FEDERACJA AKADEMII WOJSKOWYCH

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Wioletta Kuśmierska-Matyszczak

Analiza porównawcza badań numerycznych i eksperymentalnych nagniatającego przepychania ślizgowego tulei stalowych

Promotor pracy: dr hab. inż. Tomasz Dyl, prof. UMG

Gdynia 2024

SPIS TREŚCI

Wykaz skrótów i oznaczeń…… 4

STRESZCZENIE……..... 6

ABSTRACT……..… 7

1. Wprowadzenie i uzasadnienie podjętego tematu……..….. 8

2. Przegląd literatury……..…... 10

2.1. Stan wiedzy z zakresu obróbki nagniataniem……...… 10

2.2. Rozwój obróbki nagniataniem…….. 14

2.3. Zalety technologii nagniatania…….. 14

2.4. Klasyfikacja rodzajów obróbki nagniataniem…….. 17

2.5. Charakterystyka procesów nagniatania……. 21

2.6. Mechanizmy odkształceń w strefie nagniatania…..…….. 23

2.7. Stan warstwy wierzchniej po przepychającym nagniataniu ślizgowym……... 24

2.8. Narzędzia do nagniatającego przepychania…….. 26

2.9. Przykłady zastosowań nagniatania ślizgowego…… 31

3. Charakterystyka procesów kształtowania powierzchni……. 36

3.1. Wpływ procesów nagniatania na strukturę warstwy wierzchniej……. 41

3.2. Fizyczny model nagniatania ślizgowego…….. 44

3.3. Wzrost wytrzymałości warstwy wierzchniej ……... 46

4. Problem badawczy, teza, cel i zakres pracy……...……..…… 52

5. Metodyka badań…….…… 55

5.1. Program badań……...……..... 55

5.2. Przebieg badań…….. 58

5.2.1. Oprogramowanie ……..…….. 61

5.2.2. Aparatura badawcza ……... 61

5.3. Wybór badanych materiałów……..……..... 68

5.3.1. Stal konstrukcyjna S235JR……. 69

5.3.2. Stal austenityczna 316L…….. 69

5.3.3. Stal niestopowa C45……... 70

5.4. Parametry technologiczne……. 71

5.4.1. Sposób doboru warunków nagniatania ślizgowego…… 71

5.4.2. Siła nagniatania……... 71

5.4.3. Środki smarne w procesach obróbkowych……..... 72
6. Budowa modelu MES do wyznaczenia odkształceń w procesie nagniatania…… 73
6.1. Model nagniataka trzpieniowego…….……. 77
6.2. Model tulei……..……..... 77
6.3. Implementacja modelu do systemu MES……..... 77
6.4. Proces odkształcenia materiału……. 80
6.4.1. Odkształcenia sprężysto-plastyczne…….…….……. 84
6.4.2. Charakterystyka procesów powierzchniowej obróbki plastycznej…… 86
7. Wyniki badań dla analizowanych próbek stali…… 91
7.1. Analiza numeryczna nagniatającego przepychania ślizgowego……..…… 91
7.1.1. Rozkład temperatur…..……..…….. 91
7.1.2. Rozkład prędkości odkształcenia…….…….…….. 93
7.1.3. Intensywność odkształcenia…… 96
7.1.4. Intensywność naprężeń……... 98
7.1.5. Naprężenia średnie…….……. 101
7.2. Wykres zależności odkształcenia sprężysto–plastycznego …...……... 103
7.3. Analiza badań eksperymentalnych nagniatającego przepychania ślizgowego..... 106
7.3.1. Ocena wcisku nagniatania plastycznego…….…….…..... 106
7.3.2. Struktura geometryczna po nagniataniu……..... 107
7.3.3. Właściwości powierzchni otworów po obróbce nagniataniem…….. 112
7.4. Badanie makro i mikrostruktury……... 113
7.5. Wyznaczenie naprężeń własnych metodą średnich odchyleń……... 119
7.6. Wdrożenie procesu nagniatającego przepychania ślizgowego w praktyce przemysłowej…… 121
7.7. Opracowanie empirycznego wzoru na głębokość odkształceń i naprężeń nagniatającego przepychania ślizgowego……..…….... 124
Podsumowanie i wnioski końcowe……..... 126
LITERATURA…… 131
Spis rysunków…….…….. 142
Spis tabel……... 145

Wykaz skrótów i oznaczeń

C – Stała określona na podstawie analizy numerycznej intensywności naprężeń: C = 0,51 – 0,54,
CAD – (ang. Computer Aided Design) projektowanie wspomagane komputerowo,
CNC – (ang. Computerized Numerical Control) komputerowe sterowanie urządzeń numerycznych,
d – średnica zewnętrzna elementu nagniatającego (trzpienia) [mm],
d_0 – średnica wewnętrzna tulei przed nagniatającym przepychaniem ślizgowym [mm],
d_1 – średnica wewnętrzna tulei po nagniatającym przepychaniu ślizgowym [mm],
D – średnica zewnętrzna tulei po nagniatającym przepychaniu ślizgowym [mm],
D_1 – średnica zewnętrzna tulei po nagniatającym przepychaniu ślizgowym po przecięciu wzdłuż próbki [mm],
e – strefa sprężysta,
E – moduł Younga, współczynnik sprężystości podłużnej [GPa],
ε – intensywność odkształcenia,
ε_0 – odkształcenia początkowe,
$\dot{\varepsilon}_i$ – prędkość odkształcenia,
$\dot{\varepsilon}_{ij}$ – tensor prędkości odkształcenia,
ε_h – względne zagłębienie narzędzia nagniatającego,
ε_{np} – względne odkształcenie plastyczne nagniatającego przepychania ślizgowego,
F – siła nacisku elementu nagniatającego na warstwę wierzchnią elementu (siła nagniatania) [N],
G – obróbka gładkościowa,
g_t – grubość ścianki tulei [mm],
h – głębokość zagłębienia elementu w obrabianej powierzchni,
h_δ – głębokość zalegania strefy uplastycznionej,
h_f – wysokość fali materiału,
HRC – skala twardości Rockwella,
HV – skala twardości Vickersa,
IT – klasa tolerancji IT,
K_0 – stałe materiałowe odnoszące się do właściwości poszczególnych materiałów,
m – stałe materiałowe odnoszące się do właściwości poszczególnych materiałów,
m_1, m_2, m_3, m_4
MES – Metoda Elementów Skończonych (ang. Finite Element Method),
n – prędkość obrotowa przedmiotu obrabianego,
μ – współczynnik tarcia,
ν – liczba Poissona,
OUNP – O– obrabiarka, U– uchwyt, N– narzędzia, P– przedmiot obrabiany,
p – posuw nagniatania,
p_l – strefa plastyczna,
q – naddatek na nagniatanie,

q_n – nacisk jednostkowy nagniatania,
Ra – średnia arytmetyczna odchylenia profilu od linii średniej [µm],
R_e – wyraźna granica plastyczności [MPa],
r_k – promień zaokrąglenia końcówki narzędzia [mm],
R_k – promień krążka [mm],
R_r – promień rolki [mm],
Rt – całkowita wysokość profilu [µm],
Rz – wysokość chropowatości [µm],
σ – naprężenie główne,
σ_n – naprężenia normalne [MPa],
σ_0 – początkowe naprężenia uplastyczniające [MPa],
σ_p – naprężenie uplastyczniające,
S_{ij} – dewiator tensora naprężeń,
S_u – stopień utwardzenia [%],
T – temperatura,
τ – naprężenie tarcia [MPa],
U – obróbka umacniająca,
v – prędkość nagniatania,
w – wcisk nagniatania [mm],
W – obróbka gładkościowa i wymiarowa,
WW warstwa wierzchnia

STRESZCZENIE

W niniejszej pracy zamieszczono zagadnienia dotyczące tematyki z zakresu teorii zjawisk sprężystości i plastyczności, obróbki nagniataniem ze szczególnym uwzględnieniem nagniatającego przepychania ślizgowego, zjawisk tribologicznych, struktury warstwy wierzchniej, analizy numerycznej i eksperymentalnej obróbki plastycznej oraz jej weryfikację. Praca zawiera opis nagniatania ślizgowego walcowo-czołowym nagniatakiem trzpieniowym, a także zestawienie czynników mających wpływ na rezultat obróbki dla różnych rodzajów materiałów inżynierskich.

Innowacyjne podejście do powierzchniowej obróbki plastycznej dotyczy realizacji badań numerycznych za pomocą metody elementów skończonych (MES) technologii nagniatającego przepychania ślizgowego dla stali trudnoobrabialnych. Na podstawie uzyskanych zależności odkształceń i naprężeń opracowano autorskie równanie.

Przedstawiono przykładowe wyniki analizy wpływu naprężeń własnych na głębokość zalegania odkształceń. Opracowano modele w programie CAD i wykonano symulacje komputerowe w programie FORGE NxT 2.1 pozwalające na przeprowadzenie obliczania naprężeń, odkształceń, rozkładu prędkości odkształceń, naprężeń średnich poprzez nagniatające przepychanie ślizgowe.

Zasadniczą rolę pracy stanowiły teoretyczna, numeryczna i doświadczalna analiza nagniatania tulei, znajdująca zastosowanie w produkcji przemysłowej m.in. maszynowej, metalurgicznej oraz okrętów. Na bazie analizy doświadczalnej i numerycznej określono zależności między naprężeniami ściskającymi, a stanem odkształceń nagniatanej powierzchni. Dokonano analizy głębokości zalegania odkształceń.

Zbadano, że w sposób kontrolowany można kształtować stan naprężeń własnych i odkształceń w próbkach typu tuleja dla zapewnienia odpowiedniej jakości technologicznej, przy utrzymaniu wysokich własności eksploatacyjnych warstwy wierzchniej nagniatanego elementu. Wyniki otrzymane w pracy umożliwiły wyznaczanie optymalnych własności warstwy wierzchniej na etapie projektowania procesu nagniatania.

ABSTRACT

In the paper were included issues related to the theory of elasticity and plasticity phenomenom, burnishing treatment with particular emphasis on slide broaching burnishing, tribological phenomenon, surface layer structure, numerical analysis and experimental plastic processing and its verification. The paper describes the sliding burnishing of a cylindrical-frontal shaft element and list of factors influencing the processing results for different types of engineering materials as well.

An innovative approach to surface plastic forming concerns the implementation of numerical tests using the finite element method (FEM) of the slide broaching burnishing technology for hard machinable steels. A proprietary equation was developed based on the strain and stress dependency qualities obtained. Example results analysis the influence of internal stresses on the depth residual strain are presented. Models were developed in the CAD program and computer simulations were performed in the FORGE NxT 2.1 program, allowing for the calculation of stresses, strains, strain rate pattern and pressure by slide broaching burnishing.

The fundamental role of the paper was the theoretical, numerical and experimental analysis of sleeves burnishing, applicable in industrial production, among others machinery, metallurgy and shipbuilding industries. Based on the experimental and numerical analysis, the dependence between the compressive stresses and the state of deformation of the burnished surface was determined. The depth of residual strain was analysed.

It was investigated that in a controlled way it is possible to be shape the state of internal stresses and strain in sleeve-type samples to ensure appropriate technological quality, while maintaining high operating properties surface layer of the burnished element. The results obtained in the study made it possible to determine the optimal properties of the surface layer at the stage of designing the burnishing process.

1. Wprowadzenie i uzasadnienie podjętego tematu

Obróbka nagniataniem ślizgowym jest rodzajem wykańczającej obróbki plastycznej w szczególności dotyczy metali i ich stopów. Dzieli się na przetłaczanie i wygładzanie ślizgowe. Można je wykonywać jako przepychanie i przeciąganie nagniatające przy pomocy przepychacza nagniatającego, kulki lub przeciągacza nagniatającego. Obróbka plastyczna jest sposobem przygotowania półwyrobów oraz gotowych wyrobów [7, 38, 44, 111, 114]. Nagniatanie w porównaniu do obróbki skrawaniem jest szybkim i bezpiecznym procesem, realizowany w niskich temperaturach, nie pozostawia odpadu w postaci wióra, iskier i szkodliwych pyłów [33, 49]. W konsekwencji nie wywołuje strat materiału i pozwala na uzyskanie powierzchni o niskiej chropowatości i zwiększonych własnościach wytrzymałościowych [57, 63, 107].

Obróbka plastyczna opiera się na nadaniu wyrobowi określonego wymiaru i kształtu poprzez wywołanie w nich lokalnego odkształcenia plastycznego w warstwie powierzchniowej bez zaburzenia spójności metalu, przy pomocy kinetycznego gładkiego i twardego elementu nagniatającego na obrabianej powierzchni. Kluczową koncepcją dla sposobu przeróbki plastycznej jest udoskonalenie własności użytkowych, zmniejszenie naddatków obróbki, wzrost dokładności kształtowo–wymiarowej i efektywności produkcji. Istnie szeroki zakres sposobów realizowania obróbki w tym jako gładkościowa, umacniająca i wymiarowo–gładkościowa. Narzędzia do nagniatania zostały zunifikowane i znajdują zastosowanie na frezarkach, tokarkach, wiertarkach i centrach obróbkowych [38, 90, 128, 130].

Współczesny przemysł, a także metalurgiczny, maszynowy, motoryzacyjny, lotniczy i okrętowy opiera się na stosowaniu obróbki plastycznej, determinującej odpowiednie właściwości fizykochemiczne warstwy wierzchniej materiałów oraz wysoką jakość.

W przemyśle rosnące wymagania związane ze wzrostem dokładności elementów maszyn, a także niezawodnością zmuszają do poszukiwań nowych, lepszych rozwiązań obróbki. W ostatnim czasie widoczna jest tendencja do wytwarzania odporniejszych i wydajniejszych części maszyn. Istotnym aspektem jest innowacyjność, polepszenie jakości i redukcja kosztów wytwarzania produktów. Aby nadążyć za oczekiwaniami i potrzebami produkcyjnymi niezbędne jest udoskonalanie sposobów projektowania

i wytwarzania, która bezpośrednio wpływa na trwałość, wydajność warstwy wierzchniej wyrobu [17, 62, 130].

Procesy nagniatania można stosować w jednostkowej i seryjnej produkcji. Zastosowanie nagniatania w seryjnej i masowej produkcji prowadzi do oszczędności materiału z uwagi na zwiększoną trwałość narzędzi nagniatających w odróżnieniu od narzędzi skrawających [54]. Przy poszczególnych materiałach niepoddanych obróbce cieplnej i materiałów o niższej twardości, stosuje się nagniatanie poprzez zgniot w celu polepszenia ich własności.

Istnieje wiele przykładów przemysłowego zastosowania nagniatania ślizgowego związanych z ekonomicznymi i technologicznymi względami, zdatnych do zamiany wybranych operacji ściernej obróbki wykańczającej (szlifowanie, polerowanie, dogładzanie). Procesy nagniatania są przeprowadzane na specjalnych nagniatarkach albo na konwencjonalnych obrabiarkach skrawających z dostosowanym oprzyrządowaniem [106, 110, 120, 127, 128, 131, 177, 180].

W niniejszej rozprawie scharakteryzowano procesy obróbki plastycznej poprzez nagniatające przepychanie ślizgowe. Celem poznawczym pracy było wykonanie teoretycznych i doświadczalnych badań wpływu parametrów technologicznych obróbki nagniatającego przepychania ślizgowego na właściwości eksploatacyjne warstwy wierzchniej części maszyn i urządzeń.

Głównym założeniem pracy było wykonanie analitycznego i numerycznego modelowania obróbki nagniatania warstwy wierzchniej dla stalowych próbek. Przeprowadzono badania głębokości zalegania odkształceń po obróbce nagniataniem na bazie teorii sprężystości i plastyczności opartych na naprężeniach ściskających. Zachodzący proces umożliwił uzyskanie czystej od zanieczyszczeń ściernych powierzchni [47].

Uzasadnieniem podjętego tematu był przegląd literatury przedmiotu i brak opracowania metody elementów skończonych dla nagniatającego przepychania ślizgowego ze szczególnym uwzględnieniem modelu rozkładu naprężeń własnych. Perspektywiczną cechę pracy stanowią symulacyjne modele badań i analiza numeryczna obróbki nagniataniem z wykorzystaniem teorii sprężysto–plastycznej, celem pozyskania wymaganego podwyższenia trwałości eksploatacyjnych i efektywności elementów maszyn, poprzez ukonstytuowanie stanu naprężeń i odkształceń w warstwie wierzchniej [44, 202].

2. Przegląd literatury

W nagniataniu materiałów trudnoobrabialnych wykorzystuje się powierzchniowe odkształcenie plastyczne, wywołane przez miejscowe oddziaływanie narzędzia (kulka, wałek, krążek) na obrabianą powierzchnię w wyniku oddziaływania sił dociskających [90, 160]. Układ obróbkowy (OUNP: O– obrabiarka, U– uchwyt, N– narzędzia, P – przedmiot obrabiany). Taki układ pozwala na jednoczesny wzajemny ruch obrotowy, posuwowy lub obrotowo-posuwowy obrabianego przedmiotu oraz nagniatającego narzędzia. Ten rodzaj obróbki wykończeniowej jest stosowany w celu kształtowania warstwy wierzchniej, wzmocnienia właściwości eksploatacyjnych, modernizacji elementów maszyn. Obróbka nagniataniem umożliwia zmianę wymiarów, spadek chropowatości i wzrost twardości powierzchni [84].

Powszechnie prowadzone są badania w kraju [49, 52, 55, 56, 86, 88, 90, 91, 127, 129, 131, 163, 179], jak i za granicą [15, 60, 61, 65, 164] odnoszące się do obróbki nagniatania oraz jej wpływie na warstwę wierzchnią. Badania obejmują obróbkę wykańczającą dla stali nierdzewnych i żaroodpornych; stopów: aluminium, tytanu i żeliw stopowych. Rozwój obróbki nagniataniem pokazuje tendencje do obróbki materiałów trudno odkształcalnych na przykład: ceramika, kompozyty, stale hartowane, powłoki: dyfuzyjne, galwaniczne, kompozytowe, stopowe oraz faz międzymetalicznych.

Obecnie przeprowadzane są badania nad obróbką hybrydową z równoczesną obróbką skrawaniem i nagniataniem oraz w szczególnych przypadkach wspierana laserowo [126]. Dla głębokich, nieprzelotowych otworów i powierzchni kształtowych realizuję się również badania bezwiórowej obróbki wykańczającej. Obróbka nagniataniem rozwija się dynamicznie, świadczą o tym prace naukowo-techniczne oraz liczne patenty publikowane na świecie. Produkcja nowych urządzeń i narzędzi nagniatających, a także rodzajów obróbki znacząco wpływa na postęp w tej dziedzinie.

2.1. Stan wiedzy z zakresu obróbki nagniataniem

Proces powierzchniowego odkształcenia plastycznego obróbką nagniataniem jest znany od lat 20-tych XX wieku. Niemiecki producent sprzętu kolejowego prowadził próby nagniatania przy pomocy prostego, jednokrążkowego narzędzia z wielkimi siłami docisku, których zadaniem był wzrost trwałości osi wagonów i parowozów [129].

Od 1930 r. do 1940 r. nastąpiło przemysłowe zastosowanie obróbki nagniataniem przede wszystkim obejmowało niemiecki i radziecki przemysł ciężki. W tamtym czasie, aby zwiększyć wytrzymałość zmęczeniową, a także odporność na ścieranie stosowano nagniatanie przez krążkowanie takich części maszyn jak: osi, wałów, trzonów [121].

Na początku lat 20-tych rozpowszechniono przemysłowe stosowanie nagniatania jako obróbki wykańczającej części z żeliwa, a w szczególności korpusów odlewanych. Wprowadzając tym samym obróbkę gładkościową i wykańczającą obróbkę wymiarową m.in. do technologii otworów i wałków. Adaptacja do konwencjonalnych obrabiarek pozwoliła na użycie technologii w przemyśle motoryzacyjnym.

Powszechne zestawy głowic i nagniataków są wykorzystywane do wyposażenia obrabiarek uniwersalnych i sterowanych numerycznie. Opracowanie technologii równoczesnej obróbki skrawaniem i nagniataniem cylindrów, wałów dało początek produkcji wielkich i długich rur wiertniczych oraz siłowników hydraulicznych [50, 130].

W początkowym okresie narzędziami stosowanymi w obróbce nagniataniem były stalowe krążki. Następnie stosowano elementy nagniatające z węglików spiekanych, diamentów naturalnych i syntetycznych [113]. Nowy rodzaj elementów nagniatających umożliwił nagniatanie stali hartowanych, twardych powłok galwanicznych, a także obrobionych techniką cieplno-chemiczną (azotowaniem, cyjanowaniem). Nagniatanie stali ulepszonych i hartowanych wykonuje się, aby zmienić stan naprężeń warstwy wierzchniej i dla wzrostu wytrzymałości zmęczeniowej.

Przełom lat 60-tych i 70-tych przyniósł rozwój nagniatania oscylacyjnego. Metoda polega na wygniataniu mikrorowków na kształtowanej powierzchni kulką albo elementem diamentowym. Zaletami tej metody jest uzyskanie regularnej i zamierzonej powierzchni, szczególnie użytecznej w aspekcie dekoracyjnym [122, 131].

W różnych ośrodkach badawczych w kraju i za granicą zajmowano się problematyką obróbki nagniataniem, jak wynikającymi zmianami w materiale. Przedmiot badań dotyczy pojęć związanych z nagniataniem stali nierdzewnej, stopów żaroodpornych, żeliw stopowych, stopów aluminium i miedzi, powłok napawanych, dyfuzyjnych, galwanicznych, a także części z spiekanych proszków metali [38, 47, 123, 129, 139].

Intensywny rozwój badań w krajowym przemyśle przypada na okres lat 80. Jednak nadal obróbka nagniataniem cieszy się dużym zainteresowaniem i jest stosowana, jako metoda wykańczająca obróbki bezwiórowej.

W latach 60-tych i 70-tych prowadzono badania dotyczące nagniatania głównie w Instytucie Mechaniki Precyzyjnej w Warszawie i na Politechnice Warszawskiej, gdzie stosowano nagniatanie elektromechaniczne i łuskające [69, 97].

W krajowych instytucjach badawczych i przemysłowych poddawano badaniom technologię nagniatania oraz umocnienia po nagniataniu, przeprowadzano testy wytrzymałości zmęczeniowej [16, 107]. Stworzono metodę nagniatania stali i żeliw, wykonano narzędzia do nagniatania otworów, wałków, powierzchni czołowych, głowice nagniatające, urządzenia do równoczesnego skrawania i nagniatania oraz nagniatania oscylacyjnego. W Polsce w latach 70- tych powstały normatywy technologiczne, które umożliwiły dobór warunków i parametrów obróbki dla standardowych materiałów konstrukcyjnych [121, 123]. W Krakowie na Instytucie Obróbki Skrawaniem zapoczątkowano ujednoliconą produkcję nagniataków do obrabiania wałków o średnicy od 3 do 150 mm oraz otworów o średnicy od 10 do 320 mm. Udoskonalenie procesu oraz zdolność technologicznego skrawania skutkują wzrostem wydajności produkcji, szczegółowych tolerancji wymiarowych, możliwość kształtowania nawet trudnoobrabialnych materiałów konstrukcyjnych, a także dobrej, jakości obrabianego przedmiotu [73].

Rozwój obróbki skrawaniem w ostatnich latach charakteryzował:

– Wzrost prędkości skrawania. Obróbka szybkościowa z prędkością powyżej 1000 m/min [142]. Dla stali hartowanej obróbka z dużą prędkością jest definiowana dla prędkości 200 m/min.
– Zwiększenie dokładności wymiarowo-kształtowej oraz jakości warstwy wierzchniej.

Obróbka za pomocą narzędzia o odpowiedniej geometrii ostrza z zastosowaniem chemicznej obróbki atomowej do kształtowania precyzyjnej ostrości krawędzi ostrzy diamentowych, może zastąpić docieranie oraz polerowanie. Procesy obróbki wiórowej przenoszą się do obszaru nanotechnologii [79].

Ze względów ekologicznych ogranicza się zużycie cieczy obróbkowej. Powszechnie stosuje się skrawanie na sucho. Korzystając z powłok oraz supertwardych materiałów narzędziowych. Konwencjonalne sposoby obróbki można wspomagać poprzez oddziaływanie chemiczne, termiczne, strumienia plazmy albo lasera. Rodzaj obróbki odgrywa ważną rolę w ulepszaniu skrawalności trudnoobrabialnych materiałów. Ich głównym celem jest poprawa fizykomechanicznego mechanizmu. Zastosowanie dodatkowej energii cieplnej w strefie skrawania skutkuje spadkiem

wytrzymałości warstwy skrawanej, powodując zmniejszenie składowej całkowitej siły skrawania, zużycia ostrza, a także zmianie rodzaju i budowy wióra. Przez wsparcie procesu skrawania wiórowego strumieniem lasera otrzymano wzrost wydajności obróbki materiałów trudnoskrawalnych. Zmniejszenie zużycia ostrza dla zahartowanej stali stopowej o trwałości 64 HRC zostało uzyskane dzięki nagrzewaniu plazmowemu. Zwiększenie trwałości ostrza można uzyskać wprowadzając ciecz obróbkową pod ciśnieniem do obszaru kontaktu wiór– ostrze [33].

Istotną rolę w wielowymiarowości mechanizmu skrawania odgrywają metody symulacji komputerowej. Umożliwia ona na tworzenie trójwymiarowego modelu procesu obróbki. W symulacjach numerycznych ważne są właściwości mechaniczne materiałów, stopnie odkształcenia, prędkości, wysoka temperatura.

W badaniach procesów obróbki metali ważną rolę odgrywa fizyczny mechanizm skrawania, trwałość narzędzia oraz jakość technologiczna warstwy wierzchniej.

Proces obróbki skrawaniem przeprowadza się za pomocą ostrza oddzielającego warstwę materiału, prowadząc do jej odkształcenia sprężystego i plastycznego oraz wióry w formie odpadu. Zjawisko skrawania jest wynikiem oddziaływania elementów układu obróbkowego: obrabiarki (O), narzędzia (N) oraz obrabianego przedmiotu (P). Szczegółowa analiza zjawisk fizycznych w procesie obróbki wymaga uwzględnienia dynamicznych i kinematycznych cech obrabiarki, materiału ostrza narzędzia, stereometrii, wymiarów, kształtu oraz właściwości fizycznych i mechanicznych obrabianego materiału.

Obszary wpływu oddziaływania ostrza na półwyrób obejmują:

– odkształcenia sprężyste i plastyczne warstwy skrawanej;
– tarcie zewnętrzne w obszarze kontaktu oraz zużycie ostrza narzędzia;
– dekohezja materiału, tarcie wewnętrzne w wyniku, którego jest formowana nowa, czysta chemicznie powierzchnia;
– wytworzenie ciepła i przepływ w układzie obróbkowym;
– wpływ cieczy chłodząco–smarujących na przebieg zjawiska skrawania;
– przemiany fazowe i strukturalne;
– drgania w trakcie obróbki;
– kształtowanie struktury geometrycznej powierzchni oraz stanu warstwy wierzchniej (WW).

Odkształcenie plastyczne, rozdzielenie odkształconego materiału oraz tarcie w obszarze kontaktu ostrza z wiórami wpływają na siebie wzajemnie. Czynniki takie jak rodzaj materiału, stereometria ostrza, warunki skrawania, a także gatunek chłodziwa, oddziałują na rozmiar oraz intensywność odkształceń, które mają wpływ na powierzchniowe zjawiska tribologiczne w strefie kontaktu ostrza.

O wielkości rozwoju obróbki nagniataniem dowodzi ilość patentów z dziedziny procesu nagniatania i konstrukcji elementów nagniatających. Technologia obróbki nagniataniem ma szerokie zastosowanie w przemyśle metalowym z uwagi na możliwość adaptacji elementów nagniatających do uniwersalnych obrabiarek [129]. Rozwój technologii nagniatania jest niezbędny w wielu dziedzinach gospodarki i przemysłu ze względu na prosty i ekonomiczny sposób obróbki wykańczającej.

2.2. Rozwój obróbki nagniataniem

Nagniatanie jest rodzajem bezwiórowej powierzchniowej obróbki plastycznej w odróżnieniu od konwencjonalnych sposobów, gdzie stosowane jest skrawanie posiada szereg zalet.

2.3. Zalety technologii nagniatania

Główne rodzaje zalet opisuje znaczna większość metod nagniatania. Ich znajomość pomaga w opracowaniu procesów technologicznych [5]. Atuty tego rodzaju obróbki można podzielić na dwie grupy:

1. Zalety wynikające z technologii nagniatania:

– wysoka efektywność uzyskania gładkiej powierzchni w trakcie jednego przejścia roboczego narzędzia, a także większa wydajność obróbki (np. 4–krotny wzrost względem szlifowania);
– duża wytrzymałość narzędzi nagniatających, daje możliwość stosowania nagniataków w centrach obróbkowych i pozwala na ich optymalizację;
– możliwość adaptacji elementów nagniatających na konwencjonalnych obrabiarkach skrawających i łatwe użytkowanie;

- perspektywa zastąpienia intensywnych i czasochłonnych operacji ściernych obróbki wykańczającej (dogładzanie, gładzenie, docieranie, polerowanie) obróbką nagniatania;
- perspektywa łączenia obróbki skrawaniem i nagniatania w wspólną operację, przy zastosowaniu szczególnego oprzyrządowania (tj. toczenie połączone z nagniataniem [126]);
- niskie zapotrzebowanie energetyczne przy operacjach nagniatania, a także efektywniejsze stosowanie obrabianej powierzchni przez wzgląd na bezwiórową obróbkę;
- w niektórych przypadkach możliwość zamiany obróbki cieplnej albo cieplno–chemicznej przez obróbkę nagniatania;
- sposobność obróbki warstwy dyfuzyjnych z trudem podatnych na zużycie ścierne oraz twardych powłok galwanicznych;
- operacje nagniatania bez chłodzenia jego strefy obróbki, niezbędne jest smarowanie dla obniżenia zużycia nagniatających narzędzi i uzyskanie niższej chropowatości powierzchni;
- zwiększenie bezpieczeństwa personelu podczas pracy, gdyż operacje nagniataniem przeprowadza się przy niskiej temperaturze, braku wiórów i iskier, szkodliwych pyłów.

2. Zalety wynikające, z jakości obrabianego przedmiotu:

- perspektywa otrzymania powierzchni o niewielkiej chropowatości Ra=0,08 [μm] i wielkich promieniach zaokrągleń wrębów i wierzchołków;
- wysoki udział nośny profilu nierówności ok. 90% i wielkie obciążenie powierzchni zapewniając dużą trwałość pasowań i połączeń;
- możliwość otrzymania powierzchni o wysokim współczynniku odbicia;
- utrzymanie ciągłości wewnętrznych włókien w metalu ze znikomym nagrzaniem przedmiotu, cechujące brakiem deformacji cieplnych, przypaleń i odwęglenia;
- formowanie zgniotu w warstwie wierzchniej stabilnych naprężeń wewnętrznych ściskających oraz wzrost twardości;
- wzrost odporności na czynniki eksploatacyjne tj.: zmęczenie postaciowe i powierzchniowe, ścieranie, korozję powierzchniową;
- możliwość tworzenia warstwy wierzchniej o ustalonych własnościach;
- możliwość zniesienia lokalnych spiętrzeń naprężeń wewnętrznych;

– dobra przyczepność olejów smarujących do obrobionych powierzchni elementem nagniatającym, a także niski współczynnik tarcia;
– prawidłowa przyczepność i regularność nakładanych twardych galwanicznie powłok;
– brak na nagniatanej powierzchni cząstek narostu, ziaren ścierniwa, jak również wiórów.

Na dodatkową uwagę zasługuje obróbka nagniataniem oscylacyjnym (wykonywana małą kulką albo kulistym elementem diamentowym). Charakteryzują ją następujące zalety:
– perspektywa prostego kształtowania na obrobionej powierzchni symetrycznych nierówności;
– perspektywa dokonania zmian geometrycznych parametrów chropowatości w tym: wysokość, kąt zarysu, promień wierzchołka i odstęp [1];
– perspektywa stosowania w niektórych przypadkach regeneracji i modernizacji wymiaru elementów maszyn [5, 147];
– użycie nagniatania oscylacyjnego celem obróbki poprzedzającej klejenie metalowych elementów;
– stosowanie w celach dekoracyjnych i tworzenie reliefów [20, 88].

Operacje nagniataniem mają wiele zalet, jak również posiadają wady, które utrudniają ich efektywne użycie. Do najistotniejszych wad obróbki zalicza się:
– niska dokładność wymiarowo-kształtowa odnosząca się do nagniatania naporowo sprężystego;
– skomplikowany wybór właściwych parametrów obróbki;
– utrudnienia w obróbce materiału o twardości ok. 45 HRC nagniataniem tocznym częściami stalowymi [129];
– możliwość pojawienia się w trakcie obróbki łuszczenia nagniatanej powierzchni w trakcie obróbki przy użyciu dużych sił docisku;
– potrzeba szczegółowej i starannej operacji poprzedzającej nagniatanie zważywszy na możliwość pojawienia się stref nierównomiernego zgniotu (dotyczy to wyrobów smukłych i cienkościennych);
– skomplikowany w stosowaniu tulei cienkościennych, gdy stosunek $\frac{d}{D} > 0{,}8$;
– pojawienie się błędów technologicznych w osiowym przekroju wyrobu.

W przypadku obróbki nagniataniem m.in.: stopów aluminium, miedzi tj. w przypadku materiałów o wielkim wydłużeniu względnym, problematycznym jest uzyskanie małych chropowatości obrobionego przedmiotu. Do grupy materiałów trudnoobrabialnych wlicza się materiały o twardości wyższej od 45 HRC, nie zaleca się ich nagniatania w seryjnej i masowej produkcji. Dobrym rozwiązaniem nagniatania stali hartowanych jest nagniatanie metodami ślizgowymi, także ze stosowaniem diamentowych części nagniatających [65, 113, 122, 129].

