blach określającej wpływ tarcia ślizgowego na odkształcenie materiału w trakcie PMW.

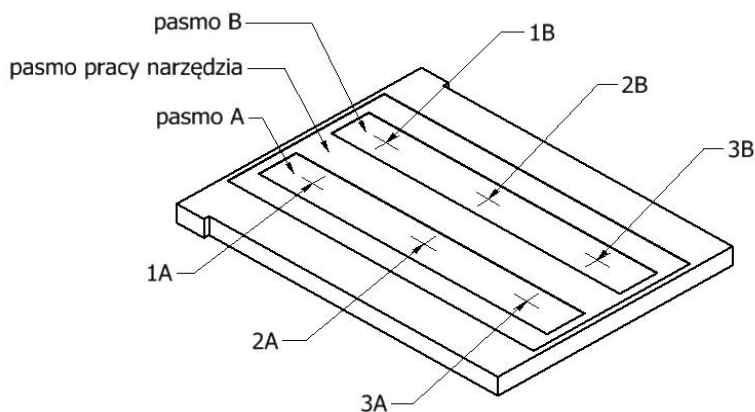
Badania twardości próbek kształtowych ze stali S235JR oraz narzędzi ze stali 41Cr4 przeprowadzono metodą Vickersa wykorzystując aparaturę typu FM 700 japońskiej firmy Future-Tech. Corporation.

Pomiary twardości narzędzi dodatkowo zrealizowano stosując metodę Rockwella wykorzystując twardościomierz NR3DR szwajcarskiej firmy Ernst. Wyniki twardości stanowiły średnią z trzech pomiarów. Widok wycinka próbki kształtowej wraz z punktami pomiarowymi pokazano na rysunku 4.18.



Rys. 4.16. Schemat pomiarów twardości na zglądach metalograficznych elementów ceowych
gdzie: G – góra, Ś – środek, D – dół

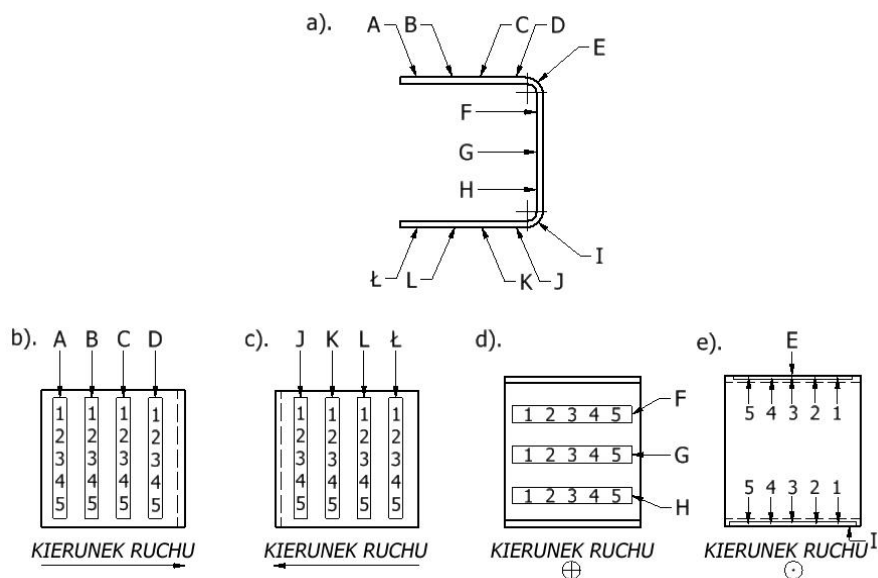
Istotnym elementem rozpatrywanym przy analizie procesu tarcia ślizgowego jest powierzchnia styku występująca w strefie tarcia. Dlatego też dokonano analizy twardości przeciwpróbek węzła tribologicznego zgodnie z rysunkiem 4.19 [96].



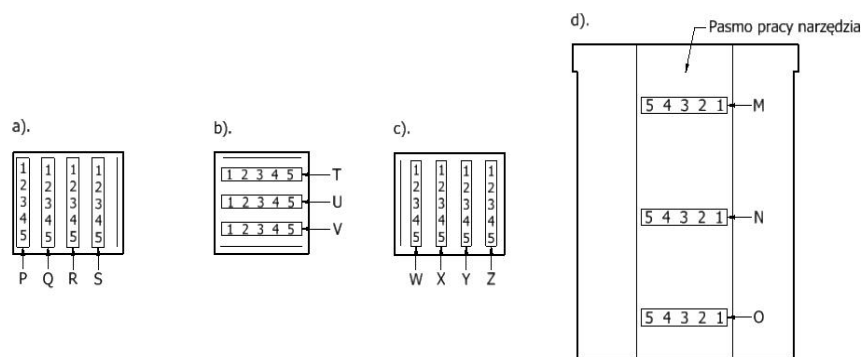
Rys. 4.17. Schemat pomiarów twardości na zglądach metalograficznych przeciwpróbki (kowadła)

Badania chropowatości przeprowadzono dla określenia wpływu tarcia w PMW na parametry chropowatości powierzchni próbek kształtowych P1, P2, P3, P4 oraz przeciwpróbki i trzpienia przed i po odkształceniu plastycznym. Pomiary chropowatości przeprowadzono na powierzchni zewnętrznej ramion próbki kształtowej stykających się z przeciwpróbką oraz powierzchni wewnętrznej próbki stykającej się z trzpieniem.

Dla każdej powierzchni próbki kształtowej, przeciwpróbki i trzpienia pomiaru chropowatości dokonano na pięciu odcinkach elementarnych o długości $l = 2,5\text{mm}$ w trzynastu pasmach na powierzchni próbki kształtowej (rys. 4.20) w jedenastu pasmach na powierzchni trzpienia (rys. 4.21 a, b, c) i w trzech pasmach na powierzchni przeciwpróbki (rys. 4.21 d).



Rys. 4.18. Miejsca pomiaru chropowatości powierzchni próbki kształtowej na odcinkach elementarnych (od 1 do 5) w pasmach (od A do L): a – oznaczenie pasm, b – widok z góry, c – widok z dołu, d – widok z lewej, e – widok z prawej



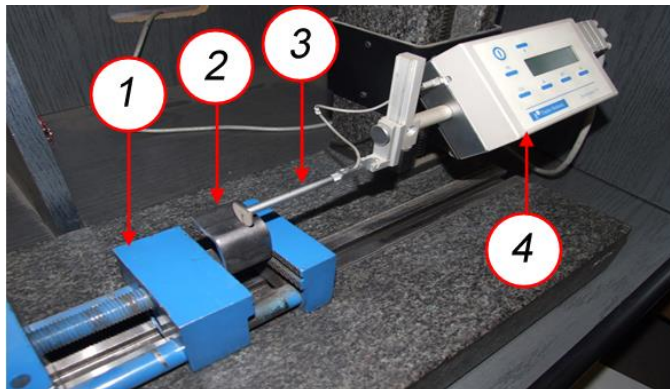
Rys. 4.19. Miejsca pomiaru chropowatości dla narzędzi trzpienia: a – widok górny, b – widok z prawej, c – widok z dołu, d – płytki przeciwpróbki

Badania chropowatości wykonano przy użyciu profilometru Surtronic 3+ firmy Taylor & Hobson (rys. 4.22) wyposażonego w program Tally Profil pozwalający na obliczenie i rejestrację wyników badań w formie wykresnej w postaci zależności profilu chropowatości od odległości na odcinku pomiarowym oraz stabelaryzowanej chropowatości R_a , R_p , R_q , R_v , R_t , R_s , R_{sk} , R_{ku} , R_{zdn} , R_{pm} , R_y , R_{sm} . Pomiary chropowatości wykonano zgodnie z zaleceniami PN-87/M-04250. Analizowano zmiany chropowatości według

parametru R_a . Jego wielkość określono za pomocą średniej arytmetycznej odchylenia profilu od linii średniej wewnątrz odcinka elementarnego l_e .

$$R_a \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_{ti}| \quad (31)$$

gdzie: R_a – średnie arytmetyczne odchylenie profilu, Z_{ti} – wysokość i-tego profilu.

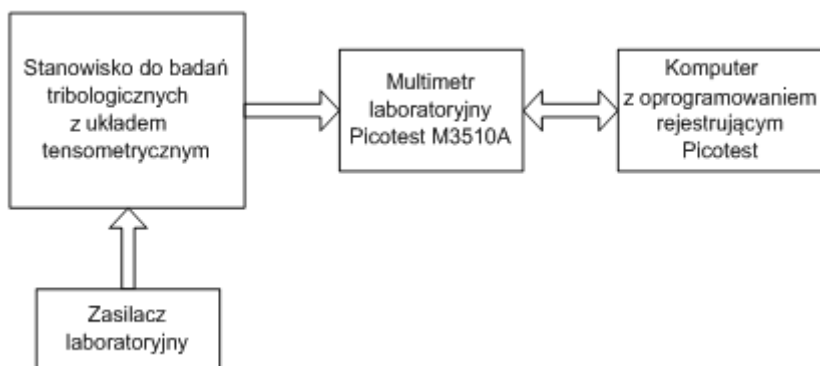


Rys. 4.20. Stanowisko badawcze Surtronic 3+ firmy Taylor & Hobson do pomiarów chropowatości próbek kształtowych i narzędzi: 1) szczeka imadła, 2) badana próbka, 3) ramię z sondą pomiarową, 4) panel sterowania i zapisu danych

Badania procesu tarcia:

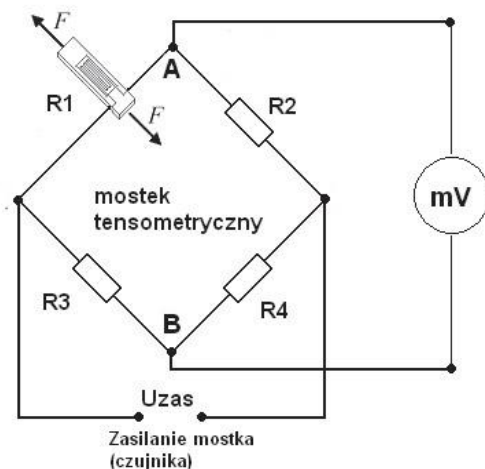
Skonstruowane w Katedrze Podstaw Techniki Politechniki Lubelskiej stanowisko do badań PMW umożliwiło badanie oporów tarcia za pomocą specjalnie do tego celu zbudowanego układu akwizycji danych. Działanie tego układu oparto na współpracy elementów urządzenia z układem tensonometrycznym. Przesunięcie w PMW próbki kształtowej powodowało generowanie sygnałów w tensometrach o zadanym próbkowaniu równym 0,025s, które następnie zostały przesłane do miliwoltomierza Pikotest M3510A (rys. 4.23).

Wykonanie pomiarów wartości napięcia w czasie 5 sekund trwania procesu z próbkowaniem 0,025 sekundy pozwoliło uzyskać 200 punktów pomiarowych. W ten sposób dokonano rejestracji czterdziestu pomiarów napięcia w ciągu sekundy.



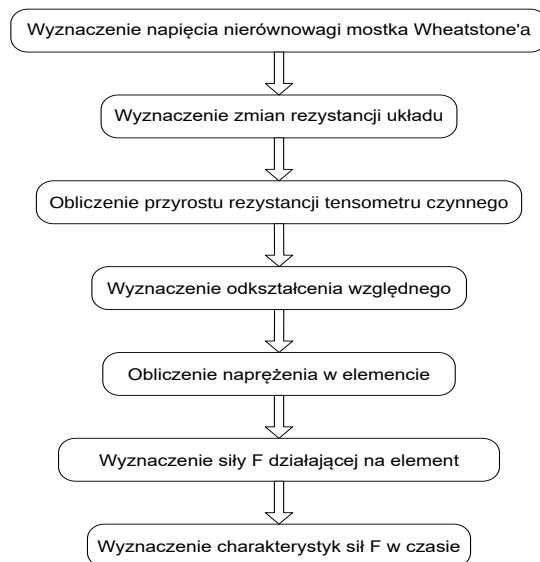
Rys. 4.21. Schemat stanowiska laboratoryjnego do badań tensometrycznych siły tarcia w PMW

Zastosowany układ tensometryczny pracuje na zasadzie ćwierćmostka Wheatstone'a (rys. 4.24) [23]. Składa się on z czterech elementów oporowych z których jeden stanowi tensometr rezystancyjny TF – s 10/120. W układzie znajduje się tensometr kompensacyjny R2 i dwa rezystory R3 i R4 o rezystancji 120 Ω .



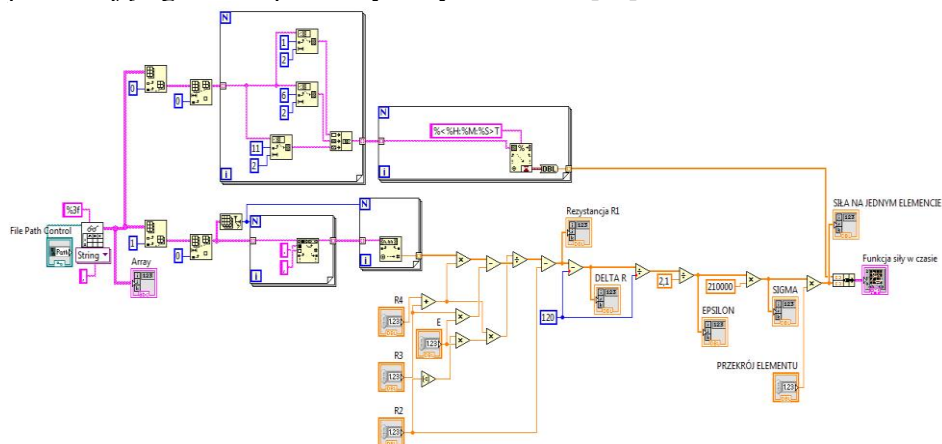
Rys. 4.22. Schemat pomiarowy ćwierćmostka Wheatstone'a do pomiaru działających sił metodą tensometryczną

W celu przeliczenia sygnału napięciowego na wartości występujących w układzie sił tarcia dla badanych węzłów tribologicznych przyjęto metodykę obliczeń tensometrycznych, której schemat blokowy pokazano na rysunku 4.25 [81].



Rys. 4.23. Schemat blokowy metodyki obliczeń tensometrycznych

Dzięki uzyskanym danym wyznaczono charakterystyki tribologiczne. Przeliczenie wartości napięć zgromadzonych przez system akwizycji danych pomiarowych dla każdej z analizowanych próbek wykonano przy wykorzystaniu specjalnie do tego opracowanego programu. W środowisku programistycznym LabView dla miernika Picotest M3510A opracowano oprogramowanie mające na celu wczytanie arkuszy danych CSV i przeliczenie zawartych w nich danych na wartości sił tarcia. Schemat blokowy programu przeliczającego został pokazany na rysunku 4.26 [70].



Rys. 4.24. Schemat blokowy oprogramowania wykorzystanego do obliczeń tensometrycznych dla układu tribologicznego

5. Zestawienie wyników uzyskanych dla przyjętych technik badawczych

Informacje uzyskane na podstawie przyjętych procesów badawczych dotyczących analizy zjawiska tarcia ślizgowego w warunkach odkształceń plastycznych dały odpowiedzi dotyczące wpływu przyjętych parametrów początkowych na badane procesy. Wyniki pomiarów uzyskanych na stanowisku laboratoryjnym i wirtualnym zgodnie z wcześniejszymi założeniami dotyczą czterech grup próbek poddanych procesowi PMW z przyjętym do obliczeń modelem Coulomba [12].

Procesy badawcze były realizowane przy pewnych założeniach upraszczających jednak nie wpłynęły one w znaczący sposób na prawidłowość wyników. Uproszczenia wynikłe z procesu modelowania dotyczące chropowatości powierzchni, rzeczywistej powierzchni styku zostały uwzględnione podczas określania warunków brzegowych badań numerycznych [89]. Do tego celu wykorzystano metodę badań odwrotnych [64].

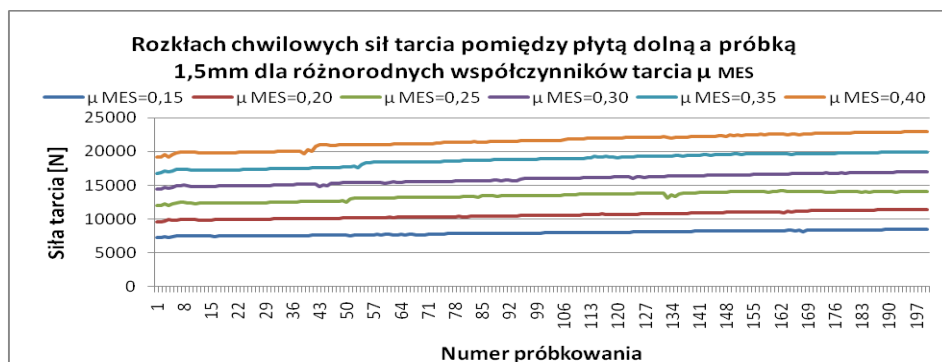
Pozwoliło to na sprecyzowanie kroków dobierania warunków początkowych dla obliczeń MES i ich wpływu na wyniki potwierdzone w warunkach laboratoryjnych. Związane jest to z koniecznością przeprowadzenia badań metalograficznych oraz badań stanu i zmienności charakterystyki powierzchni warstw wierzchnich badanych obiektów potwierdzających zjawiska odkształcenia plastycznego w tym obszarze.

5.1. Wyniki badań numerycznych uzyskanych przy zastosowaniu programu Deform 3D i Abaqus

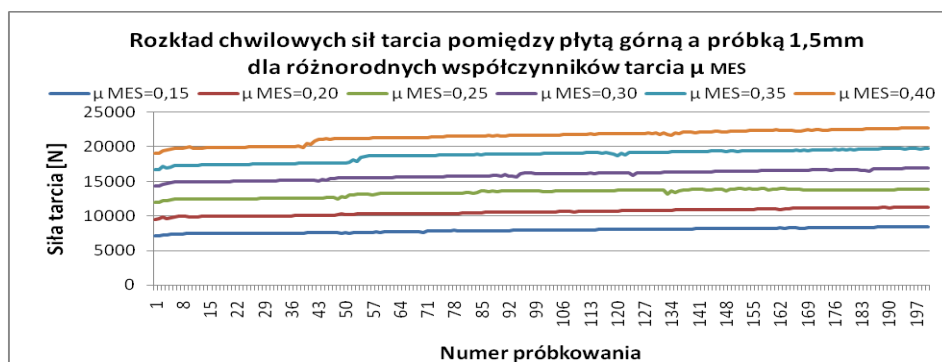
Analizie numerycznej w programie Deform 3D poddano cztery reprezentatywne zdyskretyzowane modele grup próbek: P1, P2, P3, P4. Dla każdej z próbek ustalono warunki początkowe odpowiadające warunkom rzeczywistym na stanowisku badawczym. Warunki początkowe potraktowano, jako zmienne czynniki eksperymentalne wprowadzone do procesu obliczeniowego. Warunki brzegowe, przyjęły, zatem postać zmiennych kontrolowanych. Pomimo występowania płaszczyzn symetrii modele tribologiczne poddano badaniom, jako cały układ zgodnie z zaleceniami spotykanymi w literaturze [60, 74, 76]. Przyjęte warunki brzegowe w postaci zmiany siły nacisku płyty górnej, parametrów siłowych pomiędzy trzpieniem a próbką oraz współczynników tarcia w układzie modelowym dały możliwość określenia ich korelacji z wynikami uzyskanymi w eksperymencie rzeczywistym.

Przeprowadzenie obliczeń numerycznych dało efekt w postaci szeregu wykresów. Dla numerycznego modelu stanowiska badawczego wykonano charakterystyki zmian sił tarcia w funkcji próbkowania $F_t=f(S_m)$ dla różnorodnych współczynników tarcia μ_{MES} . Na rysunkach 5.1 ÷ 5.12 pokazano

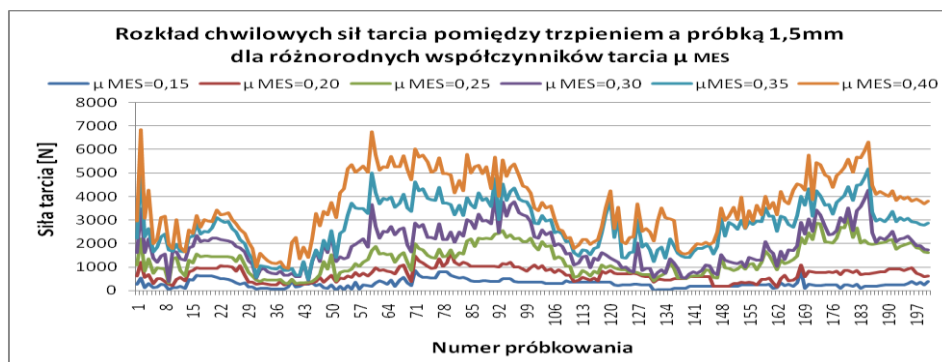
rozkłady sił tarcia pomiędzy odkształcanymi próbkami a narzędziami w PMW dla współczynników tarcia $\mu_{MES} = 0,15; 0,2; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40$ [61, 78, 106].



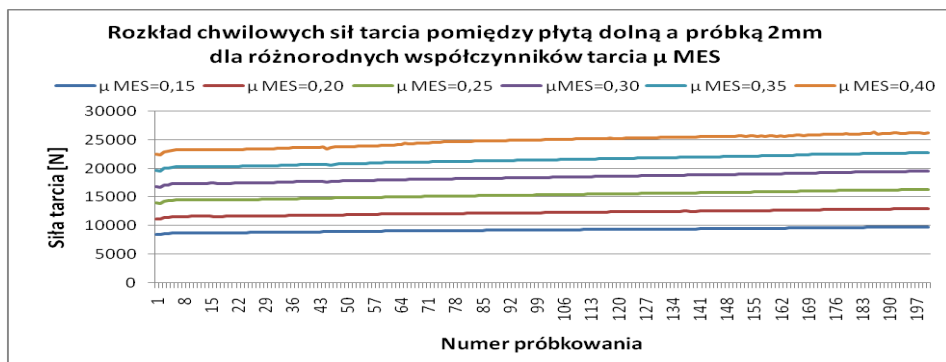
Rys. 5.1. Przebiegi wyznaczone numerycznie chwilowych sił tarcia pomiędzy płytą dolną a próbką P1 dla określonych współczynników tarcia μ_{MES} podczas PMW



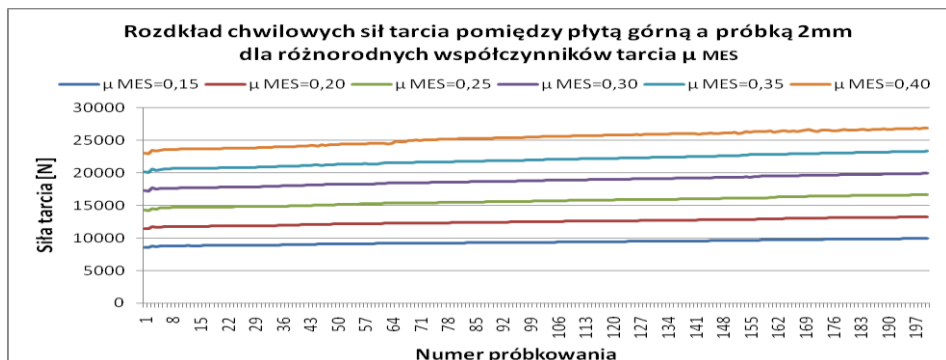
Rys. 5.2. Przebiegi wyznaczone numerycznie chwilowych sił tarcia pomiędzy płytą górną a próbką P1 dla określonych współczynników tarcia μ_{MES} podczas PMW



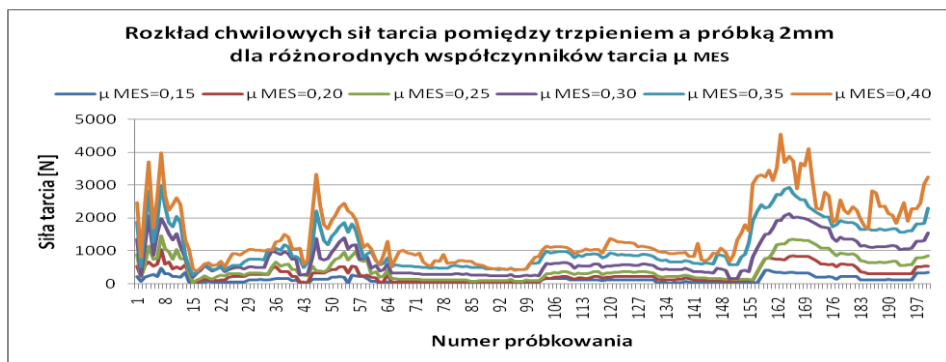
Rys. 5.3. Przebiegi wyznaczone numerycznie chwilowych sił tarcia pomiędzy trzpieniem a próbką P1 dla określonych współczynników tarcia μ_{MES} podczas PMW



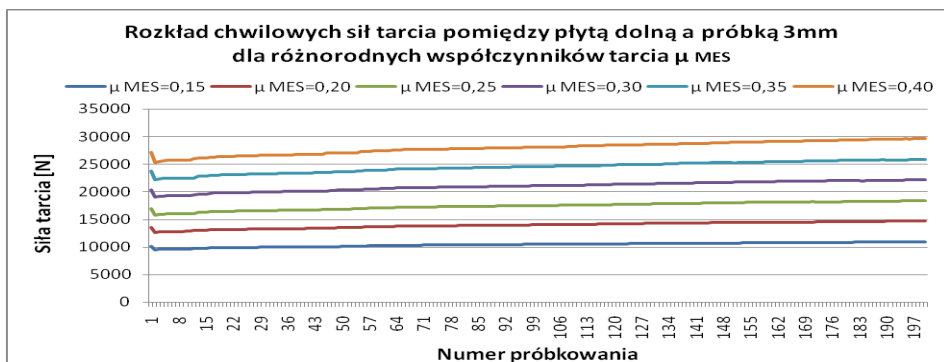
Rys. 5.4. Przebiegi wyznaczone numerycznie chwilowych sił tarcia pomiędzy płytą dolną a próbką P2 dla określonych współczynników tarcia μ_{MES} podczas PMW



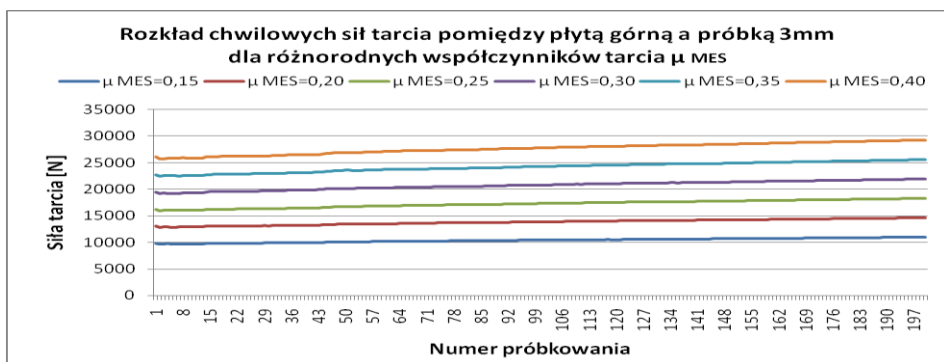
Rys. 5.5. Przebiegi wyznaczone numerycznie chwilowych sił tarcia pomiędzy płytą górną a próbką P2 dla określonych współczynników tarcia μ_{MES} podczas PMW



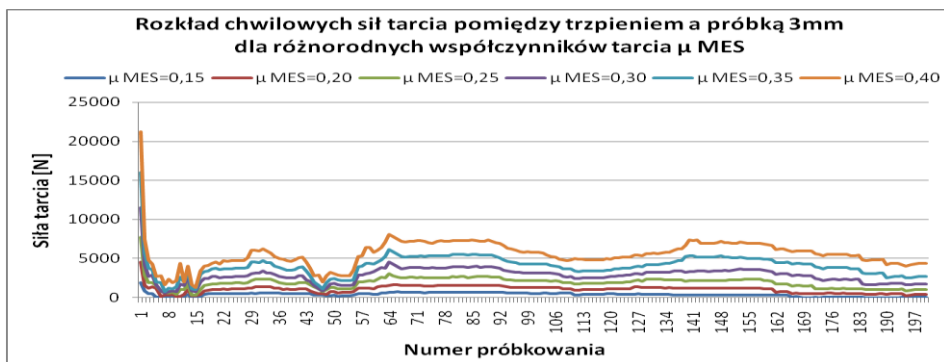
Rys. 5.6. Przebiegi wyznaczone numerycznie chwilowych sił tarcia pomiędzy trzpieniem a próbką P2 dla określonych współczynników tarcia μ_{MES} podczas PMW



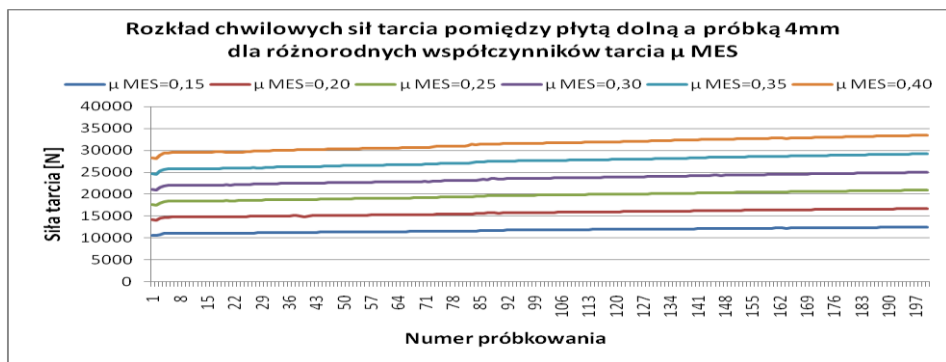
Rys. 5.7. Przebiegi wyznaczone numerycznie chwilowych sił tarcia pomiędzy płytą dolną a próbką P3 dla określonych współczynników tarcia μ MES podczas PMW



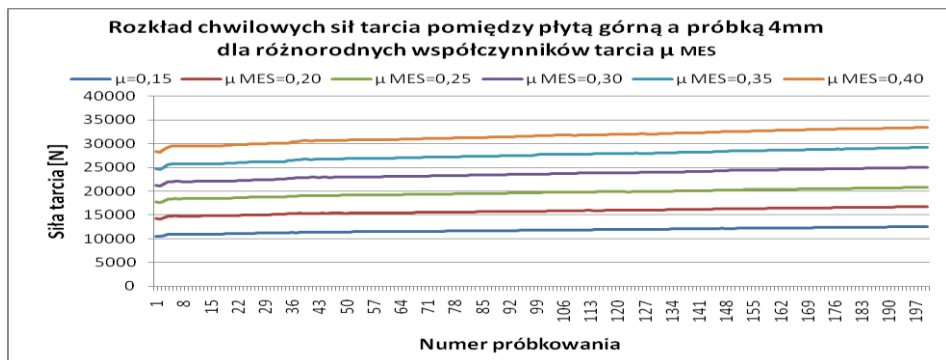
Rys. 5.8. Przebiegi wyznaczone numerycznie chwilowych sił tarcia pomiędzy płytą górną a próbką P3 dla określonych współczynników tarcia μ MES podczas PMW.



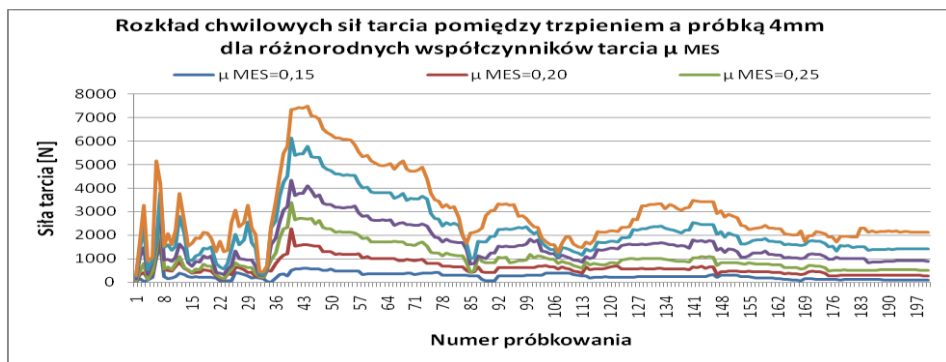
Rys. 5.9. Przebiegi wyznaczone numerycznie chwilowych sił tarcia pomiędzy trzpieniem a próbką P3 dla określonych współczynników tarcia μ MES podczas PMW



Rys. 5.10. Przebiegi wyznaczone numerycznie chwilowych sił tarcia pomiędzy płytą dolną a próbką P4 dla określonych współczynników tarcia μ MES podczas PMW



Rys. 5.11. Przebiegi wyznaczone numerycznie chwilowych sił tarcia pomiędzy płytą górną a próbką P4 dla określonych współczynników tarcia μ MES podczas PMW



Rys. 5.12. Przebiegi wyznaczone numerycznie chwilowych sił tarcia pomiędzy trzpieniem a próbką P4 dla określonych współczynników tarcia podczas PMW

Wyniki symulacji uzyskane w module postprocesora pozwoliły otrzymać informacje dotyczące wpływu doboru współczynnika μ_{MES} na wartości chwilowych sił tarcia ślizgowego dla próbek P1, P2, P3 i P4. Analiza numeryczna PMW pozwoliła na wyznaczenie naprężeń, odkształceń i prędkości przemieszczeń materiału w próbkach P1, P2, P3, P4.

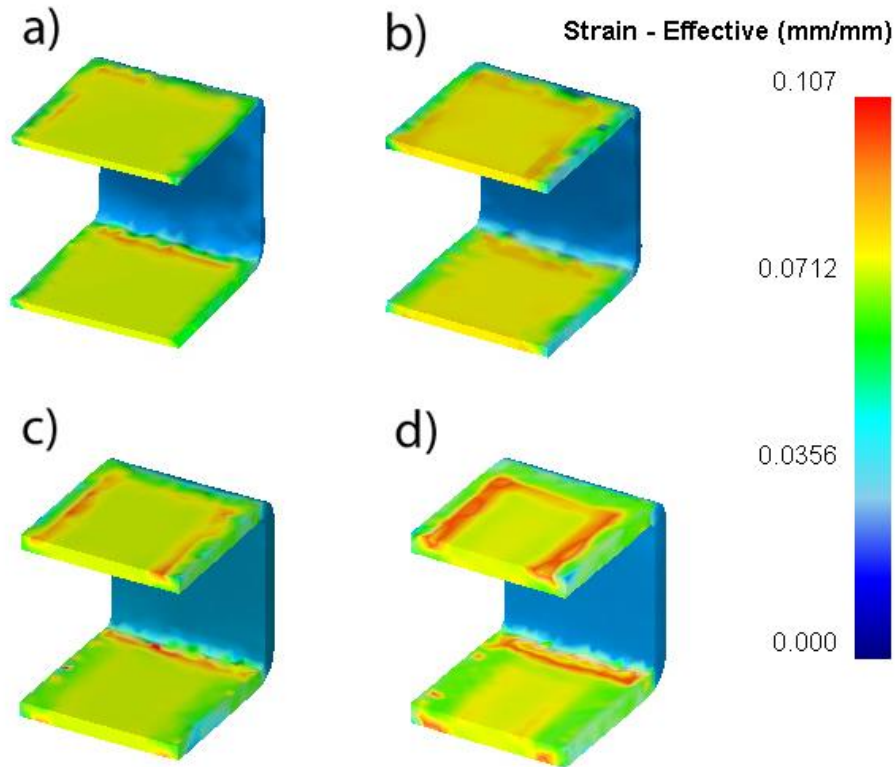
Przykładowe wykresy przedstawiające rozkład odkształceń pokazano na rysunkach 5.13 a, b, c, d. Uzyskany na podstawie badań numerycznych wykonanych w programie Deform 3D rozkład gradientu odkształceń wskazuje, że próbki w obszarze styku z przeciwpróbkami zostały odkształcone liniowo na grubości blachy w przedziale od 0,07 do 0,53 mm. Natomiast odkształcenie takie w obszarze styku próbki z częścią roboczą trzpienia zawiera się w przedziale od 0 do 0,024mm.

Analiza wielkości odkształceń występujących w próbce odkształcanej od strony jej kontaktu z matrycą wykazała, że odkształcenia są większe niż odkształcenia materiału od strony jego kontaktu z częścią roboczą trzpienia.

Wskazane różnice wielkości odkształceń można tłumaczyć występowaniem dodatkowo sił oporów tarcia przy przesuwaniu się próbki kształtowej po powierzchni przeciwpróbki. Jest to spowodowane odkształceniem się materiału przedniej części próbki gdzie styk typu powierzchnia-powierzchnia był realizowany tylko w pierwszej fazie PMW. Tego typu uzyskane odkształcenie w zdyskretyzowanych próbkach jest adekwatne do odkształcenia próbek biorących udział w badaniach laboratoryjnych. Takie zachowanie materiału można również zaobserwować w procesach przemysłowych tj. wytłaczanie, wyciąganie w szczególności w czołowej części wytłoczek.

Podczas analizy odkształconych próbek kształtowych zaobserwowano, że odkształcenia wzrastają wraz ze wzrostem grubości zastosowanej blachy – co jest zgodne z informacjami opisanymi w części teoretycznej pracy.

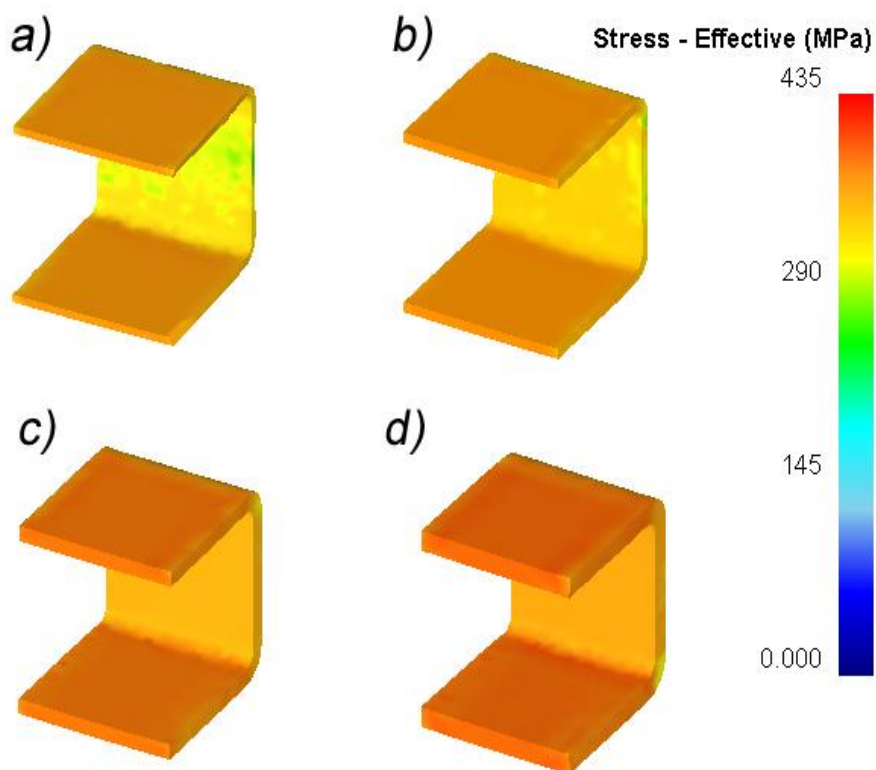
Step 200



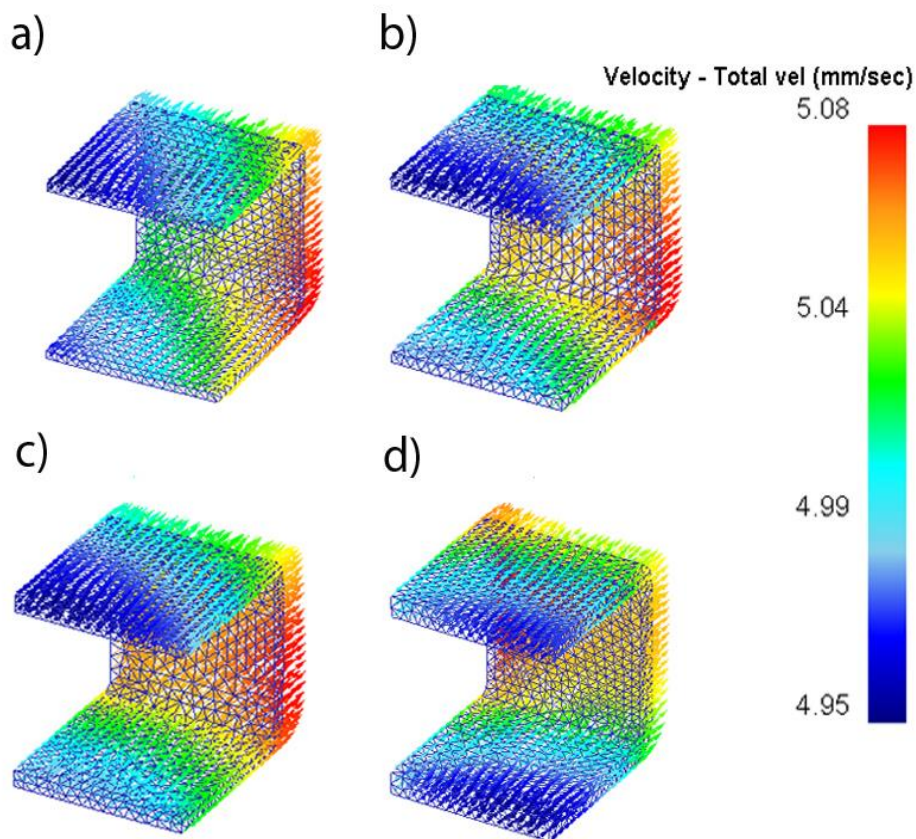
Rys. 5.13. Zmienny rozkład odkształceń materiału dla kroku próbkowania równego 200 dla próbek: a) 1,5mm, b) 2mm, c) 3mm, d) 4mm

Przykładowe wykresy przedstawiające rozkład odkształceń pokazano na rysunkach 5.14 a, b, c, d. Wartości naprężeń, które uzyskano w procesie symulacji numerycznych przekraczają naprężenie uplastyczniające dla stali S235JR wynoszące ok. 235 MPa. Potwierdzeniem zjawisk zmienności odkształceń w badanych próbkach są uzyskane efekty naprężeń i prędkości odkształceń w procesie wytłaczania – rysunki 5.14 i 5.15.