Postęp w badaniach technologicznych i rozwój udoskonalonych konstrukcji narzędzi nagniatających umożliwiają wyeliminowanie wymienionych wyżej wad.

2.4. Klasyfikacja rodzajów obróbki nagniataniem

Istnieje szereg kryteriów podziału sposobów nagniatania. W systematyzacji nagniatania uwzględniono procesy obróbkowe, jak również oprzyrządowania oraz urządzeń technologicznych. Przegląd klasyfikacji może pomóc w doborze metody nagniatania i konstrukcji narzędzi [30].

Założono następujące wymogi podziału sposobów nagniatania:

- właściwości kinematyczno-konstrukcyjne układu nagniatania;
- sposób działania narzędzia z przedmiotem;
- rodzaj działania sił nagniatania, oddziałujących narzędziem na przedmiot w trakcie obróbki;
- sposób kontaktu nagniataka z obrabianą powierzchnią;
- liczba oraz forma konstrukcji elementów nagniatających.

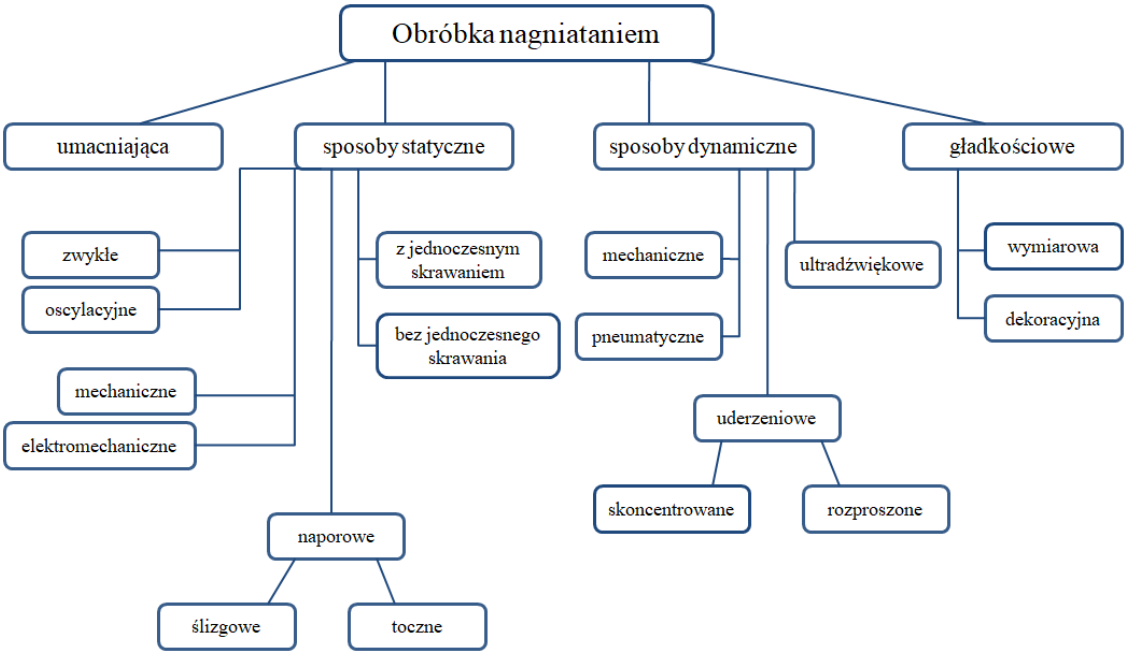
Część narzędzia nagniatającego jest to element nagniatający, którego elementami nagniatającymi są: krążki, kulki, rolki (z łożysk tocznych), nagniatak trzpieniowy (ze stali hartowanych).

W klasyfikacji założono następujące nazewnictwo elementów nagniatających:

- krążki nagniatające, to obrotowy element stożkowy, walcowy albo ze złożoną konstrukcją powierzchni zewnętrznej i otworem osiowym, którego stosunek długości do średnicy równa się $\frac{l}{d} < 1$;
- rolka nagniatająca, to obrotowy element w formie walca, stożka, baryłki, bez otworu osiowego w wymiarze $\frac{l}{d} \geq 1$;

– trzpień nagniatający, to obrotowy lub też nieobrotowa część o złożonym kształcie, a jego powierzchnia robocza jest wycinkiem kuli albo posiada inny kształt, jest wykorzystywany w celu nagniatania ślizgowego.

Nagniataki i głowice nagniatające tworzą grupę narzędzi nagniatających. Nagniatak cechuję prosta budowa z tylko jednym elementem nagniatającym bez wykonywanego ruchu obrotowego w trakcie pracy. Głowicę nagniatającą charakteryzuję złożona budowa z kilkoma elementami nagniatającymi wykonującą w trakcie pracy ruch posuwowy albo obrotowy. Spotyka się również przyrządy nagniatające, czyli urządzenia nagniatające posiadające własny napęd, współpracujący z układem kinematycznym obrabiarki (m.in. na tokarkach uniwersalnych, jako narzędzia suportowe używane do oscylacyjnego albo dynamicznego kulkowania wałków).



Rys. 2.1. Podział rodzajów nagniatania [129]. Opracowanie własne

Istnieją dwie główne grupy sposobów nagniatania z uwzględnieniem oraz cechą działania sił nagniatania i metodą położenia:

– sposoby dynamiczne, gdzie siły nagniatania zmieniają się czasowo wpływając dynamicznie na przedmiot, narzędzie nagniatające, co jakiś czas uderzając o obrobioną powierzchnię z wysoką częstotliwością. Do tej grupy sposobów zalicza

się: krążkowanie, kulkowanie strumieniowe i wibracyjne, kulkowanie oraz rolkowanie dynamiczne, młotkowanie [97, 130, 149, 151];

– sposoby statyczne, ze stałą siłą nagniatania działającą na obrabiany przedmiot przy pomocy elementu nagniatającego, który w trakcie obróbki pozostaje w stałym kontakcie z obrabianą powierzchnią [90]. Do grupy tych sposobów należą: kulkowanie, krążkowanie, przetłaczanie i wygładzanie ślizgowe.

Nagniatanie dynamiczne przeprowadza się jako uderzeniowe o odmianie skoncentrowanej i rozproszonej. Sposoby uderzeniowe skoncentrowane cechuje położenie elementów nagniatających w prowadnicach urządzenia, następnie uderzając kolejno albo równocześnie o obrabianą powierzchnię z siłą odśrodkową poprzez krzywkowy element narzędzia [37]. Nagniatanie sposobem uderzeniowym otworów wieloelementowym elementem nagniatającym z kształtową bieżnią w formie wielokątowych spłaszczeń czy też wzdłuż rowków.

W sposobach rozproszonych element nagniatający oddziałuje dynamicznie na obrabiany przedmiot pozbawiony prowadzenia w urządzeniu. Wtedy nagniatanie uderzeniowe rozproszone dzieli się na strumieniowe i wibracyjne.

Nagniatanie uderzeniowe rozproszone cechują elementy nagniatające w formie kulki, działające poprzez wibracje na całkowitą powierzchnię obrabianego przedmiotu (tzw. kulkowanie wibracyjne). Proces przeprowadza się w zamkniętym specjalnym pojemniku z wymuszonym ruchem drgającym albo w obrotowym bębnie, obejmującym obrobione przedmioty i luźne elementy nagniatające. Kulkowanie wibracyjne przebiega inaczej od wygładzania czy czyszczenia w pojemnikach rotacyjnych, czy też wibracyjnych zwanego jako bębnowanie.

W tej metodzie wyróżnia się następujące elementy nagniatające: krążki, kulki, rolki oraz trzpienie kształtowe ze stali hartowanych. Natomiast w procesie obróbki nagniatania stosuję się kolejne narzędzia nagniatające: głowica kulkowa, nagniatak krążkowy i trzpieniowy [28, 129]. Narzędzia wieloelementowe nazwano głowicami nagniatającymi, natomiast z jednym elementem nagniatakami.

W sposobach uderzeniowych strumieniowo, strumień elementów nagniatających we właściwym kierunku, energią ruchu oddziałuje na przedmiot. Do tej metody obróbki wlicza się kulkowanie strumieniowe, które cechuje jednakowa kinematyka jak w przypadku śrutowania. Stosowanym elementem nagniatającym są jedynie małe i twarde kulki o konkretnej średnicy.

Sposoby nagniatania statycznego mogą być wykonywane wprost po zabiegu skrawania albo jednocześnie ze skrawaniem w formie złożonego procesu łączonego z przeciąganiem, roztaczaniem, toczeniem. Użycie specjalnego nagniataka w jednym przejściu wstępnym pozwala na efektywną obróbkę głębokich cylindrów oraz długich wałów [128].

Uwzględniając odrębności kinematyki obróbki wyróżnia się nagniatanie oscylacyjne i zwykłe.

Charakterystyka nagniatania oscylacyjnego opiera się na dodatkowym ruchu oscylacyjnym jednego elementu lub wieloma elementami nagniatającymi w kierunku ruchu posuwowego. Skutkując po obróbce tworzeniem sinusoidalnych śladów na obrabianej powierzchni, które następnie mogą się przecinać lub nakładać formując powierzchnię regularnych mikronierówności. Pod względem kinematyki sposób nagniatania jest zbliżony do dogładzania oscylacyjnego, zwanego „superfinish". Różne warunki temperatury wpływają na wybór rodzaju nagniatania, na zimno stosuję się nagniatanie mechaniczne, na ciepło – elektromechaniczne, gdzie strefa obróbki jest podgrzewana elektrycznie.

Poszczególne rodzaje nagniatania statycznego są przeprowadzane jako naporowo ślizgowe i naporowo toczne. W zależności od sposobu obtaczania po powierzchni obrabianej elementu nagniatającego z tarciem ślizgowym lub tocznym. Do nagniatania naporowego ślizgowego twardych powłok cieplno–chemicznych i powierzchni wyrobów hartowanych element nagniatający jest wytworzony z węglików spiekanych, twardych stopów, naturalnych lub sztucznych diamentów. Siła naporu w sposobie statycznym działa w sposób sprężysty lub sztywny.

Dla nagniatania naporowego sposobem sprężystym siła jest wywierana poprzez narzędzia sprężyste (m.in. sprężyny, siłowniki pneumatyczne). W trakcie obróbki siła nagniatania jest wywierana ze stałą wartością na elementy sposobem sprężystym i zależy tylko od własności sprężystych narzędzia.

W przypadku sposobów sztywnych przyczyną sił jest wspólne oddziaływanie naprężenia narzędzia i przedmiotu, które wynikają z naddatku obróbkowego nagniatania oraz ze sztywności układu o–p–n. Najczęściej znajduje zastosowanie przy obróbce otworów kulkami i trzpieniami podczas przetłaczania naporowego lub przy obrabianiu wałków oraz otworów sztywnymi głowicami nagniatającymi.

Obróbka narzędziami sztywnymi umożliwia uzyskanie dużej dokładności wymiarowo–kształtowej przedmiotu. Natomiast w przypadku narzędzi sprężystych

istotna jest trajektoria określonych elementów nagniatających związana z dokładnością kształtową obrobionej powierzchni. Zapobiega uszkodzeniu narzędzia i łuszczeniu materiału na powierzchniach w trakcie nagniatania promieniowego w wałach stopniowych i stożkowych.

Klasyfikacja sposobów nagniatania uwzględnia nagniatanie gładkościowe oraz wzmacniające, jednak jest to ogólnie przyjęty podział technologiczny w zależności od parametrów technologicznych i zastosowania.

2.5. Charakterystyka procesów nagniatania

Obróbka nagniataniem ślizgowym jest rodzajem wykańczającej obróbki plastycznej. Dzieli się na przetłaczanie i wygładzanie ślizgowe. Można je wykonywać jako przepychanie i przeciąganie nagniatające przy pomocy przepychacza nagniatającego, kulki lub przeciągacza nagniatającego.

Najczęściej zadaniem przetłaczania ślizgowego jest uzyskanie wymiaru i dokładnego kształtu obrabianego wyrobu z miękkich albo ulepszonych materiałów. Najważniejszym zadaniem wygładzania ślizgowego jest uzyskanie wysokiej gładkości powierzchni wyrobów hartowanych z trudnoobrabialnych miękkich materiałów. W trakcie przetłaczania ślizgowego nagniatak (element nagniatający) jest w styczności z obrabianą powierzchnią wzdłuż całkowitej linii obwodu, walca lub kuli. Siła docisku przepychacza nagniatającego działa w trybie sztywnym poprzez różnice wymiaru średnicy narzędzia i przedmiotu. Wcisk nagniatania wymaga użycia wysokich sił osiowych, które są realizowane na przeciągarkach i prasach [29].

Obróbka nagniataniem w porównaniu do klasycznej ściernej obróbki wykańczającej umożliwia uzyskanie wyższych efektów ekonomicznych. Szczególnym ich powodem są w głównej mierze:

- perspektywa wykonania operacji obróbkowej tylko jednym przejściem roboczym elementem nagniatającym;
- łączenie w jedną złożoną operację skrawania i nagniatania;
- możliwość użycia dużych prędkości obrotowych nagniatania;
- wysoka trwałość narzędzia nagniatającego;
- perspektywa zastosowania obróbki grupowej;
- łatwe obsługiwanie centrów nagniatających i przystępność ich automatyzacji.

W tabeli 2.1. przedstawiono charakterystykę technologiczną metod nagniatania wewnętrznych powierzchni walcowych. Wybór metody nagniatania zależy od wielu czynników, tj. materiału części, warunków technicznych i technologicznych, a także ilości w serii produkcyjnej [128].

Tab. 2.1. Charakterystyka technologiczna metod nagniatania wewnętrznych powierzchni walcowych [128]

Rodzaj siły nagniatającej na element	Proces obróbkowy	Narzędzie nagniatające	Element nagniatający	Cel nagniatania	Stopień utwardzenia S_u [%]	Klasa dokładności IT
Statyczne	kulkowanie naporowe	Kulka	nagniatak kulkowy	U, G	20-50	9
			głowica kulkowa naporowa	U, G	20-40	8-9
			głowica kulkowa	U, W, G	20-50	7-8
			głowica kulkowa roztaczająco-nagniatająca	U, W	20-50	8
	krążkowanie naporowe	Krążek	głowica krążkowa naporowa	G	20-40	9
			głowica krążkowa	G, W	20-40	6-7
	rolkowanie naporowe	Rolka	głowica rolkowa	G, W	20-50	7-8
			głowica rolkowa roztaczająco-nagniatająca	G, W	20-50	7-8
	przetłaczanie naporowe	kulka, trzpień kształtowy	kulka, nagniatak trzpieniowy ślizgowy (przetłaczak)	W, G	40-50	6-7
			nagniatak trzpieniowy ślizgowy wielostopniowy	W, G	20-40	6-7
Dynamiczne	kulkowanie udarowe	Kulka	głowica kulkowa udarowa	U	15-30	9-10
	rolkowanie udarowe	Rolka	głowica rolkowa udarowa	U, W	30-60	8

Objaśnienia: G– obróbka gładkościowa, U– obróbka umacniająca, W– obróbka gładkościowa i wymiarowa

Operację nagniataniem cechuje szacunkowo stały koszt, na który nie wpływa dokładność obróbki wyrobu. Zwiększenie kosztów wytwarzania nagniatanych przedmiotów jest uwarunkowane wyższymi kosztami obróbki skrawaniem poprzedzającymi operację nagniatania. Konieczność wzrostu dokładności obróbki

skrawaniem jest związana ze wzrostem liczby stopni obróbki wyrobu, skutkujący mnogością liczby operacji, rzutując na zwiększenie kosztów wytwarzania. W sytuacji użycia obróbki ściernej niezbędna jest intensywna operacja gładkościowego szlifowania, kolejno dogładzania albo docierania. Obróbka nagniataniem zwłaszcza z użyciem wieloelementowych głowic jest mniej pracochłonna i tańsza. W obróbce dokładnych otworów zastosowanie nagniatania jest najbardziej ekonomicznym rodzajem obróbki z możliwych. Koszt obróbki nagniataniem jest 4-krotnie niższy od klasycznej obróbki gładkościowej, gładkościowej obróbki ściernej, jak również toczenia wykańczającego zważywszy na wyższą wydajność, niższy koszt narzędzia i niższe zapotrzebowanie na moc obróbki. Korzyści ekonomiczne obróbki przedmiotów przy operacjach nagniatania mogą być większe dla wyrobów z małym zakresem dokładności wymiarowo-kształtowym (klasy IT8), jednak przez wzgląd na okoliczności pracy muszą charakteryzować się dużą gładkością materiału [182]. Do grupy takich przedmiotów zalicza się np.: cylindry siłowników hydraulicznych, tłoczyska, śruby, wałki napędowe i sterujące. W wyżej wymienionych przykładach nie ma konieczności wykonania poprzedzającej operacji nagniataniem obróbki szlifowaniem.

2.6. Mechanizmy odkształceń w strefie nagniatania

W obszarach stykających się ze sobą nierównościami, kiedy ich powierzchnia jest odpowiednio duża, powstają odkształcenia plastyczne lub sprężyste. Jednak wartość naprężeń nie może przekroczyć wartości krytycznej granicy badanego materiału. Naprężenia w obszarze styku przy braku cieczy między dwoma powierzchniami wyjaśnia teoria Hertza [71]. Kiedy naprężenia osiągają wartość wytrzymałości materiału i krytyczny poziom uszkodzenia zmęczeniowego, pojawią się defekty i uszkodzenia warstwy wierzchniej [70, 136].

Układ sił doprowadzający, który tworzy nacisk powierzchniowy przewyższający wartość naprężenia uplastyczniającego obrabianego materiału skutkuje odkształceniami plastycznymi. Proces odbywa się na zimno wywołując przemieszczenia nierówności, jak również powodując zgniot w warstwie wierzchniej. Zjawisko przemieszczenia nierówności powierzchni (płynięcia), występuje podczas oddziaływania gładkiego i nieodkształcalnego narzędzia na obrabianą powierzchnię. W rezultacie powoduje

spadek chropowatości obrobionej powierzchni. Następstwem zgniotu obrabianego przedmiotu jest zmiana jego własności warstwy wierzchniej. Procesy zachodzą zazwyczaj równocześnie, jednak mogą się charakteryzować różną intensywnością w zależności od wymaganego wyniku obróbki [31, 89, 108].

W trakcie formowania warstw wierzchnich powstają duże naprężenia w zależności od wywołujących czynników można pogrupować na:

– strukturalne spowodowane przemianami fazowymi i towarzysząca im zmiana objętości (duże naprężenia są wywołane wzrostem objętości w trakcie przemiany martenzytnicznej, czyli przemianą pierwszego typu, zachodzącej przez zarodkowanie nowej fazy oraz wzrostem zarodków) [14];
– cieplne spowodowane gradientem temperatury;
– cieplne wywołane różnicą wartości współczynników rozszerzalności cieplnej podłoża oraz warstwy wierzchniej.

Naprężenia własne mogą być przyczyną odkształceń plastycznych wyrobów, a nawet skutkować powstaniem pęknięć w warstwie wierzchniej. Podczas obróbki w warstwie wierzchniej tworzą się korzystne naprężenia ściskające, ponieważ powodują wzrost wytrzymałości zmęczeniowej elementu [9, 87].

2.7. Stan warstwy wierzchniej po przepychającym nagniataniu ślizgowym

Warstwa wierzchnia to obszar materiału badany od powierzchni w jej głąb. Rodzaj wykonywanej obróbki wpływa na głębokość warstwy wierzchniej [11]. Parametry, które określają warstwę wierzchnią są następujące: falistość, chropowatość i twardość powierzchni.

Bazowe parametry nie są zadawalające, aby w całości wyjaśnić zjawiska, które występują podczas nagniatania. Do szczegółowego opisu stereometrii obrabianego przedmiotu najistotniejsze są [89, 90, 96, 116, 117]:

– kąt wierzchołkowy nierówności powierzchni materiału i promień zaokrąglenia wierzchołków nierówności powierzchni (parametr jest istotny przy doborze sił nagniatania);
– podziałka nierówności powierzchni przed procesem nagniatania jest ważna w doborze odpowiednich wielkości posuwu i sił nagniatania;

– promienie zaokrąglenia wgłębień nierówności mają wpływ na wytrzymałość zmęczeniową obrabianego wyrobu.

Pomiar twardości powszechnie przeprowadza się metodą Vickersa, gdyż cechuje się uniwersalnością i możliwością przeprowadzenia pomiarów na niewielkich obszarach i głębokościach powierzchni.

W warstwie wierzchniej stan naprężeń określa się poprzez usunięcie następnych warstw za pomocą technik dyfraktometrii rentgenowskiej, trawienia bezprądowego albo elektrochemicznego. Struktura metalograficzna definiowana jest poprzez: rozmiar ziarn, wielkość dyslokacji, kierunkowość struktury, stopień zgniotu.

Po obróbce nagniataniem widoczna jest znaczna poprawa licznych cech użytkowych. W trakcie nagniatania ślizgowego dochodzi do wzrostu objętości właściwej materiału w stanie zgniotu. Ukonstytuowanie naprężeń warstwy wierzchniej zwiększa wytrzymałość zmęczeniową, jest to szczególnie istotne w przypadku elementów maszyn pracujących w zmiennych obciążeniach [90, 130, 192, 202].

Wszystkie naprężenia w warstwie wierzchniej formowane w trakcie pracy maszyn się sumują. Naprężenia ściskające skutkują asymetrią rozkładu obciążeń. Zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej można uzyskać przez zmianę naprężeń warstwy wierzchniej, skutkujące bardzo niską chropowatością powierzchni w procesie nagniatania. Maksymalne naprężenia własne pojawiają się zaraz pod obrabianą powierzchnią, a ich wartość zależy od właściwości obrabianego materiału i od parametrów technologicznych [162]. Zaproponowany w pracy proces obróbki znacząco podnosi właściwości tribologiczne elementów maszyn, wydłużając czas ich pracy i poprawia odporność węzłów tarcia (łożyska ślizgowe, bieżnie łożysk tocznych, wykonanych z twardych stali czopy łożysk ślizgowych, panewki łożyskowe). Do niepożądanych efektów zjawiska obróbkowego należy wzrost gęstości dyslokacji i spadek samopasywacji materiału, które wiążą się ze spadkiem właściwości antykorozyjnych [16, 150].

Nagniatające przepychanie ślizgowe umożliwia zauważalną poprawę chropowatości materiału, zbliżoną jak po polerowaniu, a także w końcowym etapie po szlifowaniu, a nawet toczeniu [107, 172, 174]. Po nagniataniu uzyskana powierzchnia jest bez zanieczyszczeń szlifierskich, o poprawnej stereometrii powierzchni, pozbawionych nierówności powierzchni materiału. Prawidłowy dobór parametrów obróbki pozwala na osiągnięcie chropowatości powierzchni niższej od 0,40 [μm]. Struktura geometryczna powierzchni po obróbce cechuje się wielkimi odstępami,

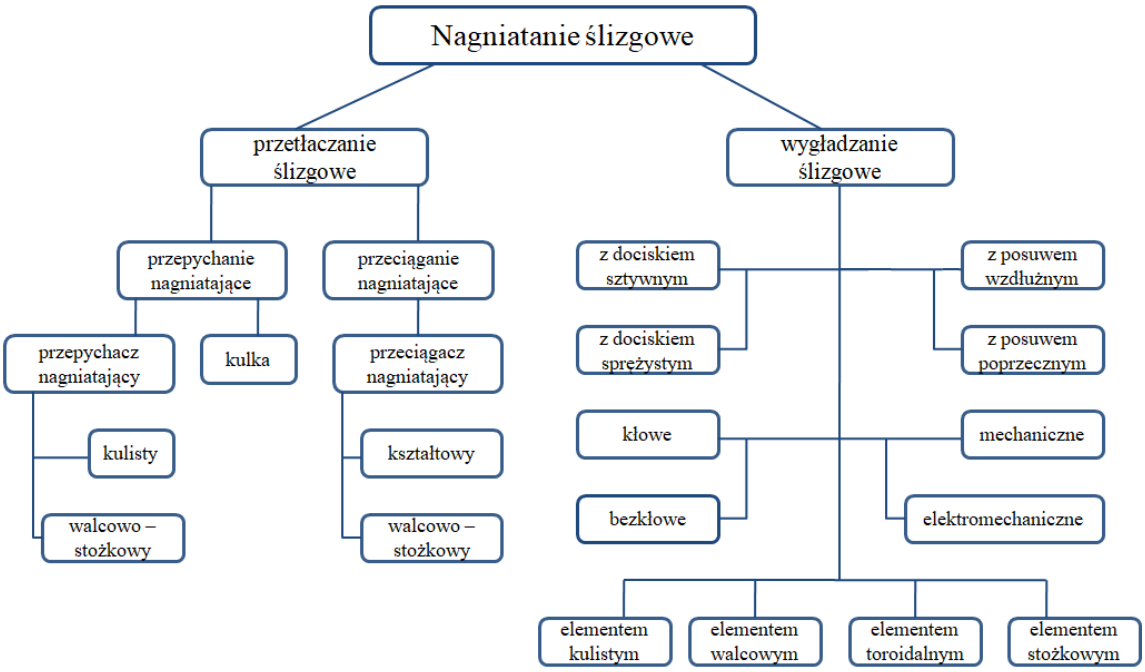
pojawiają się spłaszczone wierzchołki mikronierówności, natomiast nie występują mikrokarty, dzięki temu po nagniataniu ślizgowym powierzchnia cechuję się refleksyjnością. W trakcie nagniatania zmienia się kształt i parametry krzywej Abbotta–Firestore'a [39, 41, 54, 100]. Po obróbce umocnienie jest niższe od pozostałych rodzajów nagniatania. Stopień umocnienia jest uwarunkowany twardością materiału wyjściowego. W materiałach twardych przyrost twardości dochodzi do kilku procent, natomiast w miękkich materiałach wynosi do kilkudziesięciu procent, a umocnienie mieści się w granicach wysokości mikronierówności [90].

2.8. Narzędzia do nagniatającego przepychania

Nagniatanie ślizgowe należy do grupy sposobów naporowo-statycznych, których proces technologiczny opiera się na poślizgu, który pojawia się między obrabianą powierzchnią a elementem nagniatającym [90, 130].

Obróbka nagniataniem tocznym charakteryzuje się inną kinematyką niż nagniatanie ślizgowe. W trakcie nagniatania ślizgowego element nagniatający, którego cechuje twardość i gładkość, jest dociskany do obrabianej powierzchni. W strefie nagniatania pojawia się tarcie ślizgowe oraz odkształcenia plastyczne nierówności. Nagniatanie ślizgowe można podzielić na przetłaczanie ślizgowe i wygładzanie ślizgowe. Klasyfikacje odmian obróbki przedstawiono na rysunku 2.2. Ponadto istnieje dużo możliwości techniczno-kinematycznych układów obróbkowych i użytych kształtów narzędzi. Obecnie można wyróżnić w przybliżeniu 20 sposobów przeprowadzania nagniatania [129]. Za wyjątkiem metody elektromechanicznej obróbkę nagniataniem wykonuję się „na zimno" bez podgrzewania narzędzia oraz przedmiotu.

Wygładzanie ślizgowe jest stosowane do obróbki otworów, wałków, płaszczyzn oraz powierzchni kształtowych o najwyższej twardości od 60 – 65 HRC. W tej metodzie stosuje się przemysłowo elementy nagniatające o wysokiej twardości i niskim współczynniku tarcia ślizgowego wytworzone z węglików spiekanych, naturalnych i syntetycznych diamentów, jak również syntetycznego korundu.



Rys. 2.2. Odmiany naporowego nagniatania ślizgowego [129]. Opracowanie własne

W obróbce otworów przetłaczanie ślizgowe jest uznane jako przeciąganie i przepychanie nagniatające. Ten rodzaj odmiany ma szczególne zastosowanie w obróbce otworów o profilu przekroju kołowego w miękkich i umiarkowanej twardości wyrobach. Nagniatanie otworów walcowych można wykonać poprzez przetłaczanie ślizgowe, czyli sposobem przepychania lub przeciągania ślizgowego.

W produkcji seryjnej i masowej do przetłaczania otworów stosuje się ślizgowe nagniataki trzpieniowe, kulki nagniatające, a także wieloelementowe przeciągacze ślizgowe do obróbki otworów płytkich. Dodatkowo wyróżniamy przeciągacze jednolite, z ostrzami skrawającymi oraz składane z wymiennymi pierścieniowymi częściami nagniatającymi. Powyżej wymienione narzędzia służą do obróbki otworów skrawaniem przy równoczesnym nagniataniu z ominięciem wcześniejszego procesu roztaczania [129].

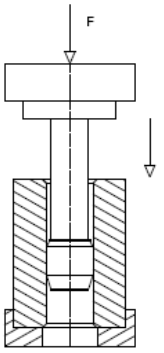
Brak ruchu obrotowego jest szczególną oznaką kinematyki przetłaczania ślizgowego podczas procesu obróbki. Jedynym pojawiającym się ruchem jest posuw narzędzia. Ten sposób przetłaczania ślizgowego realizuję się na przeciągarkach albo prasach. W głównej mierze zaletami tej odmiany nagniatania są: wysoka wydajność, przystępne oprzyrządowanie oraz obsługa, jak również wzrost dokładności otworów, których pole tolerancji w rezultacie przetłaczania obniża się od ok. 30% do 35 %.

W wyniku różnicy wymiarów narzędzia (wcisku) oraz obrabianego otworu powstaje siła normalna nagniatania. Siła normalna stabilizuje się w systemie obróbkowym oraz nie przekłada się na podzespoły obrabiarki. Siła wpływa na trwałość układu O–P–N oraz dokładność. Dużą zaletą przetłaczania jest to, że w układzie obróbkowym siła normalna się równoważy i nie przekłada się na części obrabiarki.

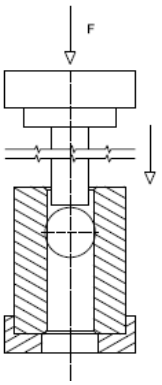
W trakcie nagniatającego przepychania ślizgowego siła F jest wywierana w głównej mierze przez suwak prasy, przemieszczając element nagniatający posiada przy tym właściwości pchające.

Elementy nagniatające mogą posiadać różnorodne kształty i budowę. Na ogół mają zastosowanie kulki łożyskowe i nagniataki trzpieniowe o zarysie kołowym, kulistym, przekroju walcowo–stożkowym albo kształtowym.

Użytkowanie przepychania kulkami łożyskowymi charakteryzuje się utrudnieniami zważywszy na stopniowanie jego średnic. Z tej przyczyny do przepychania małych otworów wykorzystuje się szczególne trzpieniowe jednoelementowe przepychacze walcowo-czołowe lub kuliste (rysunek 2.3 i 2.4).

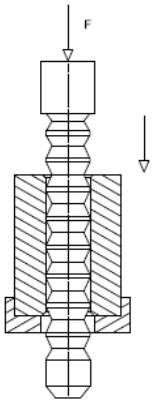


Rys. 2.3. Schemat obróbki nagniatającym przepychaniem ślizgowym jednoelementowym przepychaczem walcowo-czołowym [129]



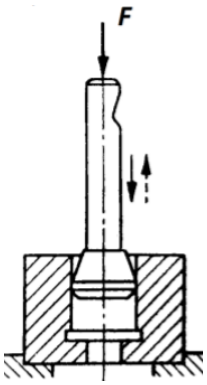
Rys. 2.4. Schemat obróbki nagniatającym przepychaczem ślizgowym kulką łożyskową [129]

W przypadku obróbki długich otworów stosuje się jednolite przepychacze wieloelementowe albo złożone z segmentów pierścieniowych (rysunek 2.5).



Rys. 2.5. Schemat obróbki nagniatającym przepychaczem ślizgowym przy pomocy przepychacza wieloelementowego składanego [129]

Do obróbki otworów nieprzelotowych jest stosowany układ przepychania, w którym jest konieczny główny dwukierunkowy roboczy ruch posuwowy, wykonywany na prasie poprzez zamocowanie w suwaku przepychacza (rysunek 2.6).



Rys. 2.6. Schemat przepychania otworu nieprzelotowego jednoelementowym trzpieniowym przepychaczem [129]

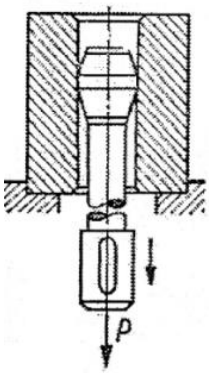
Obróbka otworu łukowego przelotowego o przekroju kołowym jest możliwa przez przepychanie kulką albo wieloma kulkami wprowadzanymi do otworu, przy czym pierwsza kulka różni się wielkością od pozostałych, ma większy rozmiar (rysunek 2.7).

Rys. 2.7. Schemat przepychania otworu łukowego przelotowego kulką łożyskową [129]

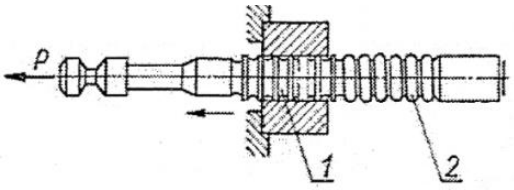
Otwory krótkie $\frac{l}{d} < 6$, a także o rozmiarze średnicy w przybliżeniu do 100 mm nagniata się przez przepychanie.

Nagniatanie ślizgowe przez przeciąganie nagniatające jest stosowane do otworów cechujących głębokość$1 > 6d$. Klasyczne modele przetłaczania ślizgowego przedstawią rysunek 2.8 – 2.10.

Natomiast przeciąganie nagniatające (odmiana przetłaczania ślizgowego) realizuje się na pionowych przeciągarkach lub poziomych (rysunek 2.8 i rysunek 2.9).