Step 200



Rys. 5.14. Zmiany naprężeń materiału dla kroku próbkowania równego 200 dla próbek:
a) 1,5mm, b) 2mm, c) 3mm, d) 4mm

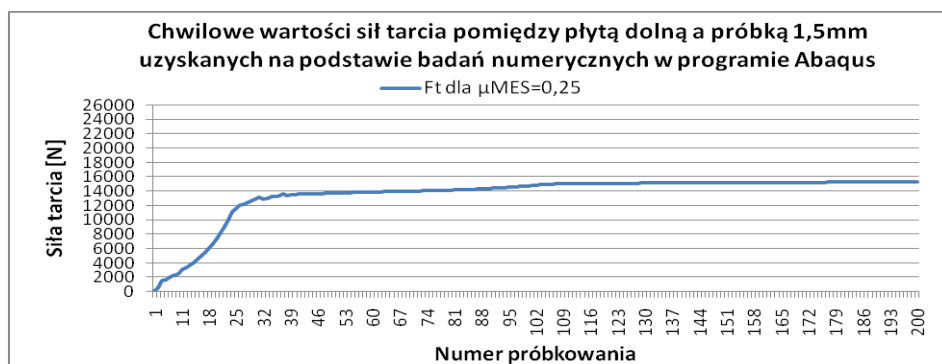


Rys. 5.15. Zmiany prędkości przemieszczenia materiału dla kroku próbkowania równego 200 dla próbek: a) 1,5mm, b) 2mm, c) 3mm, d) 4mm

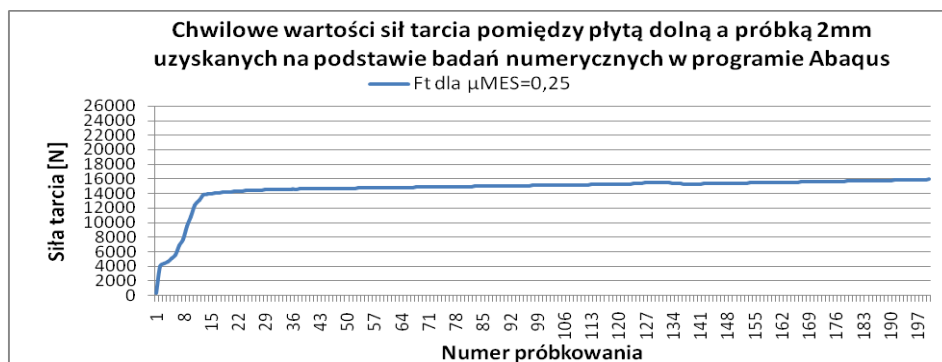
Stycznie działające siły tarcia do powierzchni styku próbki z narzędziami działania pionowego i poziomego spowodowały pojawienie się symetrycznego rozkładu naprężeń i odkształceń w próbkach. Korzystając z map naprężeń określono, że w próbkach po procesie odkształcenia plastycznego występują złożone stany naprężeń. Pola naprężeń w materiale nie są jednorodne i cechuje je zróżnicowany rozkład. Złożoność rzeczywistego procesu i trudność jego odwzorowania spowodowała nieznaczne różnice w uzyskanych wynikach dla różnych metod badawczych.

W programie Abaqus analizie numerycznej poddano cztery reprezentatywne zdyskretyzowane modele próbek: 1,5mm, 2mm, 3mm, 4mm. Przeprowadzenie obliczeń numerycznych dało efekt w postaci szeregu charakterystyk zmian sił

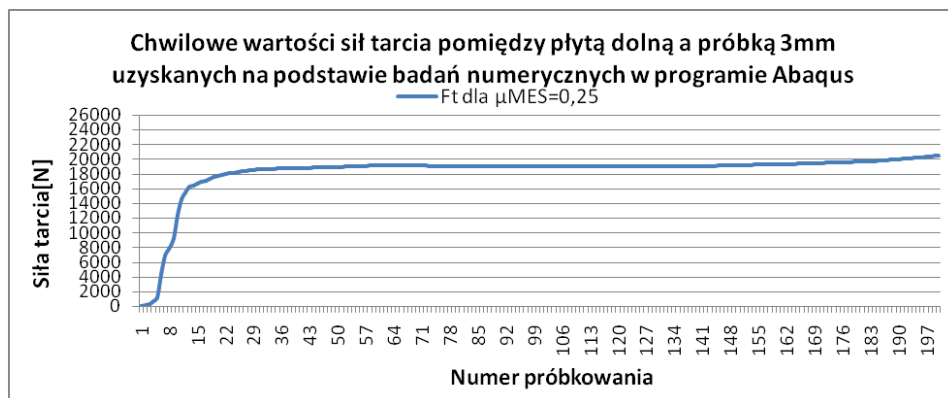
tarcia w funkcji próbkowania $F_t=f(S_m)$. Na rysunkach 5.16 ÷ 5.19 pokazano przykładowe rozkłady sił tarcia pomiędzy odkształcanymi próbkami a narzędziami dla $\mu_{MES}=0,25$.



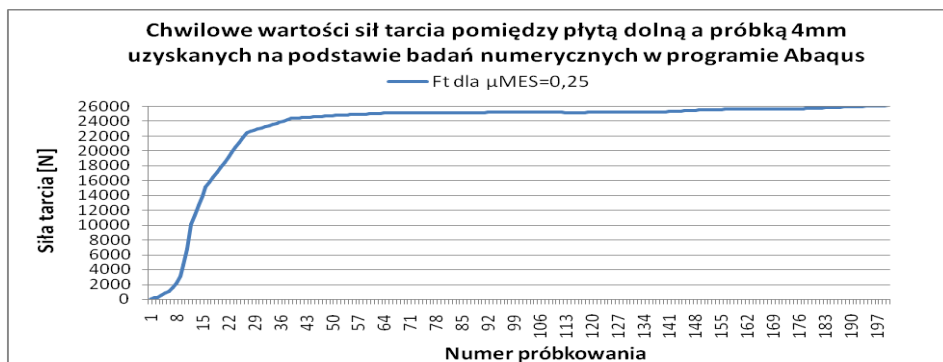
Rys. 5.16. Chwilowe wartości siły tarcia pomiędzy próbką 1,5mm a płytą dolną



Rys. 5.17. Chwilowe wartości siły tarcia pomiędzy próbką 2mm a płytą dolną

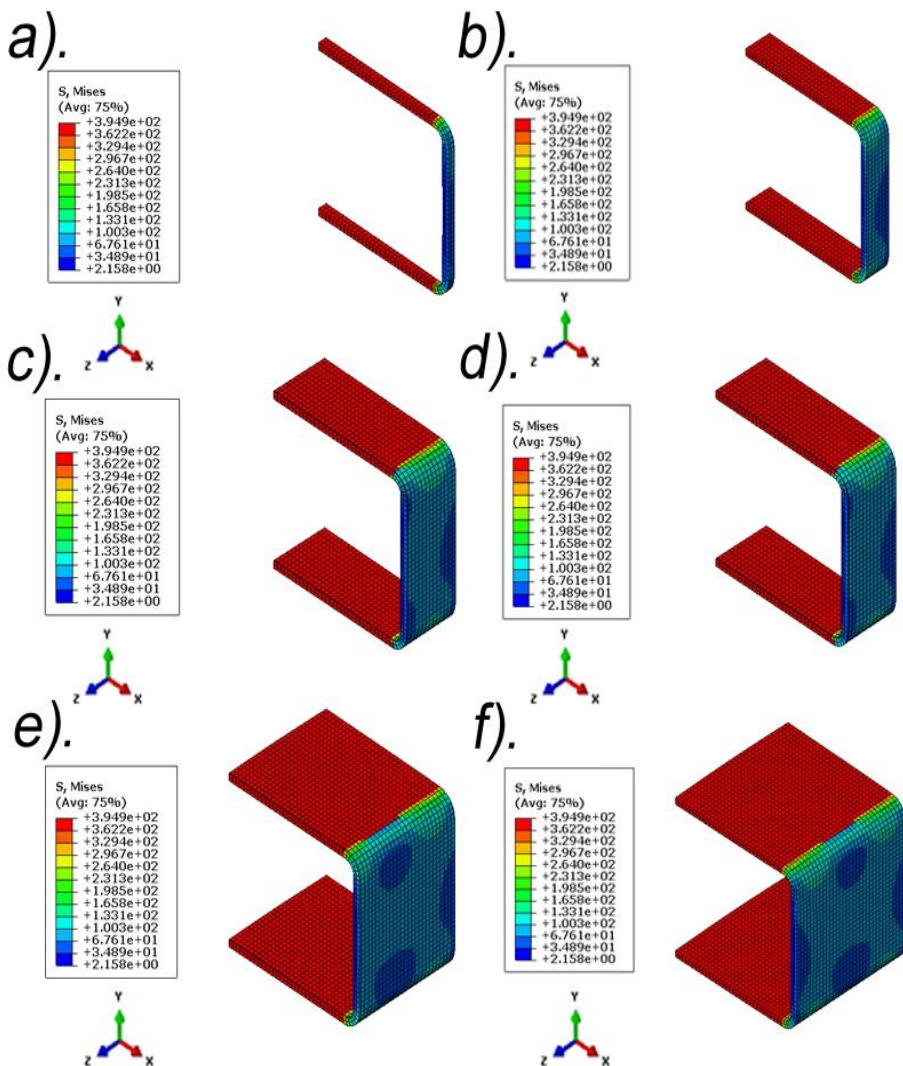


Rys. 5.18. Chwilowe wartości siły tarcia pomiędzy próbką 3mm a płytą dolną

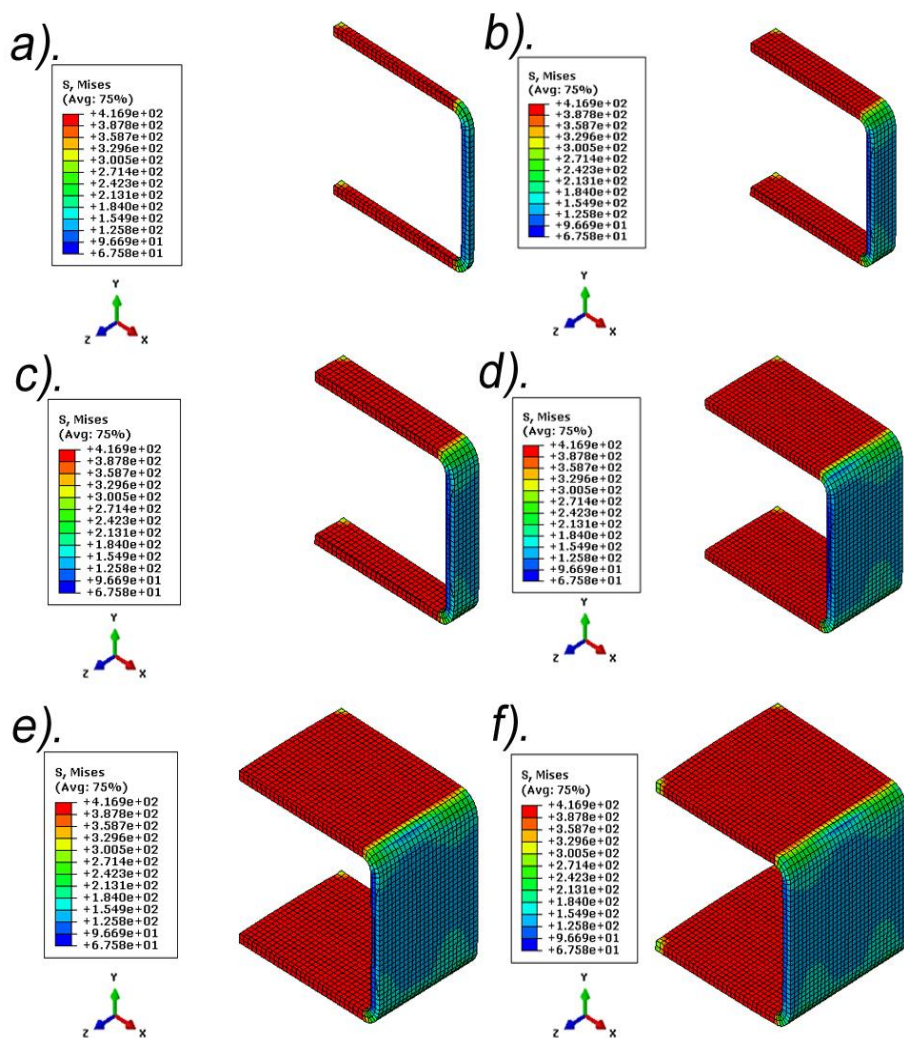


Rys. 5.19. Chwilowe wartości siły tarcia pomiędzy próbką 4mm a płytą dolną

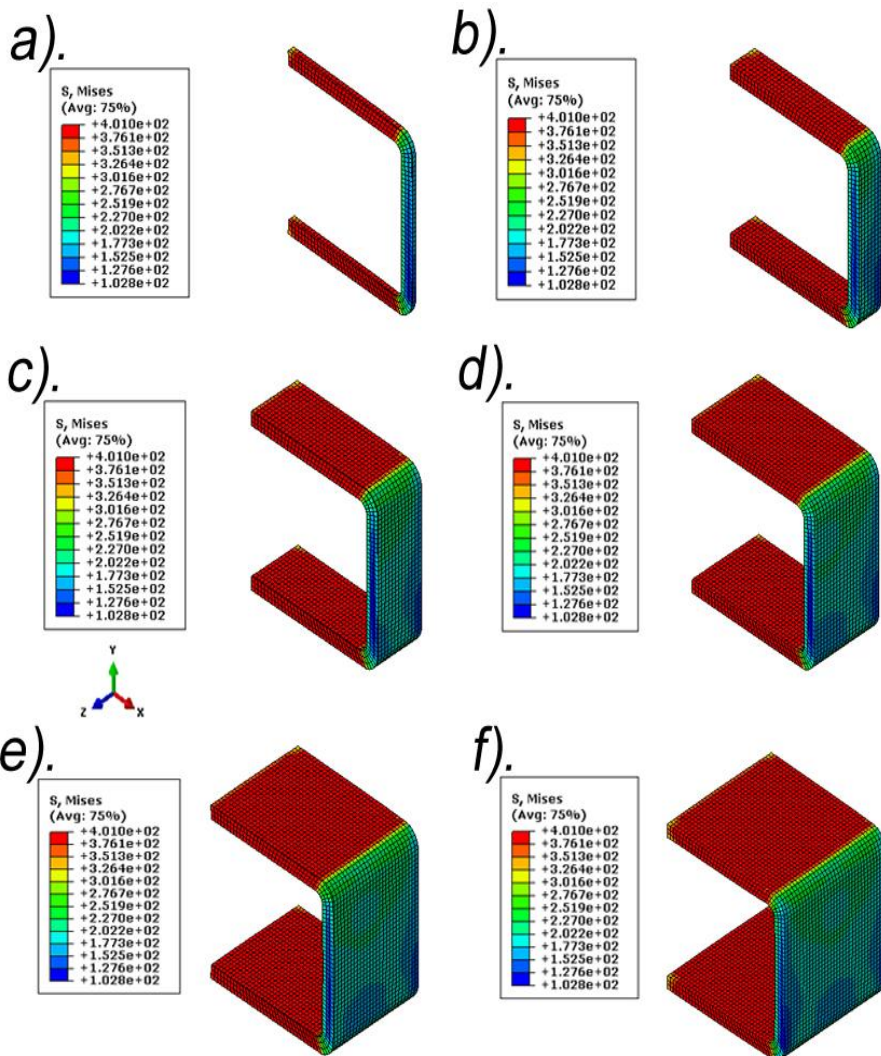
Warunki brzegowe zostały ustalone według warunków technologicznych stosowanych na stanowisku do PMW. Warunki początkowe ustalono w programie, jako zmienne czynniki eksperymentalne celowo wprowadzone do procesu obliczeniowego. Pomimo występowania płaszczyzn symetrii modele tribologiczne poddano badaniom całego układu. W badaniach numerycznych z wykorzystaniem programu Abaqus dla analizowanych grup próbek P1, P2, P3, P4 określono rozkłady naprężeń na i pod powierzchnią styku. Dla lepszego ich zobrazowania odkształcone próbki zostały pokazane na rysunkach od 5.20 do 5.23 jako wycinki. Przedstawione przekroje próbek kształtowych zawierające mapy w postaci naprężeń zredukowanych σ_{red} uzyskano w module postprocesora. Złożony rozkład sił działających na próbkę kształtową spowodował nierównomierną koncentrację naprężeń. Wyniki naprężeń dotyczące ramion i części czołowych próbek kształtowych uzyskano z dużym podobieństwem do wyników uzyskanych za pomocą oprogramowania Deform 3D. Wartości naprężeń w obszarach odkształcanych ramion próbek wynosiły ok. 400MPa natomiast w części czołowej próbek zaobserwowano naprężenia wynoszące ok. 200 MPa. W zaokrąglonych częściach próbek zaobserwowano wartości pośrednie naprężeń wynoszące ok. 300MPa.



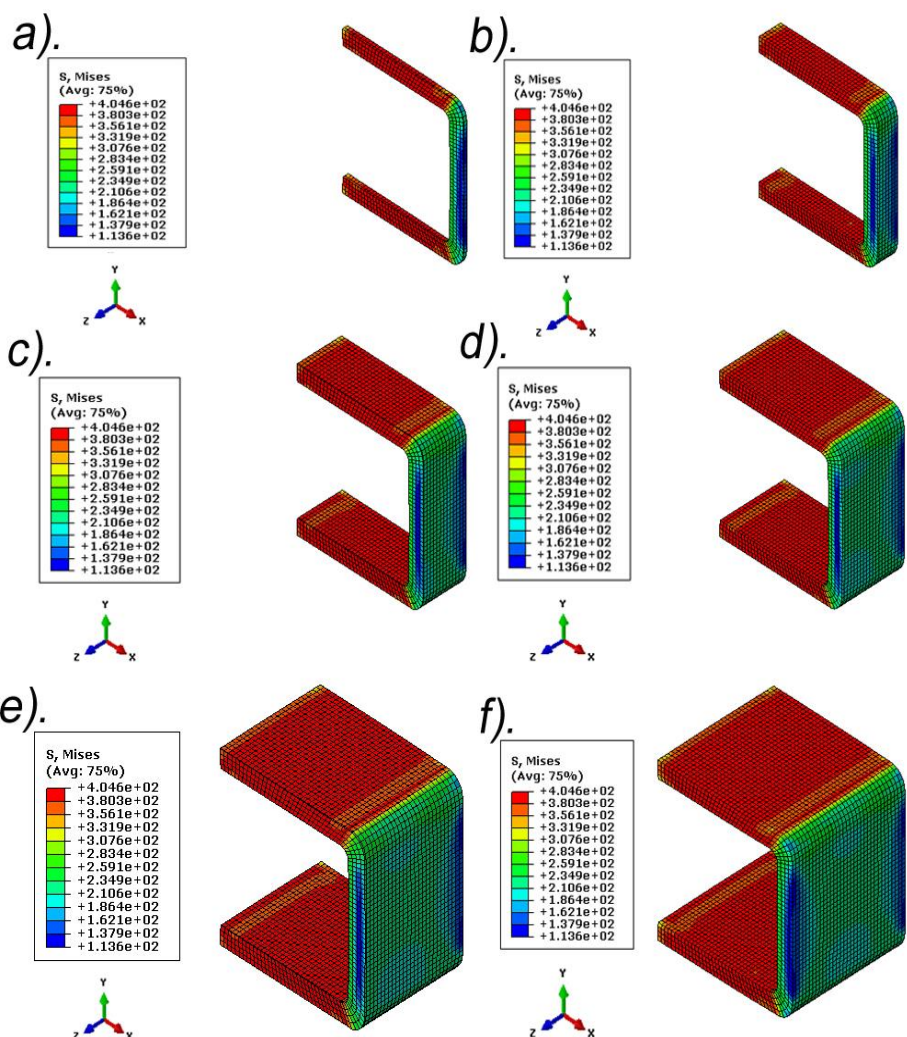
Rys. 5.20. Rozkład naprężeń w próbce P1 dla wycinków o szerokości: a) 5mm, b) 10mm, c) 15mm, d) 20mm, e) 25mm, f) 30mm (widok całej próbki)



Rys. 5.21. Rozkład naprężeń w próbce P2 dla wycinków o szerokości: a) 5mm, b) 10mm, c) 15mm, d) 20mm, e) 25mm, f) 30mm



Rys. 5.22. Rozkład naprężeń w próbce P3 dla wycinków o szerokości: a) 5mm, b) 10mm, c) 15mm, d) 20mm, e) 25mm, f) 30mm



Rys. 5.23. Rozkład naprężeń w próbce P4 dla wycinków dla szerokości: a) 5mm, b) 10mm, c) 15mm, d) 20mm, e) 25mm, f) 30mm

Na ramionach próbek odkształconych w programie Abaqus zauważono równomierne i symetryczne rozkłady naprężeń i odkształceń, co nie zawsze odpowiadało odkształceniom uzyskiwanym w badaniach numerycznych wykonywanych za pomocą programu Deform 3D.