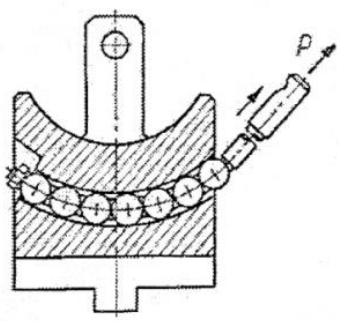
Rys. 2.8. Schemat obróbki otworów nagniatającym przeciąganiem ślizgowym przy pomocy jednoelementowego przeciągacza walcowo–stożkowego na przeciągarkach pionowych [128]



Rys. 2.9. Schemat obróbki wieloelementowym przeciągaczem ślizgowym z równoczesnym skrawaniem na przeciągarkach poziomych, gdzie: 1– zęby skrawające, 2–pierścieniowe elementy nagniatające [128]

W przeciąganiu nagniatającym kinematyka jest identyczna jak w przepychaniu nagniatającym. Odmiany przetłaczania ślizgowego wyróżniają się metodą przyłożenia głównej siły nagniatania, jak również długością oprzyrządowania. Dla jednoczesnej obróbki skrawaniem i nagniataniem przeciągacz cechuje się dwoma sekcjami obróbkowymi. Pierwsza sekcja przeciągacza skrawającego dotyczy okrągłych zębów skrawających, natomiast druga w postaci pierścieni jak u przeciągacza nagniatającego.

Nagniatające przeciągacze ślizgowe można wykonać w formie giętkich i sztywnych narzędzi, które pozwalają na możliwość łączenia obróbki wykańczającym przeciąganiem nagniatającym otworu z obróbką przeciąganiem skrawającym.



Rys. 2.10. Schemat obróbki otworów nagniatającym przeciąganiem ślizgowym wieloelementowym przeciągaczem kulistym giętkim do przepychania otworu kształtowego [128]

W przemyśle przetłaczanie ślizgowe (oprócz przepychania kulek), nie jest powszechnie stosowane, mimo że posiada przejrzysty układ kinematyczny oraz wiele zalet. Głównym powodem są złożone wymiary części nagniatających oraz sposoby obliczania naddatków, jak również warunki odnoszące się do ograniczonego stopnia wytrzymałości obrabianych elementów.

2.9. Przykłady zastosowań nagniatania ślizgowego

Obróbka nagniataniem wpływa korzystnie na właściwości użytkowe warstwy wierzchniej [83]. Proces nagniatania jest rodzajem powierzchniowej obróbki plastycznej, przeprowadzanej na obrabiarkach skrawających w formie obróbki umacniającej i wykańczającej. W przeciwieństwie do obróbki wiórowej i ściernej podczas nagniatania nie powstają wióry i iskry, jest zaliczana do ekologicznego sposobu obróbki.

Technologia obróbki nagniataniem znajduje szerokie zastosowanie w wytwarzaniu i regeneracji elementów części maszyn w przemyśle metalurgicznym, maszynowym i okrętowym [17, 22, 38, 42, 48, 56, 84, 158].

Odpowiednio dobrana konstrukcja nagniatających narzędzi i precyzyjne obrabiarki w rezultacie umożliwiają uzyskanie oprócz obróbki nagniatania, dodatkowo wzrost dokładności wymiarowej i kształtu obrabianego przedmiotu [43, 129].

Fundamentalnym celem stosowania obróbki nagniataniem może być:

– obróbka umacniająca – uzyskanie zmian, jakości warstwy wierzchniej materiału przedmiotu, powodujących zmniejszenie wpływu na czynniki eksploatacyjne, takich jak: korozja, zużycie ścierne, zmęczenie, itp.;

– obróbka gładkościowa – wyraźne zmniejszenie wielkości nierówności powierzchni po obróbce poprzedzającej nagniatanie;
– obróbka wymiarowo – gładkościowa – konkretny wzrost dokładności wymiarowej przy równoczesnym spadku chropowatości powierzchni do wskazanej wartości.

Pozostałe metody obróbki nagniataniem, zwłaszcza oscylacyjna i wibracyjna, może znaleźć zastosowanie w celu:

– kształtowania nierówności powierzchni o wybranych parametrach stereometrycznych, takich jak: kształt, wysokość, odstępy, promień zaokrąglenia wierzchołków, aby uzyskać ustalony cechy obrobionych powierzchni (obciążalność, cierność);
– powstania mikrorowków smarnych na współpracujących powierzchni podczas tarcia części: panewek, czopów, prowadnic, tłoków, cylindrów, celem wzrostu ich odporności na zużycie ścierne i zatarcie;
– tworzenia na powierzchniach zróżnicowanych reliefów, aby podkreślić ich walory dekoracyjne galanterii metalowej, naczyń aluminiowych, długopisów.

Głównym ograniczeniem wynikającym z nagniatania materiału jest twardość materiału obrabianego wyrobu i współczynnik wydłużenia względnego przy rozciąganiu. Powierzchnie materiałów, których wartość wydłużenia względnego A_5 jest mniejsza od 6% są traktowane za nieobrabialne albo trudnoobrabialne [121]. Obróbkę nagniataniem można przeprowadzić na żeliwach szarych i stopowych o wydłużeniu względnym wartości A_5 mniejszym od 6% w takim przypadku uznaje się je za nieobrabialne [121].

Istnieją pewne ograniczenia związane ze wzrostem dokładności i ulepszeniem kształtu obrabianego przedmiotu mogące uwidaczniać się w obszarze odkształceń plastycznych nieregularności powierzchni. Stosowanie obróbki nagniataniem przy odpowiednich warunkach i prawidłowej konstrukcji narzędzia daje możliwość uzyskania zakresu dokładności IT5–IT7 dla otworów, natomiast dla wałków dokładność w klasie IT6–IT8 [182, 184]. W dążeniu do osiągnięcia dokładności w zakresie klas IT5–IT6 wymagana jest precyzyjna obróbka poprzedzająca proces nagniatania.

Rośnie tendencja do bezwiórowej metody obróbki precyzyjnych części maszyn. Obecne obrabiarki CNC pozwalają na obróbkę powierzchniową o wysokiej dokładności wymiarowej (klasa dokładności: 6, 7). Tuleje cylindrów hydraulicznych poddawano obróbce skrawaniem, następnie wykonano powierzchniową obróbkę plastyczną

nagniataniem za pomocą głowic roztaczająco-nagniatających. Zintegrowana technologia jest kilkukrotnie krótsza od tradycyjnego roztaczania i honowania [133].

Wzrost dokładności obróbki poprzedzającej poprzez stosowanie m.in. toczenia, umożliwia użycie nagniatania w obróbce precyzyjnych, długich cylindrów hydraulicznych i pneumatycznych, również z części hartowanych, które zwiększają twardość warstwy wierzchniej ok. 40% [133].

Optymalne ekonomiczne korzyści można uzyskać wspólnie zestawiając szczególne narzędzia i urządzenia w obróbce skrawania razem z nagniataniem. Operację takie można wykonywać dla wytaczania, toczenia, frezowania. Metoda jest niezwykle dogodna w technologii tłoczysk, długich wałów, cylindrów hydraulicznych, rur wiertniczych. Zestawienie obróbki nagniataniem pozwala na znaczne obniżenie kosztów produkcji.

Obróbka nagniataniem jest coraz częściej stosowana w obróbce głębokich otworów, długich wałów m.in. w cylindrach hydraulicznych [157]. Zastępuję droższe i mniej ekonomiczne procesy honowania i szlifowania.

Wykonana i użyta konstrukcja jest związana z obróbką powierzchni cylindrycznych wewnętrznych. Funkcję głowicy nagniatającej pełni nagniatak trzpieniowy. Niezbędne jest stosowanie cieczy smarująco-chłodzącej w postaci oleju maszynowego.

W przypadku sprzętu i elementów przepływowych do instalacji paliwowych w którego skład wchodzą pompy i korpusy do cylindrów, obróbka nagniataniem gładkościowym zastąpiła obróbkę wykańczającą. Obróbka nagniataniem jest tańsza i mniej pracochłonna.

W przemyśle maszynowym do obróbki wykańczającej wewnętrznych powierzchni walcowych stosuje się nagniatanie. Technologia służy do obróbki walcowych otworów przelotowych, nieprzelotowych o wymiarach średnicy od 3 do 150 mm w takich częściach jak tuleje, korpusy, długie cylindry, bębny. Zazwyczaj jest stosowana w seryjnej produkcji pojazdów mechanicznych, urządzeń hydraulicznych, jak również maszyn włókienniczych.

Nagniatanie z roztaczaniem głębokich otworów zaleca się do tworzenia długich cylindrów hydraulicznych, urządzeń dźwigowych i budowlanych, stosowanych w przemyśle okrętowym i górniczym, jak również rur wiertniczych w geologii [23, 51].

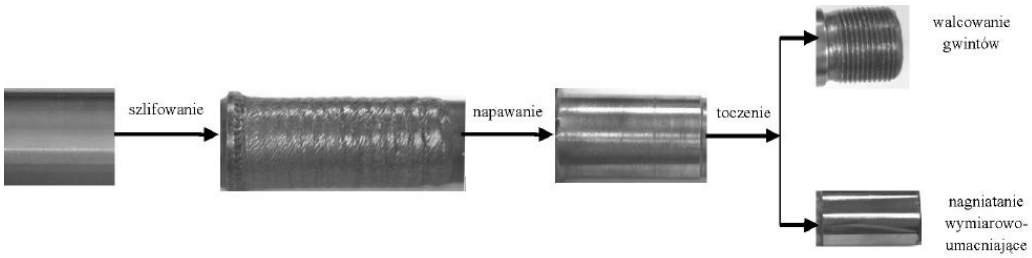
W przypadku rurociągów okrętowych zgodnie z przepisami Polskiego Rejestru Statków uwzględniono następujące połączenia rurociągów: bezpośrednio spawanych,

gwintowych, kołnierzowych, mechanicznych. Złącza kołnierzowe wykonane są z materiałów niespawalnych lub trudnospawalnych, użytkuje się je w agresywnym środowisku [21, 40, 64, 183]. Rodzaj materiału jest uwarunkowany od temperatury czynnika, a wymiar zależy od ciśnienia nominalnego instalacji. Celem zapewnienia wytrzymałości i szczelności połączeń kołnierzowych zaleca się stosowanie powierzchniowej obróbki plastycznej powierzchni płaskich.

Nagniatanie stosuje się do przylgni dużych połączeń rurowych, aby zwiększyć szczelność oraz wytrzymałość na nacisk powierzchniowy w obszarze styku albo nagniatania przylgni pierścieni lub opraw łożysk [42].

Użytkowanie nagniatania jako obróbki wykańczającej, poprzez jego prostotę i ekonomiczność umożliwia jej stosowanie w branży metalowej [44].

Proces nagniatania znajduje zastosowanie w rolnictwie jako końcowa operacja regeneracji warstwy wierzchniej części maszyn rolniczych. Regeneracja elementów maszyn rolniczych wpływa istotnie na obniżenie kosztów produkcji, przywraca pierwotny stan jakościowy i konstrukcyjny wyeksploatowanych części [154]. Na Politechnice Koszalińskiej opracowano sposoby regeneracji elementów maszyn rolniczych, użytkowanych w ciężkich warunkach. Metoda składa się z operacji szlifowania lub toczenia powierzchni zewnętrznej eksploatowanej części, napawania, toczenia lub szlifowania napawanej powierzchni, a w ostatnim etapie nagniatanie toczne warstwy wierzchniej [147].



Rys. 2.11. Sugerowana technologia odnowy części maszyn rolniczych [94]

Kształtowanie warstwy wierzchniej części maszyn rolniczych jest problematyczne, główną przyczyną jest złożony proces. Produkcja i regeneracja wyrobów rolniczych jest wieloetapowa, składa się z szlifowania, napawania, toczenia, nagniatania wymiarowo-umacniającego gładkich czopów albo walcowania gwintów na zimno.

Nagniatanie używane jest również w górnictwie jako głowice kombajnowe– węglowe maszyny górnicze [104]. Podczas urabiania mocno abrazyjnych i trudno

urabialnych skał kombajnami górniczymi pojawia się intensywne zużycie ścierno-erozyjne ostrzy i kruszenie węglików spiekanych. Trzonki noży poddawane są działaniu silnych obciążeń, często udarowych. W wyniku, których powstają pęknięcia zmęczeniowe karbu konstrukcyjnego narzędzia. Wzrost trwałości zmęczeniowej trzonków noży kombajnów został uzyskany w wyniku obróbki nagnataniem na zimno [23]. Istotną zaletą jest możliwość użycia konwencjonalnych obrabiarek, przy jednoczesnych zachowaniu niskich kosztów i zwiększeniu wytrzymałości.

Proces nagniatania znacznie poprawia jakość części maszyn przy zachowaniu niskiego kosztu. Poprawia trwałość zmęczeniową osi wałów i wagonów. Obróbka jest stosowana w przemyśle motoryzacyjnym w postaci otworów na tłoki, korbowody, części przekładni i układu hamulcowego. Metoda umożliwia wytwarzanie trwalszych powierzchni uszczelniających, zmniejsza tarcie i poprawia wygląd wizualny.

3. Charakterystyka procesów kształtowania powierzchni

W obecnych czasach bardzo dużo uwagi poświęca się wymaganiom stawianym produktom również pod względem technik ich wytwarzania. Istotny problem stanowią wytrzymałość na obciążenia mechaniczne, dokładność wymiaru i odporność na korozję. O niezawodności i trwałości decyduje warstwa wierzchnia. Na jej stan mają wpływ: nacisk jednostkowy, temperatura odkształceń metalu, prędkości odkształceń, adhezja powierzchni trących, właściwości fizykochemiczne [119, 148]. W wyniku oddziaływania mechanicznego pod wpływem zewnętrznego tarcia dochodzi do zmian chropowatości powierzchni, zmian naprężeń własnych, falistości, zmian struktury sieci krystalograficznej metalu, mikrotwardości, głębokości zalegania warstwy, a procesy fizykochemiczne prowadzą do adhezji i dyfuzji [141]. W przypadku obróbki na zimno uzyskujemy warstwę wierzchnią o innych parametrach chemicznych, odmiennej budowie i właściwościach. Wyjaśnienie zjawiska tarcia w sposób mechaniczno-molekularny należy rozpatrywać w szerszym zakresie nie tylko w aspekcie właściwości chemicznych i fizycznych cech metali. Można wyróżnić połączenia adhezyjne wynikające ze sczepień (bezdyfuzyjne) oraz uzyskiwane w wyniku zrostów (dyfuzyjne) [18].

Podczas zwiększania twardości narzędzi należy rozważyć elementy materiałowo-konstrukcyjne, eksploatacyjne oraz metody wytwarzania. Użycie materiałów wytrzymałościowych mocniejszych od stali narzędziowej, przy tym droższych oraz dobór odpowiednich metod obróbki, a także smarów prowadzi do zwiększenia trwałości wyrobów do obróbki plastycznej [166]. Wysoka cena oraz mała ilość pierwiastków stopowych, skutkuje stosowaniem wysokostopowych stali narzędziowych w szczególnych przypadkach, zwiększenie trwałości wyrobów jest podnoszone przez obróbkę powierzchniową. Stan warstwy wierzchniej narzędzia otrzymamy przez proces obróbki i procesy eksploatacyjne mają wpływ na trwałość narzędzia [103].

Ostateczne własności narzędzia kształtowane w procesach utlenienia, zmęczenia czy korozji ujawniają jego zdolności do niezawodności i trwałości. W tym celu istotny jest dobór właściwej obróbki powierzchniowej [29]. Na obciążenia zewnętrzne składają

się stykowe zjawisko tarcia i zużycia, obciążenia mechaniczne, czyli powierzchniowe oraz objętościowo-zmęczeniowe. Wzmocnienie powłoki powierzchniowej odpornej na zużycie powstaje na skutek m.in. azotowania, napylania plazmowego, ale nie jest dobre w cyklicznie zmiennym obciążeniu. Zwiększenie własności tribologicznych w obróbce mechanicznej otrzymujemy przez wzrost twardości warstwy wierzchniej w wyniku procesów np. nagniatania. W obróbce galwanicznej, cieplno-chemicznej, plazmie, polerowaniu obróbka taka zachodzi na skutek zmiany składu chemicznego węglikami boru, chromu, azotkami prowadząc do zwiększania odporności na zużycie cierne.

Zasadniczym celem obróbki jest wprowadzenie zmian mikrostruktury warstwy wierzchniej przy zużyciu ciernym wprowadza się azotki, węgliki w drobnej formie. W przypadku stali, aby chronić się przed zużyciem ciernym dodaje się chrom Cr, molibden Mo, wanad V, wolfram W. Istotna kwestia to odpowiednie, równomierne rozłożenie przy jednocześnie ciągliwej osnowie węglika. Istnieje wiele metod obróbki, wydłużającej odporność na zużycie cierne. Metody siarkowo-azotowanie, cyjano-nasiarczanianie charakteryzują się dużą odpornością na zacieranie, a także łatwym wchłanianiem. Często łączy się obróbkę cieplo-chemiczną z obróbką mechaniczną. Stosując dogniatanie w strukturze powstają defekty ułatwiające dyfuzję, więc zastosowanie dogniatania przez azotowanie zwiększy grubość warstw. Obróbka galwaniczna składa się z procesu: fosforowania, chromowania technicznego oraz przy użyciu szczawianów. Zaletą metody jest możliwość wyróżnienia granicy między metalami powłoki i podłoża. Warstwa uzyskana w wyniku chromowania technicznego charakteryzuję się dużą twardością od 1000 HV do 1200 HV, a także siatkę spękań, postrzeganą jako kanaliki smarowe. Inne cechy tribologiczne mają powłoki fosforanowe albo szczawianowe. Te pierwsze zbudowane są z cienkiej warstwy amorficznej, na której tworzy się krystaliczna powłoka składająca się z fosforanów żelazowych, cynkowych lub manganowych. Właściwości tej powłoki to dobra nasiąkliwość i duża porowatość, przez co możliwa jest absorpcja tłuszczów i olejów. Warstwa fosforanów jest aplikowana na obrabiany metal. Kolejnym rodzajem obróbki wykańczającej jest polerowanie chemiczne i elektropolerowanie [77, 102]. Za pomocą obróbki następuję usunięcie warstwy wierzchniej z defektami uzyskanej w wyniku obróbki skrawaniem i powstanie nowej warstwy o niższych naprężeniach własnych i większej gładkości. Warstwę cechuję niższy współczynnik tarcia, większa odporność na zużycie cierne i korozję.

Rola smarów w procesach obróbki jest ważna, przyczynia się do zniwelowania oporów tarcia, a co za tym idzie strat energii, spadek zużywania elementów pary trącej. Tym samym wydłuża się trwałość i niezawodność urządzeń. Smar jest umieszczany między powierzchniami trącymi w postaci stałej, płynnej, gazowej i mazistej. Użyteczne smary cechują dobre własności smarne, stabilność, zwilżalność powierzchni, możliwość odprowadzenia ciepła powstałego na skutek tarcia, odprowadzanie opiłków metalicznych. Wobec specjalistycznych smarów technologicznych stawiane są dodatkowe kryteria w zależności od rodzaju obróbki prowadzonej na zimno lub ciepło, są to: umiejętność rozdzielenia powierzchni trących, ochrona przed narostami, nadmiernym zużyciem, łatwe w umieszczeniu i usuwaniu z powierzchni, duża wytrzymałość na obciążenia. W procesach wyciskania, prasowania i kucia wymaga się, aby smar był wytrzymały na działanie wysokich temperatur nawet do 1100 °C, ułatwiał usuwanie wyrobu z narzędzia oraz posiadał funkcję izolatora [66].

W realizacji obróbki należy rozważyć gatunek odkształcającego materiału, szybkość tego procesu, uwzględnić naciski, konstrukcję i złożoność wyrobu oraz temperaturę, w której odkształca się metal. Można wyróżnić wiele rodzajów smarów w zależności od kryteriów: pochodzenia (mineralne, organiczne), przeznaczenia i konsystencji (smary stałe, smary płynne, smary maziste, smary plastyczne oraz emulsyjne). Ważną cechą smarów w obróbce plastycznej jest powstanie granicznych warstw, które nie niszczeją pod wpływem dużych nacisków w przypadku cieczy z własnościami adsorpcyjnymi [66].

Wyróżnia się adsorpcję (sorpcja fizyczna) i chemisorpcję (sorpcja chemiczna). Na skutek absorpcji pomiędzy powierzchnią ciała stałego a cząsteczkami cieczy pojawiają się siły van der Waalsa. Podczas sorpcji chemicznej pojawiają się większe siły wiązań. Wytrzymałość warstwy smarującej jest zależna od rodzaju adsorbujących cząstek, fali elektrodynamicznej i oddziaływania pola elektrostatycznego. Wpływ oddziaływania sił pola metalu zaburza rozmieszczenie ładunków smaru oraz powstanie indukowanych momentów dipolowych. Największe oddziaływanie tworzy się, kiedy cząsteczka posiada trwały moment dipolowy. Najpowszechniej stosowane są oleje mineralne jednak nie mają one trwałego momentu dipolowego, co utrudnia tworzenie mocnych warstw granicznych. Aby wzmocnić ich działanie wprowadza się dodatki o dużym momencie dipolowym. Dodatki to związki siarkowe, chlorowe, tlenowe i fosforowe [77, 99, 102, 140].

Najwcześniejszą grupę dodatków wzmacniającą smarność stanowią tłuszcze, czyli oleśnian ołowiu i stearynian ołowiu. Grupa olejów siarkowych to: siarkowy olej rzepakowy, konopny, palmowy i siarkowane polimery. Dla różnych zjawisk i parametrów obróbki plastycznej pojawiają się różne rodzaje tarcia od technicznie suchego do tarcia płynnego [146]. Rodzaje tarcia zależą w znacznym stopniu od skuteczności użytego smaru, a ich własności od nacisków jednostkowych, temperatury w strefie kontaktu (uwzględniając ten parametr ważna jest lepkość smaru) i względnej prędkości odkształcającego materiału. Najczęściej spotykanymi rodzajami smarów są smary proszkowe (talk, grafit, stearyniany), powłoki metaliczne, oleje lub na bazie wody, szkieł, a także tworzywa sztuczne o różnym składzie [66].

Wyróżnia się wiele kryteriów przedziału wskaźników smarów: własności fizyczne (lepkość, gęstość, temperatura krzepnięcia, mętnienia, zapłonu i palenia, zwilżalność); własności chemiczne (odczyn, zawartość wody, mydła, siarki, liczba kwasowa); cechy technologiczne (odporność na zacieranie, własności przeciwtarciowe i zużyciowe, korozyjne, izolacyjne) oraz własności toksyczne. Najważniejszym zadaniem smaru technologicznego jest zdolność do minimalizowania oporów tarcia w strefie styku odkształcanego metalu z narzędziem. Efektywność smarowania pokazuje relacja między oporami tarcia a wartością współczynnika, a także jakością wyrobu [78, 92, 102].

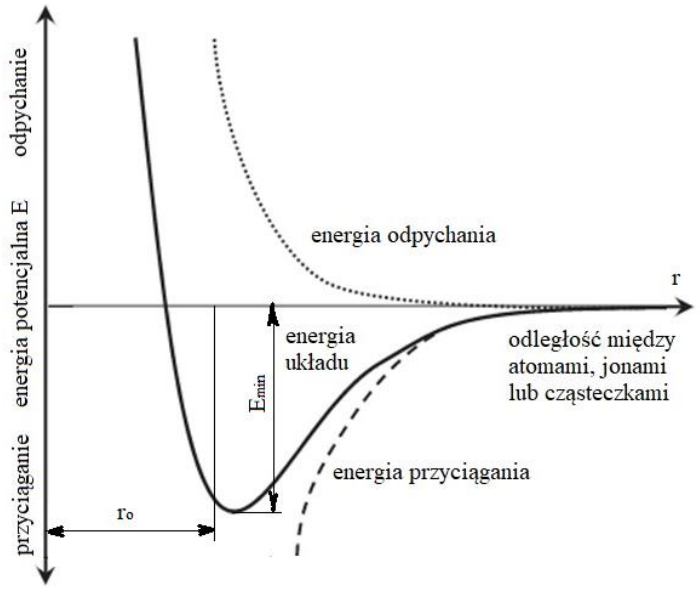
Pomiar własności technologicznych smarów odbywa się przez badania tribologiczne (na aparatach Timken'a, czterokulowym, ukazując prędkość, naciski jednostkowe); badanie własności smarów (stan naprężeń, odkształceń, zakres temperatur); oraz badania eksploatacyjne smarów. Najpowszechniej stosowaną maszyną do badań zużycia oleju jest aparat czterokulkowy. Maszyna dokonuje pomiaru wytrzymałości filmu olejowego pomiędzy trącymi elementami tocznymi. Test wykonuje się za pomocą czterech kul ze stali o średnicy 50,80 mm. W misce olejowej umieszcza się trzy kule, a ostatnią mocuje w uchwycie, jest ona dociskana do nich siłą normalną. Czwarta kula jest przez silnik i przekładnię wprawiana w ruch obrotowy [197].

Kryterium oceny cech tribologicznych smarów dzieli się następująco: czas do powstania zatarcia; szerokość śladów na poruszającej kuli w ciągu 1 min. oraz nacisk do czasu wystąpienia zatarcia wywołanego zanikiem filmu smaru. Wzrost momentu

obrotowego i głośniejszy dźwięk są efektem zjawiska zatarcia. Współczynnik tarcia można wyznaczyć z badań momentu tarcia. Wybierając smar technologiczny należy rozważyć proces, jaki chcemy przeprowadzić, jego parametry, a także gatunek materiału. Dla różnego rodzaju obróbki pojawiają się różne naciski w strefie kontaktu powierzchni z narzędziem. Wymagania dla smarów przy obciążeniach statycznych są odmienne niż dla obciążeń dynamicznych [8, 77, 81, 159].

Badania stanowią istotną rolę w ocenie warunków eksploatacyjnych maszyny. Pozwalają na dokładną analizę procesów tarcia i zużycia. Zwykle w badaniach modeluję się rzeczywiste warunki pracy tj.: geometria styku, materiał, obciążenia, naciski jednostkowe, prędkość ruchu, temperatura [62].

W przypadku badań styku statycznego i przemieszczeń materiałów istotne jest zbadanie stanu warstwy wierzchniej. Na powierzchnię ciał stałych składają się atomy, jony, cząsteczki, które nie pozostają w równowadze wewnątrz ciała jak i zewnętrznej stronie oddziaływania. Nad powierzchnią materiału powstają pola sił krótkozakresowych (jonowe, kowalencyjne, metaliczne) odpowiadające wiązaniu ciała, a także pola długozakresowe – sił van der Waalsa (rysunek 3.1.). Rola sił krótkozakresowych jest widoczna przez zbliżenie powierzchni czystych ciał w odległości średnic atomowych 0,1nm, a siły międzycząsteczkowe oddziałują do 1 nm. Pomiędzy atomami, jonami albo cząsteczkami działają siły odpychania i przyciągania.

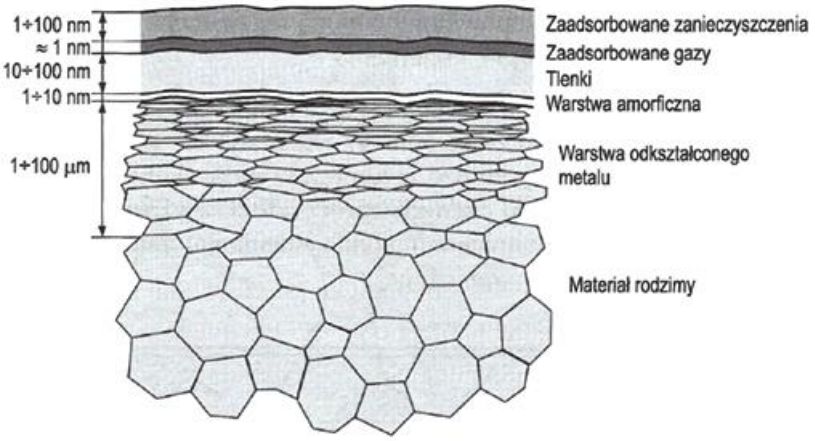


Rys. 3.1. Wykres zmiany energii potencjalnej w funkcji odległości pomiędzy atomami, jonami albo cząsteczkami [102]

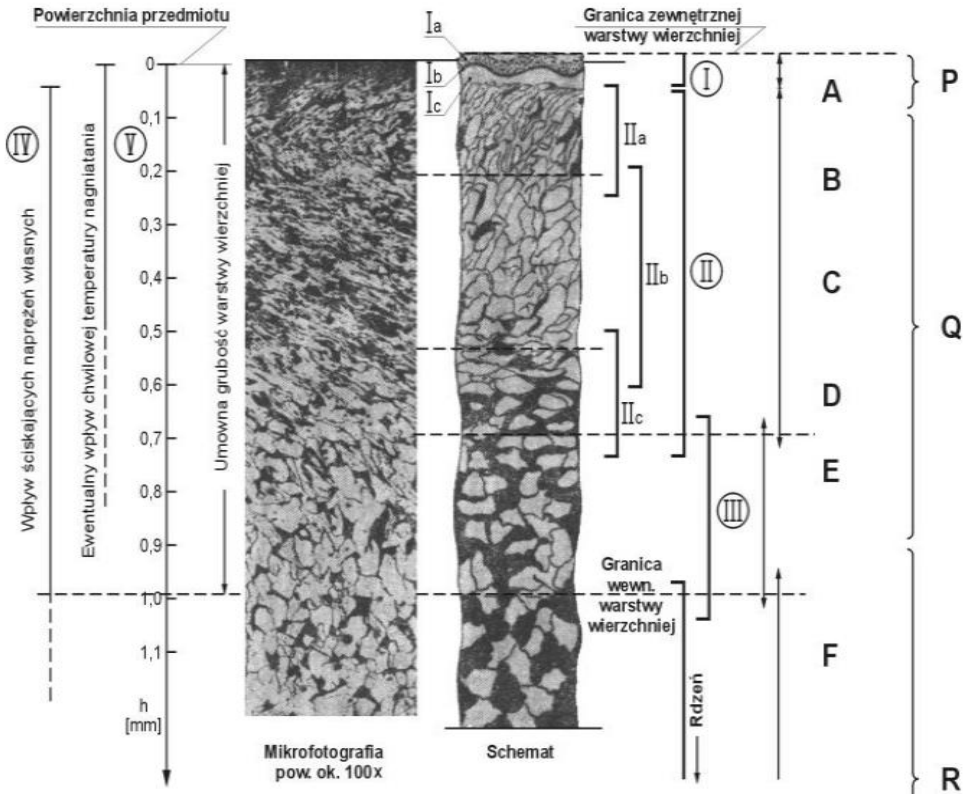
3.1. Wpływ procesów nagniatania na strukturę warstwy wierzchniej

Powierzchnia cechuję się kształtem, chropowatością, a także innymi własnościami materiału objętościowego. Wytwarzanie wyrobu determinuje stan powierzchni, a cechy użytkowe własności powierzchni. Powierzchnia materiału jest narażona na działanie środowiska, ponieważ pozostaje w jej bezpośrednim kontakcie. Styka się z narzędziami w trakcie procesu wytwarzania, a podczas użytkowania z powierzchnią współpracujących narzędzi [9, 53, 156, 170]. Własności materiału oraz kształt geometryczny warstwy wierzchniej wpływają na tarcie, zużycie, korozję, zmęczenie, jak również przewodność cieplną i elektryczną [1, 27, 32, 143, 176].

Warstwa wierzchnia powierzchni jest najczęściej odkształcana plastycznie, a następnie umocniona odkształceniowo w większym stopniu od jego rdzenia. Własności oraz grubość warstwy powierzchni umocnionej odkształceniowo zależy od sposobu wytwarzania, a także tarcia pomiędzy narzędziem i obrabianym materiałem [52, 145]. Dla przykładu proces skrawania tępym i zużytym narzędziem skutkuje względnie grubą utwardzoną warstwą wierzchnią ze znacznymi naprężeniami własnymi [19, 135]. Przeprowadzenie na materiale nieszlachetnym obróbki cieplnej podczas utleniania skutkuje powstaniem warstwy tlenków na warstwie umocnionej odkształceniowo. Tlenki wywierają wpływ na procesy tarcia, zużycia i smarowania, są twardsze i kruchsze od podłoża metalu. Na powierzchni warstwy tlenków w atmosferze powietrza występują zaadsorbowane gazy oraz wilgoć. Do rzadkości nie należą zanieczyszczenia powierzchni tj. kurz, brud, smar. Struktura warstwy wierzchniej metali została przedstawiona na rysunku 3.2.



Rys. 3.2. Schemat struktury warstwy wierzchniej metali [9, 19]



Rys. 3.3. Schemat struktury warstwy wierzchniej po nagniataniu z podziałami na strefy: I– rozdrobnienia, II– odkształceń plastycznych, III– odkształceń sprężystych, IV– wynikowa ściskających naprężeń własnych, V– efektów cieplnych [29, 129]

Istnieje wiele czynników powstawania wad powierzchniowych wyrobów m.in. nieodpowiednia metoda wytwarzania, defekty powierzchniowe materiału, niewłaściwe parametry procesu wytwarzania.

Zaburzenia warstwy wierzchniej wyrobów wpływają na spadek wytrzymałości zmęczeniowej, a także odporności na korozję. Do tego typu wad zalicza się:

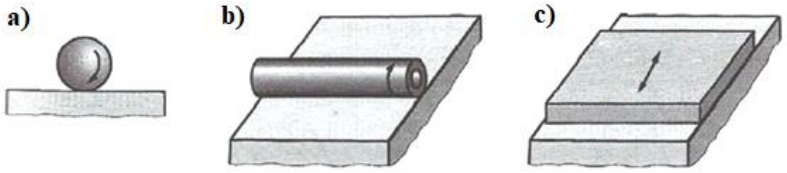
– kratery: płytkie zagłębienia;
– pęknięcia: wewnętrzne i zewnętrzne;
– wtrącenia: cząstki pierwiastka niemetalicznego i związku metalu;
– strefa wpływu ciepła, podczas wytwarzania element materiału nagrzewający się niżej od temperatury topnienia;
– spadek granic ziarn wywołanych korozją lub ciekłym metalem;
– fałdy, zakucia, zawalcowania, wady powierzchni powstałe w trakcie kształtowania elementów obróbką plastyczną;
– naprężenia własne (ściskające lub rozciągające), wywołane niejednorodnym rozkładem temperatury oraz odkształcenia;

– odkształcenia plastyczne, wywołane dużymi naprężeniami realizowanymi przez tarcie, geometrią narzędzia, procesy obróbki zużytymi narzędziami oraz metodą wytwarzania;
– zmiany metalurgiczne, mikrostruktury utworzone na skutek zmian temperatury materiału podczas wytwarzania, np. przemiany fazowe, rekrystalizacja, topnienie, krzepnięcie.

Zaburzenia powierzchni produktów powstają na skutek defektu materiału, nieprawidłowej metodzie wytwarzania lub nieodpowiednim warunkom procesu wytwarzania [9, 27, 72].

Głównym zadaniem tribologii jest spadek tarcia i zużycia, jednak wielokrotnie obserwowany jest brak powiązania między zużyciem a tarciem.

Biorąc pod uwagę geometrię styku ciernego wyodrębnia się styki: liniowe, powierzchniowe i punktowe (rysunek 3.4.). Styk rzeczywisty z uwagi na odkształcenie materiału obejmuje określony obszar powierzchni. Styki liniowe i punktowe należą do grupy styków zlokalizowanych w elementach maszyn i urządzeń (łożyskach, mechanizmach krzywkowych, prowadnicach tocznych, przekładniach zębatych). W stykach skoncentrowanych o dużej wielkości naprężenia i powiązane odkształcenia są przyczyną tarcia tocznego i pojawienia się uszkodzeń warstwy wierzchniej, najczęściej zmęczeniowych [9, 32, 52, 135, 176].



Rys. 3.4. Schemat rodzajów styków ciernych odnoszący się do geometrii: a) powierzchniowy, b) liniowy, c) punktowy [9]

W procesie suchego tarcia ślizgowego przyczyną zużywania i oporów materiału jest oddziaływanie pomiędzy nierównościami współpracujących powierzchni, doprowadzające do odkształceń sprężystych, czasem także plastycznych, odrywanie powstałych połączeń adhezyjnych pomiędzy nierównościami, również mikroskrawanie i bruzdowanie. Styk cierny tworzą oddziaływania pomiędzy powierzchniami materiałów.

Kiedy naprężenia na wierzchołkach stykających wypukłości są mniejsze niż naprężenia, gdy materiał odkształca się plastycznie, tego typu odkształcenie jest

wyłącznie sprężyste. W styku ciernym względne przemieszczenie sprawia, że wypukłości powstałe po odkształceniu sprężystym i przekroczeniu sił adhezji w stykach powracają do stanu pierwotnego. Kilkukrotne odkształcenia sprężyste wypukłości w trakcie oddziaływania z wypukłościami przeciw powierzchni, może skutkować pęknięciami zmęczeniowymi, jak i odpryskiwaniem wypukłości poprzez zmęczenia materiału [32, 176].

Gdy stykające się powierzchnie materiału mają podobną twardość, cechują się plastycznością, a naprężenia na wierzchołkach stykających wypukłości przewyższają naprężenia płynięcia plastycznego. Siły adhezji między wypukłościami są niewielkie przy względnym przemieszczeniu powierzchni, prowadzą do odkształcenia plastycznego stykających wypukłości. Kilkukrotne odkształcenia plastyczne wypukłości powierzchni doprowadzają do wygładzenia materiału, a z ich powierzchni do eliminacji zanieczyszczeń oraz tlenków. Skutkuję to stykiem czystych powierzchni i oddziaływaniem wiązań między atomami, a co za tym idzie formowaniem zrostów i wyrywaniem części wypukłości [9].

Gdy jedna z powierzchni tworzących styk jest wyraźnie twardsza niż druga i pojawiają się na nim nierówności w formie wypukłości albo twardych cząstek, skutkujące formowaniem się bruzd albo mikroskrawaniem w miękkim materiale. Jeśli miękki materiał ma chropowatą powierzchnię, a twardy gładką, to wywoła odkształcenie plastyczne wierzchołków chropowatości natomiast sczepienia prowadzą do zużycia ściernego i adhezyjnego [9, 53, 98, 100].

Powierzchnia wyrobu jest wystawiona na wielokrotne obciążenia w styku ciernym, dochodzi do zmęczenia [9, 32, 52, 176]. W licznych stykach ciernych zużycie jest małe, jednak jest przeważające w styku skoncentrowanym. W zależności od warstwy wierzchniej i rodzaju występującego środowiska w stykach ciernych występują oddziaływanie mechaniczne i chemiczne (utlenianie).

3.2. Fizyczny model nagniatania ślizgowego

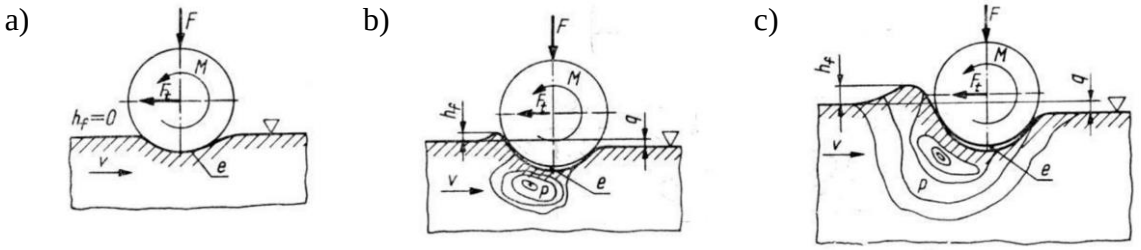
Efektywną jakość obrabianych wyrobów uzyskuje się za pomocą parametrów technologicznych przez opracowanie modelu procesu. Modelowanie numeryczne jest oparte na metodzie elementów skończonych lub zastosowaniu sieci neuronowych. Po obróbce plastycznej rozkład naprężeń własnych jest powiązany ze stanem energetycznym. Proces nagniatania ślizgowego powoduje odkształcenia plastyczne

i sprężyste, które podwyższają stan energetyczny powierzchniowej warstwy wierzchniej.

Modelując oddziaływanie pomiędzy materiałem obrabianym, a nagniatającym narzędziem korzysta się z teorii dla ciał sprężysto–plastycznych, a także sztywno–plastycznych (równanie Hertza, Flamanta i Bussinesqa). Na rysunku 3.5 zaprezentowano schemat modelu odkształceń przy nagniataniu. Warunek plastyczności Hubera Misesa–Hencky'go ma zastosowanie przy modelowaniu procesów odkształceń plastycznych [44, 90].

Podczas nagniatania w strefie warstwy wierzchniej wyrobu istnieje możliwość pojawienia się odkształceń sprężystych, sprężysto–plastycznych, a dla określonej wartości sił docisku F przed narzędziem nagniatającym pojawia się wybrzuszenie materiału, które przeciwstawia się ruchowi tocznemu narzędzia [44].

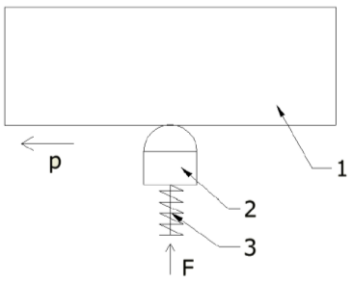
Nagniatanie toczne realizowane jest poprzez toczenie po obiekcie odkształconym przez nagniatak o dużej sztywności.



Rys. 3.5. Schemat modelu odkształceń nagniatania tocznego: a) odkształcenia sprężyste, b) odkształcenia sprężysto–plastyczne, c) odkształcenia plastyczne: F– siła nagniatania, v– prędkość nagniatania, h_f– wysokość fali materiału, e– strefa sprężysta, p_l – strefa plastyczna, q– naddatek na nagniatanie [130]

W pierwotnej fazie zjawisk deformacji pojawia się odkształcenie sprężyste materiału. Następnie jest przekraczana granica sprężystości obrabianego materiału. Pod powierzchnią warstwy powierzchniowej formuję się strefa uplastyczniona. Wzrost sił docisku w obszarze plastycznym otoczonej strefą sprężystą skutkuje jej wzrostem. Gdy strefa sprężysta zanika, strefa plastyczna rozszerza się pod powierzchnią i formuję falę materiału przed elementem nagniatającym [44, 86, 130].

Istnieje wiele metod kształtowania powierzchni, jedną z nich jest metoda nagniatania ślizgowego. Charakterystyką nagniatania ślizgowego jest poślizg między powierzchnią obrabianą i elementem nagniatającym.



Rys. 3.6. Schemat nagniatania ślizgowego: F– siła dociskająca, p– posuw nagniatania, 1–przedmiot obrabiany, 2– element nagniatający, 3–sprężyna dociskająca [130]

Gładki i twardy element nagniatający dociskany do obrabianej powierzchni przemieszcza się po odkształconym obiekcie, wywołuje tarcie ślizgowe i odkształcenia plastyczne nierówności w warstwie wierzchniej i zmianę kierunku struktury obrabianego wyrobu. Na skutek procesów fizycznych występujących w obszarze obróbki pojawi się trwałe odkształcenie plastyczne, które następnie prowadzi do wzmocnienia materiału.

Nagniatanie ślizgowe dzieli się na:

– przetłaczanie ślizgowe,

– wygładzanie ślizgowe.

Przetłaczanie ślizgowe stosowane jest przede wszystkim do dokładnej obróbki otworów w wyrobach z miękkich i średniej twardości materiałów. Przetłaczanie dzieli się na przeciąganie i przepychanie nagniatające [90, 130].

Wygładzanie ślizgowe znajduje zastosowanie do obróbki otworów, wałków, powierzchni kształtowych i płaszczyzn o wysokiej twardości [180]. Do tego rodzaju obróbki nagniataki są twarde i cechują się niskim współczynnikiem tarcia [90]. Wygładzanie jest stosowane jako umacniająca i gładkościowa obróbka nagniatająca dla hartowanych i trudnoobrabialnych materiałów.

Wybór i rozwój zastosowania modelowania obróbki trudnoobrabialnych materiałów jest istotne dla ustalenia możliwego rozkładu pola odkształceń, naprężeń i temperatur. Prawidłowe modelowanie zmniejsza koszt projektowania i wytwarzania wyrobu [180].

3.3. Wzrost wytrzymałości warstwy wierzchniej

Hipoteza dyslokacji wyjaśnia zjawisko umocnienia metali w trakcie deformacji [77, 157, 168]. Zaburzenie dyslokacji kryształu wynika z otaczających naprężeń wewnętrznych. Określone pola naprężeń nakładają się na siebie i fragmentarycznie

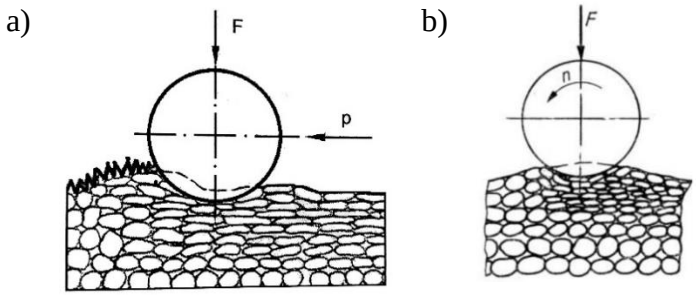
znoszą. Zakres granicy plastyczności jest uwarunkowany od naprężeń wewnętrznych, które stawiają opór dla przemieszczenia dyslokacji. W przypadku płynięcia plastycznego wzrasta ilość dyslokacji i jest uwięziona wewnątrz kryształów na skutek oddziaływania sprężystego z dyslokacjami, a także krawędziami kryształów. Natomiast zatrzymane dyslokacje powodują powstanie naprężeń wewnętrznych, które podnoszą granicę plastyczności do wartości ekstremalnej. Metale to materiały polikrystaliczne, traktowane jako ośrodek ciągły, dla którego przy charakterystyce procesów fizycznych należy uwzględnić występowanie granic kryształów, orientacją płynięcia, defektami, które dodatkowo wywołują naprężenia wewnętrzne (szczeliny, jamy, itp.) [77].

Wpływ na zwiększenie twardości w warstwie wierzchniej obrabianych przedmiotów ma struktura powierzchni nagniatanego przedmiotu. Największy stopień względnego utwardzenia w przedziale od 50% do 80% uzyskuje się dla struktury ferrytycznych i martenzytycznych, natomiast najniższy stopień utwardzenia od 10% do 20% dla struktury sorbitycznych i perlityczno-sorbitycznych [77].

Grubość warstwy wierzchniej określa się prostopadle do kierunku powierzchni przedmiotu, a pomiar jest związany z jej zewnętrzną oraz wewnętrzną granicą. Zewnętrzna granica jest powierzchnią oddzieloną warstwą wierzchnią od ośrodka oraz formuje zewnętrzny kształt części maszyny natomiast wewnętrzna granica, która oddziela rdzeń materiału od warstwy wierzchniej. Granicę wewnętrzną stanowi głębokość zalegania kilku parametrów warstwy wierzchniej, wynosząca kilka milimetrów [44, 77, 90, 173].

Nacisk F nagniatającego elementu działający na obrabiany element skutkuje formowaniem w strefie styku lokalnego odkształcenia sprężystego i plastycznego. Wysoka twardość obrabianego elementu wpływa na pojawienie odkształceń przede wszystkim w górnej warstwie wyrobu [13].

Deformacja zmienia formę i orientację krystalograficzną ziaren. Dodatkowo ziarna są spłaszczane, wydłużane i kruszone, formując teksturę zgniotu. Do określonej głębokości ma miejsce deformacja plastyczna, zależna od właściwości nagniatania i plastycznych parametrów materiału. Na rysunku 3.7 zaprezentowano schemat modelu odkształceń plastycznych w warstwie wierzchniej nagniatanego kulką [44, 90, 134].



Rys. 3.7. Schemat modelu odkształceń plastycznych występujących w warstwie wierzchniej wałka w trakcie nagniatania kulką w przekroju: a) wzdłużnym, b) poprzecznym : F– siła nagniatania, n– prędkość obrotowa przedmiotu obrabianego, p – posuw nagniatania [44, 130]

Po procesie nagniatania odnotowano wzrost twardości dla stali niestopowych oraz stopowych. Wartość przyrostu twardości jest zależna od składu zawartości węgla oraz składników stopionych w stali. Wzrost zawartości węgla następuję proporcjonalnie do zmniejszenia przyrostu twardości [13, 155]. Wzrost mikroodkształceń skutkuje umocnieniem powierzchni, jednocześnie zmianą twardości. Wyznacznikiem utwardzenia jest różnica mikrotwardości przed i po zjawisku odkształcenia powstałego przez odkształcenie plastyczne [29, 130].

Po nagniataniu warstwa wierzchnia umacnia się na skutek odkształcenia plastycznego na zimno. Wpływa na wzrost odporności na zużycie ścierne i wytrzymałość zmęczeniową. Umocnienie warstwy wierzchniej klasyfikuję głębokość zgniotu i stopień zgniotu. Rodzaj i siła docisku mają znaczący wpływ na parametry obróbki. Dla docisku sprężystego oznacza wartość sił docisku narzędzia, natomiast w docisku sztywnym dobiera się wartość zagłębienia narzędzia w obrabianym przedmiocie [90, 155]. W wyniku zjawisk technologicznych lub eksploatacyjnych wielkość zmian własności chemicznych lub fizycznych na różnych obszarach warstwy wierzchniej są nierównomierne. Głównymi parametrami, które określają siły docisku i wielkość zagłębienia narzędzia są: zalecana głębokość umocnienia przedmiotu oraz właściwości wytrzymałościowe.

Podstawowymi procesami nagniatania powierzchniowego jest nagniatanie umacniające oraz gładkościowe. Nagniatanie umacniające jest stosowane w celu zwiększenia trwałości zmęczeniowej, natomiast w nagniataniu gładkościowym istotne jest uzyskanie wysokiej gładkości powierzchni. Ważniejsze od parametrów kinematycznych (prędkość, liczba przejść) jest określenie parametrów siłowych (siła

docisku, krzywizna nagniatającego elementu). W przypadku nagniatania gładkościowego ważniejszą rolę pełnią parametry kinematyczne [44, 77, 90]. Jednak dla otrzymania odpowiedniej głębokości umocnionej warstwy należy stosować prawidłowe parametry siłowe. Po określeniu głębokości wyliczamy siłę docisku, przy ustalonej krzywiźnie elementu nagniatającego. Zakładając, że odpowiednia głębokość warstwy umocnionej jest równa w przybliżeniu δ=0,05D, to parametry siłowe muszą zostać wyliczone dla każdego przekroju nagniatanego elementu.

Właściwości użytkowe materiałów nagniatanych zależą od głębokości zalegania odkształceń plastycznych w warstwie wierzchniej. Głębokość zalegania tego rodzaju odkształceń określa położenie strefy warstwy wierzchniej w odniesieniu do powierzchni obrobionej, w której pojawią się trwale odkształcone ziarna strukturalne oraz dyslokacje sieci krystalograficznej w następstwie obciążenia zewnętrznego poprzez oddziaływanie elementu nagniatającego.

Głębokość zalegania obszaru uplastycznionego h_δ zależy od najwyższego naprężenia stycznego. Naprężenia zredukowane uzyskują nieskończenie dużą wartość na powierzchni wyrobu, gdzie siły nagniatania działają wzdłuż jej kierunku. Natomiast maleją w miarę zwiększania odległości od powierzchni obrabianego przedmiotu. Zgodnie z warunkami plastyczności wartość głębokości zalegania odkształceń plastycznych h_δ określa graniczny stan naprężeń, który wyznacza się zgodnie z rozwiązaniami Treski [144]:

$$\sigma_{red} = 2\tau_{max} = R_e = \frac{F}{2\pi h_\delta^2}\left(\frac{1-2\nu}{2} + 3\right) \tag{3.1}$$

Wzory, w których uwzględniono krzywiznę narzędzia posiadają bardziej złożoną formę. Równanie ogólne bez uwzględnionej krzywizny narzędzia nagniatającego opisuję zależność między głębokością δ oraz siłą docisku:

$$\delta = c\sqrt{\frac{P}{R_e}} \tag{3.2}$$

gdzie:

c– współczynnik zależny od rodzaju rozwiązania i zaakceptowanego modelu.

Głębokość zalegania odkształceń plastycznych po procesie obróbki nagniataniem powstałych w wyniku sił nagniatających określono z zależności [144]:

$$h_\delta = C\sqrt{\frac{F}{2R_e}} \tag{3.3}$$

gdzie: C– stała określona na podstawie analizy numerycznej intensywności naprężeń: C=0,51–0,54, F– siła nagniatania, R_e– wyraźna granica plastyczności.

Metody numeryczne oparte na metodzie elementów skończonych umożliwiają analizę strefy plastycznej w tym stan naprężeń i głębokość zalegania odkształceń plastycznych w nagniatanym przedmiocie. W prawidłowym planowaniu technologii obróbki plastycznej niezbędna jest analiza głębokości zalegania odkształceń. Przydatne są zalecania i rekomendacje od producentów narzędzi nagniatających, jak również wzory matematyczne dotyczące parametrów obróbki [28, 90, 130, 144].

Tab. 3.1. Zestawienie zależności dla obliczeń głębokości zalegania odkształcenia plastycznego dla różnych rodzajów obróbki nagniataniem [44, 144]

Sposób nagniatania	Równanie	Numer równania
Krążkowanie naporowe	$h_\delta = \frac{1}{1+0{,}07R_k}\sqrt{\frac{F}{2R_e}}$	(3.4)
Kulkowanie naporowe	$h_\delta = \frac{1}{1+0{,}07r_k}\sqrt{\frac{F}{2R_e}}$	(3.5)
Rolkowanie naporowe	$h_\delta = \frac{1}{1+0{,}07R_r}\sqrt{\frac{F}{2R_e}}$	(3.6)
Nagniatające przepychanie ślizgowe	$h_\delta = (1{,}2 \div 1{,}5)w\sqrt[3]{\frac{w^2}{4}}$	(3.7)

gdzie:

F– siła nacisku elementu nagniatającego na warstwę wierzchnią elementu obrabianego [N],

h_δ– głębokość zalegania strefy uplastycznionej,

r_k– promień kulki [mm],

R_e– wyraźna granica plastyczności [MPa],

R_k– promień krążka [mm],

R_r– promień rolki [mm],

w– wcisk nagniatania [mm].

Na podstawie teorii plastyczności i sprężystości na razie nie uzyskano analitycznego rozwiązania kontaktu ciał odkształcalnych. Na podstawie badań eksperymentalnych w pracach [44, 90, 97, 130, 160] występują przybliżenia zależności do obliczenia głębokości odkształceń plastycznych.

4. Problem badawczy, teza, cel i zakres pracy

W trakcie procesu nagniatającego przepychania ślizgowego powstaje wiele złożonych zjawisk, które wpływają na kształtowanie właściwości użytkowych narzędzi. W literaturze naukowej rzadko się spotyka określenia zjawisk zachodzących podczas procesu przepychającego nagniatania ślizgowego materiałów trudnoobrabialnych przeprowadzonych metodą elementów skończonych MES. W trakcie kolejnych procesów nagniatania elementy nagniatane umacniają się, zwiększając przy tym swoją wytrzymałość.

Z danych literaturowych, jak również analizy procesów przepychającego nagniatania ślizgowego, intensywność odkształceń i naprężeń, zmiany w strukturze warstwy wierzchniej zostają otrzymane metodami obróbki i powstają poprzez usunięcie nierówności materiału współpracujących powierzchni elementu. W trakcie ruchu względnego nagniataka trzpieniowego z obrabianym elementem formują się kolejne nierówności powierzchni. Od chropowatości powierzchni zależy rozkład sił, który determinuje położenie i wielkość obszaru styku, oddziaływanie sił wewnętrznych i zewnętrznych, a także właściwości mechaniczne warstwy wierzchniej. Analiza badań modelowych wykazała, że siły zewnętrzne działają na parę tribologiczną, które wpływają na obciążenia w punkcie rzeczywistego kontaktu.

Celem niniejszej pracy doktorskiej jest określenie wpływu nagniataka trzpieniowego na odkształcenia sprężyste i plastyczne działające na właściwości warstwy wierzchniej oraz parametrów nagniatania, takich jak temperatura współpracujących elementów narzędzi, prędkość nagniatania, siły nacisku, na odporność i deformację (naprężenia średnie, intensywność naprężeń i prędkości odkształceń) materiałów sprężysto–lepko–plastycznych. Model utworzono przy użyciu programu CAD. Analiza badanego oddziaływania została przeprowadzona przy pomocy obliczeń numerycznych w programie FORGE NxT 2.1. W każdym z analizowanych modeli przyjęto dane doświadczalne oraz literaturowe.

Na podstawie analizy literatury, doświadczenia zawodowego autorki i badań własnych sformułowano hipotezę o charakterze poznawczym i utylitarnym.

Podstawę do stworzenia hipotezy stanowiły:

– wybór parametrów technologicznych nagniatającego przepychania ślizgowego,

– badania zjawisk sprężysto–plastycznych i jej wpływu na warstwę wierzchnią,
– przeprowadzenie analizy numerycznej z uwzględnieniem warunków brzegowych na bazie metody elementów skończonych (MES).

Przyczyną postawionej tezy po analizie przeglądu literatury, były niewystarczające symulacje komputerowe procesu nagniatania dla określonego zakresu badań.

Na podstawie przeglądu literaturowego związanego z opisywanym zagadnieniem założono następujące cele pracy:

– określenie wpływu obróbki plastycznej na fizyczne właściwości warstwy wierzchniej po procesie nagniatania,
– ustalenie zadanego odkształcenia na występujące odkształcenia w trakcie i po wyjściu nagniataka trzpieniowego z tulei,
– ocena wpływu parametrów nagniatającego przepychania ślizgowego na rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej wyrobów ze stali S235JR i porównanie rozkładu naprężeń w wyrobach ze stali AISI 316L oraz C45 przy określonych parametrach technologicznych.

Zasadniczym celem pracy jest zbadanie wpływu odkształceń sprężystych i plastycznych poprzez badanie:

– rozkładu temperatur,
– rozkładu prędkości odkształcenia warstw w stali,
– intensywności odkształcenia w warstwie stali,
– intensywności naprężenia,
– naprężenia średniego.

Udowodnienie przyjętych tez i założonych celów zostało przeprowadzone na podstawie badań własnych, których zakres pracy obejmował:

– charakterystykę i klasyfikację sposobów nagniatania,
– określenie parametrów technologicznych warunków nagniatającego przepychania ślizgowego,
– zaprojektowanie i przygotowanie projektu nagniataka trzpieniowego i tulei w programie CAD,
– implementację modelu do systemu MES i przeprowadzenie symulacji numerycznych procesu nagniatania,

– określenie zależności głębokości zalegania odkształceń na podstawie pól naprężeń i odkształceń,
– zbadanie właściwości wyrobu uzyskanych po procesie nagniatania,
– analizę numeryczną i eksperymentalną odkształceń po procesie nagniatającego przepychania ślizgowego, a także uzyskanych wyników.

Dodatkowo zakres pracy dotyczył badań numerycznych i stanowiskowych procesu nagniatania uzyskanych w wyniku obróbki plastycznej nagniataniem. W następnej kolejności została zaprezentowana wstępna analiza struktur warstwy wierzchniej (chropowatość, nośność, falistość powierzchni).

Na potwierdzenie postawionej tezy zrealizowano następujące badania:

– badania właściwości mechanicznych oraz struktury warstwy wierzchniej,
– opracowanie rozszerzonego modelu matematycznego naprężeń własnych procesu nagniatania materiałów trudnoobrabialnych,
– analizę procesu nagniatającego przepychania ślizgowego i granicznego stanu naprężeń na bazie rozwiązań Treski,
– obliczenia mechaniczne odkształconego materiału na podstawie prawa Nortona-Hoffa,
– ocena wyników uzyskanych w rezultacie obliczeń numerycznych.

Uwzględniając założony cel oraz na podstawie uzyskanych wcześniej wyników badań własnych sformułowano tezy pracy:

1. **Prawidłowy dobór parametrów technologicznych pozwala na wytworzenie wyrobu o zakładanym stanie mechanicznym.**
2. **Badania pozwalają na określenie głębokości zalegania naprężeń na podstawie zjawisk sprężysto-plastycznych.**
3. **Analiza zjawisk sprężysto-plastycznych po nagniataniu przepychająco ślizgowym stali niestopowej, konstrukcyjnej i austenitycznej pozwala na przeprowadzanie procesu o oczekiwanych właściwościach użytkowych wyboru i sformułowanie według własnego opracowania modelu matematycznego naprężeń własnych.**

5. Metodyka badań

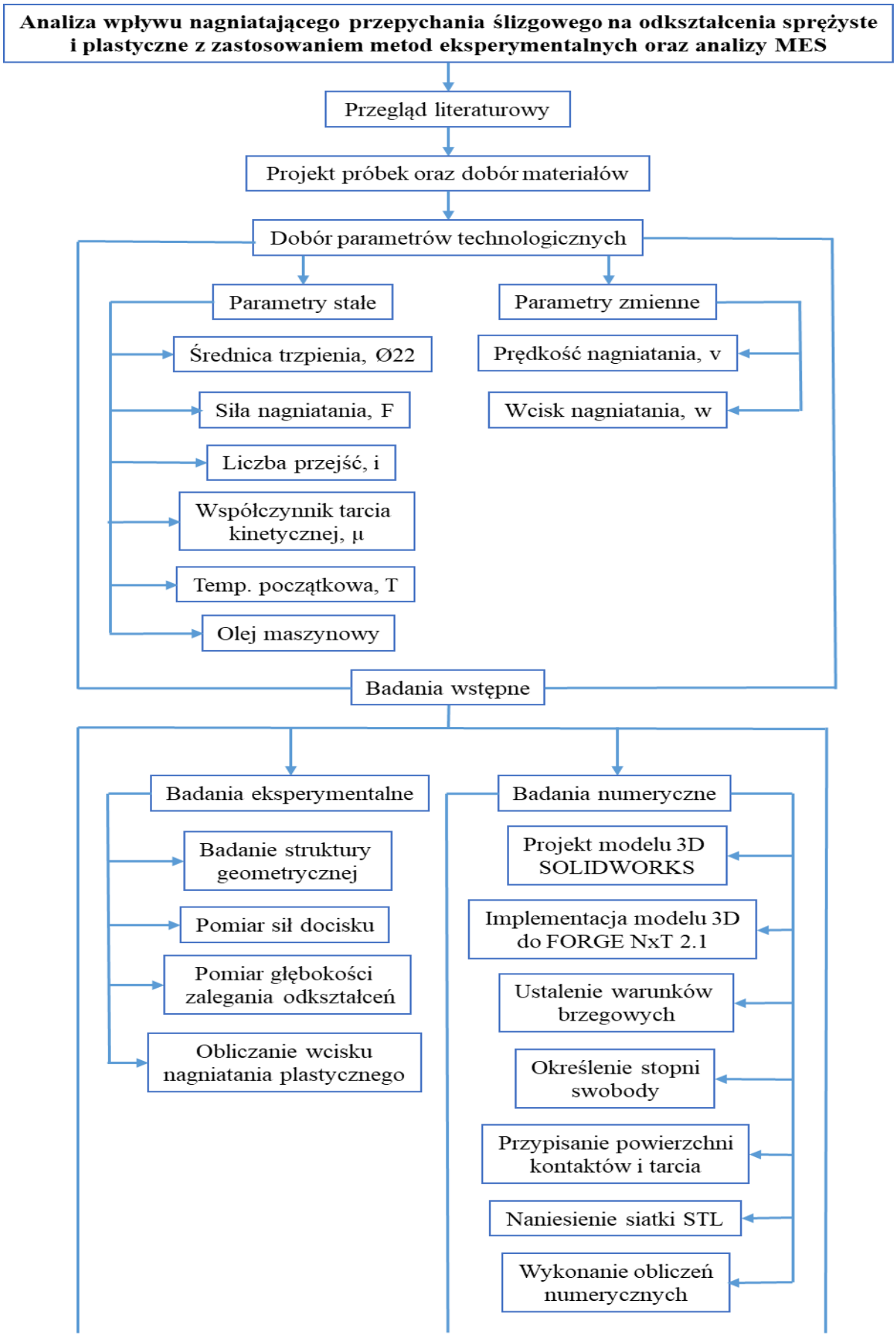
Obróbka nagniataniem jest bezwiórową metodą obróbki wykańczającej. Technologia opiera się na wykorzystaniu danego miejsca odkształcenia plastycznego metali, powstałego w warstwie wierzchniej wyrobu za przyczyną stykowego działania obrobionej powierzchni z gładkim i twardym narzędziem (m.in. w postaci krążka, kulki, wałka, trzpienia).

Układ obróbkowy nagniatania, na którego składają się narzędzie–przedmiot obrabiany ma na celu uzyskanie szczegółowego układu sił dociskających, koniecznych do formowania powierzchniowych odkształceń plastycznych [44, 90, 129, 130].

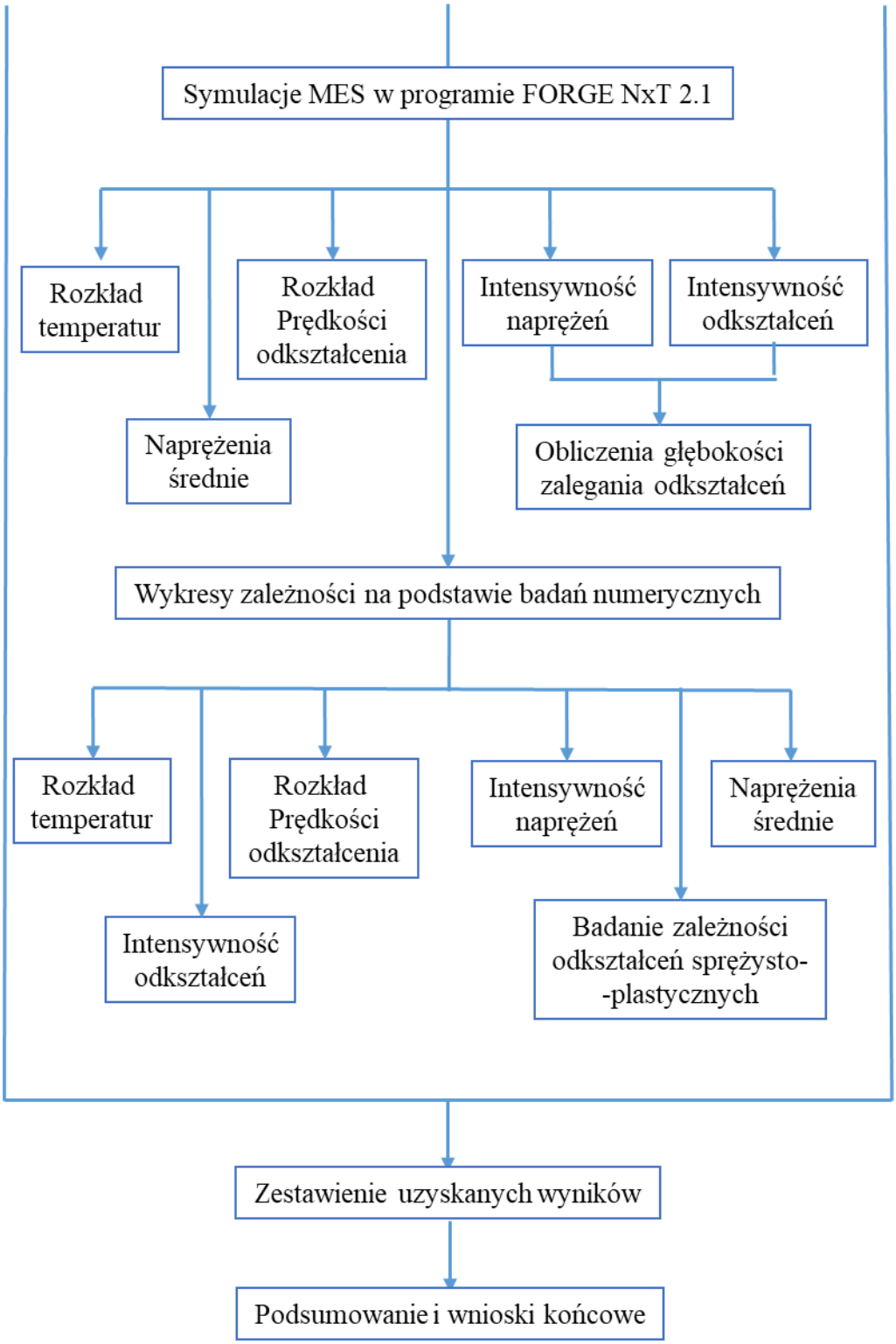
Obecny stan rozwoju nagniatania opiera się w znacznym stopniu na metodach eksperymentalnych.