5.2. Efekty badań laboratoryjnych przed i po procesie modelowego wytłaczania

Dla określenia zmian topografii powierzchni badanego materiału uwzględniono czynniki materiałowe w celu porównania zmian chropowatości i własności materiałowych oraz wielkości odkształceń materiału i powiązania ich z warunkami brzegowymi.

Dlatego też przeprowadzono próby badawcze zbadania właściwości materiałowych w wyniku przebiegu tarcia ślizgowego w PMW. Badania materiałowe obejmowały pomiar twardości, chropowatości oraz obserwacje metalograficzne próbek kształtowych ze stali S235JR i przeciwpróbek oraz trzpienia ze stali 41Cr4 przed i po PMW.

Wyniki badań przeprowadzono zgodnie z założeniami zawartymi w schemacie metodyki badań (rys. 1.2).

Wyniki badań twardości na przekroju poprzecznym próbek kształtowych wzdłuż ich ramion w trzech obszarach pomiarowych G, Ś, D w liniach 1,2,3 przedstawiono w tabeli 5.1. Natomiast wyniki twardości przeciwpróbek zrealizowanych w paśmie A i B na powierzchni współdziałania z próbką kształtową ujęto w tabeli 5.2.

Tab.5. 1. Wybrane wyniki pomiarów twardości próbek kształtowych 2 i 4 odkształconych plastycznie

Oznaczenie elementu	Miejsce pomiaru	Twardość HV10		
		Punkty pomiarowe		
		1	2	3
P2	G	146,5	148,8	155,4
	Ś	128,3	148,0	172,3
	D	131,8	138,4	162,4
	G	115,2	133,7	140,5
	Ś	120,4	135,0	147,4
	D	126,1	132,2	147,6
P4	G	145,4	154,0	158,5
	Ś	127,7	133,9	146,0
	D	138,8	142,6	149,0
	G	135,9	129,0	135,7
	Ś	125,1	122,1	133,3
	D	132,3	130,6	137,8

G– górna część przekroju blach próbki kształtowej,

Ś– środek przekrój blachy próbki kształtowej,

D– dolna część przekroju próbki kształtowej

Twardość przeciwpróbki spełniającej rolę matrycy ustalono, jako średnią arytmetyczną z grupy pomiarów – tabela 5.2.

Wyniki pomiaru twardości próbek kształtowych P2 i P4 na ich przekroju wskazują, że maksymalne wartości twardości występują w warstwie przypowierzchniowej w obszarze współpracy z przeciwpróbką – tabela 5.1. Dla próbki o oznaczeniu P2 twardość w górnej części przekroju wynosi 146 HV10 dla próbki P4 na zglądzie nr 1 – 145HV10 a na zglądzie nr 2 – 136HV10.

Tab. 5.2. Wyniki pomiaru twardości przeciwpróbki metodą Rockwella i Vickers'a

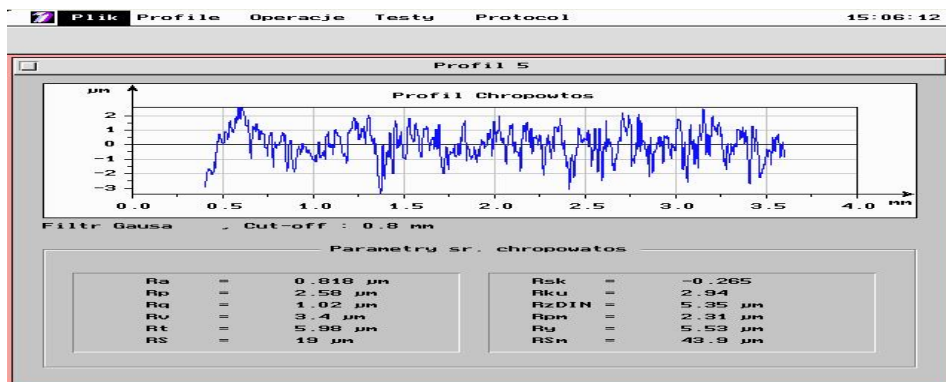
Oznaczenie zglądu	Twardość			
	HRC	$\overline{HRC}$	HV10	$\overline{HV10}$
A	53	52	581,0	567,2
	52		549,0	
	51		571,8	
B	52	53	595,0	588,6
	54		600,0	
	53		570,8	

Wstępne pomiary twardości przeciwpróbki zrealizowano na jej powierzchni roboczej metodą Rockwella w skali C. Twardość mierzona w paśmie A (tab. 5.2) wynosi 52HRC a w paśmie B 53HRC. Dodatkowo pomiar twardości w tych pasmach przeprowadzono metodą Vickers'a i uzyskano HV10 równe 567,2 w paśmie A i HV10 równe 588,6 w paśmie B.

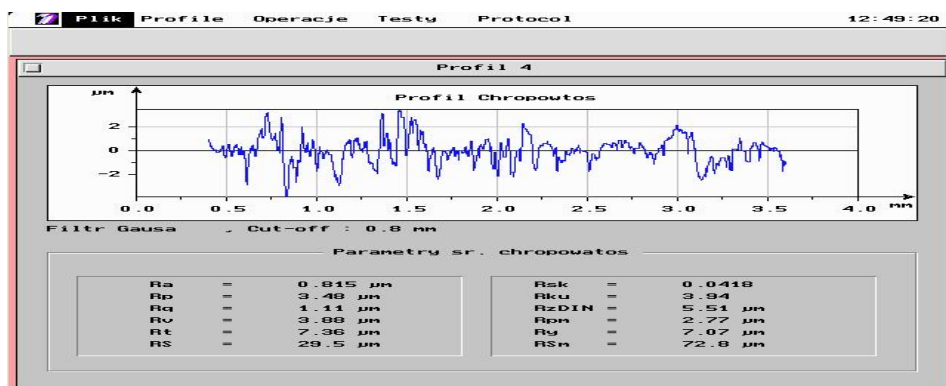
Twardość trzpienia wywołującego ruch posuwisty próbki kształtowej w PMW określona metodą Vickers'a wynosi 590HV.

Przemieszczanie próbki kształtowej względem przeciwpróbek w PMW powoduje cykliczne powstawanie i niszczenie połączeń adhezyjnych [25]. Skutkiem, czego występują zmiany chropowatości warstwy przypowierzchniowej materiału odkształcanego. W badaniach oceniano chropowatość próbek kształtowych podając wartość średniego odchylenia profilu Ra (parametr Ra).

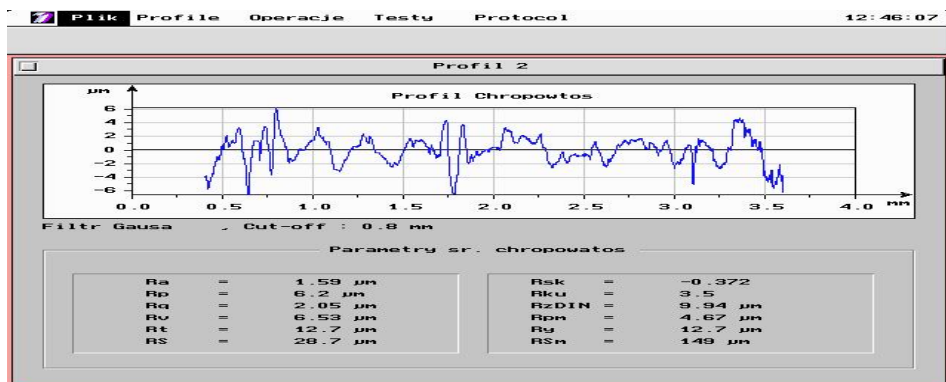
Wybrane profilogramy parametru chropowatości dla próbek kształtowych o oznaczeniu P1, P2, P3, P4 pokazano na rysunkach 5.24÷5.27, a narzędzi w postaci trzpienia i przeciwpróbki na rysunkach 5.28 i 5.29. Wyniki badań chropowatości powierzchni wybranych próbek kształtowych po PMW przedstawiono w tabelach 5.3÷5.6 i na histogramach 5.30÷5.33. Natomiast porównanie wyników pomiarów przed i po PMW – na histogramach 5.34÷5.37.



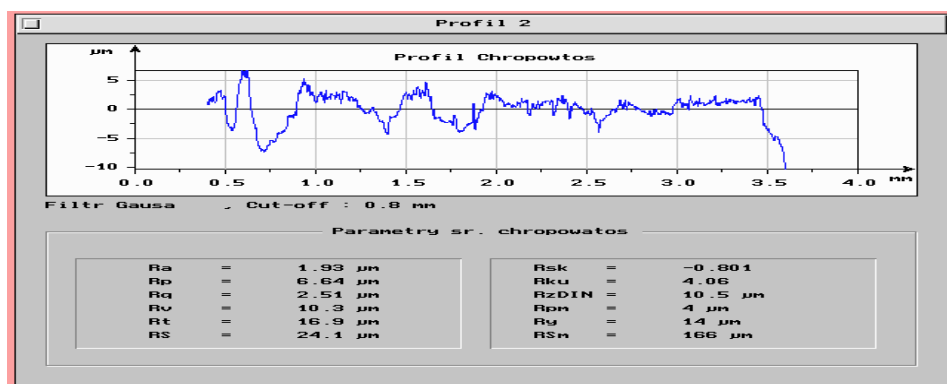
Rys. 5.24. Profilogram chropowatosi próbki P1 po PMW



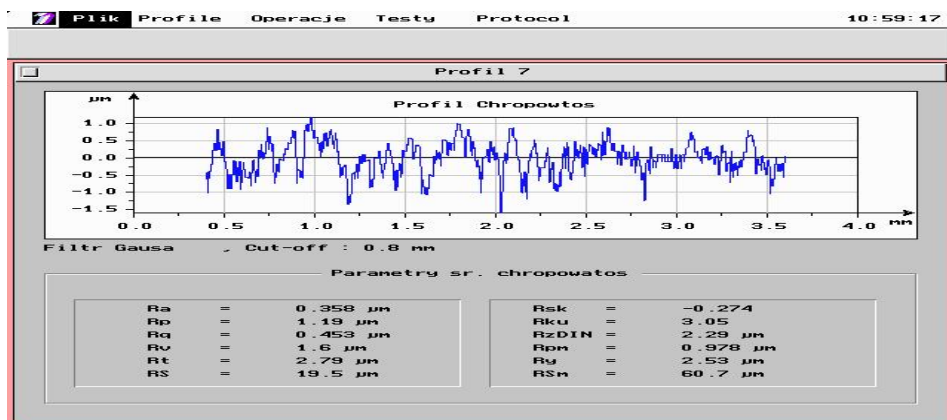
Rys. 5.25. Profilogram chropowatosi próbki P2 po PMW



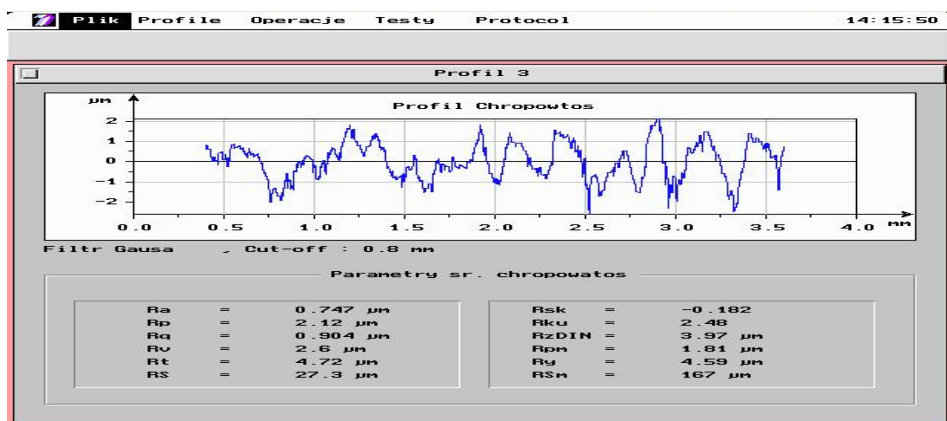
Rys. 5.26. Profilogram chropowatosi próbki P3 po PMW



Rys. 5.27. Profilogram chropowatości próbki P4 po PMW



Rys. 5.28. Profilogram powierzchni przeciwpróbki przed PMW



Rys. 5.29. Profilogram powierzchni styku trzpienia z próbką przed PMW

Maksymalną wartością Ra wynoszącą od ok. 1 do 1,5µm, od ok. 2 do 3 µm, od ok. 1,5 do 2,8 µm oraz od ok. 1,5 do 2 µm charakteryzuje się powierzchnia czołowa próbek kształtowych oznaczonych odpowiednio P1, P2, P3, P4 badanych po PMW (rysunki 5.30÷5.33). Chropowatość środkowych obszarów powierzchni bocznych próbek współpracujących z przeciwpróbką przyjmuje minimalne wartości $Ra \approx 0,5\mu m$ dla próbki P1, $Ra \approx 0,7\mu m$ dla próbki P2, $Ra \approx 0,6\mu m$ dla próbki P3 oraz $Ra \approx 0,6\mu m$ dla próbki P4. Środkowe obszary powierzchni bocznych badanych próbek stanowią pola styku z przeciwpróbką w PMW i stąd niższe wartości Ra w tych obszarach. Wartości parametrów chropowatości Ra mierzonych przed PMW są porównywalne na całej zewnętrznej powierzchni próbek. Natomiast po PMW chropowatość jest zdecydowanie niższa w obszarach styku próbki z przeciwpróbką (rysunki 5.34÷5.37). Wartości parametru Ra z tabel od 5.3 do 5.6 odnoszą się do następujących pasm próbek kształtowych:

- pasma A, B, C, D – powierzchnia styku materiału z płytą górną,
- pasma E, I – powierzchnia próbki bez styku z narzędziem,
- pasma F, G, H – wewnętrzna powierzchnia czołowa próbki kształtowej ze stykiem w pierwszej fazie PMW,
- pasma J, K, L, Ł – powierzchnia styku materiału z płytą dolną.

Tab. 5.3. Wartość parametru Ra dla pasm powierzchni styku próbki kształtowej P1 po PMW

Ozna- czenie pasma	Wartość parametru Ra[μm]									
	Przed PMW					Po PMW				
	Numer odcinka pomiarowego									
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
A	1,01	0,99	0,99	1,23	1,22	1,15	0,95	1,07	1,16	1,27
B	0,95	0,89	1,2	1,02	1,05	0,39	0,35	0,42	0,43	0,46
C	0,92	1,27	1,15	1,32	1,23	0,81	0,27	0,21	0,88	0,78
D	1,32	0,89	1,25	1,04	1,20	0,32	0,62	0,78	0,64	0,28
E	1,33	1,14	1,15	1,33	1,37	1,16	1,47	1,3	1,24	1,44
F	1,21	1,37	1,35	1,18	1,21	1,24	1,33	1,35	1,02	1,15
G	1,24	1,29	1,25	1,26	1,18	0,96	1,36	1,38	1,34	1,15
H	1,24	1,31	1,25	1,11	1,22	1,31	1,02	1,11	1,17	1,16
I	1,26	1,22	1,15	1,21	1,22	1,22	1,29	1,12	1,31	1,26
J	0,99	1,12	1,32	1,27	1,26	0,53	0,77	0,83	0,88	0,76
K	1,04	1,14	1,24	1,32	1,22	0,56	0,47	0,58	0,56	0,67
L	1,11	1,22	1,23	0,86	0,98	0,45	0,47	0,34	0,48	0,59
Ł	0,96	0,94	1,11	0,99	0,93	0,93	0,94	1,03	1,02	0,9

Tab. 5.4. Wartość parametru Ra dla pasm powierzchni styku próbki kształtowej P2 po PMW

Ozna- czenie pasma	Wartość parametru Ra[μm]									
	Przed PMW					Przed PMW				
	Numer odcinka pomiarowego									
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
A	2,17	2,3	2,1	2,05	1,86	2,35	2,24	2,61	2,21	1,34
B	2,37	2,1	1,6	1,3	2,2	1,84	1,23	0,95	0,81	0,86
C	2,44	2,2	1,9	1,97	2,24	0,64	0,56	0,98	0,52	0,55
D	2,17	2,1	2,1	2,08	1,95	1,17	1,01	0,87	1,13	0,75
E	2,42	2,3	2,8	2,26	2,33	2,52	2,86	2,93	2,29	2,59
F	2,45	2,4	2,4	2,49	2,54	2,52	2,47	2,24	2,51	2,53
G	2,24	2,1	2,5	2,03	2,72	2,23	2,16	2,69	1,97	2,67
H	2,12	2,1	2,2	2,28	2,27	2,17	2,46	2,43	2,44	2,28
I	2,33	2,2	2,2	2,31	2,04	2,41	2,31	2,12	2,29	2,21
J	2,11	2,1	2,2	2,13	2,12	1,11	1,02	1,24	0,85	1,07
K	1,78	1,8	1,8	2,23	1,93	0,68	0,75	0,99	1,15	0,85
L	2,44	2,3	2,2	2,11	2,04	1,1	0,78	0,75	0,84	1,02
Ł	2,36	2,2	2,3	2,37	2,24	2,4	2,5	2,18	2,12	2,24

Tab. 5.5. Wartość parametru Ra dla pasm powierzchni styku próbki kształtowej P3 po PMW

Ozna- czenie pasma	Wartość parametru Ra[μm]									
	Przed PMW					Przed PMW				
	Numer odcinka pomiarowego									
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
A	1,83	1,75	1,94	1,81	1,92	1,21	1,23	1,14	0,79	1,11
B	1,61	1,82	1,42	1,41	1,83	0,56	0,36	0,37	0,44	0,29
C	1,88	1,79	1,72	1,51	1,59	0,8	0,85	0,69	0,46	0,59
D	1,54	1,51	1,55	1,66	1,61	0,53	0,49	0,57	0,63	0,56
E	1,71	1,72	1,62	1,58	1,49	1,82	1,91	1,67	1,93	1,89
F	1,83	1,82	1,85	1,87	1,88	1,77	1,69	1,96	1,87	1,95
G	1,77	1,73	1,78	1,59	1,79	1,89	1,26	1,37	1,18	1,31
H	1,93	1,87	1,86	1,78	1,89	1,83	2	1,98	1,65	1,91
I	1,93	1,84	1,72	1,96	2,03	1,72	2,14	2,12	1,98	2,08
J	1,65	1,57	1,38	1,51	1,82	1,04	1,18	1,28	0,92	1,01
K	1,7	1,71	1,73	1,76	1,72	0,71	0,74	0,63	0,71	0,6
L	1,41	1,43	1,34	1,29	1,38	1,24	1,17	1,04	1,11	1,28
Ł	1,33	1,41	1,34	1,23	1,43	1,23	1,42	1,31	1,03	1,38

Tab. 5.6. Wartość parametru Ra dla pasm powierzchni styku próbki kształtowej P4 po PMW

Ozna- czenie pasma	Wartość parametru Ra[μm]									
	Przed PMW					Przed PMW				
	Numer odcinka pomiarowego									
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
A	1,56	1,47	1,12	1,61	1,13	1,41	1,48	1,11	1,57	1,14
B	1,32	1,43	1,45	1,32	1,41	0,22	0,23	0,38	0,31	0,27
C	1,71	1,64	1,48	1,65	1,69	0,67	0,69	0,45	0,66	0,62
D	1,55	1,73	1,54	1,52	1,41	0,54	0,73	0,54	0,42	0,35
E	1,75	1,73	1,89	1,55	1,69	1,68	1,76	1,84	1,89	1,85
F	1,78	1,69	1,88	1,84	1,65	1,82	1,62	1,65	1,82	1,62
G	1,58	1,72	1,74	1,81	1,62	1,52	1,61	1,81	1,77	1,42
H	1,78	1,76	1,87	1,89	1,79	1,99	1,9	1,76	1,83	2,00
I	1,99	1,93	1,79	1,72	1,83	2,03	1,93	1,89	1,66	1,79
J	1,73	1,66	1,67	1,68	1,78	0,7	0,61	0,67	0,67	0,72
K	1,41	1,31	1,27	1,43	1,32	1,04	1,15	0,92	0,94	1,07
L	1,52	1,43	1,52	1,42	1,61	0,91	0,81	0,71	0,7	0,69
Ł	1,23	1,39	1,12	1,34	1,37	1,11	1,11	1,06	1,21	1,27

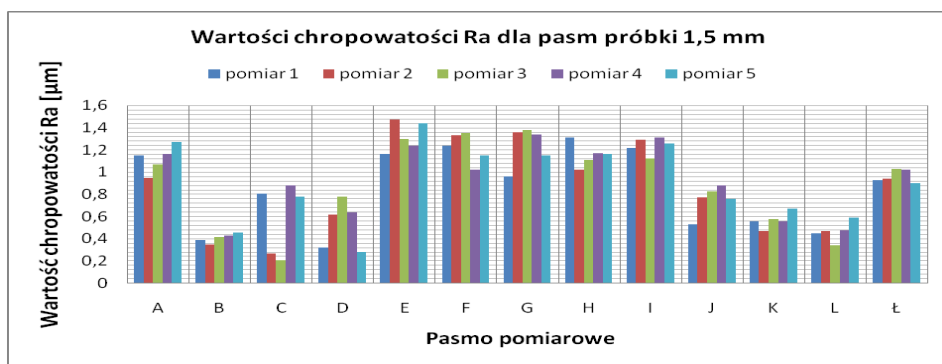
Przykładowe wartości chropowatości Ra dla badanych pasm narzędzia typu płyta górna przed i po PMW opisano w tabeli 4.7.