5.1. Program badań

Podstawą do stworzenia graficznej koncepcji było wyjaśnienie tematu dysertacji. Schemat poniżej prezentuję rozbudowany zakres zrealizowanej pracy.



Rys. 5.1. Schemat blokowy realizowanych badań



Rys. 5.1. Schemat blokowy realizowanych badań (cd.)

5.2. Przebieg badań

Nagniatak trzpieniowy został wykonany w zakładzie produkcyjnym na tokarce sterowanej numerycznie CNC. Zakupiono półfabrykaty zgodnie z zasadami zachowania naddatków technologicznych na obróbkę. Kolejno wykonywano procesy: planowanie od czoła, toczenie zgrubne, toczenie kształtujące. Natomiast do obróbki wykańczającej możemy zaliczyć proces szlifowania. Po wykonaniu obrabianych elementów następuję kontrola jakości w celu weryfikacji wymiarów rzeczywistych z tymi, które znajdują się na rysunku wykonawczym oraz sprawdzenie chropowatości powierzchni.

Tuleje stalowe zostały wykonane w warsztacie Laboratorium Inżynierii Produkcji znajdującym się w Katedrze Materiałów Okrętowych i Technologii Remontów Uniwersytetu Morskiego na tokarce uniwersalnej CDS 500X1000. Półfabrykaty zakupiono z naddatkiem na obróbkę skrawaniem. W celu oceny obrobionej powierzchni przeprowadzono kontrolę jakości.

Rys. 5.2. Tokarka uniwersalna CDS 500X1000

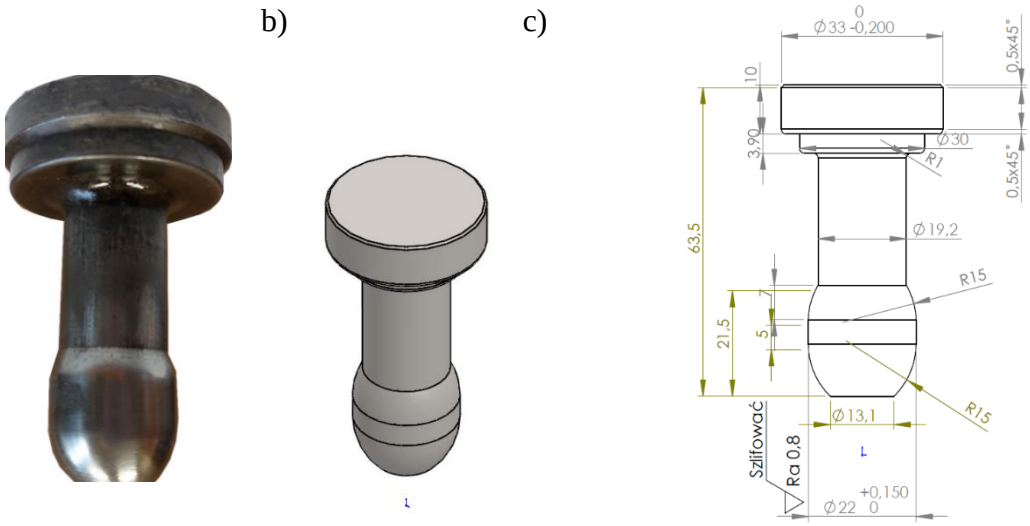
W pracy zaprezentowano wymagania stawiane w trakcie projektowania nagniataka trzpieniowego pod umocowanie wykrojników, żeby średnica zewnętrzna trzpienia mieściła się w zakresie średnic otworów matrycy uniwersalnej prasy hydraulicznej [195].

Proces technologiczny przygotowano dla nagniataka trzpieniowego o średnicy elementu nagniatającego 22 mm (NPS) oraz dla tulei o średnicy wewnętrznej 21,7 mm; 21,75 mm; 21,80 mm; 21,85 mm; 21,90 mm; 21,95 mm. Do umocowania NPS za pomocą uchwytu na prasie hydraulicznej użyto nakrętki hakowej mocującej o oznaczeniu katalogowym 6 [195]. Kształt elementu nagniatającego i tulejek

wybrano na postawie literatury [44, 130]. Projekt nagniataka trzpieniowego i nagniatanych elementów został zaprojektowany w programie SOLIDWORKS 2019.

Nagniatak trzpieniowy został wykonany ze stali 40HM (1.7225) na tokarce sterowanej numerycznie, następnie zahartowany w temperaturze ok. 850°C oraz chłodzony w oleju. Materiał wybrano ze względu na niski koszt oraz możliwość utwardzania do twardości 60 HRC. Za pomocą twardościomierza Qness Q250M zbadano jego twardość, która mieściła się w zakresie 57 HRC do 60 HRC [198]. Ponadto jest stosowany do obróbki otworów o kołowym przekroju i średnicy od kilku milimetrów. Powinna go cechować wyższa twardość od obrabianego materiału ok. 20 HRC, stąd do obróbki trudnoobrabialnych materiałów powinno się wybierać diament monokrystaliczny lub kompozyt diamentowy, oba cechują się najwyższą twardością z jednoczesną małą odpornością na uderzenia.

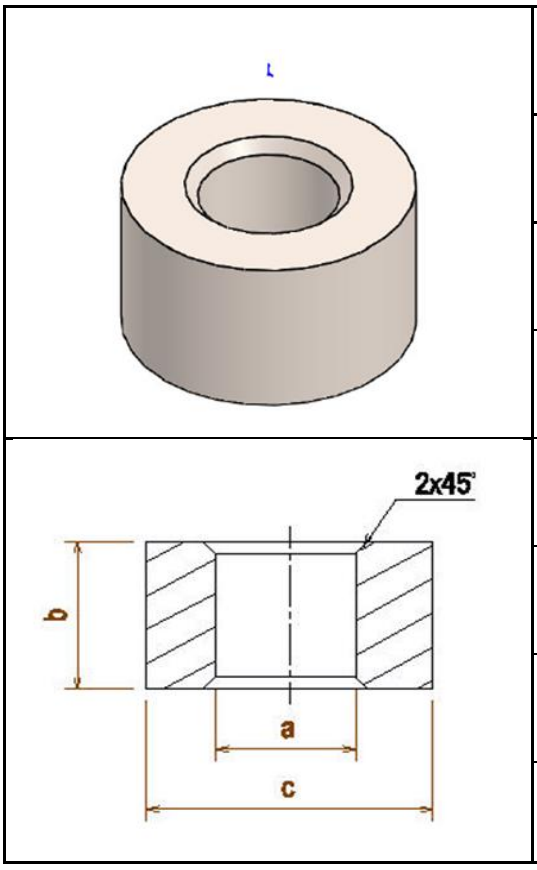
a) b) c)



Rys. 5.3. Nagniatak trzpieniowy: a) model fizyczny, b) model 3D, c) model konstrukcyjny

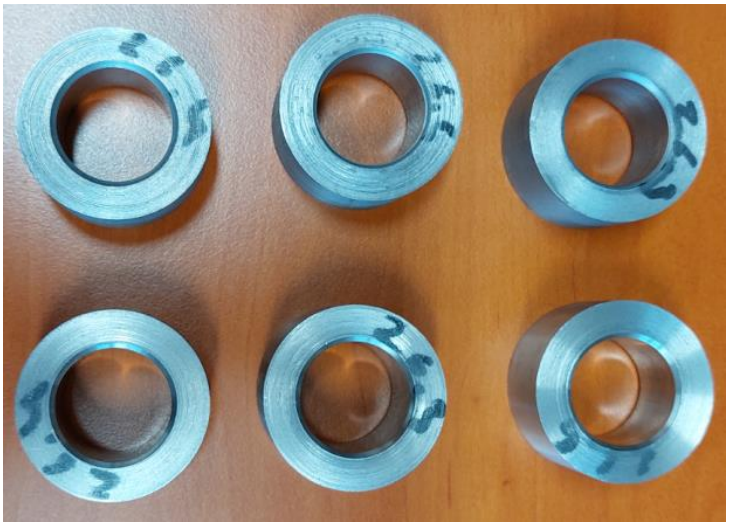
Następnie przygotowano zestaw próbek. Przy użyciu technik toczenia uzyskano 6 tulei ze stali austenitycznej 316L, 6 tulei ze stali konstrukcyjnej S235JR oraz 6 tulei ze stali niestopowej C45 (rysunek 5.4). Każda z próbek miała jednakową średnice zewnętrzną 45 mm i wysokość 25 mm. Natomiast różne średnice wewnętrzne, docelowo średnica wewnętrzna po obróbce nagniataniem powinna wynosić 22 mm. Wartość wcisków próbek wynosiła 0,05 mm; 0,1 mm; 0,15 mm; 0,2 mm; 0,25 mm; 0,3 mm. Wybór prawidłowego wcisku odgrywa kluczową rolę w optymalizacji procesu i uzyskaniu odpowiedniej powierzchni obróbkowej. Zanadto duży wcisk wywoła

powstanie fali poprzedzającej narzędzie i odkładanie materiału za nim. Natomiast zbyt mały wcisk doprowadzi do niedostatecznego wyrównania wierzchołków chropowatości.



Wymiary tulei po nagniataniu		
a [mm]	**b [mm]**	**c [mm]**
21,95	25	45
21,90		
21,85		
21,80		
21,75		
21,70		

Rys. 5.4. Próbki do nagniatającego przepychania ślizgowego: schemat konstrukcyjny wymiaru próbek; model 3D



Rys. 5.5. Model fizyczny próbek do nagniatającego przepychania ślizgowego

Wybór metody nagniatania i budowy narzędzi (sztywność i wymiary) należy uwzględniać z cechami materiału i geometrią obrabianej powierzchni.

5.2.1. Oprogramowanie

Model nagniataka trzpieniowego i tulei został wykonany za pomocą programu SOLIDWORKS 2019. Następnie modele bryłowe zostały zaimplementowane do programu FORGE NxT 2.1. w którym zostały przeprowadzone badania numeryczne.

5.2.2. Aparatura badawcza

W pracy zaprezentowano projekt nagniataka trzpieniowego do obróbki tulei z materiałów trudnoobrabialnych na prasie hydraulicznej uniwersalnej MX–340G firmy MAQSTOCK [195]. Prasa hydrauliczna znajduję się na Wydziale Mechanicznym Uniwersytetu Morskiego w Gdyni w Laboratorium Obróbki Plastycznej Katedry Materiałów Okrętowych i Technologii Remontów. Budowę prasy hydraulicznej wraz z opisem przedstawiono na rysunku 5.6.

Rys. 5.6. Prasa hydrauliczna NARGESA model MX–340G

Prasa hydrauliczna jest dodatkowo zbudowana z: silnika elektrycznego pompy, zaworu bezpieczeństwa, elektrozaworu, rewizji poziomu oleju hydraulicznego, punktu zaczepu liny.

Parametry techniczne prasy hydraulicznej MX–340G [195]:

– moc silnika: 2,2 kW;

– nacisk: 392,27 KN;

– zasilanie 3–fazowe: 380/220 V;

– zapotrzebowanie na prąd: od 7 A do 12,8 A;

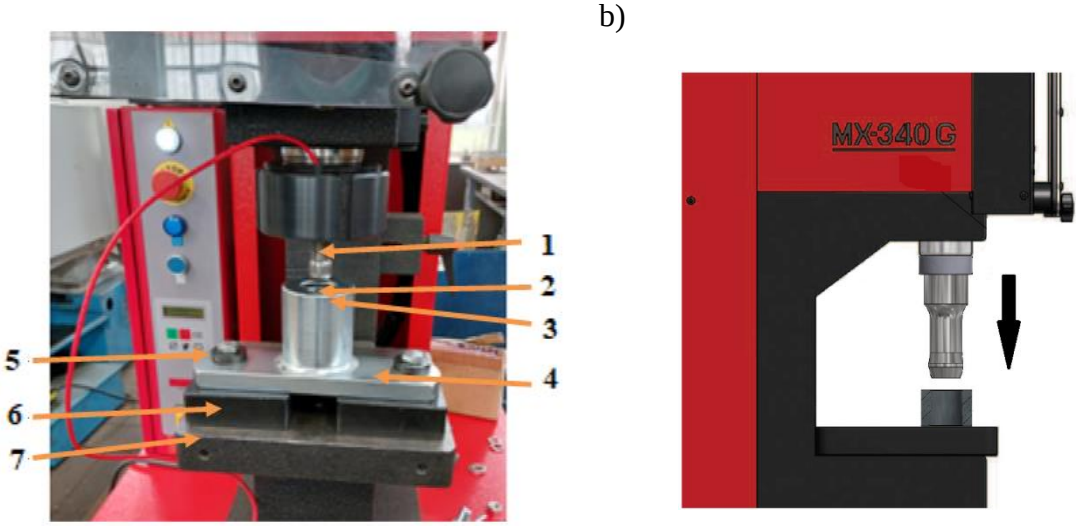
– maksymalny nacisk hydrauliczny: 200 kg;

– waga całkowita: 650 kg;

– wydajność pompy: 7,5 l/min;

– pojemność zbiornika oleju: 27 l.

a) b)



Rys. 5.7. a) Budowa prasy hydraulicznej MX-340G:1– nagniatak trzpieniowy, 2–tuleja obrabiana, 3– matryca, 4–konstrukcja unieruchamiająca próbkę przy wyjmowaniu nagniataka, 5– śruby mocujące, 6– konstrukcja unieruchamiająca próbkę w osi narzędzia, 7–podstawa mocująca matryce; b) schemat procesu nagniatającego przepychania ślizgowego

Badania wpływu określonych warunków obróbkowych przepychania ślizgowego na wyniki obróbki zrealizowano po wstępnych badaniach. Proces umożliwia obróbkę otworów bez prostoliniowości. Badania zostały przeprowadzone w celu zbadania wcisku i wpływu nagniatania na zmianę średnic wewnętrznych różnych rodzajów stali i chropowatości.

Przyjęto następujące wartości:

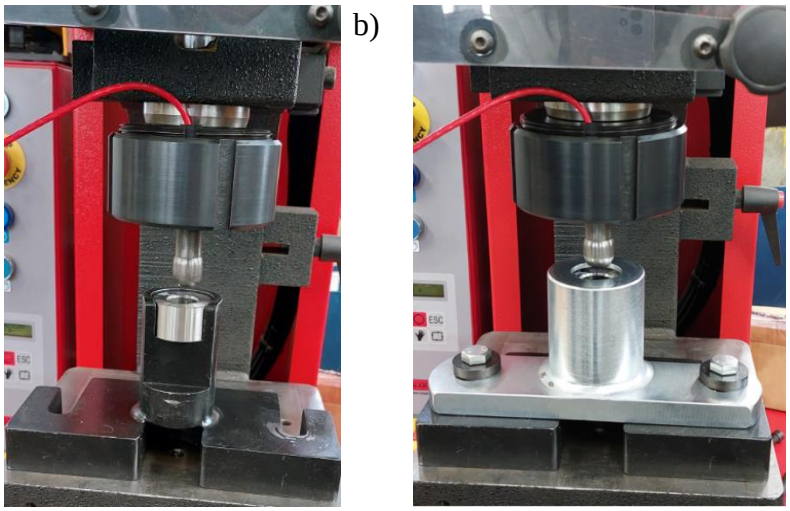
a) parametry stałe:

– nagniatak trzpieniowy ze stali 40HM;
– średnica nagniataka trzpieniowego Ø22 mm;
– próbki w kształcie walca, Ø45 x 25 mm;
– siła nagniatania 40t (392,27kN);
– liczba przejść i=2;
–współczynnik tarcia kinetycznego μ=0,1;
– współczynnik wymiany ciepła pomiędzy materiałem a narzędziem 3000 [W/ K•mm^2];
– współczynnik wymiany ciepła pomiędzy materiałem a powietrzem 100 [W/ K•mm^2];
– temperatura początkowa: T= 25°C;
–olej maszynowy VECO Megol 32 [204];
b) parametry zmienne:
– próbki materiału: stal konstrukcyjna S235JR, stal austenityczna AISI 316L, stal niestopowa C45;
– prędkość nagniatania: v= 2÷6 mm/s;
– wcisk: 0,05mm; 0,1mm; 0,15 mm; 0,2mm; 0,25mm; 0,3mm.

Po obróbce zmierzono chropowatość powierzchni za pomocą profilometru HOMMELWERKE. Na podstawie analizy określono wpływ szybkości nagniatania na chropowatość powierzchni. Podczas kolejnych badań stosowano siły nagniatania 392,27 kN, zmieniając wcisk w= 0,05 ÷0,3 mm. Dodatkowo przeprowadzono pomiar sił w trakcie nagniatania i analizę chropowatości próbek po nagniataniu.

Do usprawnienia badań nagniatania została wykonana dodatkowa konstrukcja [118], która pełni funkcję utrzymania próbki podczas wyjazdu narzędzia z tulei. Zamocowana do podstawy prasy wraz z konstrukcją do wykrawania, utrzymującą próbkę w osi narzędzia. Podstawowy element dostarczony z prasą jest używany do wykrawania otworów w kątownikach od 25 – 60 mm (rysunek 5.8 a). Pomocnicza konstrukcja (rysunek 5.8.b) została wykonana z dwóch sztabek materiału i wytoczonej tulei. Wymiar średnicy wewnętrznej tulei jest nieznacznie większy od średnicy zewnętrznej formy do wykrawania. Wymiar tulei został dobrany, tak aby można go było zespawać ze frezowanymi ocynkowanymi sztabkami zamocowanymi do podstawy maszyny za pomocą śrub.

a) b)

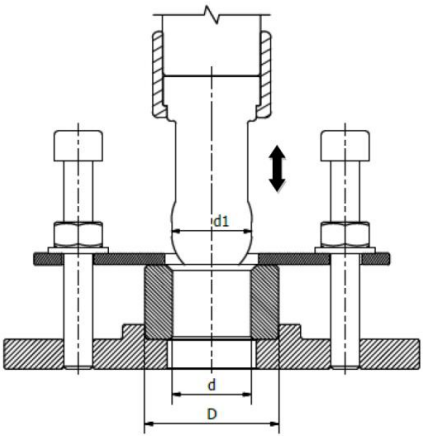


Rys. 5.8. a) Konstrukcja od producenta umożliwiająca na unieruchomienie próbki w osi narzędzia; b) dodatkowa konstrukcja zrealizowana w celu unieruchomienia próbek w trakcie wyjmowania nagniataka trzpieniowego [118]

Konstrukcja nagniataka trzpieniowego ma znaczenie na jego dokładność wymiarowo-kształtową obrabianego elementu. Narzędzia o złożonych elementach nagniatających cechuje większa dokładność, wykonywanych w trakcie prac na prowadnicach od jednoelementowych urządzeń z dociskiem sprężystym. Znaczenie mają warunki technologiczne tj.: naddatek obróbkowy, regularne rozmieszczenie naddatku, sztywność przedmiotu, grubość ścianek, dokładność kształtu itp.

Kolejnymi ograniczeniami w procesie nagniatania są ograniczenia wynikające z układu obrabiarka–uchwyt–przedmiot–narzędzie (OUPN). Konfiguracja musi cechować się dużą sztywnością, ponieważ ma bezpośrednie znaczenie na dokładność wymiarową obrobionego przedmiotu.

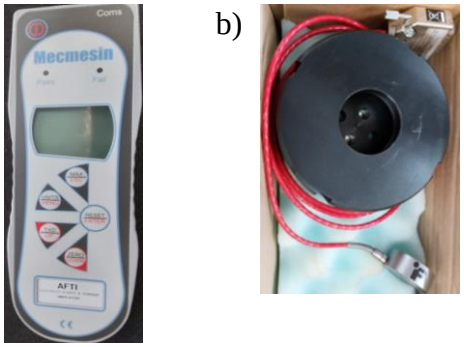
Proces nagniatania odbywał się w dwóch przejściach, narzędzie poruszało się w kierunku pionowym, pierwsze w dół, następnie w górę. Nagniatak trzpieniowy jest mocowany na uchwycie głowicy prasy hydraulicznej w taki sposób, aby jego wymiar pasował do wymiaru średnicy otworów jego matrycy. Narzędzie było tak zamocowane, aby mogło obrobić całą długość tulei. Stalowe próbki mocowano za pomocą uchwytu [54]. Tuleja została zabezpieczona przed przesunięciem za pomocą dodatkowej konstrukcji mocującej. Podczas obróbki nagniatającego przepychania ślizgowego użyto olej maszynowy VECO Megol 32, aby nie występowało zbyt duże tarcie pomiędzy stykającymi się powierzchniami.



Rys. 5.9. Schemat procesu nagniatającego przepychania ślizgowego [54]

W trakcie przepychania narzędzia został przeprowadzony pomiar sił za pomocą wskaźnika sił i momentu firmy Mecmesin AFTI z czujnikiem obciążnikowym przyciskowym (rysunek 5.10). Wskaźnik używany z wyświetlaczem AFTI umożliwia maksymalny odczyt przy wysokiej częstotliwości 5000 Hz. Cechuje go dokładność ±1% pełnej skali. Zakres ogniwa obciążnikowego mieści się w przedziale od 100 N do 50 kN, a długość jego kabla wynosi 1,5 m [194, 203]. Czujnik przyciskowy został umiejscowiony między tłokiem prasy a nagniatakiem trzpieniowym.

a) b)



Rys. 5.10. a) Wskaźnik sił i momentu obrotowego marki Mecmesin AFTI, b) kabel ogniwa obciążnikowego z czujnikiem obciążnikowym

Przedział sił podczas badania w dół mieścił się w przedziale 8350 N do 19090 N. Przedział sił przy powrocie nagniataka trzpieniowego w górę wynosił od 3200 N do 4300 N.

Zdefiniowane w pracy kryteria umożliwiły wybór najbardziej optymalnych czynników opisujących obszar badanej powierzchni.

Po wykonaniu procesu technologicznego poprzez toczenie zgrubnie, toczenie kształtujące i szlifowanie przeprowadzono pomiar twardości po hartowaniu. W celu uzyskania większej dokładności przeprowadzono trzy pomiary.

Pomiar twardości został przeprowadzony na twardościomierzu Qness Q250M, który umożliwia uzyskanie 4 i 10–krotnego powiększenia i zastosowanie wielu metod w tym: Brinella, Rockwella, Vickersa [198].

Badana tuleja zostala umieszczona na stole pomiarowym ze znormalizowanym otworem Ø25H7 przeznaczonym do mocowania pryzmatycznego albo płaskiego stolika testowego z automatyczną 6–pozycyjną głowicą pomiarową, umożliwiającą na montaż obiektywów i wgłębników.

Rys. 5.11. Twardościomierz uniwersalny Qness Q250M

Twardość zbadano za pomocą metody Vickers'a. Pomiar został analizowany na monitorze umieszczonym z boku aparatu. Przy określonym obciążeniu wgłębnik diamentowy w kształcie piramidy zagłębiał się w próbkę.

Dla każdego z trzech rodzajów stali wykonano trzy badania pomiaru twardości na sześciu tulejach.

Tab. 5.1. Wyniki twardości nagniataka trzpieniowego

Numer pomiaru	**1**	**2**	**3**	**Średnia**
Pomiar twardości NPT22 [HRC]	57	58	57	57

Tab. 5.2. Wyniki pomiarów twardości stalowych tulei realizowanych metodą Vickers'a

Numer pomiaru	S235JR	AISI 316L	C45
Średnia twardość tulei [HV]	220	230	229

Po obróbce zmierzono chropowatość powierzchni za pomocą profilometru HOMMELWERKE. Na podstawie analizy określono wpływ szybkości nagniatania na chropowatość powierzchni.

Istotnym rodzajem badania wykonanym przed obróbką był pomiar średnic zespołu elementów obrabiającego oraz obrabianego za pomocą mikrometru, a także chropowatości przy użyciu profilometru HOMMEL TESTER T1000.

Rys. 5.12. a) Profilometr HOMMEL TESTER T1000; b) Przykładowy pomiar chropowatości

Badanie średnic zewnętrznych nagniataka trzpieniowego wykonano mikrometrem w trzech punktach. Maksymalna wartość odchylenia wynosi 2 µm i jest wywołana pozostałością naddatku po obróbce toczeniem. Po hartowaniu został poddany szlifowaniu, aby uzyskać jak najlepszą chropowatość powierzchni.

5.3. Wybór badanych materiałów

Materiałem użytym na nagniatak trzpieniowy była stal 40HM (1.7225) po hartowaniu w temperaturze ok. 850°C do twardości 60 HRC, materiał został chłodzony w oleju. Natomiast element obrabiany był wykonany ze stali S235JR, C45, AISI 316L w postaci tulei o średnicy zewnętrznej 45 mm i wysokości 25 mm.

Tab. 5.3. Właściwości fizyczne rodzajów stali użytych do badań [35, 124]

Rodzaj materiału	**Współczynnik Sprężystości [kN/mm^2]**	**Współczynnik Poissona [-]**	**Masa właściwa [kg/m^3]**	**Współczynnik rozszerzalności Cieplnej [10^{-6}m/(m•K)] [20°C-400°C]**	**Przewodność cieplna [W/(m•K)] [20°C]**	**Hartowanie temp. [°C]**
40HM (1.7225)	210	0,28	7 800	13,5	42,6	ok. 850°C
S235JR (1.0037)	210	0,28	7 800	12	0,37	—
AISI 316 L (1.4404)	193	0,3	8 000	17,5	15	—
C45 (1.0503)	210	0,28	7 800	11,65	49,4	—

Przeprowadzone badania eksperymentalne oraz zaprojektowane symulacje komputerowe procesu nagniatania zostały zaprezentowane w celu pokazania zjawisk zachodzących w trakcie kształtowania warstwy wierzchniej, jej stanu naprężeń oraz odkształceń.

Tab. 5.4. Skład chemiczny i właściwości mechaniczne stali 40HM (1.7225) [186, 187, 189]

C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]
0,38-0,45	0,4-0,7	0,17-0,37	max 0,035	max 0,035	0,9-1,2
Ni [%]	**Mo [%]**	**W [%]**	**V [%]**	**Cu [%]**	**Co**
max 0,3	0,15-0,25	max 0,2	max 0,05	max 0,25	-
Re [MPa]	**Rm [MPa]**	**A [%]**	**Z [%]**	**HRC**	**KV [J]**
880	1030	≥10	≥45	max 60	≥30

Stal 40HM jest stosowana do ulepszania cieplnego i hartowania, o wysokiej wytrzymałości. Łatwo obrabialna cieplnie i mechanicznie, nie spawalna. Stal ma zastosowanie w częściach konstrukcyjnych o wysokiej odporności na obciążenia dynamiczne. Stosowane w konstrukcjach samochodów i pojazdów, wałach korbowych i półosiach, kołach zębatych, dźwigniach, zwrotnicach, korbowodach oraz popychaczach [187, 189].

5.3.1. Stal konstrukcyjna S235JR

Elementy nagniatane zostały wykonane z niestopowej, niskowęglowej stali konstrukcyjnej S235JR (1.0037), jest to powszechnie użytkowana stal maszynowa i ogólnobudowlana [185].

Tab. 5.5. Skład chemiczny i właściwości mechaniczne stali S235JR (1.0037) [124, 200]

C [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	N [%]	Cu [%]
≤0,17	≤1,40	≤0,035	≤0,035	≤0,12	≤0,55
Re [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	Z [%]	KV [J]	
175–235	340–510	21–26	20–25	27	

W konstrukcjach mechanicznych główne zadanie odgrywają stale konstrukcyjne uwarunkowane wytrzymałością. Stal konstrukcyjna niestopowa jest używana głównie w technologii lądowej i morskiej, do budowy budynków mieszkalnych oraz przemysłowych, konstrukcji okrętowych, elementy wież przeładunkowych, platform naftowych i gazowych, jak również elementów wyposażenia. Stosowana na konstrukcje nitowane, spawane, łączone śrubami, wyroby długie, półwyroby, odkuwki, tuleje, pręty, kształtowniki, taśmy gorącowalcowane [67, 196, 201].

5.3.2. Stal austenityczna 316L

Następne elementy nagniatane zostały wykonane ze stali odpornej na korozję 316L (1.4404). Stal austenityczna jest zdefiniowana polską normą PN–EN 10027–2:2015–07 –wersja polska [215]. Stal austenityczna 316L jest stalą nierdzewną austenityczną chromowo-niklowo-molibdenową z zawartością węgla. Materiały trudnoobrabialne cechują się wysoką plastycznością, ciągliwością i odpornością na wysokie temperatury.

Charakteryzują się dużą wytrzymałością mechaniczną w niskich temperaturach i dobrą spawalnością.

Tab. 5.6. Skład chemiczny i właściwości mechaniczne stali AISI 316L (1.4404) [19, 191]

C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]
max 0,03	max 1	max 2	16,50-18,50	2-2,50	10-13
	N [%]	S [%]	P [%]		
	max 0,11	max 0,015	max 0,045		
Re [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	Z [%]	KV [J]	
240	530–680	>40	25	>60	

Stal odporna na działanie atmosfery H_2S, wód naturalnych, gorących roztworów H_2SO_4 oraz odporną na korozję międzykrystaliczną. Stal austenityczna 316L znajduje zastosowanie w przemyśle chemicznym, okrętowym, petrochemicznym, tekstylnym, motoryzacyjnym, a także spożywczym [10, 35, 110]. Stosowana w przemyśle chemicznym na instalację, na elementy pracujące w środowisku morskim i architektonicznym, wymienniki ciepła, sprężyny, tuleje, filtry spalin.

5.3.3. Stal niestopowa C45

Kolejne elementy nagniatane zostały wykonane ze stali C45 (1.0503) [184]. Skład chemiczny i wymagania własności mechanicznych stali niestopowej C45 podano w tabeli 5.7.

Tab. 5.7. Skład chemiczny i właściwości mechaniczne stali C45 (1.0503) [124, 190]

C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]
0,42-0,5	0,5-0,8	0,1-0,4	max 0,04	max 0,04	max 0,3
Ni [%]	Mo [%]	W [%]	V [%]	Al [%]	Cu [%]
max 0,3	max 0,1	-	-	-	max 0,3
Re [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	Z [%]	KV [J]	
275-490	560-850	14-17	35-45	≥25	

Stale niestopowe C45 (1.0503) są stosowane na części maszyn w stanie normalizowanym. Można te stale stosować zarówno po ulepszeniu cieplnym, jak i po hartowaniu powierzchniowym. Stal C45 sosowana jest na części konstrukcyjne o średnim obciążeniu, jak: wrzeciona, osie, wały korbowe, wały silników elektrycznych, tarcze, śruby, wirniki pomp [188, 190].

5.4. Parametry technologiczne

Odpowiednio dobrane wartości parametrów technologicznych wpływają bezpośrednio, na jakość nagniatanego wyrobu. Określenie dokładnych wartości parametrów nagniatania stanowi podstawę projektowania procesu technologicznego produktu. Na właściwości warstwy wierzchniej mają wpływ następujące parametry nagniatania: promień zaokrąglenia końcówki narzędzia, siła nagniatania, liczba przejść oraz warunki smarowania na obrabianej powierzchni. Liczebność czynników, które wpływają na obróbkę wymagają obszernych badań eksperymentalnych. Parametry technologiczne zostały wybrane na podstawie [86, 90, 129, 130, 132].

5.4.1. Sposób doboru warunków nagniatania ślizgowego

Dobór właściwych warunków obróbki nagniatania jest istotnym czynnikiem mającym wpływ, na jakość powierzchni. Przed obróbką nagniataniem powierzchnia została oczyszczona, tak aby stała się gładka, pozbawiona rys, wgłębień oraz narostu. W przypadku badanych materiałów parametr chropowatości Ra dla materiałów o niskiej twardości mieści się w zakresie od 0,63 μm do 2,5 μm, natomiast dla wysokiej twardości materiałów parametr Ra powinien wynosić od 0,32 μm do 1,25 μm. Jednak wystąpienia na obrabianej powierzchni dużych nierówności dla nagniatania ślizgowego skutkuje zanikaniem właściwości obróbki gładkościowej [90].

5.4.2. Siła nagniatania

Siła nagniatania zależy od wielu czynników w tym wysokości nierówności powierzchni, odległość między mikronierównościami w kierunku przemieszczenia narzędzia nagniatającego oraz promienia zaokrąglenia narzędzia [90]. Powyższe warunki mają jednocześnie znaczenie na ilość i objętość nierówności mieszczących się pod narzędziem a tym samym rozmiarem materiału, który ulega odkształceniom plastycznym i zostaje zrównany podczas nagniatania ślizgowego. Wyznaczanie nominalnej siły osiowej jest niezbędne do przeprowadzenia procesu nagniatania. Zależy od konstrukcji nagniataka trzpieniowego, wartości wcisku, jak również średnicy

elementu obrabianego. Wartość sił nagniatania mieści się w przedziale od kilku do kilkunastu daN [90].

5.4.3. Środki smarne w procesach obróbkowych

W trakcie obróbki nagniataniem ślizgowym stosowanie środka smarnego nie jest wymagane, jednak poprawia poślizg nagniataka trzpieniowego na obrabianej powierzchni, ujawnia właściwości tłumiące i przyczynia się do spadku oporów tarcia. W czasie procesu nagniatania stali wskazane jest nieprzerwane nawilżanie obrabianej powierzchni olejem maszynowym, jednak nie zaleca się użytkowania emulsji obróbkowych i środków aktywnych. Środki smarne tj. olej maszynowy jest przypisywany do obróbki odmiennych stopów od stali i „czystych" metali. W trakcie badań jako środek smarny użyto olej maszynowy VECO Megol 32. Dla nagniatania smarowanie ma negatywny wpływ na powłoki chromowe wywołując wzrost porów w powłoce i prowadząc do jej uszkodzenia [90].

6. Budowa modelu MES do wyznaczenia odkształceń w procesie nagniatania

Obróbka plastyczna jest procesem wywołującym duże odkształcenia plastyczne, które prowadzą do tworzenia i rozwoju anizotropii materiału w kształtowanym wyrobie. Do opisu odkształceń i naprężeń konstrukcji inżynierskich stosuje się teorię sprężystości i plastyczności, związane z plastycznym płynięciem materiału [7, 11, 44, 156].

Określenie tensora prędkości plastycznej deformacji umożliwia przewidywanie oraz przeciwdziałanie niekorzystnym procesom. Zjawisko lokalizacji odkształceń zahamowuje procesy kształtowania metalowych wyrobów. Procesy zachodzące w trakcie odkształcenia są bardzo złożone. Metoda Elementów Skończonych pozwala na projektowanie i weryfikację procesów plastycznego kształtowania części. MES pozwala na rozwiązywanie zadań nieliniowych, jak również analizy sztywności metodą numeryczną. Budowane modele są skomplikowane i stosuję się pewne uproszczenia. Budowa MES jest jednoznaczna z metodą wariacyjno–różniczkową. Metodę można traktować jako formę aproksymacji funkcji, poprzez punkty węzłowe określonych elementów obszaru siatki. Teoria plastycznego płynięcia metali dzieli się na modele fenomenologiczne i fizyczne, a w obu przypadkach fundamentalną rolę stanowi powierzchnia plastyczności.

Główne kierunki płynięcia odkształcenia są definiowane poprzez powierzchnię potencjału tensora prędkości deformacji plastycznej [7, 24]. Badany element w modelu fizycznym traktuje się jako polikrystaliczny, definiuje się go jako stan naprężeń i prędkość deformacji. Użycie modelu pozwala na uzyskanie wyników symulacji zgodnych z wynikami badań eksperymentalnych. Natomiast wadą modelu jest złożony proces obliczeniowy.

Klasyczna teoria plastyczności jest podstawą modelu fenomenologicznego, gdzie badany materiał jest jednorodny i plastycznie anizotropowy. Obszar plastyczności definiuję się jako funkcję tensora naprężeń i parametrów określanych poprzez badania makroskopowe. Charakterystyka anizotropii plastycznej jest wyznaczana na podstawie szeregu krzywych uplastycznianego materiału. Najlepszą metodą jest łączenie obu metod i implementacja do modelu MES.

Sformułowanie modelu sprężysto–plastycznego metali zostało opisane przy pomocy zamkniętego układu równań z analityczną powierzchnią plastyczności.
Formuje się lokalną powierzchnię plastyczności, czyli pojedynczego kryształu. Takie założenie umożliwia zbudowanie uproszczonego modelu plastycznego płynięcia metalu. Przy pomocy funkcji tensora naprężeń powstanie globalna powierzchnia plastyczności. Powstały model ma anizotropię uwarunkowaną strukturą krystalograficzną i definiuję się go jako fenomenologiczny model plastycznego płynięcia metalu [9, 10].

Metoda Elementów Skończonych polega na modelowaniu ośrodka ciągłego przez jego podział na obszary (elementy skończone), które łączą się w ograniczonych liczbowo punktach węzłowych. W węzłach ośrodków sprężystych albo plastycznych działają siły węzłowe, które powodują przemieszczenia określonych punktów węzłowych opisanych funkcjami naprężenia i przemieszczenia [162]. Dla zwiększenia dokładności obliczeń można stosować różne gęstości siatki elementów skończonych (punktów węzłowych). W obszarach dużej deformacji można zagęścić siatkę, natomiast w obszarach o niskim stopniu deformacji się ją rozrzedza. Główną wadą w stosowaniu MES są trudności w jej analizowaniu w przypadku dużych odkształceń plastycznych. Do przeprowadzenia analizy należy zamodelować ośrodek ciągły przez podział na pewną liczbę elementów. Wymiar i kształt elementów wpływają na dokładność wyników, a do rozwiązywania zagadnień najlepiej zastosować rachunek macierzowy. W procesie odkształcenia założono, że obciążenie działa na wszystkie elementy siatki, kształt elementu w tym procesie się nie zmienia, a obciążenia działają wyłącznie na brzegach elementu. W węzłach elementów przykłada się siły skupione, uznawane jako obciążenie. Siła działa na węzły w zależności od ilości stopni swobody powodując ich przemieszczenie. Wyniki uzyskane przez stosowanie metody elementów skończonych są dokładne i wiarygodne, a metoda ułatwia proces projektowania.

W symulacjach komputerowych siły tarcia modelowano zgodnie w oparciu o rozwiązania Treski [44]:

$$\tau = m\frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \qquad \mu\sigma_n > m\frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \tag{6.1}$$

gdzie:

τ – naprężenie tarcia [MPa],

μ – współczynnik tarcia,

m – czynnik tarcia,

σ_0 – początkowe naprężenia uplastyczniające [MPa],

σ_n – naprężenia normalne [MPa].

Do analizy numerycznej plastycznego płynięcia metalu w trakcie nagniatania użyto modelu matematycznego, a dokładniej prawa Nortona–Hoffa, opisującego stan mechaniczny odkształconego wyrobu [44]:

$$S_{ij} = 2K_0(\varepsilon + \varepsilon_0)^{n_0} \cdot e^{(-\beta_0 \cdot T)}(\sqrt{3\dot{\varepsilon}_i})^{m_0 - 1}\dot{\varepsilon}_{ij} \tag{6.2}$$

gdzie:

S_{ij} – dewiator tensora naprężeń,

ε – intensywność odkształcenia,

ε_0 – odkształcenia początkowe,

$\dot{\varepsilon}_i$ –prędkość odkształcenia,

$\dot{\varepsilon}_{ij}$ – tensor prędkości odkształcenia,

T – temperatura,

β_0, K_0, m_0, n_0 – stałe materiałowe odnoszące się do właściwości poszczególnych materiałów.

Podczas badań do programu FORGE NxT 2.1 za pomocą funkcji Hensla–Spittla zostały wczytane właściwości reologiczne stali [44]:

$$\sigma_p = K_0 e^{m_1 T} \varepsilon^{m_2} \dot{\varepsilon}_i^{m_3} e^{\frac{m_4}{\varepsilon}} \tag{6.3}$$

gdzie:

σ_p – naprężenie uplastyczniające,

ε – intensywność odkształcenia,

$\dot{\varepsilon}_i$ –prędkość odkształcenia,

T – temperatura,

K_0, m_1, m_2, m_3, m_4– stałe materiałowe odnoszące się do właściwości poszczególnych materiałów.

Badanie polegało na zbudowaniu modelu bryłowego w programie SOLIDWORKS 2019 i składało się ze stworzenia modelu obliczeniowego. Model został zaimplementowany do programu FORGE NxT 2.1, a następnie przeprowadzono obliczenia dla procesu nagniatającego przepychania ślizgowego.

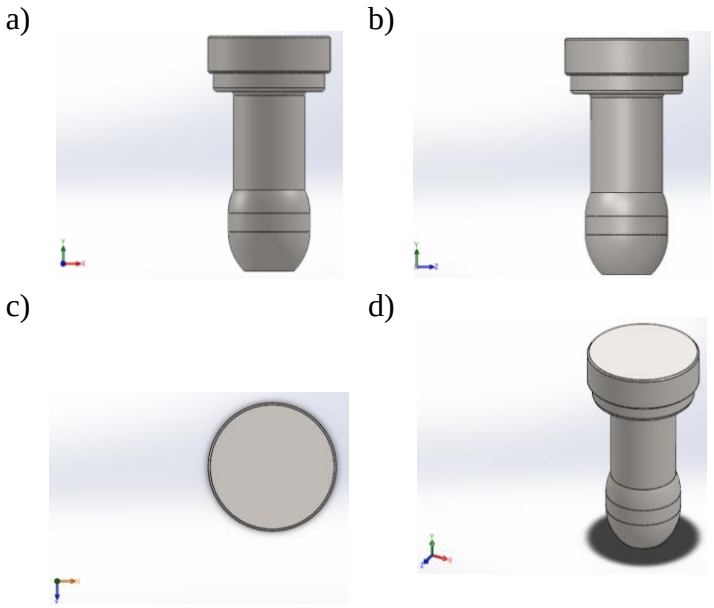
Model bryłowy został wykonany w następujących etapach:

1. Budowa modelu bryłowego w programie SOLIDWORKS 2019.
2. Wczytanie modelu do programu FORGE NxT 2.1.

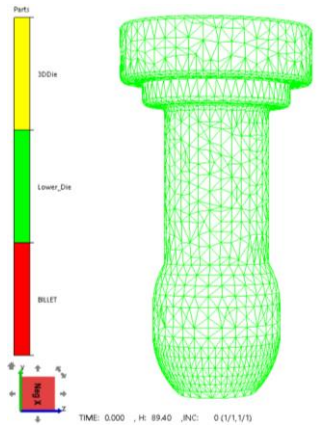
3. Stworzenie siatki STL (ang. Stereolithography).
4. Określenie parametrów.
5. Wykonanie obliczeń.

6.1. Model nagniataka trzpieniowego

Model bryłowy składa się z nagniataka trzpieniowego i elementu obrabianego– tulei. Badane materiały zostały przypisane w programie SOLIDWORKS 2019. Poszczególne elementy zostały narysowane oddzielnie w następnej kolejności zostały złożone.



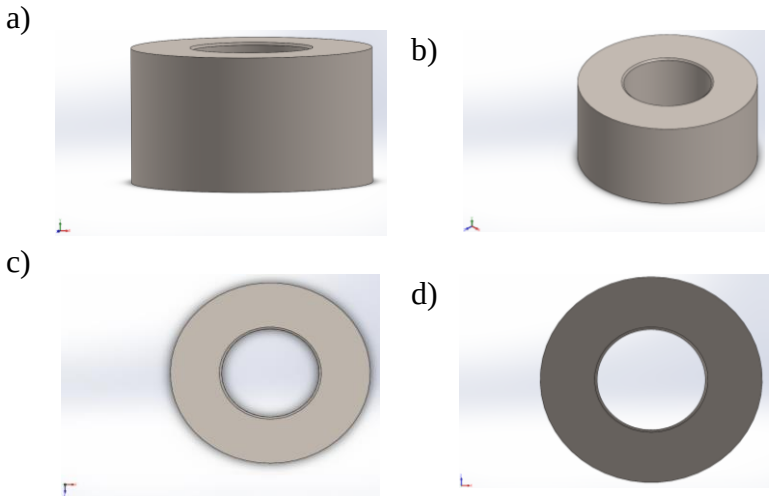
Rys. 6.1. Model 3D nagniataka trzpieniowego w programie SOLIDWORKS 2019, rzut: a) z przodu; b) lewa strona; c) z góry; d) aksonometryczny trójwymiarowy



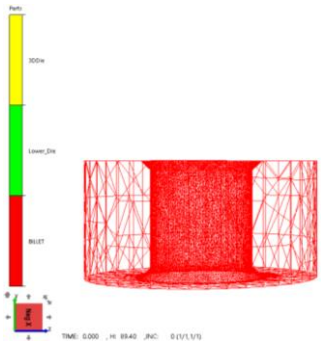
Rys. 6.2. Widok siatki MES w programie FORGE NxT 2.1

6.2. Model tulei

Model bryłowy tulei został zaprojektowany w programie SOLIDWORKS 2019. Wymiar stały to wysokości każdej z tulei wynosi 25 mm, a średnica zewnętrzna 45 mm. Zmieniała się tylko średnica wewnętrzna otworu.



Rys. 6.3. Model 3D tulei w programie SOLIDWORKS 2019, rzut: a) z przodu; b) izometryczny; c) z góry; d) z dołu



Rys. 6.4. Widok siatki MES w programie FORGE NxT 2.1

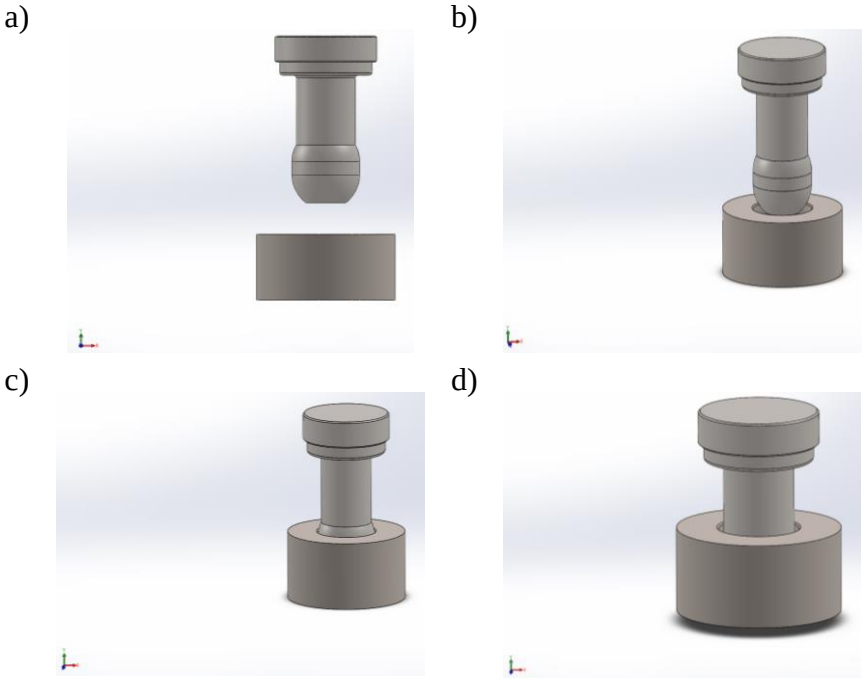
6.3. Implementacja modelu do systemu MES

Model przedmiotu obrabiającego i obrabianego został zaprojektowany w programie SOLIDWORKS 2019, następnie zapisany do pliku o rozszerzalności STL., SLDPRT i za pomocą funkcji importowania przeniesiony do programu FORGE NxT 2.1. Program pozwolił na wczytanie modeli stworzonych w innych programach, w których jest opcja zapisu pliku o tym rozszerzeniu. Następnym krokiem po wczytaniu modelu bryłowego było wprowadzenie właściwości materiałowych badanych próbek na trzech rodzajach materiałów.

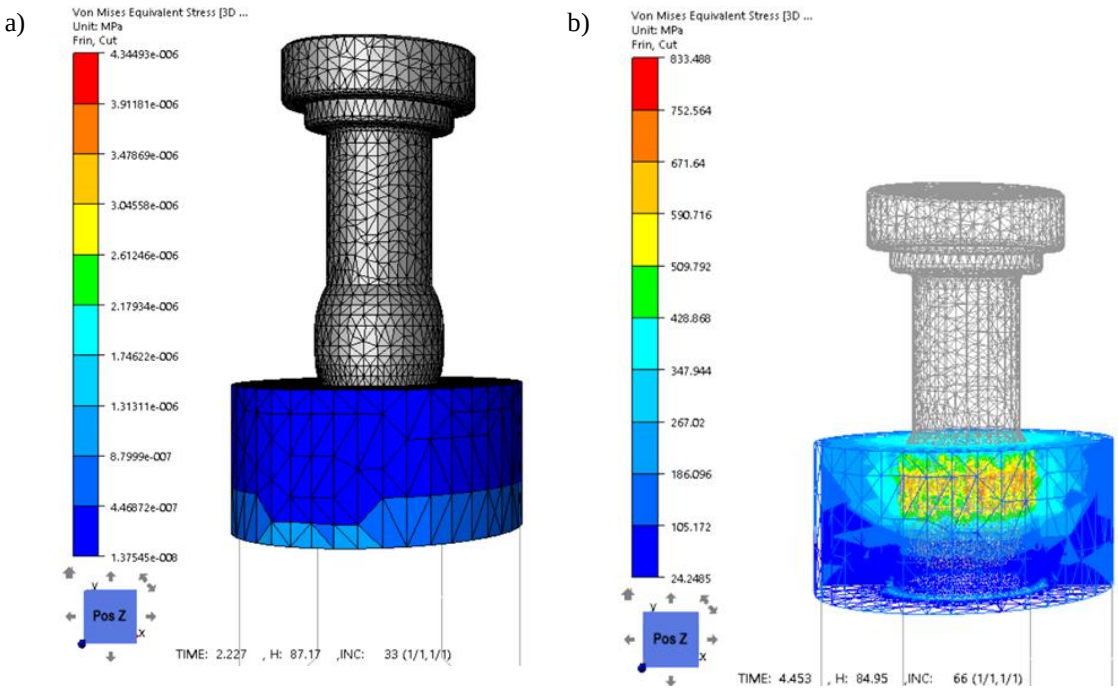
Do realizacji modelu obliczeniowego MES zostały przeprowadzone następujące czynności:

1. Wprowadzenie parametrów technologicznych materiałów.
2. Ustalenie warunków brzegowych: właściwości narzędzi i materiału, tarcie, parametry kinetyczne i termiczne.
3. Ustalenie stopni swobody.
4. Przypisanie siły działającej na badaną próbkę.
5. Przypisanie powierzchni kontaktów i tarcia.
6. Określenie gęstości siatki w zależności od punktów lokalnej koncentracji naprężeń.

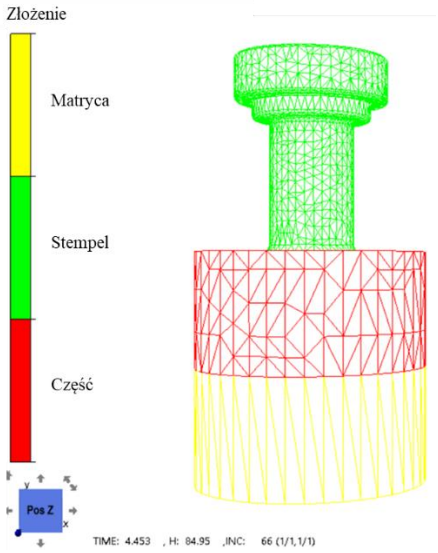
Po przeprowadzeniu powyższych czynności model obliczeniowy w programie FORGE NxT 2.1 jest gotowy do obliczeń numerycznych.



Rys. 6.5. Model 3D złożeniowy w programie SOLIDWORKS 2019: a) rzut z przodu; b) w początkowej fazie badania; c) w pośredniej fazie badania; d) w końcowej fazie badania



Rys. 6.6. Widok siatki MES dla złożenia w programie FORGE NxT 2.1: a) podczas rozpoczęcia symulacji; b) w trakcie badania; c) z widocznym rozkładem intensywności naprężeń



Rys. 6.7. Widok siatki MES w programie FORGE NxT 2.1

6.4. Proces odkształcenia materiału

W celu ułatwienia oceny dalszych wyników, rozdział 6.4 został celowo zamieszczony w części dotyczącej badań własnych, ale zdaniem autorki, taki zabieg ułatwia kompleksowe zrozumienie tematu. Można nadmienić, że bliżej mu do opisu części teoretycznej, niemniej jednak, takie podejście do analizowanego problemu badawczego ułatwia wprowadzenie w omawianą tematykę. Jako uzupełnienie procesu odkształceń w aspekcie dalszych wyników zamieszczonych w rozdziale 7 (Wyniki badań dla analizowanych próbek stali) opisano dane, które łączą się z wynikami przedstawionymi w literaturze.

W trakcie powierzchniowego umocnienia zgniotem na zimno metalu powstaje odkształcenie sprężysto-plastyczne warstwy wierzchniej. Następują zmiany w powierzchni makro i mikro geometrii oraz samej strukturze metalu, zmieniając własności mechaniczne. Badania wykazały, że warstwa wierzchnia odkształcona plastycznie różni się od bazowego metalu [12, 17, 42, 178]. Zmiany w strukturze strefy odkształconej plastycznie metalu można opisać na podstawie budowy metalograficznej oraz teorii dyslokacji. Po procesie odkształcenia plastycznego w warstwie pojawia się rozdrobnienie krystalitu metalu, a w płaszczyźnie poślizgu ziarna wyciągają się w kierunku deformacji oraz spłaszczają się. Zmienia się rozmiar ziarn, zwiększając w stronę strefy odkształcenia. Powstaje uporządkowana struktura o włóknistych cechach z nieuporządkowanym położeniem krystalitów [45, 75, 114]. Anizotropia własności mechanicznych ukazuję zwiększoną plastyczność wzdłuż włókien niż w kierunku poprzecznym. Twardy składnik struktury kondensuje się na deformowanej powierzchni. Podczas odkształcania warstwy wierzchniej występują wielkie zniekształcenia siatki krystalicznej [43, 49, 109, 148, 150].

Analizę warstwy wierzchniej metalu można wykonać za pomocą mikroskopu elektronowego. Przejście ze struktury ze zorientowanymi ziarnami do nieuporządkowanej struktury staje się wyraźniejsze w badaniu oddzielnych warstw materiału. Wraz z oddaleniem się od powierzchni zmniejsza się wielkość odkształcenia plastycznego. W zależności od parametrów i rodzaju materiałów na pewnej głębokości odkształcenie całkowicie ustępuje.

Ze wzrostem parametrów nagniatania, zwiększa się stopień deformacji ziarn. Nierówności powierzchni po nagniataniu zaokrągliły się i zanikają. Zmniejszyła się

chropowatość powierzchni, stopień deformacji ziarn jest znikomy, a rozmiar i kształt ziarn mało dostrzegalny w cienkiej warstwie powierzchniowej [24, 114, 134].

Ośrodki krystaliczne podczas odkształcenia plastycznego zachowują swoją budowę krystaliczną oraz spójność. Odkształcenie plastyczne ciała powstaje w związku z równoczesnym odkształceniem wielu ziarn na skutek wzajemnego oddziaływania pomiędzy nimi. Zachowanie spójności jest możliwe tylko przez odkształcenie ziarn przynajmniej w pięciu systemach poślizgu [34, 36, 166].

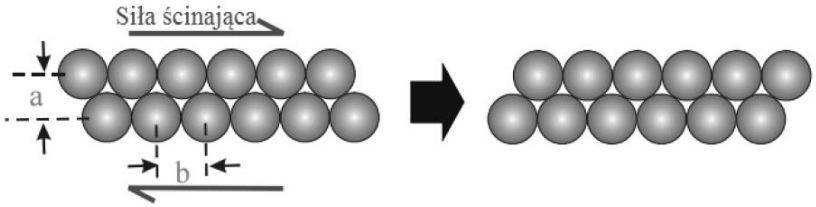
Materiałom polikrystalicznym w trakcie odkształceń plastycznych towarzyszą wysokie wartości naprężeń. Z tego powodu nie można uniknąć przemieszczenia wzdłuż i przy granicy ziarn. Występują dwa rodzaje mechanizmów odkształcenia: międzykrystaliczne i wewnątrzkrystaliczne. Na skutek odkształcenia zmienia się kształt, orientacja krystalograficzna ziarna, a także ulega rozdrobnieniu. W wyniku zgniotu ziarna podlegają wydłużeniu z równoczesnym obrotem osi krystalograficznych. Wraz ze wzrostem odkształcenia osie przyjmują położenie analogiczne do kierunku najwyższego wydłużenia. Otrzymana w ten sposób postać, o jednoznacznie zauważalnej orientacji krystalicznej ziarn, nazywana jest teksturą zgniotu. Tekstura determinuje anizotropię cech mechanicznych, przede wszystkim wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenie [74, 80, 137].

Analizując zmiany fizyczne metalu dla odkształcenia plastycznego na zimno stwierdza się zmiany własności mechanicznych, nazywane umocnieniem na skutek zgniotu na zimno. Eskalacja gęstości dyslokacji zwiększa granicę plastyczności, czyli powoduję umocnienie metalu.

Metale to materiały, które na ogół są poddawane obróbce nagniataniem. Materiały te posiadają budowę krystaliczną, oznacza to, że są ciałami polikrystalicznymi złożonymi z kryształów o wielkich rozmiarach zwanych monokryształami. Monokryształy mogą się odkształcać plastycznie poprzez bliźniakowanie i poślizg [80, 109, 181, 184]. Translacja lub poślizg jest procesem przemieszczania części kryształu względem innej części w danych płaszczyznach krystalograficznych, z uwzględnieniem ich budowy.

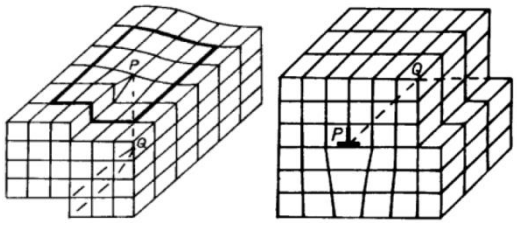
Poślizg powstaje stopniowo i pojawia się w płaszczyznach oraz kierunkach, gdzie naprężenie styczne pierwotnie uzyska wartość krytyczną. Poślizg jest zjawiskiem anizotropowym, czyli w określonych kierunkach i płaszczyznach krystalograficznych pozytywnie skierowanych do kierunku siły zewnętrznej, ma miejsce przy niższych

wartościach naprężeń stycznych. Najgęściej obsadzone atomami kierunki i płaszczyzny określone są systemami łatwego poślizgu [3, 82, 83].



Rys. 6.8. Schemat zjawiska poślizgu [2, 20, 192]

Występowanie defektów liniowych w sieci krystalicznej inaczej dyslokacji wpływa na granicę plastyczności, które podczas ścinania jest kilka rzędów mniejsze. Wyróżnia się dyslokacje śrubowe, krawędziowe oraz mieszane. Tylko dwie pierwsze występują w formie krańcowej. W krysztale wyróżnia się różne rodzaje dyslokacji mieszanych o zmiennym udziale cech dyslokacji śrubowej i krawędziowej.



Rys. 6.9. Schemat dyslokacji: a) śrubowej, b) krawędziowej, gdzie: P, Q– krawędź dyslokacji [192]

Przesunięcie w krysztale dyslokacji krawędziowej może występować przez poślizg oraz wspinanie, jednak przemieszczenie dyslokacji śrubowej wystąpi tylko przez poślizg.

W wyższych temperaturach możliwość dyslokacji do wspinania się jest zbliżona do zdolności ślizgania. Proces ten jest nazwany pełzaniem dyslokacji. Poślizg w przypadku dyslokacji liniowej ma miejsce prostopadle do linii dyslokacji, natomiast przy dyslokacji śrubowej poślizg odbywa się równolegle do niej. Przemieszczenie się dyslokacji wzdłuż strefy poślizgu o jedną odległość międzyatomową oraz systematycznym powtarzaniem procesu wywoła przejście przez kryształ. Trwałe

odkształcenia są wywołane mechanizmem przejścia dyslokacji przez cały kryształ [5, 36, 86].

Natomiast, aby powstała zauważalna linia poślizgu w krysztale musi przejść stosowna liczba dyslokacji. Gęstość dyslokacji w czystych kryształach zwykle równa się od 10^1 do 10^3 cm/cm^3 i jest za niska, żeby doprowadzić do odkształcenia plastycznego. W metalach odkształcanych na zimno gęstość dyslokacji wynosi 10^{10} cm/cm^3. Odkształcenia plastyczne kryształów w skali makroskopowej w trakcie działania naprężenia potrzebują czynności powiększających liczbę dyslokacji [140, 175, 176].

Rezultaty odkształcenia plastycznego w mikroskali są zauważalne w formie pasm poślizgu, złożonych z wielu linii poślizgu. Na zewnętrznej powierzchni powstaje uskok dla pojedynczej dyslokacji, wysokość jest równa wektorowi Burgersa. Charakterystyka stref poślizgu zależy od właściwości sieci krystalicznej a. W układzie płaskocentrycznym regularnym oraz heksagonalnym linie poślizgu prezentują się jak proste równoległe. W wyniku większych odkształceń plastycznych powstają krzyżujące pasma poślizgów przypisane do innych systemów poślizgów. Zjawisko to nazywa się podwójnym lub wielokrotnym poślizgiem [36, 46].

W skali makroskopowej kierunek odkształcenia jest zbliżony do ścinania. Wraz ze wzrostem odkształcenia wzrasta wielkość ścięcia w pasach poślizgu, a także liczba pasm.

Bezwymiarowa miara stopnia odkształcenia jest równa:

$$\gamma = \frac{\Delta s}{D} \tag{6.4}$$

Całkowity poślizg γ jest średnią miarą stopnia odkształcenia z uwagi, że proces przebiega niejednorodnie i nie jest jednakowy z dowolnym, miejscowym poślizgiem kryształu. W ostatniej fazie odkształcenia rozpoczyna się dekohezja materiału przez powstanie przewężenia lub zsunięcie płaszczyzn poślizgu [36, 85, 109, 115, 177].

Przestrzeń wewnętrzna materiału przylegającego do obszaru poślizgu nie przejawia typowej koncentracji naprężeń poślizgu, jednak jest podporządkowana działaniu niemalże stałych jak i wysokich naprężeń ściskających. W związku z tym przebieg odkształcenia jest rozpatrywany powtarzalnym regularnie i lokalnie wypaczaniem materiału.

6.4.1. Odkształcenia sprężysto-plastyczne

Następny rodzaj odkształceń to odkształcenia sprężyste. Nazwane odkształceniami przemijającymi, które po odciążeniu zanikają, a odkształcony metalowy element ponownie powraca do pierwotnego wymiaru i kształtu. W sieci krystalicznej pod wpływem przyłożonego obciążenia zmieniają się odstępy pomiędzy atomami. Jeśli na komórki sieciowe działają siły rozciągające wydłużają się one w kierunku działania sił, natomiast w przypadku sił ściskających komórki sieciowe nieznacznie się skracają [9, 10, 140]. Wzajemne oddziaływanie między wysuniętymi z położeń równowagi atomami, siły wewnętrzne formują się wewnątrz odkształconego materiału, zmierzając do przywrócenia stanu równowagi. Po odciążeniu element metalowy powraca do pierwotnego kształtu.

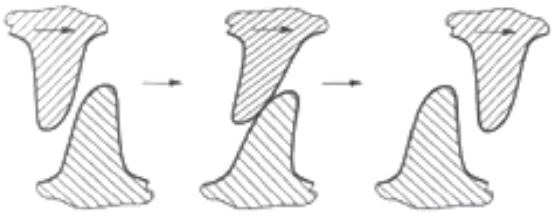
Dla materiałów tj. metale i ich stopy w zakresie odkształceń sprężystych występuje proporcjonalna zależność między naprężeniem a odkształceniem, bazując na prawie Hooke'a:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \tag{6.5}$$

gdzie: E– moduł Younga, moduł sprężystości podłużnej, określający właściwości sprężyste materiałów

W określonym zakresie odkształcenie jest proporcjonalne do naprężenia. W pierwszym etapie odkształceń z rosnącymi naprężeniami materiały wykazują cechy sprężyste (rysunek 6.10).

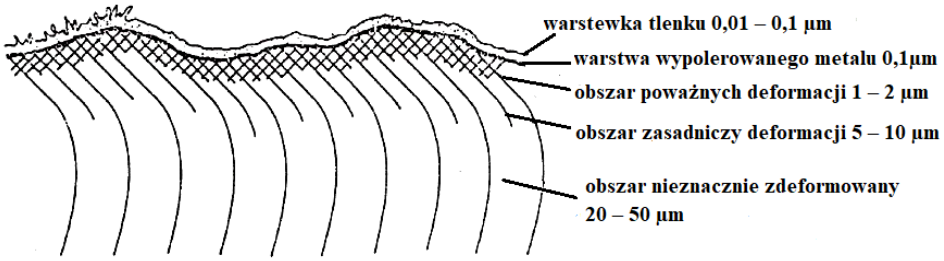
Wybrane rodzaje materiału wykazują własności sprężyste i plastyczne. Odkształcenia opisuje tensor całkowitych odkształceń, który rozkłada się na część sprężystą, lepką oraz plastyczną. Rodzaj odkształceń lepkich i plastycznych są ze sobą tożsame i można je rozpatrywać kompleksowo. Odkształcenia lepkie i plastyczne po zdjęciu obciążeń występują nadal, natomiast sprężyste są odwracalne (nietrwałe). Część sprężystych odkształceń opisuje liniowy związek Hook'a, natomiast dla części lepko–plastycznych, który wyznaczono z prawa płynięcia obowiązuje nieliniowy warunek plastyczności Hubera–Misesa–Hencky'ego [44, 125, 140].



Rys. 6.10. Model oddziaływania pomiędzy wypukłościami powierzchni w trakcie względnego przemieszczenia dla odkształcenia sprężystego [9]

Mechanizm deformacji sprężystych opisuje strukturalna teoria sieci krystalicznej. Ciało stałe jest zbudowane z blisko położonych przyciągających się cząstek. Odległości między nimi pochodzą z równoważenia sił przyciągających i odpychających. W wyniku działania nagniataka trzpieniowego zostaje zachwiana wewnętrzna równowaga sił przyciągania i odpychania. Proporcjonalne do obciążenia pojawiają się odkształcenia sprężyste. Własności plastyczne metali należy rozpatrywać uwzględniając dyslokację kryształów [125, 168, 174]. Dyslokacja w odkształceniach plastycznych przez poślizg w płaszczyźnie powoduje przemieszczenie, przy czym przemieszczenie może powstać przy minimalnym naprężeniu [4, 44, 125, 131, 157]. Plastyczne własności krystalitów wynikają z wyznaczenia dyslokacji, a także z uporządkowania atomów kryształu dookoła dyslokacji. Odległość między liniami dyslokacji w krysztale rzeczywistym wynoszą 10^{-6} m. Poszczególne dyslokację mieszczą się w płaszczyźnie poślizgu i są zatrzymywane przez pozostałe dyslokację leżące w innych płaszczyznach. Podczas gdy do kryształu jest dostarczone naprężenie, ruchoma dyslokacja doświadcza obrotu wokół punktów wyjścia, tworząc pierścienie dyslokacji. Na rysunku 6.11 w płaszczyźnie poślizgu pierścienie rozszerzają się i formują obszary poślizgu [171].