Tab. 5.7. Zestawienie wartości chropowatości dla narzędzia typu płyta po PMW

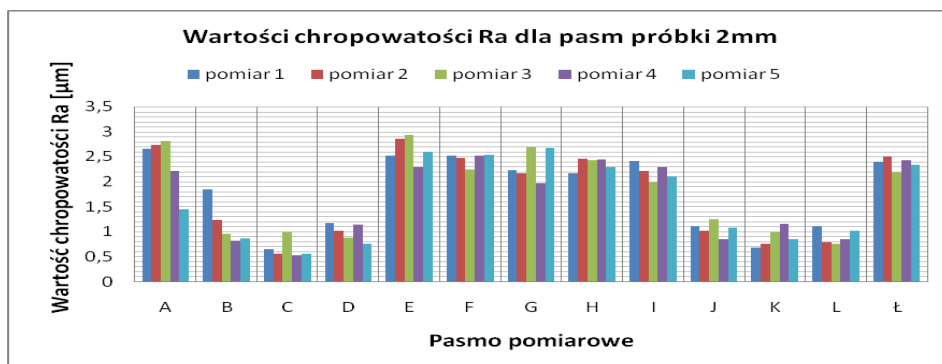
Oznaczenie pasma	Wartość parametru Ra[μm]									
	Przed PMW					Przed PMW				
	Numer odcinka pomiarowego									
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
M	0,49	0,46	0,49	0,51	0,47	0,51	0,45	0,50	0,47	0,46
N	0,48	0,52	0,52	0,47	0,49	0,44	0,45	0,48	0,47	0,49
O	0,49	0,48	0,52	0,51	0,52	0,50	0,51	0,57	0,54	0,49

Wartość chropowatości powierzchni przeciwpróbki określona jako średnia arytmetyczna w pasmach M, N, O jest zbliżona i wynosi ok. 0,5 μm co odpowiada ósmej klasie chropowatości.

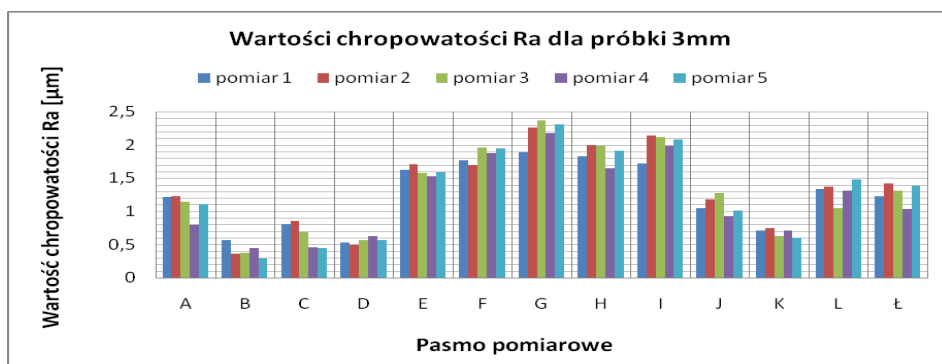
Przygotowane przeciwpróbki i trzpień do badania parametrów tarcia w PMW spełniają wymagania co do twardości i chropowatości stawiane narzędziom przez PN-73/M-04251. Parametr chropowatości wymagany przez PN dla narzędzi w takich procesach wynosi $Ra \approx 0,6$ a twardość $\approx 65\text{HRC}$.



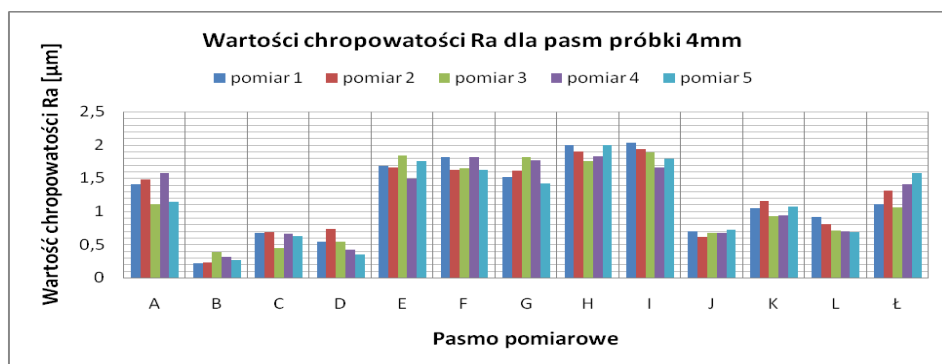
Rys. 5.30. Wartości chropowatości powierzchni pasm próbki kształtowej P1 po PMW



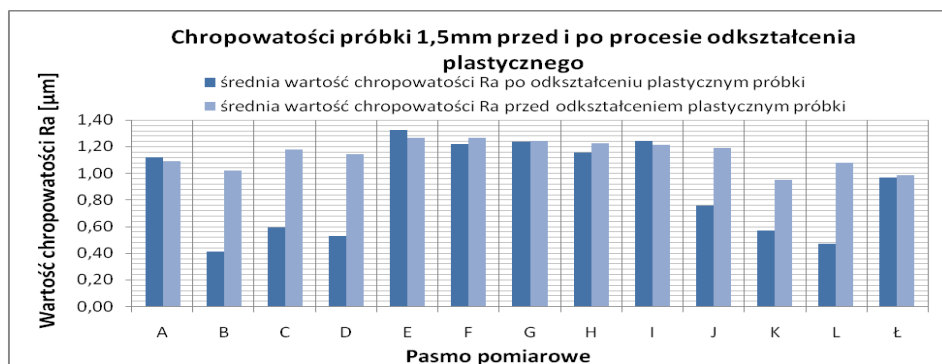
Rys. 5.31. Wartości chropowatości powierzchni pasm próbki kształtowej P2 po PMW



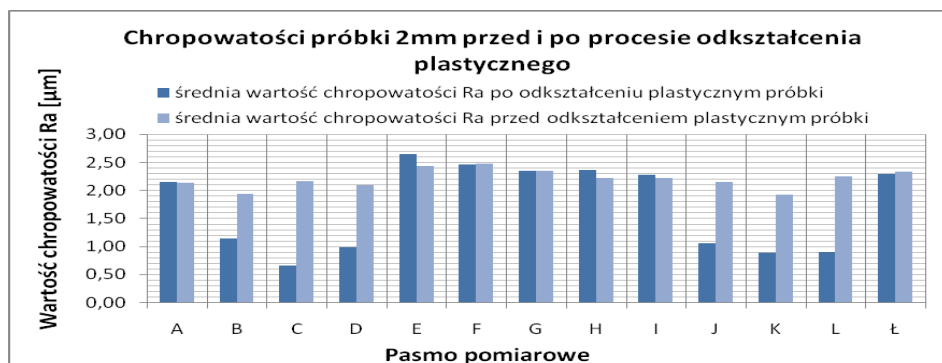
Rys. 5.32. Wartości chropowatości powierzchni pasm próbki kształtowej P3 po PMW



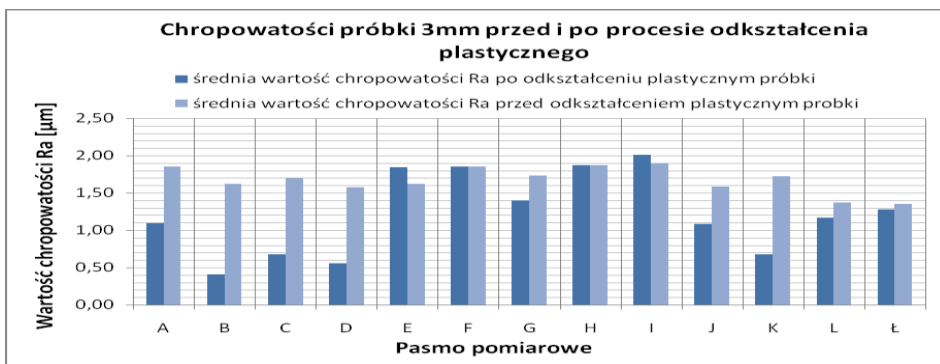
Rys. 5.33. Wartości chropowatości powierzchni pasm próbki kształtowej P4 po PMW



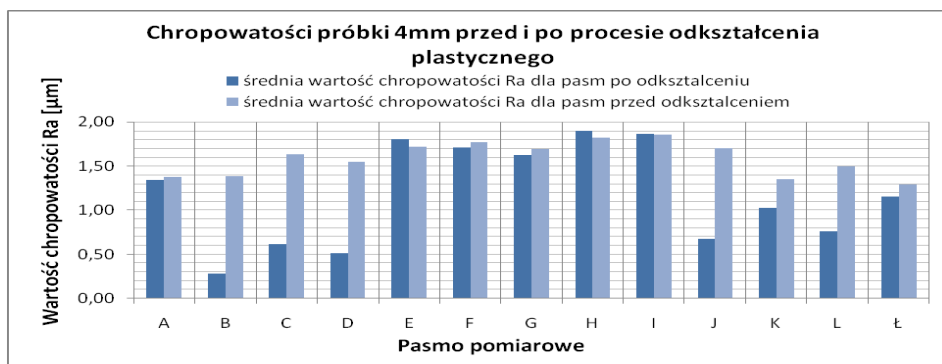
Rys. 5.34. Średnie wartości chropowatości powierzchni pasm próbki kształtowej P1 przed i po PMW



Rys. 5.35. Średnie wartości chropowatości powierzchni pasm próbki kształtowej P2 przed i po PMW



Rys. 5.36. Średnie wartości chropowatości powierzchni pasm próbki kształtowej P3 przed i po PMW

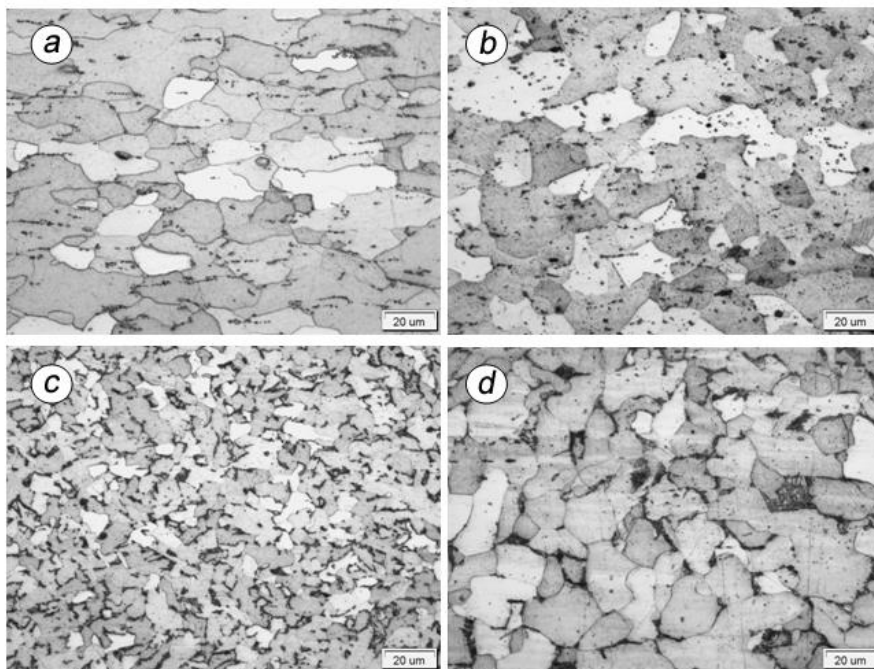


Rys. 5.37. Średnie wartości chropowatości powierzchni pasm próbki kształtowej P4 przed i po PMW

W wyniku odkształcenia plastycznego w PMW w strefach styku próbek kształtowych z przeciwpórką stwierdzono występowanie niewielkiego spadku chropowatości powierzchni w pasmach B÷D oraz JL natomiast wartość współczynnika Ra w pasmach E, I nie uległa zmianie. Zmniejszenie chropowatości podczas odkształceń plastycznych materiału potwierdzają wyniki badań zamieszczonych w literaturze [24].

Przeprowadzone badanie parametrów tarcia w PMW, w warunkach laboratoryjnych przy wykorzystaniu próbek kształtowych od P1 do P4 oraz przeciwpórek i trzpienia pozwoliło uzyskać wyniki określające wielkości zmian chropowatości modelu węzła tarcia ślizgowego w PMW. Znajomość wartości parametru chropowatości powierzchni próbek i narzędzi przed i po PMW powiązana jest z doбором współczynników tarcia w badaniach numerycznych MES.

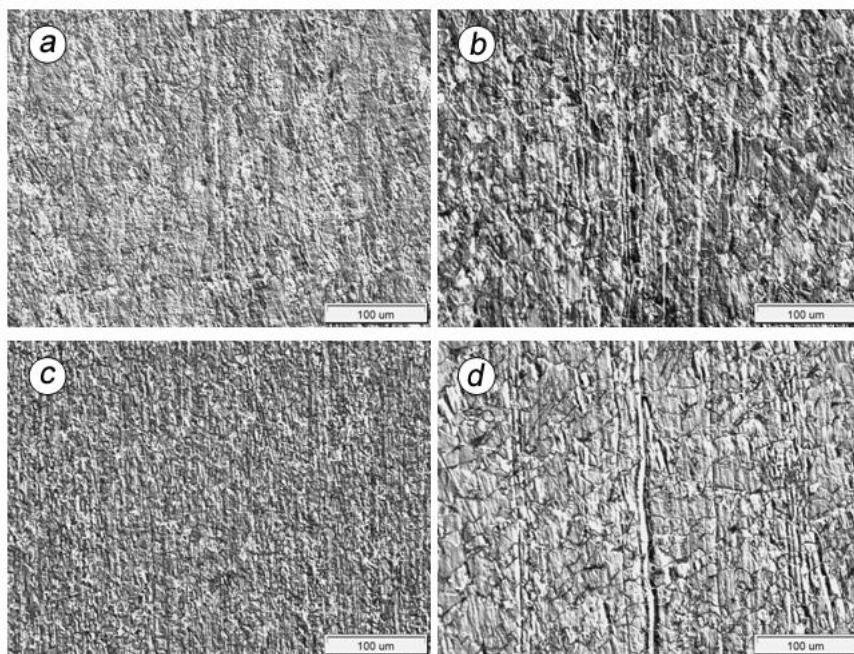
Badania metalograficzne mikroskopowe pozwoliły określić strukturę, rozmiary i kształt ziaren oraz rodzaje efektów odkształcenia w materiale próbek kształtowych o oznaczeniu P1, P2, P3, P4 przed oraz po odkształceniu w PMW. Wyniki obserwacji metalograficznych przedstawione na mikrofotografiach pozwoliły potwierdzić, że przyjęto prawidłowe założenia w opracowaniu modeli badawczych. Badane próbki kształtowe o oznaczeniach P1, P2, P3, P4 przeznaczone do badania parametrów tarcia w PMW charakteryzuje struktura ferrytyczna z niewielką ilością cementytu w postaci drobnych wydzieliń usytuowanych na granicach ziaren ferrytu (rys. 5.38).



Rys. 5.38. Struktury ferrytyczne z Fe_3C próbek kształtowych: a) próbka P1, b) próbka P2, c) próbka P3, d) próbka P4 w stanie dostarczenia

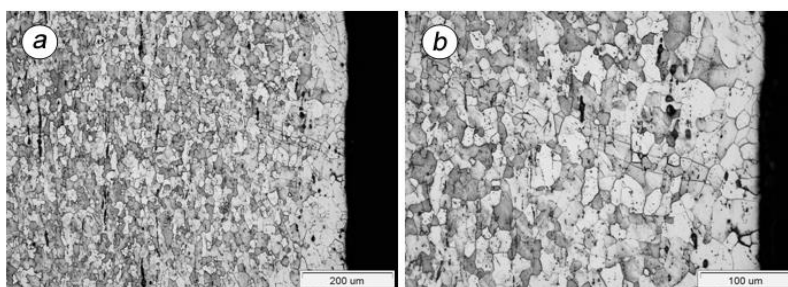
Struktura stali poszczególnych próbek w stanie dostarczenia różni się wielkością ziaren ferrytu. Średnia średnica ziaren ferrytu w strukturze próbek kształtowych P1, P2, P3, P4 wynosi ok. 40 μm , 35 μm , 30 μm , 8 μm .

Przeprowadzenie PMW spowodowało zmiany kształtu ziaren w strukturze stali próbek kształtowych oraz pojawienie się wyraźnych efektów odkształcenia plastycznego (rys. 5.39). Po odkształceniu na zimno w PMW w strukturze materiału w zewnętrznym obszarze przypowierzchniowym próbek P1, P2, P4 wystąpiły efekty odkształcenia w postaci wydłużonych ziaren ferrytu.



Rys. 5.39. Wydłużone ziarna ferrytu w strukturze stali S235JR w obszarze współdziałania próbki i przeciwpróbki a) próbka P1, b) próbka P2, c) próbka P3, d) próbka P4

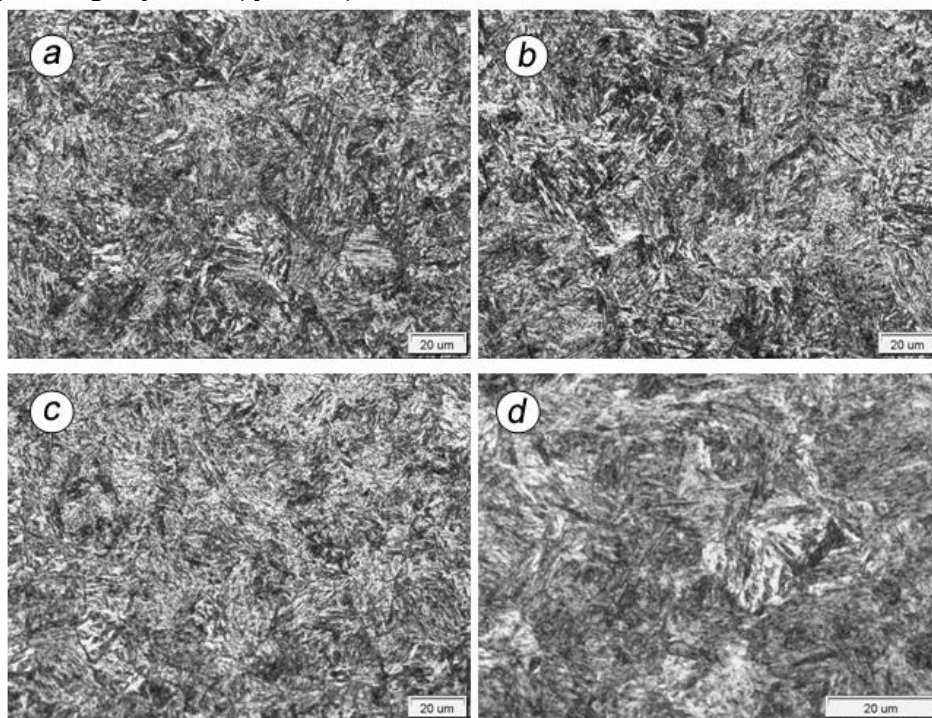
W środkowej części przekroju próbek występują osiowe ziarna ferrytu. Obserwacje metalograficzne w świetle spolaryzowanym przy użyciu kontrastu Nomarskiego pozwoliły na ujawnienie występowania pasm odkształcenia w próbkach odkształcanych w procesie PMW (rys. 5.40). Pasma te występują głównie w obszarach współdziałania próbki i przeciwpróbki i przebiegają zgodnie z kierunkiem przemieszczania się próbki podczas PMW. Ponadto w strukturze materiału próbki P2 stwierdzono w obszarach współpracy z przeciwpróbką występowanie pasm ścinania, których oś tworzy kąt ok. 65° z powierzchnią próbki (rys. 5.40).



Rys. 5.40. Pasma ścinania w strukturze stali S235JR próbki P2 w obszarze współdziałania próbki P2 i przeciwpróbki a) – powiększenie x200, b) – powiększenie x400

Występujące efekty w materiale próbek w obszarach styku z przeciwpórką można interpretować, jako odkształcenia zewnętrznych warstw materiału próbek poddawanych odkształceniu w PMW. Potwierdzają one słuszność przyjętego modelu próbka – przeciwpórką o charakterze sztywno – plastycznym.

Materiał dolnej i górnej przeciwpórkki jak również trzpienia w urządzeniu do badania parametrów tarcia w PMW charakteryzuje się strukturą bainityczno – martenzytyczną nisko odpuszczoną o zróżnicowanej wielkości płytek poszczególnych faz (rys. 5.41).



Rys. 5.41. Martenzyt z bainitem w strukturze stali 41Cr4; a) przeciwpórkki górnej, b) przeciwpórkki dolnej c) trzpienia - pow.1000x, d) trzpienia - pow. 2000x

Struktura martenzytyczno-bainityczna przeciwpórek i trzpienia o wysokiej twardości ok. 53HRC w zestawieniu z niską twardością stali S235JR próbek kształtowych potwierdza trafność przygotowania modelu sztywno - plastycznego do analizy zjawiska PMW.

5.3. Wyniki badań parametrów siłowych w procesie modelowego wylaczania

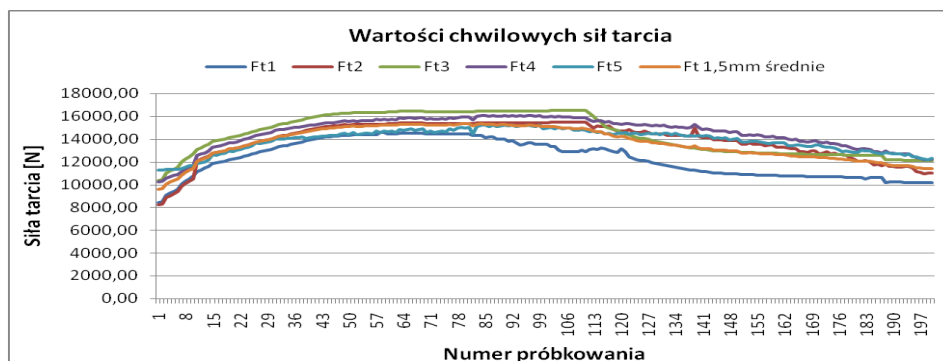
Do pomiaru sił tarcia odnoszących się do zmian parametrów tarcia ślizgowego w warunkach odkształceń plastycznych wykorzystano pomiary tensometryczne zgodnie z opisem z rozdziału 4.3.2. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów sił tarcia na stanowisku laboratoryjnym wyznaczone zostały średnie wartości siły tarcia dla czterech grup próbek P1, P2, P3, P4. Siła nacisku prasy była zwiększana od zera do siły P_k wynoszącej od 70 kN do 100 kN w zależności od grubości próbki.

Przykładowe wyniki badań chwilowych sił tarcia dla próbek 1.5mm dla nacisku równego 70 kN w czasie 5 sekund zamieszczono w tabeli nr 5.8.

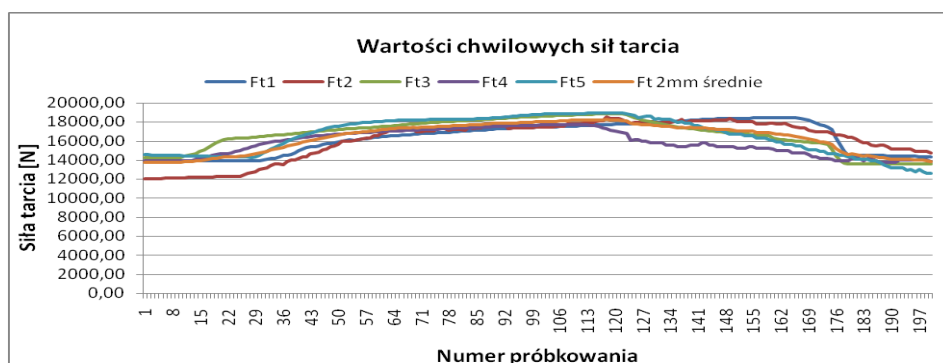
Tab. 5.8. Wybrane wyniki chwilowych sił tarcia dla próbki A=1,5mm

Próba Numer próbkowania	P1=1,5mm				
	Wartości sił dla określonego numeru próby				
	Nr 1	Nr 2	Nr 3	Nr 4	Nr 5
	Ft _{ch} [N]	Ft _{ch} [N]	Ft _{ch} [N]	Ft _{ch} [N]	Ft _{ch} [N]
10	10734,33	10546,68	12655,77	11644,78	11684,26
20	12269,08	13202,44	14191,30	13680,04	12914,01
30	12972,59	13906,12	14895,16	14436,67	13654,79
40	13727,42	14663,71	15649,99	15100,49	14164,49
50	14292,43	15226,48	16215,60	15538,22	14437,40
60	14563,72	15328,06	16317,47	15662,41	14572,90
70	14476,10	15411,22	16400,65	15721,69	14602,91
80	14469,49	15403,39	16392,81	15911,60	14973,31
90	13990,50	15432,98	16422,41	15985,98	15085,70
100	13521,06	15472,05	16461,49	16027,32	15125,55
110	13051,00	15510,46	16499,91	15891,03	14826,96
120	12909,75	14860,43	14832,29	15320,87	14388,50
130	11805,79	14478,10	13727,77	15130,82	14408,02
140	11182,21	14289,52	13103,88	14999,36	14345,63
150	10925,87	13905,05	12847,41	14638,61	14041,38
160	10801,13	13291,81	12717,47	14110,60	13646,62
170	10708,32	12972,96	12629,35	13874,39	13514,51
180	10651,68	12237,19	12573,08	13144,94	12857,69
190	10215,90	11594,28	12137,08	12733,50	12715,13
200	10159,66	11029,96	12080,81	12227,18	12312,85

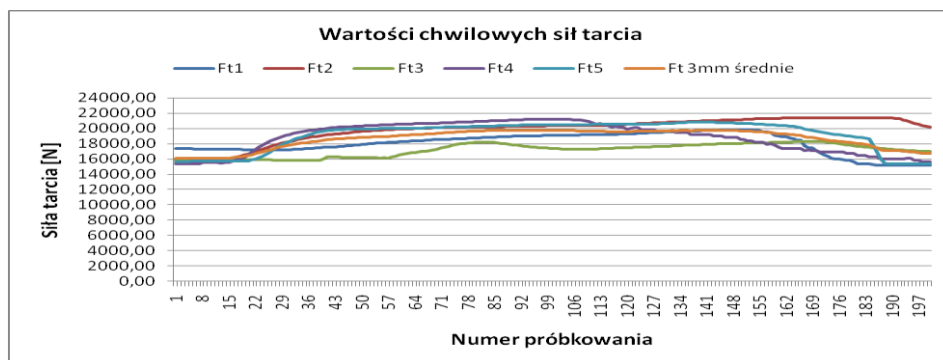
Dla każdej z czterech grup próbek otrzymano charakterystyki sił tarcia w funkcji czasu. Wykresy sił tarcia dla czterech grup próbek przedstawiono na rysunkach 5.42, 5.43, 5.44, 5.45.



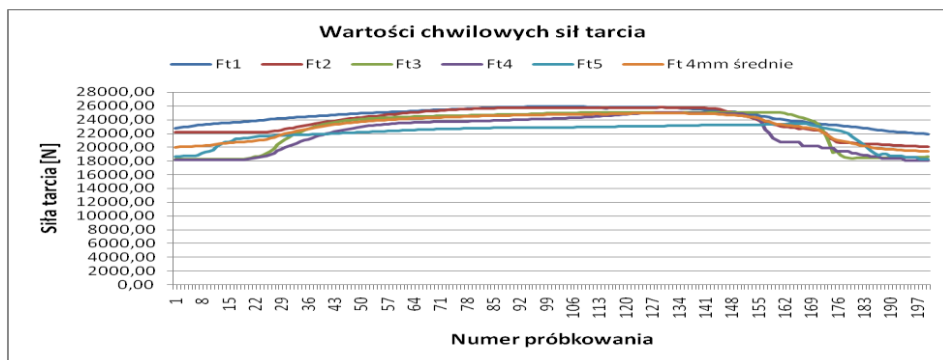
Rys. 5.42. Przebiegi sił tarcia podczas PMW dla grupy próbek kształtowych P1



Rys. 5.43. Przebiegi sił tarcia podczas PMW dla grupy próbek kształtowych P2



Rys. 5.44. Przebiegi sił tarcia podczas PMW dla grupy próbek kształtowych P3



Rys. 5.45. Przebiegi sił tarcia podczas PMW dla grupy próbek kształtowych P4

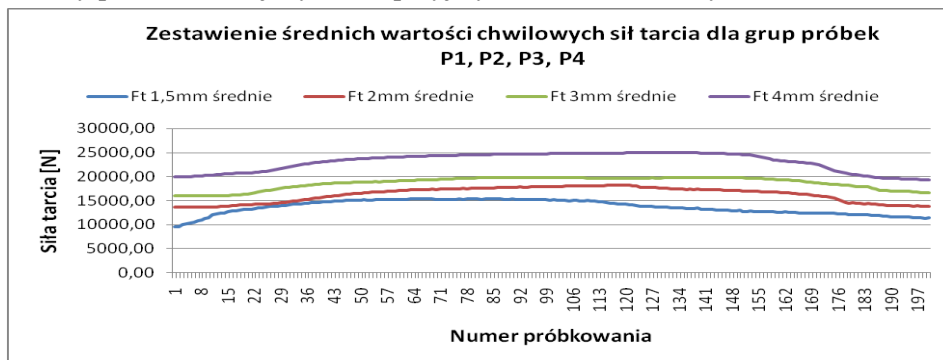
W celu zobrazowania różnic pomiędzy wartościami sił tarcia dla badanych próbek poszczególnych grup wykonano zestawienie średnich wartości sił. Na podstawie przebiegów sił tarcia dla każdej grupy próbek wyznaczono wypadkowy przebieg będący średnią arytmetyczną sił zgodnie ze wzorem (32):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + \dots + x_n) \quad (32),$$

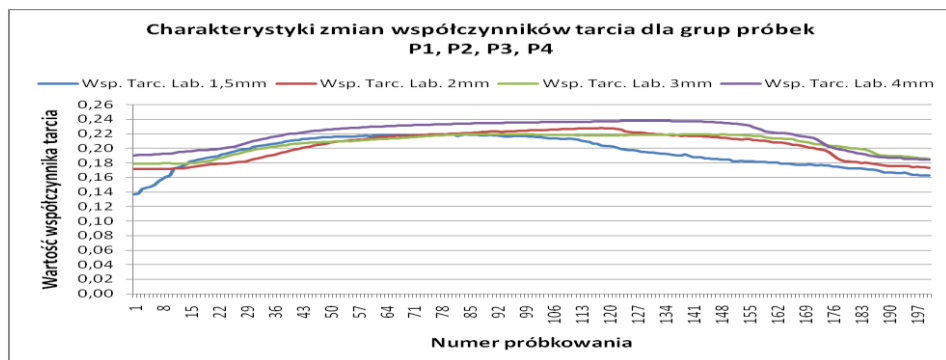
gdzie siła tarcia rozpatrywana jest za pomocą wzoru (33):

$$\bar{F}_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |F_{ti}| \quad (33),$$

Wykresy przebiegu uśrednionych sił i współczynników tarcia ślizgowego w PMW przedstawiono na rysunkach 5.46 i 5.47. Przebiegi te wykorzystano do analizy porównawczej wyników przyjętych metod badawczych.



Rys. 5.46. Zestawienie przebiegów uśrednionych wartości sił tarcia dla próbek kształtowych P1, P2, P3, P4



Rys.5.47. Porównanie uśrednionych przebiegów współczynników tarcia dla grup próbek kształtowych P1, P2, P3, P4

Przeprowadzono obliczenia oporów tarcia dla każdej grupy próbek i wyznaczono dla nich charakterystyki wypadkowe. Na ich podstawie wyliczono średnią siłę tarcia będącą średnią z wartości bezwzględnej chwilowych sił tarcia. Uzyskane wyniki zamieszczono w tabeli 5.9.

Tab. 5.9. Średnie wartości chwilowych sił tarcia i współczynników tarcia, $\overline{F_{tw}}$ – średnia wartość siły tarcia, $\overline{\mu}$ – średnia wartość współczynnika tarcia

Grubość blachy próbek kształtowych							
P1=1,5mm		P2=2mm		P3=3mm		P4=4mm	
$\overline{F_{tw}}$ [N]	$\overline{\mu}$	$\overline{F_{tw}}$ [N]	$\overline{\mu}$	$\overline{F_{tw}}$ [N]	$\overline{\mu}$	$\overline{F_{tw}}$ [N]	$\overline{\mu}$
13645,78	0,19	16345,71	0,20	18635,91	0,21	23088,56	0,23

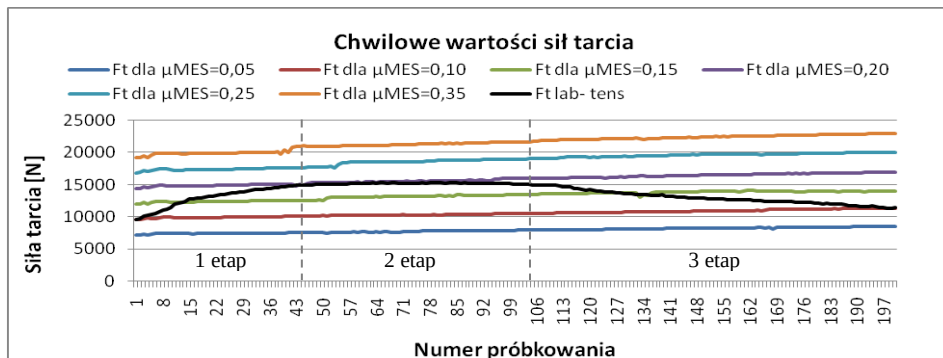
Badania tribologiczne analizowanych skojarzeń próbek w ruchu ślizgowym podczas odkształceń materiału dały możliwość określenia oporów tarcia w zależności od zadanych warunków początkowych procesu.

5.4. Porównanie wyników badań laboratoryjnych i numerycznych uzyskanych w programie Deform 3D i Abaqus

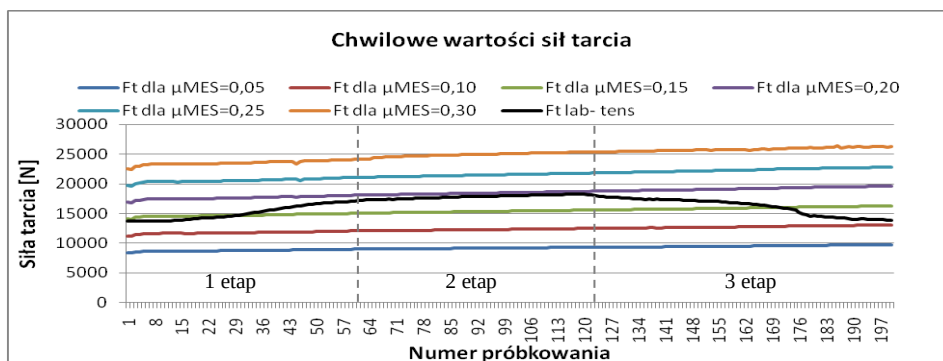
Zestawienie wyników badań tribologicznych dostarczyło informacji na temat zmian wartości oporów tarcia w czasie w zależności od ustalonych parametrów tarcia. Porównanie przykładowych wyników badań numerycznych oraz badań eksperymentalnych dla tarcia ślizgowego PMW przedstawiono na wykresach zbiorczych nr 5.48, 5.49, 5.50, 5.51.

Oceniając chwilowe charakterystyki sił tarcia przyjęto następujące etapy charakterystyk:

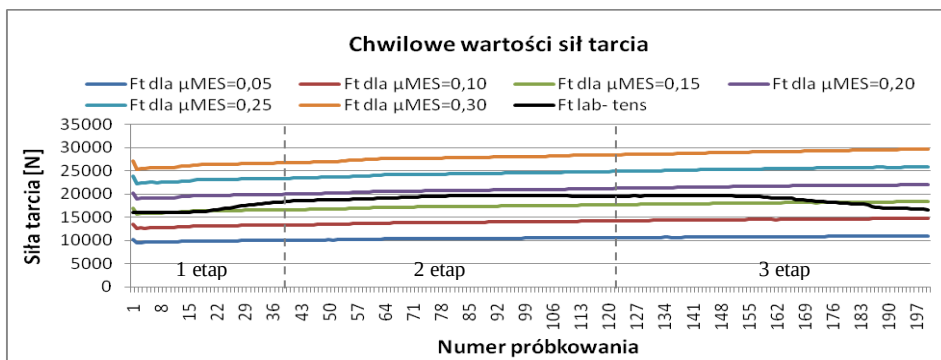
- Pierwszy etap rozpatrywany, jako rozpoczęcie badanego procesu.
- Drugi etap rozpatrywany, jako etap reprezentatywny dla badanego procesu.
- Trzeci etap rozpatrywany, jako zakończenie badanego procesu.



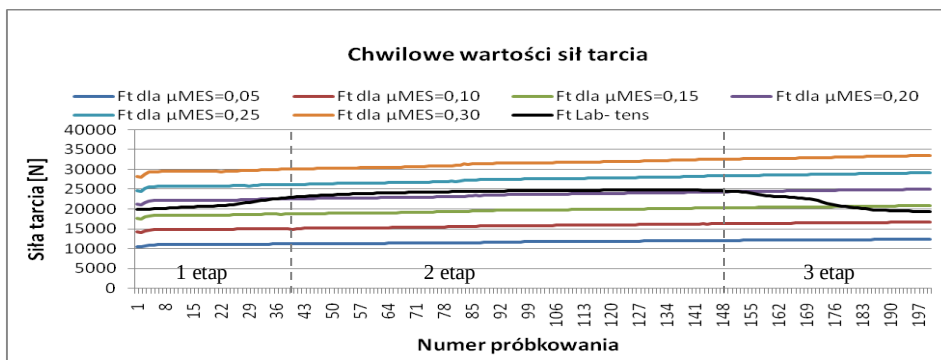
Rys. 5.48. Eksperymentalne i obliczeniowe krzywe chwilowych wartości sił tarcia ślizgowego pomiędzy płytą dolną a próbką P1 dla zróżnicowanych wartości μ_{MES}



Rys. 5.49. Eksperymentalne i obliczeniowe krzywe chwilowych wartości sił tarcia ślizgowego pomiędzy płytą dolną a próbką P2 dla zróżnicowanych wartości μ_{MES}



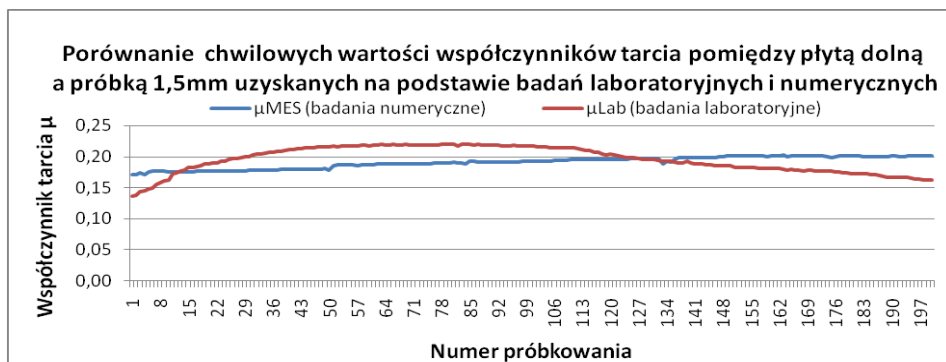
Rys. 5.50. Eksperymentalne i obliczeniowe krzywe chwilowych wartości sił tarcia ślizgowego pomiędzy płytą dolną a próbką P3 dla zróżnicowanych wartości μ_{MES}



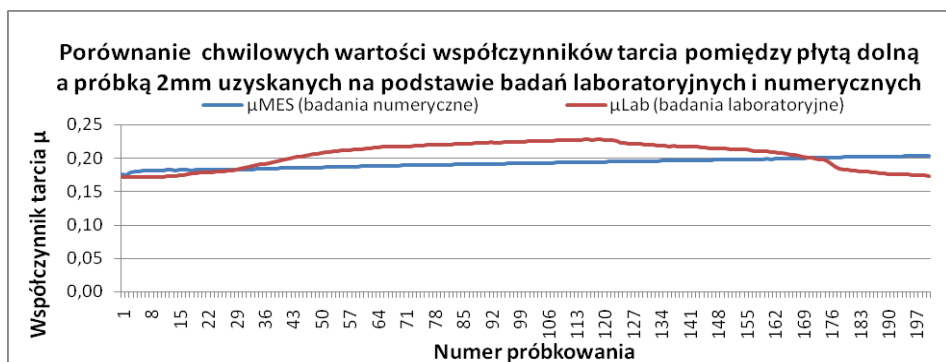
Rys. 5.51. Eksperymentalne i obliczeniowe krzywe chwilowych wartości sił tarcia ślizgowego pomiędzy płytą dolną a próbką P4 dla zróżnicowanych wartości μ_{MES}

Jak można zauważyć na podstawie przedstawionych na rysunkach 5.48 ÷ 5.51 charakterystyk porównawczych sił tarcia dla dobranych warunków brzegowych i współczynników tarcia istnieje zgodność pomiędzy wynikami badań numerycznych oraz badań laboratoryjnych. Różnice wartości sił tarcia pomiędzy badaniami numerycznymi a laboratoryjnymi są silnie zależne od przyjętych warunków początkowych – w tym wypadku współczynników tarcia μ_{MES} .