Naprężenie powierzchniowe ciał stałych nie bywa równe napięciu powierzchniowemu. Tworzenie swobodnej powierzchni substancji stałych dzieli się na dwa etapy: uzyskanie swobodnej powierzchni zbliżonej przełomowi wnętrza substancji, następnie przybraniu równowagowej, ustabilizowanej budowy [171].



Rys. 6.11. Schemat wypolerowanej powierzchni metalu [171]

Tarcie między dwoma powierzchniami płaszczyzny nie zależy od kształtu oraz powierzchni tarcia, a jest jedynie uzależnione od sił nacisku. Pomiędzy trącymi powierzchniami powstają cienkie warstwy naturalnych tlenków [2].

Naprężenia w materiale są zależne od wzajemnego umiejscowienia cząstek elementarnych materiału poddanego działaniu sił zewnętrznych. Naprężenia są związane zależnością z funkcji odkształcenia, które są uwarunkowane właściwościami materiału wyrobu [9, 10, 140].

$$\sigma = f(\varepsilon) \tag{6.6}$$

Funkcje f wzajemnych zależności parametru σ od ε opisują badania wytrzymałościowe.

W porównaniu z odkształceniami plastycznymi, sprężyste są stosunkowo niewielkie [7]. W zakresie sprężystym związki między naprężeniem a odkształceniem opisuje prawo sprężystości [119]. Teoria sprężystości dotyczy zagadnienia odkształceń nieskończenie małych [115]. Odkształcenia dla modelu ciała sprężystego występują w bliskiej zależności liniowej od naprężeń. Wyraża się w postaci odkształcenia ośrodka ciągłego, które jest proporcjonalne względem obciążenia, które je wywołało w stanie równowagi.

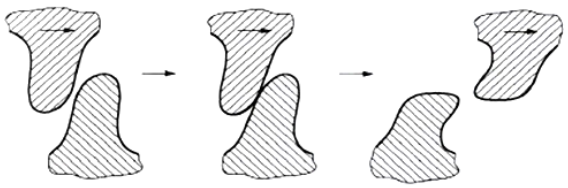
6.4.2. Charakterystyka procesów powierzchniowej obróbki plastycznej

Modele nagniatania zawarte w literaturze [36, 44, 58, 59, 86, 89, 90, 93, 95, 115, 116, 127, 130, 167, 177, 179] opisują zależność między głębokością odkształcenia plastycznego obrabianego elementu, siłą nagniatania oraz właściwościami obrabianego materiału w postaci wzoru [90, 175]. Powierzchnia obrabiana jest analizowana jako idealnie gładka powierzchnia. Umożliwia to określenie sił nagniatania w zależności od wymaganej geometrii styku narzędzia i obrabianego elementu, głębokości umocnienia warstwy wierzchniej oraz właściwości sprężysto-plastycznych.

Efekt końcowy obróbki dla nagniatania ślizgowego gładkościowego zależy od: sił nagniatania, właściwości sprężysto–plastycznych, chropowatości powierzchni, geometrii styku narzędzia i obrabianego przedmiotu [90, 163].

Kolejnym ważnym kryterium jest temperatura, przy której jest realizowana obróbka, kierunek ruchu materiału po narzędziu oraz rodzaj tego materiału. W przypadku obróbki plastycznej metali np. aluminium, tytanu w narzędziach tworzą się narosty. Do pracy w wyższej temperaturze muszą zostać spełnione inne wymagania niż podczas formowania materiału w temperaturze otoczenia.

Opory tarcia powstają pomiędzy odkształcającym materiałem a narzędziem wpływając na sprawność energetyczną, trwałość oraz zużycie narzędzia i kinematykę płynięcia warstwy wierzchniej, jak na jakość [18, 66, 76, 77, 102, 111, 148, 161]. W zjawiskach, których tarcie ma negatywny wpływ na narzędzie konieczne jest użycie smarów technologicznych. Przez ich zastosowanie można otrzymać wyższe odkształcenia graniczne bez obaw o pęknięcia.



Rys. 6.12. Model oddziaływania pomiędzy wypukłościami powierzchni w trakcie względnego przemieszczenia dla odkształcenia plastycznego [9]

Materiały plastyczne o zbliżonej twardości, w których naprężenia przekraczają naprężenia płynięcia plastycznego w wierzchołkach stykających się wypukłości powodują odkształcenia plastyczne (rysunek 6.12). Kilkakrotne odkształcenia plastyczne powodują wygładzenie powierzchni, usunięcia tlenków i zanieczyszczeń z powierzchni [9].

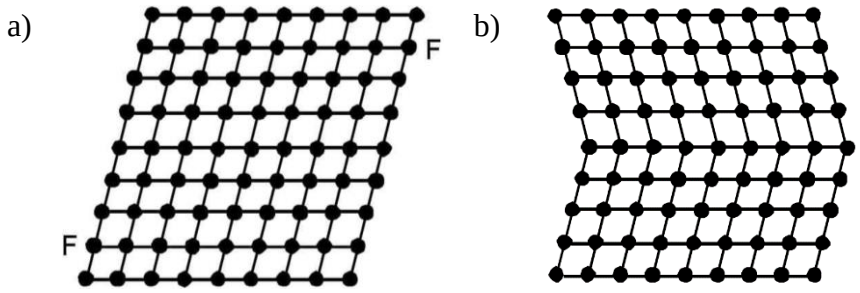
Element metalowy obciążony powyżej pewnej granicy sprężystości wywołuje trwałe odkształcenia plastyczne, a metal wykazuje nieodwracalną zmianę kształtu. Zjawisko zachodzi poprzez poślizg i bliźniakowanie [116, 119, 148].

Poślizg powstaje na skutek działania sił zewnętrznych, które powodują przesunięcie części kryształu względem określonych płaszczyzn krystalograficznych. Przesunięcie części kryształu wywołują zniekształcenia sieci krystalograficznej, powstrzymując ruch poślizgowy, który następnie przechodzi na drugą płaszczyznę

o identycznej orientacji krystalograficznej. Jednakowo powstają nowe płaszczyzny poślizgu odseparowane nieodkształconymi warstwami krystalicznymi rzędu od 0,0001 do 0,01 mm. Metal stawia znikomy opór odkształceniom w obszarze płaszczyzn łatwego poślizgu, czyli z najgęstszym ułożeniem atomów.

Plastyczność metali jest bezpośrednio powiązana z płaszczyznami łatwego poślizgu. Metal jest bardziej plastyczny im w sieci krystalicznej jest więcej systemów płaszczyzn łatwego poślizgu.

Rysunek 6.13 przedstawia odkształcenie za pomocą bliźniakowania, które łatwo zachodzi w metalach o układzie regularnym płasko centrowym oraz heksagonalnym. Powstanie kryształów bliźniaczych polega na przyjmowaniu przez części kryształu położenia będącego zwierciadlanym odbiciem pozostałej części kryształu. Przemieszczenie określonych warstw atomowych jest proporcjonalne do odległości od ich bliźniaczej płaszczyzny [36, 77, 140, 169]. Jednym z rodzajów oddziaływań wywołujących zmiany geometrii powierzchni są odkształcenia plastyczne mikronierówności, które w wyniku ich wzajemnego zahaczania, skutkuje ich spłaszczeniem.

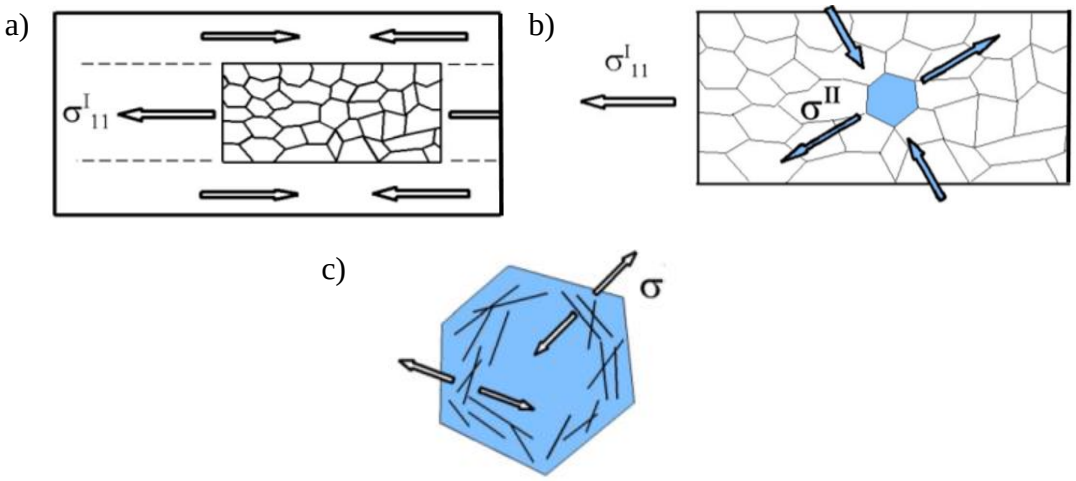


Rys. 6.13. Odkształcenie plastyczne przez bliźniakowanie a) bez odkształcenia, b) kryształ bliźniaczy [140]

W trakcie obróbki mechanicznej na zimno pojawiają się deformacje plastyczne i sprężyste. Precyzyjne obliczenie granicy wielkości odkształceń plastycznych i sprężystych są trudne. W przypadku tego typu obróbki w warstwie wierzchniej występuje odkształcenie plastyczne charakteryzujące się sprężystym stanem naprężeń warstwy [35, 131].

Badany materiał w wyniku zewnętrznego obciążenia ulega deformacji.
W następstwie oddziaływania obciążenia przekraczającego granicę sprężystości w strukturze materiału powstają nieodwracalne odkształcenia plastyczne. Odkształcenia plastyczne w ciałach polikrystalicznych zachodzą w sposób nierównomierny. Naprężenia własne powodują zmiany mikrostruktury, które są spowodowane

nierównomiernym odkształceniem powierzchni materiału [20, 192]. Naprężenia są wywołane poprzez niejednorodne zmiany kształtu ciała, których przyczyną powstania są trwałe odkształcenia. W strukturze krystalicznej w wyniku obciążeń zewnętrznych następuję przesunięcie części sieci. Pola naprężeń własnych formują się na skutek zjawiska dyslokacji, czyli zaburzenia ciągłości uporządkowania sieci. Ze względu na obszar występowania naprężenia własne można podzielić na: makro, sub i mikro naprężenia (rysunek 6.14.).



Rys. 6.14. Rodzaje naprężeń: a) makro naprężenia; b) sub naprężenia; c) mikro naprężenia [199]

Naprężenia własne wywierają wpływ na właściwości mechaniczne, obrabialność materiału, a także podatność na korozję. W trakcie obróbki materiału większa część zjawisk pojawia się na niewielkich głębokościach, z tego powodu naprężenia własne są umiejscowione przede wszystkim w warstwie wierzchniej albo do niej przylegających. Najczęściej w pobliżu warstwy wierzchniej wartość bezwzględna naprężeń własnych jest wyższa i maleje w głąb obrabianego materiału [192].

Proces nagniatającego przepychania ślizgowego wywołuje zgniot, który doprowadza do zagęszczenia dyslokacji, powodując spadek gęstości metalu. Obniżenie gęstości wyrobu jest wywołane wzrostem dyslokacji oraz wakansów. Rozmiar i stopień odkształcenia plastycznego jest argumentowany zmianą objętości liniowych warstw stali, jak i naprężeń warstwy wierzchniej. W rezultacie odkształceń plastycznych w strefie nagniatania ślizgowego powstają nierówności. Nagniatanie ślizgowe stali skutkuje zmianami w twardości warstwy wierzchniej tulei.

Przy nagniataniu ze zwiększeniem odkształcenia wzrasta jego opór. Energia wykorzystana na odkształcenie sprężysto-plastyczne kondensuje się na powierzchni metalu. Energia i naprężenie wewnętrzne użyte na odkształcenie podwyższa opór metalu w trakcie odkształcenia plastycznego w procesie nagniatania [77, 144, 169, 193].

W trakcie obróbki nagniataniem zgniotowi ulegają cienkie warstwy wierzchnie materiału. Głębokości warstwy umocnionej przy nagniatającym przepychaniu ślizgowym zależy od parametrów i przeznaczenia obróbki. Po obróbce zmienia się względny przyrost twardości oraz głębokości utwardzenia. Zjawisko umocnienia metalu przy powierzchniowym zgniocie na zimno jest skomplikowanym procesem fizykalno-chemicznym. W oparciu o teorię dyslokacji umocnienie powstaje na skutek lawinopodobnego rozwoju dyslokacji. Defekt siatki krystalicznej metalu tworzy się obok linii przesunięć i jest hamowany przez przeszkody formujące się podczas deformacji. Zmniejszenie objętości metalu przez rozdrobnienie zlokalizowane między liniami przesunięć, zniekształcenie płaszczyzn przesunięcia oraz nagromadzenie zniszczonych wyrobów siatki krystalicznej doprowadza do zwiększenia chropowatości w płaszczyznach przesunięć, a co za tym idzie przyrostu stopnia umocnienia materiału. W procesach kształtowania plastycznego metali pojawiają się odkształcenia skończone [46, 115, 193].

Metal, który został poddany odkształceniu sprężysto-plastycznemu na zimno umacnia się, wywołując zmianę własności fizycznych i mechanicznych. Wzrost stopnia zgniotu skutkuje przybliżaniem granic plastyczności do ekstremum granic wytrzymałości. W przypadku przekroczenia pewnego stopnia odkształcenia uszkodzenie warstwy wierzchniej materiału dokonuje się bez płynięcia plastycznego. Proces umocnienia jest ograniczony najwyższym dla metalu stopniem odkształcenia, objawiający się deformacją warstwy wierzchniej. Przekroczenie maksymalnej granicy wywołuje zbyt duży zgniot, a także rozdzielenie warstwy w postaci falistości powierzchni, łuszczenie i spadek wzrostu twardości [77].

7. Wyniki badań dla analizowanych próbek stali

Do przeprowadzenia badań inżynierskich CAD użyto programu SOLIDWORKS 2019. Program pozwala na projektowanie, tworzenie dokumentacji rysunkowej, złożeń, modelowanie, a także uproszczonej analizy MES.

Analiza numeryczna konstrukcji została wykonana w programie Forge NxT 2.1 z wykorzystaniem pakietu komercyjnego, opierając się na teorii elementów skończonych. Dyskretyzację przeprowadza się na lokalnie niewielkich obszarach.

7.1. Analiza numeryczna nagniatającego przepychania ślizgowego

W tej części opracowania sprecyzowano model rozkładu naprężeń własnych dla ciał sprężysto–plastycznych po procesie nagniatania przy użyciu metody MES.

W pracy zaprezentowano przykładowe wyniki analizy numerycznej dla modeli współpracujących narzędzi nagniatających. Analiza teoretyczna procesów nagniatania została przeprowadzona metodą analityczną, a także numeryczną.

Przez wzgląd na osiowosymetryczny charakter nagniatania zaprezentowano wybrane rodzaje badań symulacji komputerowych na przekroju wzdłużnym w połowie tulei.

Symulacje komputerowe przy zastosowaniu teorii elementów skończonych umożliwiają analizę zmian w warstwie wierzchniej na bazie modeli przestrzennych 3D. Na podstawie wyników uzyskanych w programie FORGE NxT 2.1 sporządzono wykresy zależności różnego rodzaju badań dla odkształceń sprężysto–plastycznych.

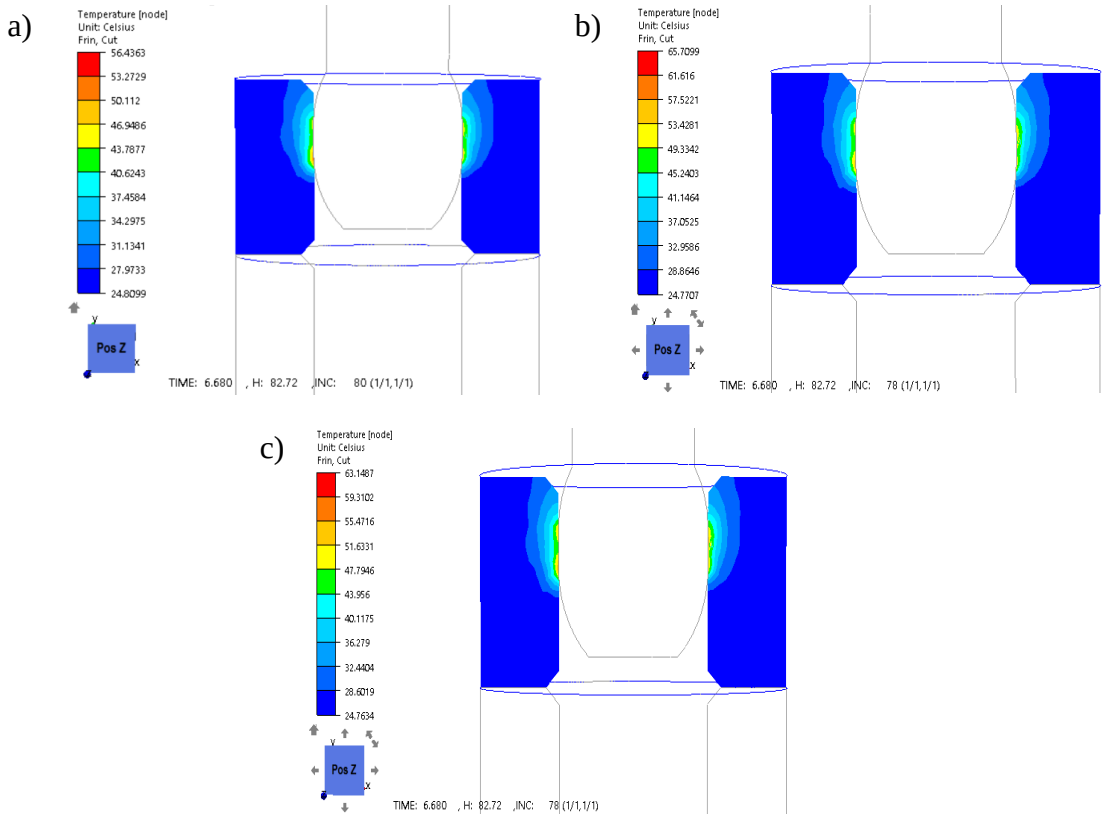
7.1.1. Rozkład temperatur

Pierwszym rodzajem przeprowadzanych badań była analiza rozkładu temperatury. W przypadku wymiaru średnicy wewnętrznej tulei Ø21,70 mm, Ø21,75 mm, Ø21,80 mm, Ø21,85 mm odnotowano trend wzrostowy wartości dla każdej ze stali. Natomiast dla wymiaru wewnętrznego tulei Ø21,90 mm i Ø21,95 mm po przekroczeniu prędkości nagniatania od 5 mm/s dla stali C45 wartości nie odbiegają od siebie znacząco.

Po zrealizowaniu symulacji komputerowych w programie FORGE NxT 2.1 procesu nagniatającego przepychania ślizgowego w strefie odkształcenia określono rozkład temperatury na powierzchni kontaktu nagniataka trzpieniowego z wewnętrzną ścianą tulei. Maksymalny wzrost temperatury wyznaczono w odległości 0,55 mm.

Wzrost tensora naprężeń własnych oraz odkształceń jest wywołany działaniem sił nacisku na wewnętrznej powierzchni tulei, powodując wzrost gradientu temperatury na wewnętrznej ściance tulei. Praca odkształcenia plastycznego w strefie odkształcenia skutkuje wydzieleniem ciepła. W wyniku pracy odkształcenia i tarcia obu elementów w warstwie wierzchniej materiału podczas intensywnego rozwoju powierzchniowej obróbki plastycznej w obszarze styku narzędzia następuję czasowy wzrost temperatury.

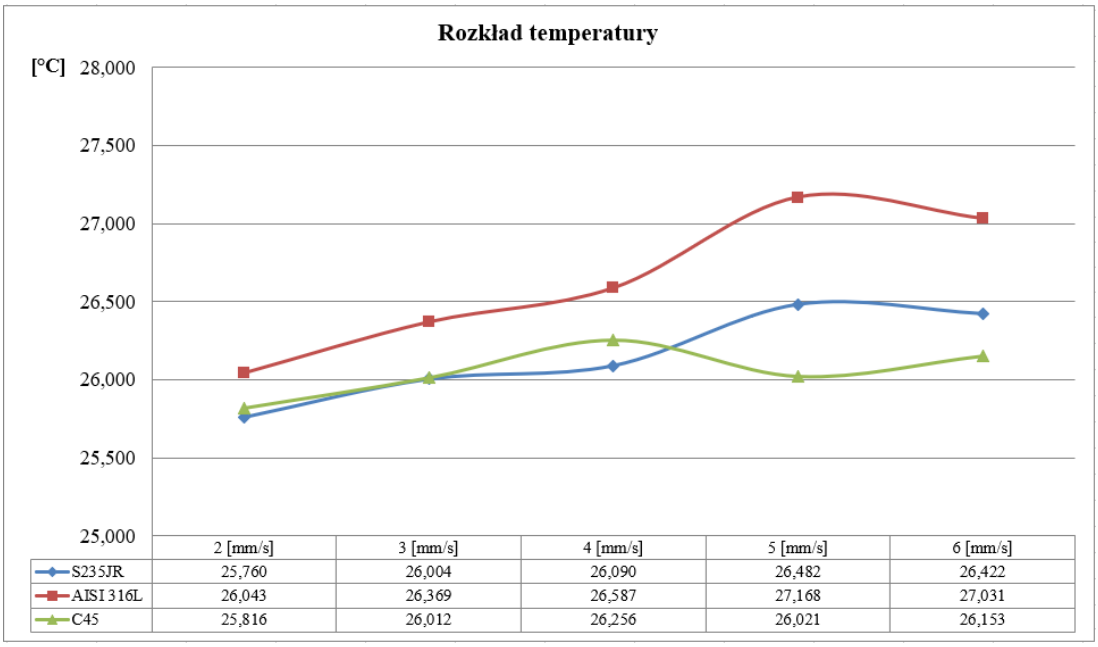
Na rysunku 7.1 przedstawiono wybrany rozkład temperatury dla odkształcenia względnego ε_{np}= 0,92% dla średnicy nagniataka trzpieniowego d= 22 mm przy wcisku nagniatania w= 0,20 mm.



Rys. 7.1. Rozkład temperatury uzyskany w symulacji komputerowej nagniatającego przepychania ślizgowego podczas obróbki na zimno dla: a) stali S235JR; b) stali AISI 316L; c) stali C45

W przypadku wyników zamieszczonych na rysunku 7.1 po procesie nagniatania w miejscu kontaktu obrabianych narzędzi dla stali S235JR temperatura wynosi 50,1°C, dla stali AISI 316L 57,5°C, a dla stali C45 51,6°C.

Na rysunku 7.2 zaprezentowano przykładowy wykres wpływu prędkości nagniatającego przepychania ślizgowego na rozkład temperatury po procesie nagniatania dla nagniatanego elementu o wymiarze średnicy wewnętrznej Ø21,75 mm.



	2 [mm/s]	3 [mm/s]	4 [mm/s]	5 [mm/s]	6 [mm/s]
S235JR	25,760	26,004	26,090	26,482	26,422
AISI 316L	26,043	26,369	26,587	27,168	27,031
C45	25,816	26,012	26,256	26,021	26,153

Rys. 7.2. Wykres przedstawia wpływ prędkości nagniatającego przepychania ślizgowego na rozkład temperatury dla stali S235JR, AISI 316L i C45 o średnicy nagniataka trzpieniowego Ø 22mm dla wcisku nagniatania w= 0,25 mm po procesie nagniatania

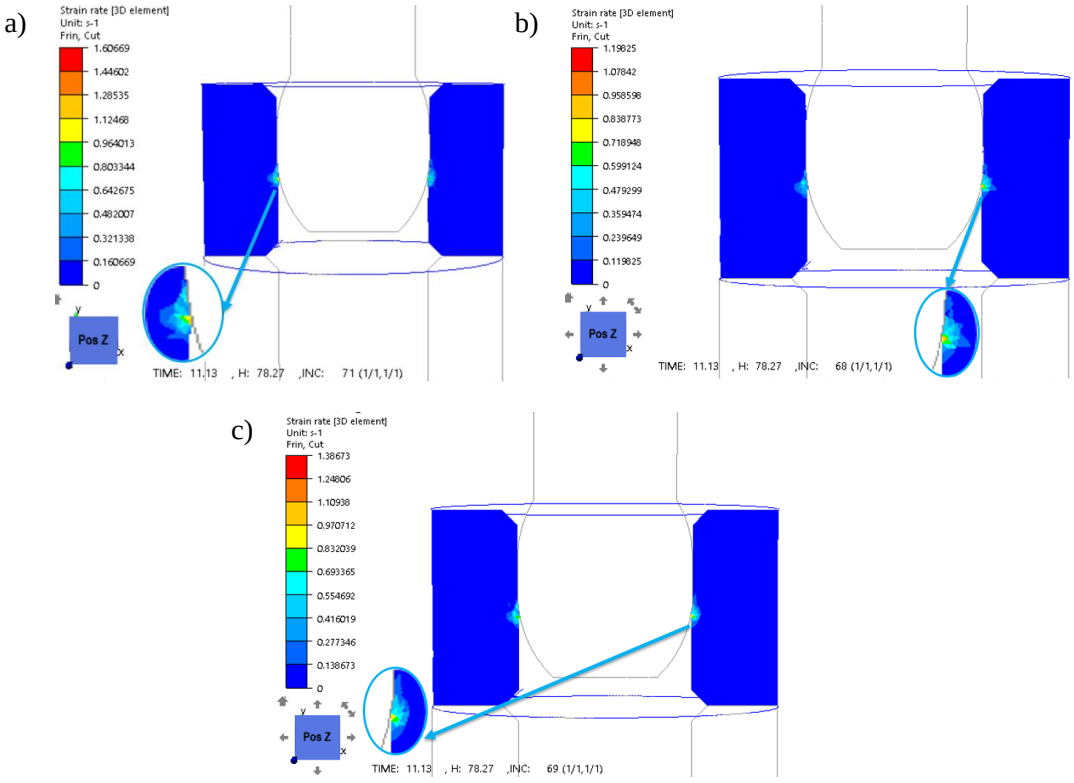
Największe wartości temperatury odczytano w strefie kontaktu narzędzi, natomiast były one tym wyższe im większa była prędkość nagniatania. Uzyskane wartości dla trzech rodzajów stali są zbliżone, natomiast punktowa wartość w miejscu styku dla stali AISI 316 L wynosi 53,43°C, dla C45 51,36°C, a dla S235JR 50,11°C.

7.1.2. Rozkład prędkości odkształcenia

Po wykonaniu analizy numerycznej w programie FORGE NxT 2.1 procesu nagniatającego przepychania ślizgowego określono rozkład prędkości odkształcenia (rysunek 7.3).

W tej części pracy opracowano analizę rozkładu prędkości odkształceń. W przypadku wymiaru średnicy wewnętrznej tulei Ø21,70 mm, Ø21,75 mm, Ø21,80 mm, Ø21,90 mm odnotowano trend wzrostowy wartości prędkości odkształceń dla każdego rodzaju stali. Natomiast dla wymiaru wewnętrznego tulei Ø21,85 mm i Ø21,95 mm po przekroczeniu prędkości nagniatania 5 mm/s wartości dla wszystkich rodzajów stali maleją.

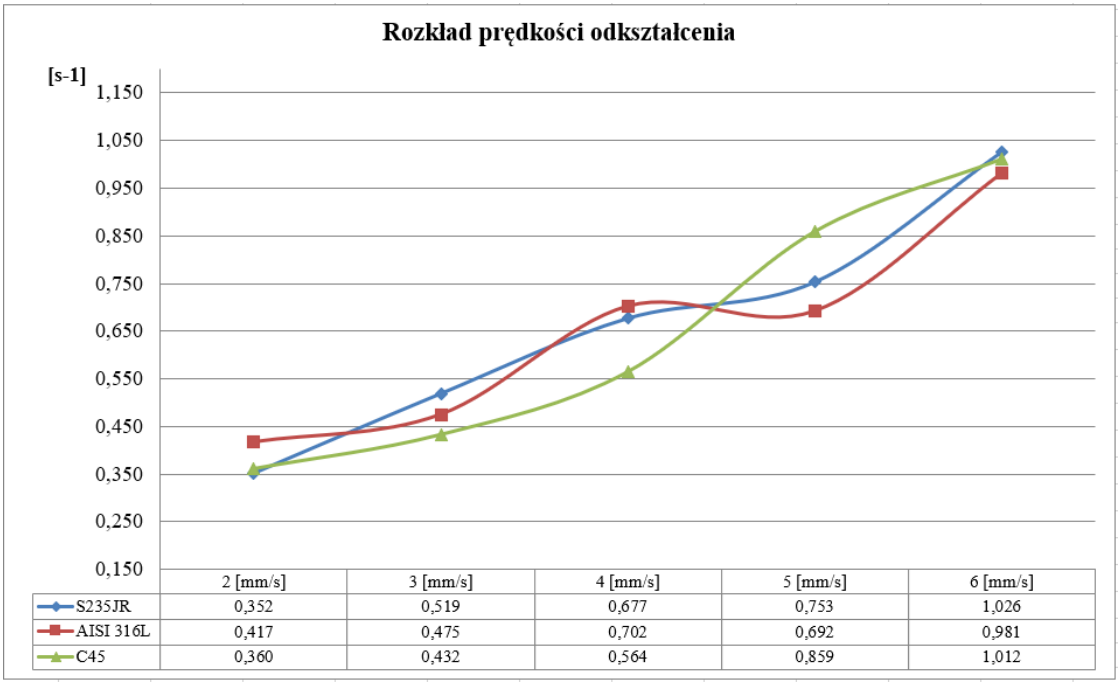
Prędkość odkształcenia osiąga niższe wartości dla większych wartości średnic. Natomiast dla mniejszych średnic przyjmuję większe wartości. Proces wynika ze względu na zmniejszenie powierzchni obszaru odkształcenia na styku nagniataka trzpieniowego i wewnętrznej ściany tulei. Rozkład w największym stopniu jest widoczny na powierzchni styku odkształcanej tulei z elementem nagniatającym.



Rys. 7.3. Rozkład prędkości odkształcenia uzyskany w symulacji komputerowej nagniatającego przepychania ślizgowego podczas obróbki na zimno dla: a) stali S235JR; b) stali AISI 316L; c) stali C45

Prezentowane wyniki numerycznego modelowania rozkładu prędkości odkształcenia nagniatającego przepychania ślizgowego dla wcisku nagniatania w= 0,30 mm przy prędkości przepychania narzędzia 2 mm/s. Po nagniatającym przepychaniu ślizgowym

uzyskano następujące wartości dla stali S235JR równe 1,1248 s^{-1}, dla stali AISI 316L o wartości 0,8388 s^{-1}, dla stali C45 równe 0,9707 s^{-1}.



	2 [mm/s]	3 [mm/s]	4 [mm/s]	5 [mm/s]	6 [mm/s]
S235JR	0,352	0,519	0,677	0,753	1,026
AISI 316L	0,417	0,475	0,702	0,692	0,981
C45	0,360	0,432	0,564	0,859	1,012

Rys. 7.4. Wykres przedstawia wpływ prędkości nagniatającego przepychania ślizgowego na rozkład prędkości odkształcenia dla stali S235JR, AISI 316L i C45 o średnicy nagniataka trzpieniowego Ø 22mm dla wcisku nagniatania w= 0,10 mm po procesie nagniatania

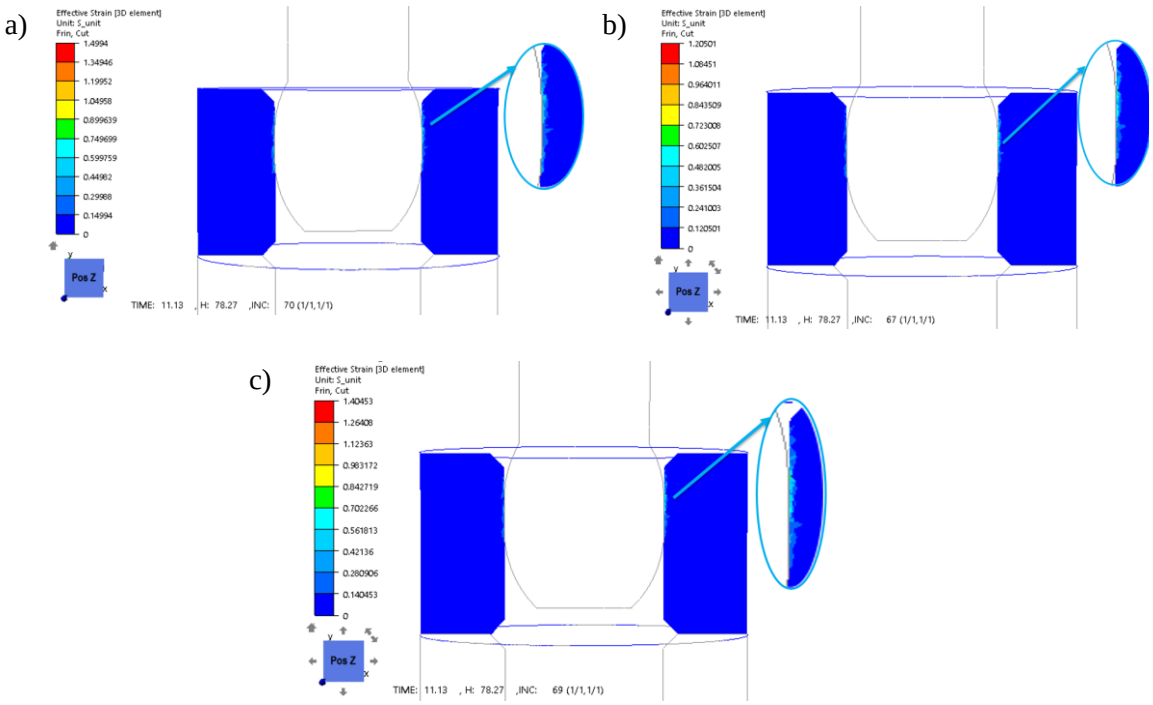
Na rysunku 7.4 przedstawiono przykładowy wykres wpływu prędkości nagniatającego przepychania ślizgowego na rozkład prędkości odkształcenia dla stali S235JR, AISI 316L i C45 dla nagniatanego elementu o wymiarze średnicy wewnętrznej Ø21,90 mm. Na wartość tego badania ma wpływ materiał, tarcie, parametry oraz wielkość i kształt nagniatanego materiału.