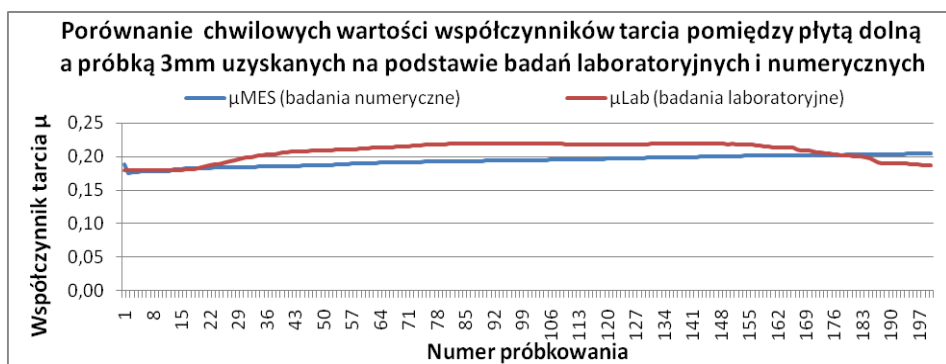
Analizie porównawczej poddano również zestawienie zmian wartości współczynników tarcia μ_{MES} uzyskanych w programie Deform 3D i μ_{LAB} uzyskanych na stanowisku laboratoryjnym dla poszczególnych kroków próbkowania. Porównanie zmian współczynników tarcia w funkcji próbkowania dla grup próbek P1, P2, P3, P4 pokazano na rysunkach 5.52, 5.53, 5.54, 5.55.



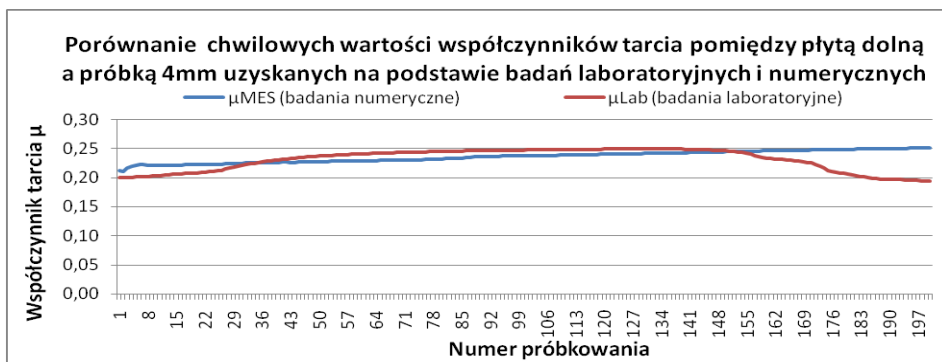
Rys. 5.52. Zależność przebiegu eksperymentalnych i obliczeniowych krzywych chwilowych współczynników tarcia dla próbki P1 i dolnej przeciwpróbki



Rys. 5.53. Zależność przebiegu eksperymentalnych i obliczeniowych krzywych chwilowych współczynników tarcia dla próbki P2 i dolnej przeciwpróbki



Rys. 5.54. Zależność przebiegu eksperymentalnych i obliczeniowych krzywych chwilowych współczynników tarcia dla próbki P3 i dolnej przeciwpróbki



Rys. 5.55. Zależność przebiegu eksperymentalnych i obliczeniowych krzywych chwilowych współczynników tarcia dla próbki P4 i dolnej przeciwpróbki

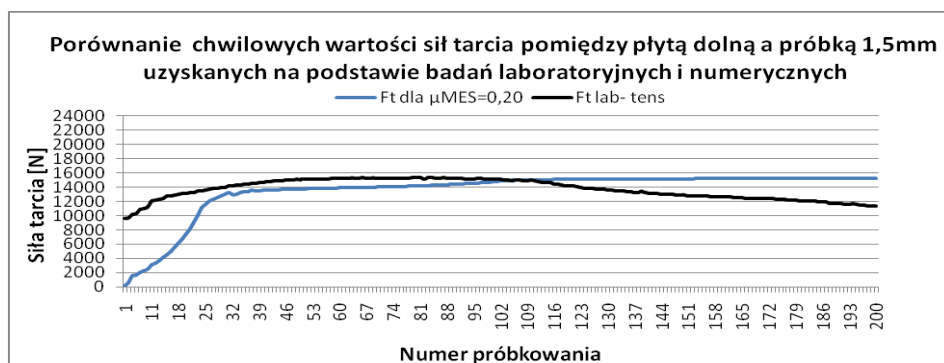
Analiza chwilowych sił tarcia dla różnych wartości μ_{MES} dotycząca badań modelowych i laboratoryjnych pozwala stwierdzić, że największą zgodność przebiegu charakterystyk uzyskano dla wartości $\mu_{MES} = 0,2$.

W ten sposób otrzymano wytyczne przyjmowania wartości brzegowych w tym zadawania współczynnika tarcia $\mu_{MES} = 0,2$ dla badanego PMW.

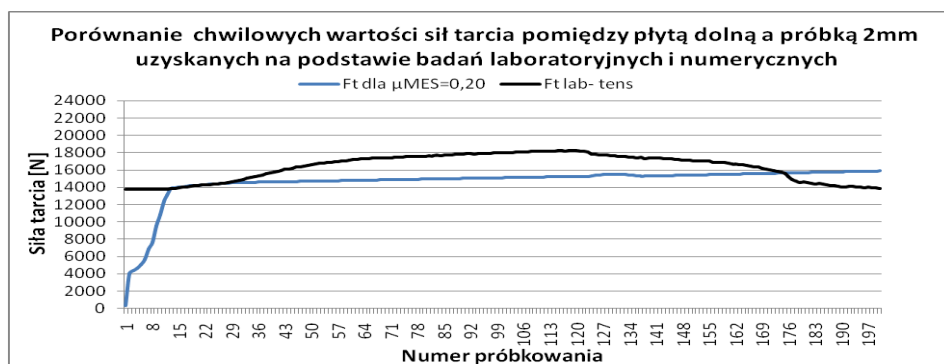
W warunkach rzeczywistych wartości zmieniających się współczynników tarcia dotyczą zmiany stanu warstwy wierzchniej jak również oddziaływań adhezyjnych i ściernych. W początkowej fazie procesu tarcia wartości μ_{LAB} rosną natomiast po chwili stabilizują się. Wzrost charakterystyk może być spowodowany charakterem odkształcania się materiału próbek pomiędzy narzędziami urządzenia do PMW. Innym powodem różnorodnego narastania charakterystyk może być niesymetryczność zamocowania i przesuwu próbki w procesie odkształcenia plastycznego spowodowana działaniem przekładni kolanowej. W końcowej fazie procesu tarcia ślizgowego następuje spadek wartości siły i współczynnika tarcia. Występujące różnice w wartościach sił oporów i współczynników tarcia mogą wynikać z nierównomiernego rozkładu nacisków narzędzia w strefie styku. Potwierdzeniem tego zjawiska mogą być badania mikroskopowe i chropowatości gdzie dla grup próbek P1, P2, P3, P4 zauważono zróżnicowane strefy odkształceń. Różnice w nierównomiernych rozkładach nacisków mogą wynikać z niedokładności mocowania próbek lub niwelowania luzów urządzenia badawczego.

Na podstawie uzyskanych wyników badań dla metod numerycznych i laboratoryjnych zaobserwowano, że dla rozpatrywanych par trących wartości sił i współczynników tarcia są zbliżone. Uzyskane efekty i związana z nimi problematyka badań były podstawą do budowy programu 4 modułu MES mającego na celu wspomaganie komputerowe doboru warunków brzegowych o zróżnicowanej czułości dla rozpatrywanych procesów numerycznych [31, 46, 54, 75, 79].

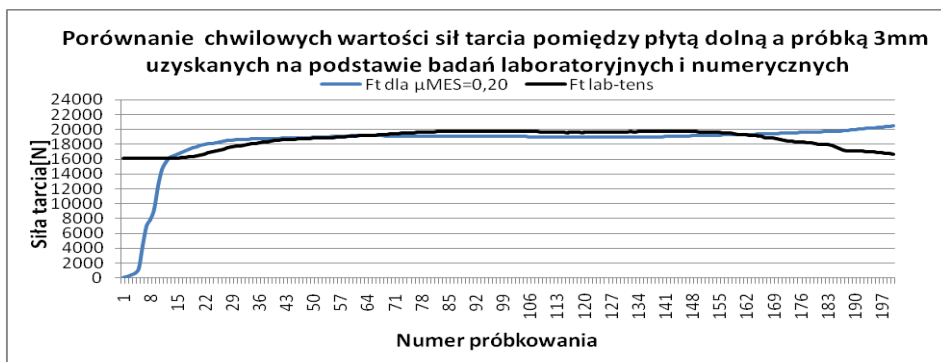
W celu potwierdzenia zgodności wyników badań wykonanych wcześniej w programie Deform 3D i na stanowisku laboratoryjnym porównano ich charakterystyki tribologiczne i na tej podstawie dobrano współczynniki tarcia dla badań w programie Abaqus. Wyniki dla badań numerycznych uzyskane za pomocą programu Abaqus oraz badań laboratoryjnych zestawiono w postaci charakterystyk chwilowych sił tarcia dla czterech grup badawczych. Charakterystyki numeryczne siły tarcia w pierwszej fazie procesu gwałtownie rosną a następnie się stabilizują. Po ustabilizowaniu procesu występuje wyraźna zgodność pomiędzy wynikami badań numerycznych i badań rzeczywistych. Zestawienie chwilowych wartości sił tarcia ślizgowego pomiędzy próbkami P1, P2, P3 i P4 a przeciwpróbką dla badań numerycznych i laboratoryjnych pokazano na rysunkach 5.56, 5.57, 5.58 i 5.59.



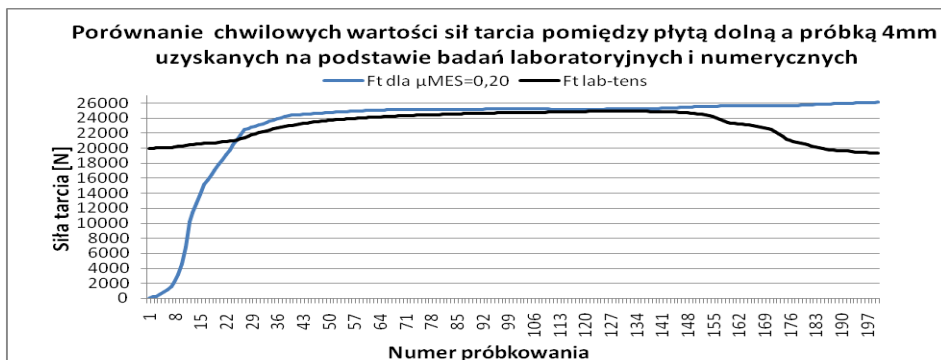
Rys. 5.56. Zestawienie charakterystyk chwilowych sił tarcia dla próbki 1,5mm i przeciwpróbki uzyskanych na podstawie badań numerycznych i laboratoryjnych



Rys. 5.57. Zestawienie charakterystyk chwilowych sił tarcia dla próbki 2mm i przeciwpróbki uzyskanych na podstawie badań numerycznych i laboratoryjnych



Rys. 5.58. Zestawienie charakterystyk chwilowych sił tarcia dla próbki 3mm i przeciwpróbki uzyskanych na podstawie badań numerycznych i laboratoryjnych



Rys. 5.59. Zestawienie charakterystyk chwilowych sił tarcia dla próbki 4mm i przeciwpróbki uzyskanych na podstawie badań numerycznych i laboratoryjnych

Różnica w początkowej i końcowej fazie wykresów może wynikać z tego, że warunki brzegowe ustalone numerycznie w programie Abaqus wymusiły przebieg procesu tarcia ślizgowego symetrycznie względem osi układu, co odpowiadało w warunkach rzeczywistych etapowi drugiemu ocenianych charakterystyk.

5.5. Analiza statystyczna i dyskusja wyników badań

Wyniki pomiarów zastosowanych metod badawczych muszą charakteryzować się w takim stopniu wiarygodnością i dokładnością, aby można było przyjąć ich zamienność. Dlatego też podjęto próbę wykonania analizy statystycznej współzależności pomiędzy przyjętymi w rozdziale 4.2 warunkami brzegowymi a odpowiedzią układu w postaci chwilowych sił tarcia.

Celem badania statystycznego było wykonanie opisu zbiorowości uzyskanych wyników oraz weryfikacja słuszności przyjętych przez autora metod analizy zjawiska.

Jako populacje do badań wybrano zbiór chwilowych sił tarcia ślizgowego $F_{t_{LAB}}$ oraz zestaw zbiorów populacji $F_{t_{MES}}$ dla współczynników tarcia μ_{MES} . Każda z wybranych populacji miała charakter skończony i posiadała 200 jednostek statystycznych – co odpowiadało liczbie próbkowania przyjętych w pracy metod badawczych. Jako rozpatrywaną cechę statystyczną określono chwilowe wartości siły tarcia ślizgowego dla określonych współczynników tarcia.

Na podstawie analizy zbioru wartości danych niezależnych dobrano następujące metody statystyczne:

Współczynnik korelacji Karla Pearsona (R) określany jest, jako miara relacji pomiędzy analizowanymi populacjami (34). Odzwierciedla on stopień liniowej zależności pomiędzy rozpatrywanymi wynikami badań zgodnie ze wzorem:

$$R_{F_{t_{Lab}}F_{t_{Mes}}} = \frac{cov(F_{t_{Lab}}, F_{t_{Mes}})}{\sigma F_{t_{Lab}} \sigma F_{t_{Mes}}} \quad (34)$$

gdzie: $R_{F_{t_{Lab}}F_{t_{Mes}}}$ – współczynnik korelacji Pearsona, $cov(F_{t_{Lab}}, F_{t_{Mes}})$ – zmienne losowe dla chwilowych sił tarcia ślizgowego, $\sigma F_{t_{Lab}}$ – odchylenie standardowe siły tarcia ślizgowego dla badań laboratoryjnych, $\sigma F_{t_{MES}}$ – odchylenie standardowe dla badań numerycznych.

W celu opisu współzależności pomiędzy charakterystykami sił tarcia dla μ_{LAB} i μ_{MES} opracowano tablicę korelacyjną, której wyniki zamieszczono w tabeli nr 5.10. Na tej podstawie wybrano wyniki najbliższe wartościom -1 i 1. Pozwoliło to uzyskać poziomy korelacji dla zbiorów danych.

Błąd średniokwadratowy BSK (z ang. MSE) pojedynczego pomiaru skończonej serii pomiarów rozumiany, jako odchylenie standardowe wyliczone z zależności (35):

$$BSK = \frac{\sum (F_{t_{Lab}} - F_{t_{Mes}})^2}{n} \text{ dla } n=1 \dots 200 \quad (35),$$

gdzie: $F_{t_{Lab}}$ – siła tarcia w badaniach laboratoryjnych, $F_{t_{Mes}}$ – siła tarcia w badaniach numerycznych, n – wielkość populacji.

Uzyskane wyniki dla poszczególnych populacji zamieszczono w tabeli 5.10. Na ich podstawie wybrano wartości najmniejsze odpowiadające najmniejszym błędom średniokwadratowym pomiędzy charakterystykami.

Procentowy błąd średniokwadratowy – jako pierwiastek błędu średniokwadratowego określony jest wzorem (36):

$$RMSE = \sqrt{BSK} \quad (36),$$

Dzięki niemu określono jak populacje wyników numerycznych różnią się od laboratoryjnych wartości chwilowych sił tarcia – tabela 5.10.

Błąd standardowy składnika losowego (S) – informuje o tym, że wartości $F_{t_{Mes}}$ różnią się od wartości $F_{t_{Lab}}$ co do modułu o tę liczbę - tabela 5.10.

Ze względu na dużą ilość przeprowadzonych obliczeń w tabeli 5.10 zestawiono tylko najbardziej znaczące wyniki analiz statystycznych dotyczących porównania wyników numerycznych uzyskanych w programach Deform 3D i Abaqus względem wyników uzyskanych na stanowisku laboratoryjnym.

W tabeli 5.10 zaznaczono wytłuszczonym drukiem wyniki uzyskane w programach Deform 3D i Abaqus 6.10, które są najbardziej zbliżone do wyników uzyskanych przy wykorzystaniu stanowiska laboratoryjnego.

Tab. 5.10. Przykładowe wyniki statystycznych obliczeń wielkości sił tarcia dla różnorodnych współczynników tarcia

Próbka	Metoda statys.	Wyniki obliczeń wielkości statystycznych dla współczynników tarcia dla $\mu_{MES} = \mu_{LAB}$					
		Deform 3D			Abaqus		
		$\mu=0,15$	$\mu=0,20$	$\mu=0,25$	$\mu=0,15$	$\mu=0,20$	$\mu=0,25$
P1	R	-0,344	-0,153	-0,289	0,24	0,40	0,35
	MSE	12315772	2801161	8044508	13810789	10649017	11267337
	MSPE	0,058	0,016	0,055	0,55	0,10	0,39
	S	3509,384	1673,667	2836,284	5459,92	3262,28	3803,20
P2	R	0,190	0,185	0,184	0,184	0,39	0,132
	MSE	18769547	3330661	6743368	9743368	6885209	7470444
	MSPE	6,419	1,165	3,154	3,154	0,029	3,390
	S	4332,384	1825,010	2596,800	2796,800	2623,97	8623,830
P3	R	0,446	0,444	0,433	0,433	0,509	0,419
	MSE	23534355	2710215	6432133	23432133	9063107	88035227
	MSPE	6,517	0,734	2,068	2,068	0,034	6,251
	S	4851,222	1646,273	2536,165	5536,165	3010,5	9382,709
P4	R	0,074	0,075	0,071	0,171	0,479	0,264
	MSE	57886255	15715168	4433355	43433355	26132514	12464344
	MSPE	10,291	2,715	1,057	1,057	1,326	0,1
	S	7608,302	3964,236	2105,553	6105	8765	5112

Najbardziej wiarygodną metodą statystyczną okazała się metoda BSK, natomiast najmniej wiarygodną metoda obliczenia współczynnika korelacji R. Można stwierdzić, że potwierdzają one słuszność wcześniej przyjętych metod obliczeniowych zarówno praktycznej jak i teoretycznej serii badań. Uzyskane wyniki statystyczne wykorzystano do opracowania programu komputerowego 4 modułu MES.

6. Podsumowanie i wnioski

W monografii przedstawiono możliwości wykorzystania Metody Elementów Skończonych w procesach modelowania układów tribologicznych w warunkach kształtowania plastycznego metali. W celu opracowania nowatorskiej metody wyznaczania współczynników tarcia ślizgowego w procesie modelowego wytłaczania opracowano stanowisko tribologiczne oraz odpowiadające mu modele numeryczne węzła tarcia.

Na podstawie badań teoretyczno – doświadczalnych geometrię i własności materiałowe dla próbek i narzędzi dobrano tak, aby mogły stanowić wzajemne odwzorowanie oraz spełniały kryteria podobieństwa.

Przeprowadzone badania laboratoryjne i numeryczne umożliwiły określenie wpływu doboru wartości współczynników tarcia na wartości oporów tarcia dla stanowiska numerycznego i laboratoryjnego.

Na tej podstawie wykreślono charakterystyki zmian oporów tarcia ślizgowego w funkcji przyjętych współczynników tarcia dla metody laboratoryjnej i metod numerycznych. W pracy wykazano zalety i wady stosowania Metody Elementów Skończonych względem analizy zjawiska tarcia ślizgowego w warunkach odkształceń plastycznych dla stali konstrukcyjnej S235JR.

Na uzyskane wyniki w przeprowadzonych badaniach istotny wpływ miały różnice materiałowe jak również występowanie niedokładności geometrycznych i pomiarowych. Mimo tego, że w obu przypadkach zastosowano materiał badawczy tego samego gatunku to należy mieć na uwadze możliwość wystąpienia różnorodności jego składu chemicznego. Mogło to wpłynąć na uzyskiwane zgodności między wynikami badań numerycznych a wynikami badań laboratoryjnych. W metodzie laboratoryjnej zastosowane próbki są zróżnicowane objętościowo natomiast przy analizie MES przyjęty materiał ma charakter izotropowy, który we wszystkich kierunkach wykazuje te same właściwości fizyczne. Przy procesie symulacji odkształcenia próbki nie jest brany pod uwagę przestrzenny rozkład chemiczny badanych elementów układu tribologicznego.

Na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej oraz badań laboratoryjnych i numerycznych uzyskane wyniki stanowią podstawę do stwierdzenia następujących wniosków:

1. Do analizy numerycznej modelu wykorzystano oprogramowanie Deform 3D V10.0, które umożliwiło przeprowadzenie symulacji PMW. Oprogramowanie pozwoliło efektywnie przeprowadzić procesy obliczeniowe dla występujących w układzie sił tarcia.
2. Otrzymane za pomocą oprogramowania Deform 3D przebiegi oporów tarcia zostały zweryfikowane przy wykorzystaniu programu Abaqus.

- Przebiegi oporów tarcia procesów modelowego wytłaczania uzyskane w obu programach dla współczynników tarcia $\mu=0,2$ można uznać za zbliżone względem przebiegów oporów tarcia uzyskanych na stanowisku tribologicznym (rozdział 5.1).
3. Opracowana metodyka badań laboratoryjnych przy wykorzystaniu zaproponowanego stanowiska laboratoryjnego oraz określonego doboru próbek kształtowych umożliwiła przeprowadzenie badań PMW.
 4. W strefie styku w badanych zakresach nacisków zaobserwowano powierzchniowe odkształcenia materiału mające istotny wpływ na zmianę twardości warstw wierzchnich próbek. Istotny wpływ na rozkład siły tarcia miały połączenia adhezyjne oraz ścinanie mikronierówności powierzchni, co wyraźnie widać na wynikach badań metalograficznych i chropowatości (rozdział 5.2).
 5. Wyniki badań metalograficznych oraz twardości próbek kształtowych i przeciwpróbek pozwoliły na potwierdzenie prawidłowo przyjętego modelu sztywno-plastycznego w badaniach PMW.
 6. Opracowanie nowatorskiego modułu obliczeniowego MES współpracującego z oprogramowaniem Deform 3D V10.0 pozwoliło na określanie czułości warunków brzegowych w odniesieniu do rozpatrywanych procesów wytłaczania.
 7. W kontekście przyjętego celu pracy wykorzystanie czwartego modułu MES opartego na przedstawionych w pracy metodach obliczeniowych jest uzasadnione. Uzyskane dzięki programowi komputerowemu wyniki analiz mogą stanowić dla badaczy i technologów istotne wskazówki dotyczące przygotowania modelu numerycznego i tribologicznego dla analizy wytłaczania blach.
 8. Pomimo dokładnego odzwierciedlenia modelu stanowiska laboratoryjnego i zadanych warunków początkowych nie jest w pełni możliwe przeprowadzanie badań numerycznych z uzyskaniem wyników o stuprocentowej wiarygodności.
 9. Statystyczna weryfikacja uzyskanych wyników badań wskazuje na przydatność zastosowanych metod w badaniach modelowych procesów obróbki plastycznej.
 10. Opracowany algorytm i program komputerowy zwany czwartym modułem MES wykonano przy wykorzystaniu pięciu metod obliczeniowych umożliwiających określenie funkcjonalnej zależności pomiędzy warunkami początkowymi (np. współczynnikami tarcia) w Metodzie Elementów Skończonych a uzyskanymi odpowiedziami dotyczącymi oporów tarcia ślizgowego przy określonych parametrach procesu wytłaczania.

11. Na podstawie analizy otrzymanych wyników i wniosków z nich wynikających można przyjąć, że metoda odwrotna może być zalecana do analizy podobnie złożonych zadań jak w przypadku procesu wytłaczania.
12. Badanie modeli tribologicznych Metodą Elementów Skończonych pozwoliło na łatwiejsze szybsze i tańsze pozyskiwanie informacji badawczych.
13. Opracowane stanowiska i metody badawcze – laboratoryjne i wirtualne pozwalają rozszerzyć zakres badań z zastosowaniem innych gatunków materiałów jak również wpływu środków smarnych na realizację badanego procesu.

Przedstawiona i opracowana metodyka badań numerycznych i laboratoryjnych z wykorzystaniem metod matematycznych i badań odwrotnych może być dalej rozwijana w kierunku uzyskania funkcyjnych zależności dotyczących np.: środków smarnych, par materiałowych, granicznych wartości stosowanych sił, itd.

Dlatego duże znaczenie będzie miał dalszy rozwój Metody Elementów Skończonych ze szczególnym uwzględnieniem większego nacisku na zjawiska kontaktowe.

Literatura

- [1] Adamus J., Gierżyńska Dolna M., Lacki P.: *Kompleksowe sterowanie jakością odkuwek matrycowych*, Konferencja Naukowo Techniczna Problemy Narzędziowe w Obróbce Plastycznej, 2001, s. 7–12.
- [2] Adamus J., Lacki P.: *An influence of the material discontinuity on the die forging process- numerical simulation*. Proceedings Third MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics, 2005, p.14–17.
- [3] Amontons G.: *De la resistance caus'ee dans les machines*, l'Acad. Roy. A, 1699, s. 257–282.
- [4] Archard J., *Contact and rubbing of float surfaces*, „Journal of applied Physics”, vol. 24, 1953, p. 981–988.
- [5] Avitzur B., Nakamura Y.: *Analytical determination of friction resistance as a function of normal load and geometry of surface irregularities*, 1986, s.367– 383.
- [6] Balawender T.: „*Analiza krzywych spęczania materiałów metalicznych. Obróbka Plastyczna Metali*” nr 4, 2005, s.5–13.
- [7] Bathe K.: *Finite Element Procedures*, Prentice– Hall, 1996.
- [8] Bay N.: *Friction stress and normal stress in bulk metal forming processes*. *Journal of Mechanical Working Technology*, 1987, p. 203-224.
- [9] Bednarski T., *Mechanika plastycznego płynięcia*, PWN Warszawa, 1995.
- [10] Bowden F., Tabor D.: *The Frictional and Lubrication of Solids*, Clarendon– Oxford, 1964.
- [11] Brodny J.: *Modelowanie tarcia w układach mechanicznych. Górnictwo i geologia*– t. 5, z. 2. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2010, s.7–17.
- [12] Coulomb C.: *Theorie des machines simples, en ayant egard au frottement de leurs parties, et la roideur descordages*, Memorial Math Physics, 1785.
- [13] Courant R.: *Variational Methods for solution of Equilibrium and Vibration*, Bull. Am. Math Soc., Vol. 49, 1943
- [14] Czerniec M., Skwarek Jurij, *Wytrzymałość stykowo-tarciowa i trwałość systemów tribotechnicznych ślizgowych*, Lublin, Wyd. Politechniki Lubelskiej, 2000.
- [15] Cichoń Cz. *Metody Obliczeniowe*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2005.
- [16] Clough R. W.: *Original Formulation of the Finite Element Method, FiniteElements in Analysis and Design* 7,1991
- [17] Czichos H.: *Tribology a system approach to the science and technology of friction, lubrication and wear*, Technology series 1, 1987.
- [18] Dębski H., *Doświadczalno-numeryczna analiza stanu krytycznego ściskania cienkościennych słupów kompozytowych*, Modelowanie

matematyczne procesów technicznych, Politechnika Lubelska 2013, s. 45–66.

- [19] Dobrudzki W., Odrzywołek E., *Analiza metod wyznaczania współczynnika tarcia między narzędziem i metalem w stanie płynięcia plastycznego, opartych na procesie spęczania*, Obróbka Plastyczna, 1979.
- [20] Duda P., Bąkowski H., Służalek G.: *Zastosowanie MES do określenia naprężeń i odkształceń w węzłach tarcia testera T-05*, Mechanik NR 2/2010, s. 122–124.
- [21] Dib M., Ribeiro B., Prates P.: *Model Prediction of Defects in Sheet Metal Forming Processes*, Communications in Computer and Information Science, CCIS, volume 893, 2018.
- [22] Gabryszewski Z., Gronostajski J.: *Mechanika procesów obróbki plastycznej*, PWN Warszawa, 1991.
- [23] Gawęcki W.: *Pomiary elektryczne wielkości nieelektrycznych*, Wydawnictwo AGH Kraków 2010.
- [24] Gierzyńska M.: *Tarcie zużycie i smarowanie w obróbce plastycznej metali*, WNT Warszawa, 1983.
- [25] Gierzyńska M.: *Studium zjawisk trybologicznych w procesach obróbki plastycznej*, Politechnika Śląska, 1974.
- [26] Gierzyńska Dolna M., Lacki P.: *Some aspects of modeling of metal forming processes*, Computers and Structures, 2003, p.605– 613.
- [27] Gontarz A., Dziubińska A., Pater Z., Winiarski G., Drozdowski K.: *Badania teoretyczno-doświadczalne procesu kucia matrycowego stopów magnezu*, MECHANIK – 2013, nr 7–8.
- [28] Grądzki R.: *Wprowadzenie do Metody Elementów Skończonych*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2002.
- [29] Grosman F., Bogacz S.: *Komputerowe wspomaganie procesu kucia swobodnego na prasie*, Zastosowanie komputerów w zakładach przetwórstwa metali, 2000.
- [30] Gupkin S.: *Plastическая деформация металлов*, Металлургиздат, Moskwa 1961.
- [31] Hebda M.: *Procesy tarcia, smarowania i zużywania maszyn*, Wydawnictwo ITE-PIB, Radom, 2006.
- [32] Hughes T.J.R.: *The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*, Prentice Hall 2000.
- [33] Iwama T.: *Current trends in automotiv forging industry*, Japanese Spring Conference for the Technology of Plasticity, 1997, p. 91-97.
- [34] Jadhav S., Schoiswohl M. Buchmayr B.: *Applications of Finite Element Simulation in the Development of Advanced Sheet Metal Forming Processes*, BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte volume 163, p. 109–118, 2018.

- [35] Kruszewski J., Sawiak S., Wittbrodt E.: *Metoda sztywnych elementów skończonych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, 1999.
- [36] Krzekotowski Z.: *Technologia kucia swobodnego i półswobodnego*, Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1964.
- [37] Kukuryk B., Lacki P.: *Analiza naprężeń i odkształceń w procesie kucia narzędziami kształtowymi*, Obróbka Plastyczna Metali XI, s. 37-44.
- [38] **Korga S.**, Duda A., Kalinowska Ozgowicz E.: *The problem discretization objects in the FEM simulation studies*, Słowania 2013.
- [39] **Korga S.**, Duda A., Ciekanowski Z.: *Capabilities of using FEM in sheet-metal forming*, Prace Szkoły Inżynierii Materiałowej, Wydawnictwo Naukowe Akapit 2014.
- [40] **Korga S.**, Lenik K.: *Modelowanie oporów tarcia dla określonych warunków procesów wytłaczania, przetłaczania i wyciągania*. Postępy Nauki i Techniki, nr 4, 2010, s. 85-90.
- [41] **Korga S.**, Lenik K.: *FEM applications to model friction processes in plastic strain conditions*. Archives of Materials Science and Engineering, Volume 41, 2010, p. 121-124.
- [42] **Korga S.**, Lenik K.: *The application of a tribotester prototype to sliding friction simulations and wear computations by means of FEM*. Les problemes contemporains du technosphere et de la formation des cadres d'ingenieurs, 2011, p. 61-64.
- [43] **Korga S.**, Lenik K.: *Deform 3D and Solidworks FEM tests in conditions of sliding friction*. Archives of Materials Science and Engineering, Volume 56, 2012, p. 89-92.
- [44] **Korga S.**, Lenik K.: *FEM and Flow Simulation Module for selecting parameters in rotors flow systems*. Archives of Materials Science and Engineering, Volume 59, 2013, p. 69-75.
- [45] Konieczka P., Namieśnik J.: *Ocena i kontrola jakości wyników pomiarów analitycznych*. Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 2007.
- [46] Kostecki W.I. : *Trenije, smazka i iznos w maszinach*. Izd. "Technika", Kijew, 1970, /j. rosyjski/
- [47] Kowalski L.: *Modelowanie i prognozowanie*, WAT Warszawa 2010.
- [48] Kubica M., Służalek G.: *Metoda elementów skończonych w badaniach tribologicznych*. Logistyka-Nauka nr6, 2011, 2003-2013.
- [49] Kubica M., Służalek G., Wrazidło M.: *Trójwymiarowy animowany model testera T-11 wykorzystywany do badań tribologicznych węzłów tarcia trzpień tarcza i kulka tarcza*. Mechanik nr 2,
- [50] Lacki P.: *Modelowanie tarcia w procesach objętościowej obróbki plastycznej*. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2010.
- [51] Lacki P.: *Numerical simulation of the forging process with material discontinuity*, The XVI International Scientific and Technological

- Conference Design and Technology of Drawpieces and Die Stampings, 2004, p. 249-257.
- [52] Lacki P.: *Optimisation of the stamping parameters of a drawn- part made of stainless steel*, *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications, 2007, p. 349- 355.
 - [53] Lacki P.: *Simulation of friction in upsetting process*, *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*, 2004, p. 247-255.
 - [54] Lacki P.: *Symulacja numeryczna węzła tarcia Testera T-05*, XXV Szkoła Tribologiczna Tribologia na Progu Trzeciego Tysiąclecia, 2002, 184-189.
 - [55] Lacki P.: *The problem of describing the friction coefficient in numerical simulations of metal working*, *Tribology: Science and Applications*, 2003, p. 146-155.
 - [56] Lacki P.: *Wpływ tarcia na nierównomierność odkształceń wyrobu w procesie kucia swobodnego*, *Tribologia* 4, 2003, s. 289-300.
 - [57] Lacki P.: *Analiza numeryczna wybranych testów trybologicznych stosowanych w procesach obróbki plastycznej*, *Obróbka plastyczna metali*, tom 19, 2008.
 - [58] Laptew V. G.: *Baza danych dotyczących tribotechnicznych charakterystyk par tarciovych, realizujących efekt bezzużyciowy. Tribologia a Inżynieria Powierzchni*, Polskie Towarzystwo Tribologiczne, 1995, s. 183-189.
 - [59] Lawrowski Z.: *Tribologia-tarcie, zużywanie i smarowanie*, PWN Warszawa, 1993.
 - [60] Lee C.H., Kobayashi S. *New Solution to Rigid-Plastic Deformation Problems Using Matrix Method*. ASME J. Eng. Ind. 1973.
 - [61] Lenik K., Pashechko M., Dziedzic K., Barszcz M.: *Stanowisko do oceny przydatności płynnych środków smarnych w modelowych warunkach procesu wytłaczania*. *Zaawansowana Tribologia*, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom: 2009, s. 69-74.
 - [62] Lenik K., Borowski G. *Stanowisko do badania procesów tarcia*. Patent WUP PL-170088B1.
 - [63] Leonardo da Vinci, *Codex Atlanticus*, folio 29 former folio 8 Codice Atlantico di Leonardo da Vinci nella biblioteca Ambrosiana di Milano.
 - [64] Leszek W.: *Badania empiryczne*. Wydawnictwo Instytutu Technologii i Eksploatacji, Radom 1997.
 - [65] Liu Y., Chen W., Hu Q., Yang Ch. Bao Y.: *A new method to get initial guess configuration for multi-step sheet metal forming simulations*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* volume 110, p. 2651–2668, 2020.
 - [66] Łukaszewicz K., Labisz K., Żukowska L.: *Zużycie trybologiczne powłok PVD*, Ćwiczenia laboratoryjne z inżynierii materiałowej i nanotechnologii, International OCSCO World Press – vol.10, 2013.

- [67] Łodygowski T., Kąkol W.: *Metoda Elementów Skończonych w wybranych zagadnieniach mechaniki konstrukcji inżynierskich*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2003.
- [68] Male A. Cockcroft M.: *A method for the determination of the coefficient of friction of metals under conditions of bulk plastic deformation*, Journal of the Institute of Metals, 1965, p. 38-46.
- [69] Martin H.C., Carey G.F.: *Introduction to finite element analysis*, McGraw-Hill, New York 1973.
- [70] Myszka W.: *Komputerowy system obsługi eksperymentu*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne. Warszawa 1991.
- [71] Nakamura T.: *Friction-assisted forming, Japanese Spring Conference for Technology of Plasticity*, 1987, p. 783-790.
- [72] Odermatt A. Richert C. Huber N.: *Prediction of elastic-plastic deformation of nanoporous metals by FEM beam modeling: A bottom-up approach from ligaments to real microstructures*, 22 July 2020.
- [73] Pater Z. Samołyk G.: *Podstawy teorii i analizy obróbki plastycznej metali*, Politechnika Lubelska, Lublin 2011.
- [74] Pater Z. Samołyk G.: *Podstawy technologii obróbki plastycznej metali*, Politechnika Lubelska, Lublin 2013.
- [75] Pauk W.: *Wybrane zagadnienia kontaktu ciał odkształcalnych*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, rozdział 4, Kielce 2005.
- [76] Pietrzyk M.: *Metody numeryczne w przeróbce plastycznej metali*, AGH Kraków, 1992.
- [77] Piwnik J., Leszczyński M.: *Analiza numeryczna wpływu tarcia na stan odkształcenia w procesie wyciskania materiału perforowanego*. Rudy Metale nr 6, 2012, s. 378-386.
- [78] Polska Norma PN-ISO 377-1, *Pobieranie i przygotowanie próbek i odcinków próbnych z wyrobów stalowych*, październik 1994.
- [79] Polska Norma PN-EN 10139, *Taśma wąska niepowlekana walcowana na zimno ze stali niskowęglowych*. Przeznaczona do obróbki plastycznej na zimno, kwiecień 2001.
- [80] Rayleigh L.: *On the theory of Resonance*, London, 1870, p. 77-118.
- [81] Roliński Z.: *Zarys elektrycznej tensometrii oporowej*, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, 1966.
- [82] Siebel E.: *Resistance and deformation and the flow material during rolling*, Stahl und Eisen 1930, p. 1769-1775.
- [83] Shen J., Wheeler C., Ilic D., Chen J.: *Application of open source FEM and DEM simulations for dynamic belt deflection modelling*, Powder Technology, Volume 357, p. 171-185, 1 December 2019.
- [84] Scientific Forming Technologies Corporation– support: *DEFORM 3D User's manual*, Columbus Ohio 43220.

- [85] Schey J.: *Friction laws in metal forming tribology*, Proceedings of the Second ICTP, 1987, p. 873-882.
- [86] Schey J.: *Metal deformation processes*, New York Friction and lubrication, 1970.
- [87] Służalek G., Kubica M., Bąkowski H.: *Rozkład naprężeń i odkształceń wybranych węzłów tarcia w badaniu warstwy typu duplex*. Mechanik nr 1, 2010.
- [88] Służalek G., Kubica M.: *Wirtualne laboratorium tribologiczne*. Mechanik nr 2, 2012.
- [89] Służalek G., Kubica M., Bąkowski H.: *Modelowanie zmiennych warunków eksploatacji dla skojarzenia kostka płytka z wykorzystaniem MES*. Mechanik nr 89, 2010, s. 483-490.
- [90] Szczerek M., Wiśniewski M.: *Tribologia i tribotechnika*, Wydawnictwo iTE Radom, 2000.
- [91] Szeliga D., Pietrzyk M.: *Identification of Rheological and Tribological Parameters*, Metal Forming Science and Practice, A state of the art., 2002, p. 227-258.
- [92] Stupkiewicz S., Mróz Z.: *Modelowanie tarcia i zużycia w procesach obróbki plastycznej metali*, Zastosowanie Komputerów w Zakładach Przetwórstwa Metali, 1998, s. 67-74.
- [93] Szmelter J., Dacko M., Dobrociński S., Wieczorek M.: *Metoda Elementów Skończonych w statyce konstrukcji*, Arkady Warszawa, 1979.
- [94] Szyndler R., Lacki P.: *Analiza numeryczna odkształceń sprężystych matryc do kucia kół zębatach*, Informatyka w Technologii Metali, 2003, s. 125-132.
- [95] Szyndler D.: *Problem odwrotny w zastosowaniu do identyfikacji parametrów procesów plastycznej przeróbki metali*, Praca doktorska AGH, 2003.
- [96] Śmierzchalski D., Wieczorkowski M., Pollak K.: *Przewodnik po pomiarach twardości*. Materiały firmy ERNST 2013.
- [97] Śródka W.: *Trzy lekcje metody elementów skończonych*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004.
- [98] Tomczak J., Pater Z., Bulzak T.: *Płynięcie metalu podczas wyciskania wiertel krętych dla różnych czynników tarcia*, TRIBOLOGIA – 2013, nr 3, s. 9-20
- [99] Tsukizoe T., Hisakado T.: *On the mechanism of contact between metal surfaces*, The real area and the number of the contact points, Journal of Lubrication Technology 1986, p.81-88.
- [100] Von Karman Th.: *On the theory of rolling*, Journal of Mathematics and Mechanics 1925, p. 139-141.
- [101] Wanheim T., Bay N.: *A model for friction in metal forming processes*, Annals College International pour la Recherche en Productique, 1978.

- [102] Wanheim T.: *Friction at high normal pressures*, Wear 1973, p.225-244.
- [103] Wasiunyk P.: *Kucie matrycowe*, WNT Warszawa, 1987.
- [104] Weroński W.: Pater Z., *Obróbka plastyczna, obliczenia sił kształtowania*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 1994.
- [105] Zeramardini B., Camille R., Germain G., Pottier T.: *Numerical simulation of metal forming processes with 3D adaptive Remeshing strategy based on a posteriori error estimation*, International Journal of Material Forming volume 12, p. 411–428, 2019.
- [106] Zwierzycki W.: *Prognozowanie niezawodności zużywających się elementów maszyn*. Instytut Technologii Eksploatacji w Radomiu, 1998.
- [107] Yoshimura H., Wang C.C.: *Manufacturing of Dies for Precision Forging*. First Japanese Spring Conference for Technology of Plasticity, 1997.
- [108] Zienkiewicz O.C.: *Metoda Elementów Skończonych*, Arkady, Warszawa 1972.
- [109] Zienkiewicz O.C.: *The finite element method in engineering science*, University Michigan 1971.
- [110] <http://pl.scribd.com/doc/79447639/tablice-naprezen-dopuszczalnych#scribd>
- [111] <http://www.mtmstal.pl/pl/informacje-techniczne/zastosowanie-i-kasyfikacja-stali>
- [112] <http://www.tribologia.org/ptt-old/BiPol.htm>

Załączniki

W wersji drukowanej zamieszczony w rozprawie doktorskiej autora pt:

Wykorzystanie Metody Elementów Skończonych
w badaniach teoretyczno-doświadczalnych tarcia ślizgowego
w warunkach odkształceń plastycznych dostępny
w Bibliotece Politechniki Lubelskiej

W wersji elektronicznej dostępny w Bibliotece Cyfrowej Politechniki Lubelskiej