Najniższe wartości zaobserwowano przy prędkości nagniatania 2 mm/s dla stali S235JR 0,352 s^{-1}, stali C45 o wartości 0,360 s^{-1} i 0,417 s^{-1} dla stali AISI 316L. Na wykresie można zauważyć, że ze wzrostem prędkości nagniatania gwałtownie rośnie rozkład prędkości odkształcenia, rosnąc aż osiągnęła najwyższą wartość dla stali S235JR o wartości 1,026 s^{-1}, dla stali C45 1,012 s^{-1} i AISI 316L 0,981 s^{-1}.

7.1.3. Intensywność odkształcenia

W tej części pracy przeprowadzono analizę intensywność odkształceń. Dla każdego rodzaju stali o wymiarze średnicy wewnętrznej tulei Ø21,70 mm, Ø21,75 mm, Ø21,80 mm, Ø21,85 mm zaobserwowano trend wzrostowy wartości intensywności odkształcenia. Jednak dla wszystkich stali o wymiarze wewnętrznym tulei Ø21,90 mm i Ø21,95 mm odnotowano tendencję spadkową. Wyniki uzyskane w programie FORGE NxT 2.1. dla dwóch najmniejszych wcisków nagniatania są obciążone błędami wynikłymi ze złożonych modeli obliczeniowych wybranego obszaru pomiarowego. Przy tak małym wcisku nagniatania i takiej prędkości nagniatania może pojawić się niestabilność pomiarowa, a sama tuleja może ulec rozpęczaniu.

Naprężenia własne w procesie nagniatania kształtują technologiczną warstwę wierzchnią. Intensywność odkształceń przyjmuję większe wartości dla małych średnic elementów nagniatających, natomiast dla większych średnic przyjmują mniejsze wartości. Wartości intensywności odkształcenia rozchodzą się gradientowo wewnątrz powierzchni materiału. W procesie nagniatającego przepychania ślizgowego wartość intensywności odkształcenia zależy od wcisku nagniatania. Parametr intensywność odkształcenia rośnie ze zwiększeniem wcisku nagniatania od wewnętrznej strony w warstwie wierzchniej w obszarze styku z nagniatakiem. Zastosowanie mniejszej średnicy tulei skutkuje wzrostem wartości intensywności odkształcenia. Natomiast dla większych wartości średnicy nagniatanych próbek intensywność odkształcenia ma mniejsze wartości. Specyfika stanu odkształcenia jest uzależniona od stanu naprężenia umiejscowionego w warstwie wierzchniej nagniatanej próbki.

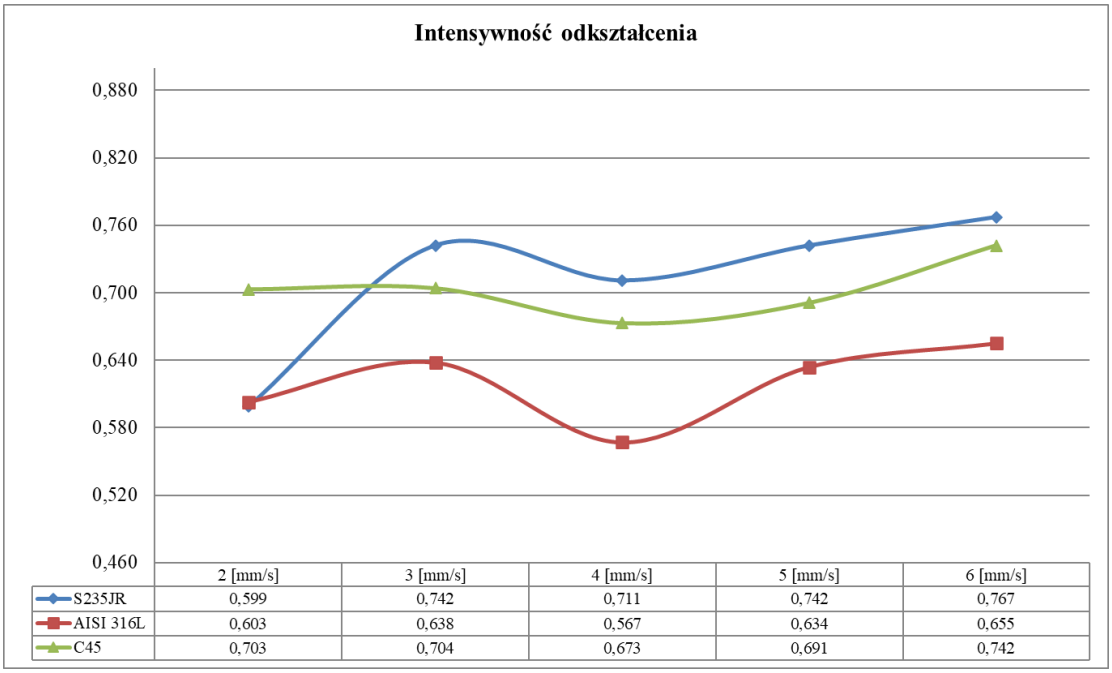


Rys. 7.5. Intensywność odkształcenia uzyskana w symulacji komputerowej nagniatającego przepychania ślizgowego podczas obróbki na zimno dla: a) stali S235JR; b) stali AISI 316L; c) stali C45

Prezentowane wyniki (rysunek 7.5) numerycznego modelowania intensywności odkształcenia nagniatającego przepychania ślizgowego dla średnicy nagniataka trzpieniowego Ø 22mm dla wcisku nagniatania w= 0,20 mm przy prędkości przepychania narzędzia 2 mm/s. Po nagniatającym przepychaniu ślizgowym uzyskano następujące wartości dla stali S235JR 0,149, dla stali AISI 316L o wartości 0,121, dla stali C45 o wartości 0,140.

Na rysunku 7.6. zaprezentowano przykładowy wykres dla nagniatanego elementu o wymiarze średnicy wewnętrznej Ø21,80 mm.

Na wykresie (rysunek 7.6) widać, że wartość intensywności odkształcenia są stabilne, a ze wzrostem prędkości narzędzia nagniatającego osiągając podobne wartości maksymalne dla S235JR i C45. Natomiast krzywa intensywności odkształcenia w funkcji prędkości nagniatania dla stali AISI 316L minimalnie wzrasta. Stal S235JR jest najbardziej podatna na działanie intensywności odkształceń i najszybciej ulega umocnieniu.



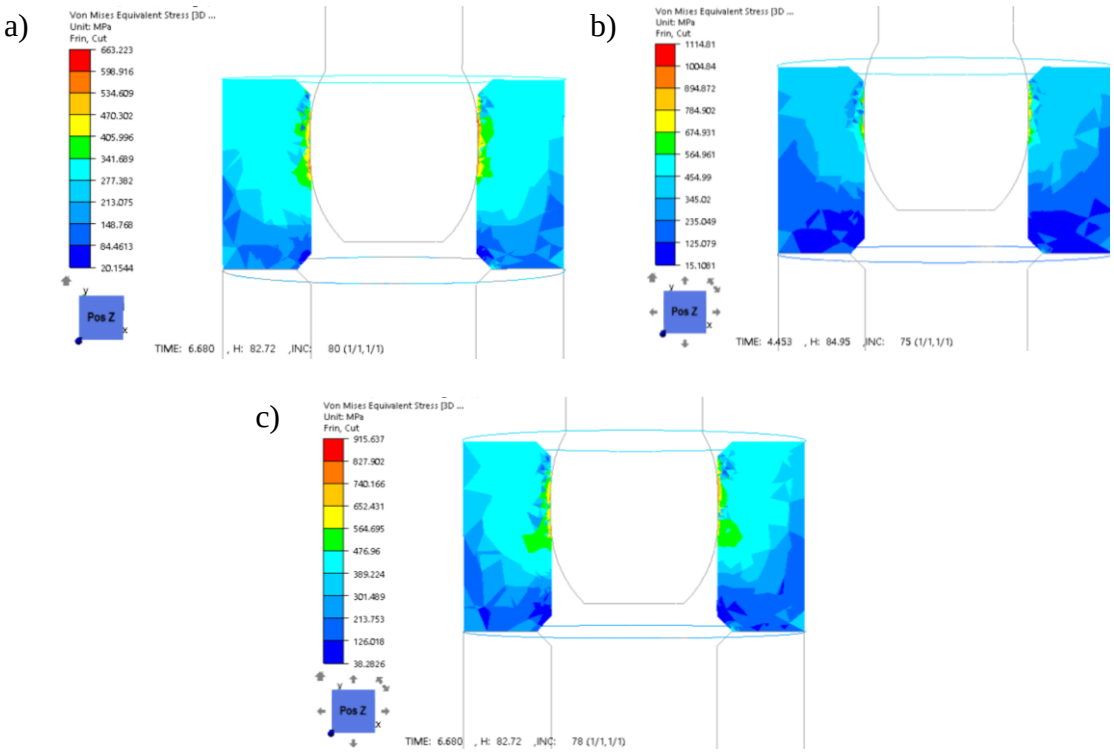
Rys. 7.6. Wykres przedstawia wpływ prędkości nagniatającego przepychania ślizgowego na intensywność odkształcenia dla stali S235JR, AISI 316L i C45 o średnicy nagniataka trzpieniowego Ø 22mm dla wcisku nagniatania w= 0,20 mm po procesie nagniatania

Najniższe wartości zaobserwowano przy prędkości nagniatania 4 mm/s dla stali AISI 316L o wartości 0,567, dla S235JR o wartości 0,711 i dla C45 o wartości 0,673. Na wykresie można zauważyć, że ze wzrostem prędkości nagniatania rośnie intensywność odkształcenia, rosnąc aż osiągnęła najwyższą wartość dla stali S235JR o wartości 0,767, a dla stali C45 0,742, intensywność odkształceń najmniej zwiększyła się dla AISI 316L do wartości 0,655.

7.1.4. Intensywność naprężeń

W tej części pracy badano intensywność naprężeń. Analizując naprężenia własne bada się ich następstwa tj. odkształcenie. Dla każdego wymiaru średnicy wewnętrznej tulei Ø21,70 mm, Ø21,75 mm, Ø21,80 mm, Ø21,85 mm, Ø21,90 mm i Ø21,95 mm zaobserwowano trend wzrostowy. Natomiast dla wszystkich stali o wcisku nagniatania o 0,05 mm, 0,15 mm i 0,25 mm nie odnotowano znaczącej różnicy w wartościach. Najbardziej widoczne rozbieżności są widoczne schodząc z pełnych wymiarów o 0,10 mm, 0,20 mm i 0,30 mm.

Intensywność naprężeń podobnie jak w pozostałych rodzajach badań zależy od wewnętrznej średnicy nagniatanego elementu. Wartości dla intensywności naprężeń rozprzestrzeniają się gradientowo w głąb powierzchni materiału. Analogicznie jak w przypadku naprężeń średnich, intensywność naprężenia dla małych wartości średnic tulei osiąga największe wartości. Najwyższe wartości intensywności naprężeń występują na głębokości obrabianej powierzchni w pobliżu połowy grubości nagniatanej tulei. Intensywność naprężeń rośnie wraz ze wzrostem wartości wcisku.



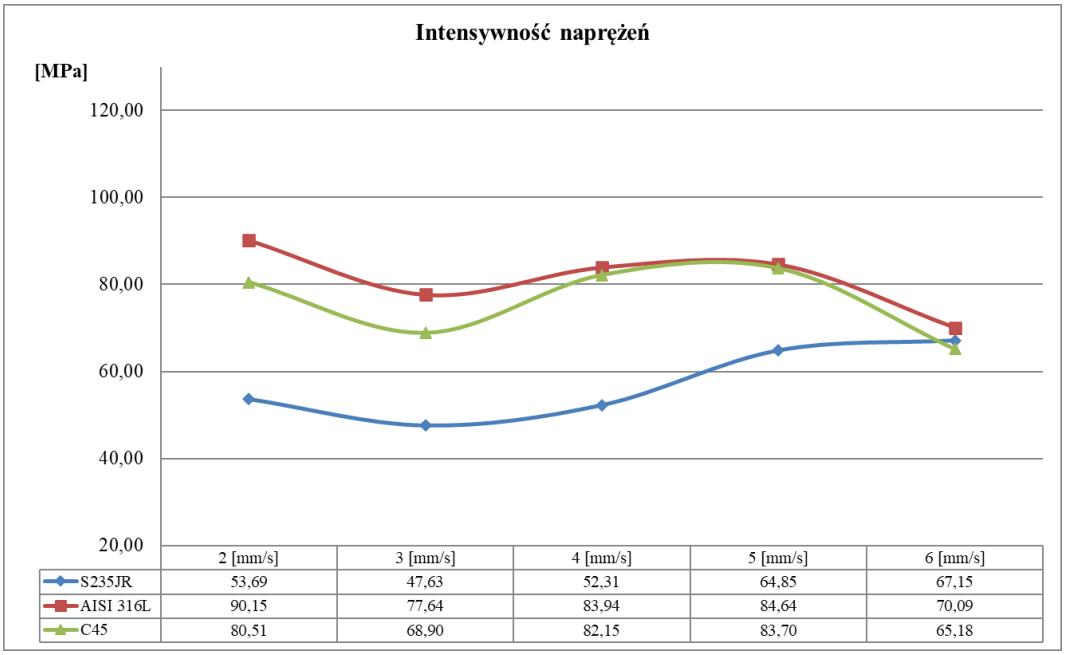
Rys. 7.7. Intensywność naprężeń uzyskana w symulacji komputerowej nagniatającego przepychania ślizgowego podczas obróbki na zimno dla: a) stali S235JR; b) stali AISI 316L; c) stali C45

Analizując uzyskane wyniki (rysunek 7.7) można wywnioskować, że wraz ze zmniejszeniem średnicy wewnętrznej tulei oraz zwiększeniem wcisku zaobserwowano wzrost intensywności naprężeń.

Prezentowane wyniki numerycznego modelowania intensywności naprężeń nagniatającego przepychania ślizgowego dla średnicy nagniataka trzpieniowego Ø 22mm dla wcisku nagniatania w= 0,20 mm przy prędkości przepychania narzędzia 3 mm/s. Po nagniatającym przepychaniu ślizgowym oceniam wyniki, które dotyczą

największej powierzchni tulei, których wartości dla stali S235JR 67,15 MPa, dla stali AISI 316L o wartości 90,15 MPa, dla stali C45 o wartości 83,70 MPa. Natomiast najwyższe wyniki uzyskano w punkcie styku, nie przekroczyły one granicy plastyczności i wynosiły dla stali S235JR 598,92 MPa, dla stali AISI 316L o wartości 784,90 MPa oraz dla stali C45 652,43 MPa.

Na rysunku 7.8. zaprezentowano przykładowy wykres dla nagniatanego elementu o wymiarze średnicy wewnętrznej Ø21,80 mm.



	2 [mm/s]	3 [mm/s]	4 [mm/s]	5 [mm/s]	6 [mm/s]
S235JR	53,69	47,63	52,31	64,85	67,15
AISI 316L	90,15	77,64	83,94	84,64	70,09
C45	80,51	68,90	82,15	83,70	65,18

Rys. 7.8. Wykres przedstawia wpływ prędkości nagniatającego przepychania ślizgowego na intensywność naprężeń dla stali S235JR, AISI 316L i C45 o średnicy nagniataka trzpieniowego Ø 22mm dla wcisku nagniatania w= 0,20 mm po procesie nagniatania

Najniższe wartości intensywności naprężeń zauważono dla stali S235JR o wartości 47,63 MPa, natomiast dla pozostałych stali minimalna wartość jest znacznie wyższa i wynosi dla stali C45 65,18 MPa i 70,09 MPa dla AISI 316L. Zaobserwowano podobieństwo tendencji wzrostu dla stali AISI 316L i C45, natomiast ze zwiększeniem prędkości nagniatania dla stali S235JR wzrasta intensywność naprężeń. Najwyższe wartości zaobserwowano dla stali AISI 316L o wartości 90,15 MPa, dla stali C45 83,70 MPa i dla stali S235JR o wartości 67,15 MPa. Wartość intensywności naprężenia są stabilne.

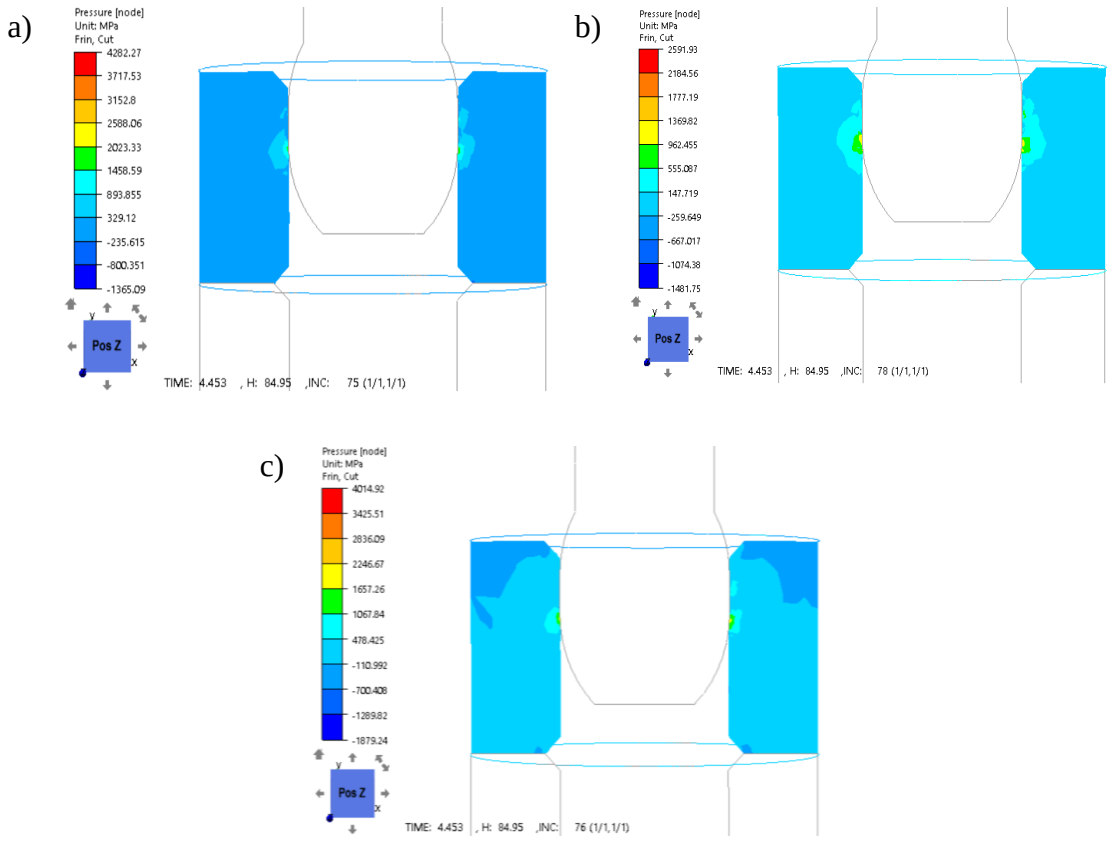
7.1.5. Naprężenia średnie

Obróbkę nagniatającego przepychania ślizgowego w warstwie wierzchniej cechują naprężenia własne ściskające, a ich maksymalne wartości umiejscowione są na powierzchni albo w nieznacznej odległości od jej powierzchni.

Stosowanie metody elementów skończonych umożliwia wyznaczenie parametrów i zjawisk występujących po obróbce nagniataniem w warstwie wierzchniej. W warstwie wierzchniej naprężenia ściskające ograniczają działanie czynników korozyjnych w głąb materiału spowalniając korozję materiału. Podczas naprężeń ściskających powstaje zgniot warstwy wierzchniej powodując zmniejszenie chropowatości obrobionej powierzchni i minimalizację jej uszkodzenia, jak również zużycie tribologiczne. Wzrost odporności korozyjnej następuję poprzez spadek wysokości oraz ilości nierówności powierzchni, wpływając na zmniejszenie czynnej powierzchni korodującej. W zależności od zgniotu oraz wygładzenia określa się wielkość odporności na korozję [9, 23, 44, 183].

W tej części pracy analizowano naprężenia średnie. Dla wszystkich wymiarów średnicy wewnętrznej tulei Ø21,80 mm, Ø21,85 mm, Ø21,90 mm i Ø21,95 mm zaobserwowano tendencje wzrostową. Natomiast dla stali C45 o wcisku nagniatania o 0,25 mm i 0,30 mm zaobserwowano minimalny spadek wartości, jednak nie odnotowano znaczącej różnicy w wynikach.

Naprężenia średnie zależą od średnicy wewnętrznej nagniatanego elementu. Najwyższe wartości zaobserwowano w przypadku mniejszych średnic wewnętrznych nagniatanego elementu.

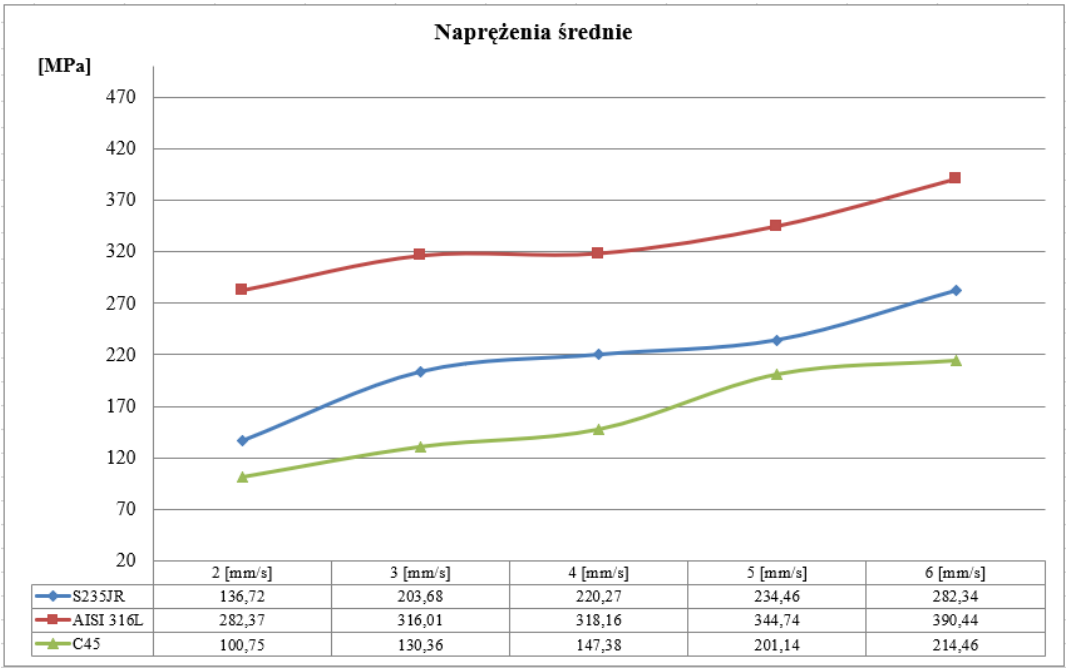


Rys.7.9. Naprężenia średnie uzyskane w symulacji komputerowej nagniatającego przepychania ślizgowego dla: a) stali S235JR; b) stali AISI 316L; c) stali C45

Prezentowane wyniki (rysunek 7.9) numerycznego modelowania rozkładu prędkości odkształcenia nagniatającego przepychania ślizgowego dla średnicy nagnitaka trzpieniowego Ø22 mm dla wcisku nagniatania w= 0,20 mm przy prędkości przepychania narzędzia 6 mm/s.

Po nagniatającym przepychaniu ślizgowym oceniam wyniki, które dotyczą największej powierzchni tulei, których wartości dla stali S235JR 329,12 MPa, dla stali AISI 316L o wartości 555,08 MPa, dla stali C45 o wartości 478,42 MPa.

Na rysunku 7.10. zaprezentowano przykładowy wykres naprężeń średnich dla nagniatanego elementu o wymiarze średnicy wewnętrznej Ø21,80 mm.



	2 [mm/s]	3 [mm/s]	4 [mm/s]	5 [mm/s]	6 [mm/s]
S235JR	136,72	203,68	220,27	234,46	282,34
AISI 316L	282,37	316,01	318,16	344,74	390,44
C45	100,75	130,36	147,38	201,14	214,46

Rys. 7.10. Wykres przedstawia wpływ prędkości nagniatającego przepychania ślizgowego na naprężenia średnie dla stali S235JR, AISI 316L oraz C45 o średnicy nagniataka trzpieniowego Ø 22mm dla wcisku nagniatania w= 0,20 mm po procesie nagniatania

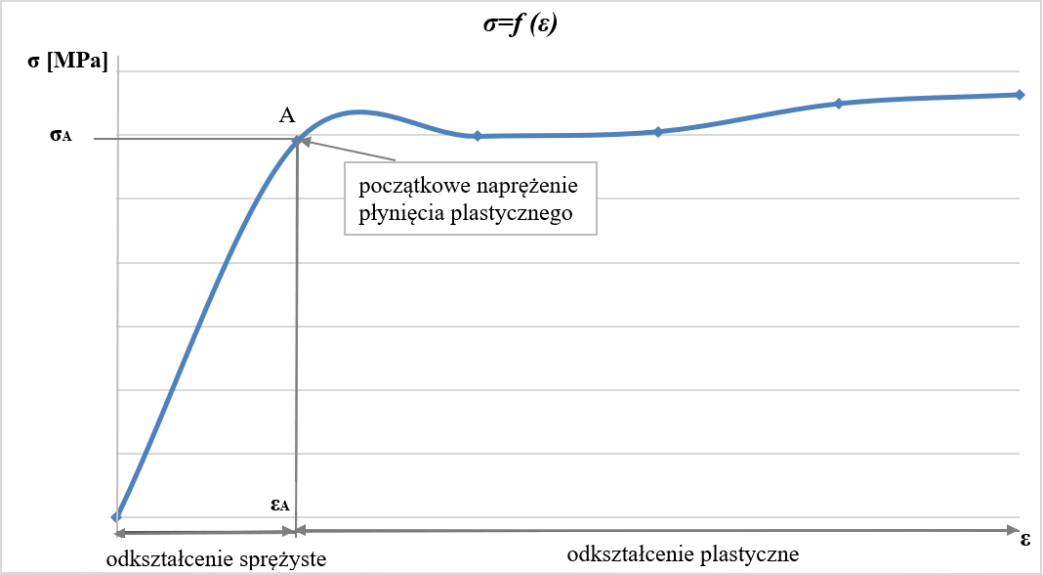
Najniższe wartości naprężeń średnich zaobserwowano dla stali C45 o wartości 100,75 MPa, natomiast dla pozostałych stali minimalna wartość wynosi dla stali S235JR wynosi 136,72 MPa, a dla AISI 316L 282,37 MPa. Najwyższe naprężenia formują się w miejscu największych odkształceń, czyli w miejscu zmiany wymiaru średnicy. Największą wartość naprężeń średnich uzyskano dla stali AISI 316L równą 390,44 MPa, dla stali S235JR 282,34 MPa, natomiast maksymalna wartość stali C45 wynosiła 214,46 MPa.

Dla wszystkich stali zaobserwowano wzrostową tendencję, a ze zwiększeniem prędkości nagniatania wzrastają naprężenia średnie. Widoczne jest znaczne podobieństwo wartości między stalami S235JR i C45, a dla stali AISI 316L odnotowano dużą różnicę w wartościach.

7.2. Wykres zależności odkształcenia sprężysto–plastycznego

W teorii sprężystości i plastyczności zależność sprężysto–plastyczna ma charakter liniowy. Dla materiałów w stanie sprężystym zależności między naprężeniem i odkształceniem mają charakter nieliniowy. Po usunięciu obciążenia

ośrodek ciągły powraca do stanu normalnego, sprzed obciążenia. Odkształcenia sprężyste są stosunkowo niewielkie do odkształceń plastycznych [7, 101, 115].



Rys. 7.11. Wykres krzywej płynięcia materiału sprężysto–plastycznego z umocnieniem nieliniowym

Zależności między tymi badaniami opisuje prawo sprężystości, znane jako prawo Hooke'a [3, 174]. Prawo mówi, że:„ Odkształcenie ciała jest proporcjonalne względem obciążenia, które je wywołało w stanie równowagi tego ośrodka ciągłego".

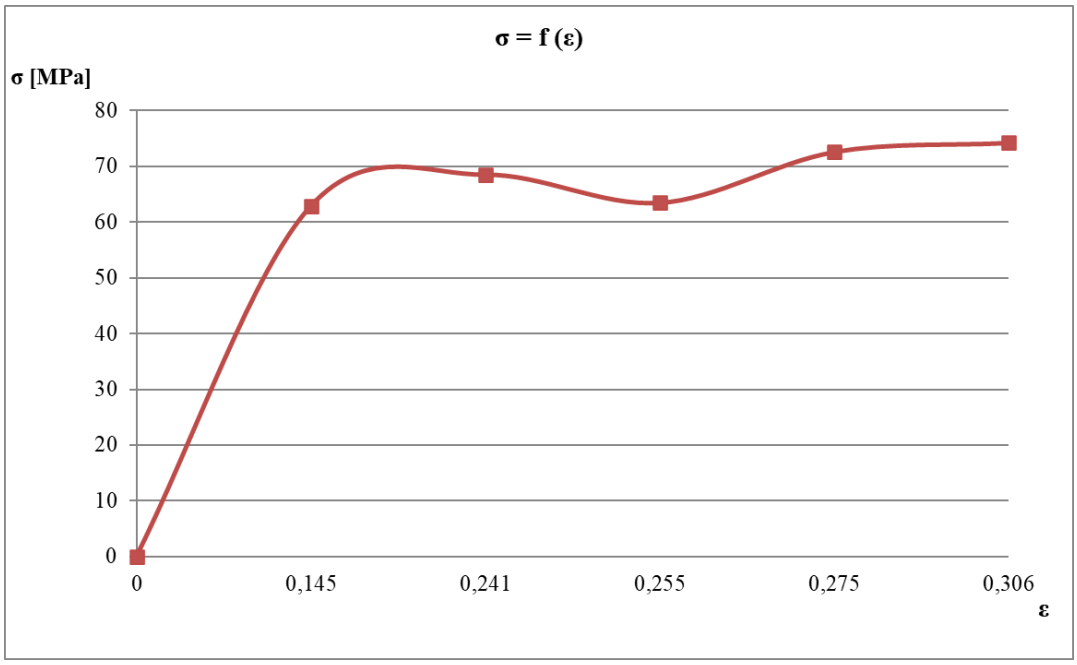
Zaznaczony na wykresie punkt A, oznacza granicę sprężystości (granicę proporcjonalności). Odcinek od początku wykresu do punktu A ma charakter liniowy i przedstawia prawo sprężystości. Zgodnie ze wzorem:

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \cdot \sigma \qquad (7.1)$$

gdzie:

ε– odkształcenie główne, σ– naprężenie główne

Natomiast wskaźniki σ_A i ε_A oznaczają granicę zakresu sprężystego naprężenia i odkształcenia. Z początkiem naprężenia płynięcia plastycznego są zauważalne odkształcenia plastyczne materiału.



Rys. 7.12. Przykładowy model krzywej umocnienia przez odkształcenie dla stali AISI 316L o wymiarze Ø21,95 mm

Stal austenityczna AISI 316L cechowała się podobną charakterystyką do stali C45. Najniższe wartości zaobserwowano dla wymiaru Ø21,95 mm przy intensywności naprężenia $\sigma = 62{,}89$ MPa i intensywność odkształcenia wynosiła $\varepsilon = 0{,}145$, ze zwiększeniem średnicy wewnętrznej do Ø21,70 mm intensywność naprężenia rośnie $\sigma = 98{,}83$ MPa a z nią intensywność odkształcenia do $\varepsilon = 0{,}756$.

Po analizie zależności odkształceń od naprężeń dla stali S235JR, AISI 316L i C45 można zauważyć wzrost ich wartości dla większych średnic wewnętrznych tulei.

Porównując nagniatanie statyczne z dynamicznym, można z pewnością stwierdzić, że nagniatanie ślizgowe zapewnia lepsze właściwości warstwy wierzchniej, a także ją umacnia przez odkształcenie [125]. Umożliwia regulowanie głębokości odkształcenia plastycznego oraz stosowanie supertwardych materiałów lub diamentowych narzędzi.

7.3. Analiza badań eksperymentalnych nagniatającego przepychania ślizgowego

7.3.1. Ocena wcisku nagniatania plastycznego

W celu analizy wyników odkształceń plastycznych przeprowadzono następujące badania: względnego odkształcenia, wcisku nagniatania, bezwzględne odkształcenia plastyczne i sprężyste oraz nacisk jednostkowy nagniatania.

Względne odkształcenie plastyczne nagniatającego przepychania ślizgowego wyrażono wzorem:

$$\varepsilon_{np} = \frac{d-d_0}{d_0} \cdot 100\% \tag{7.2}$$

Bezwzględny wcisk nagniatania:

$$w = d - d_0 \tag{7.3}$$

Bezwzględne odkształcenie sprężyste jest wyrażone równaniem:

$$\Delta d_s = d - d_1 \tag{7.4}$$

Natomiast wynikowe bezwzględne odkształcenie plastyczne:

$$\Delta d = d_1 - d_0 \tag{7.5}$$

gdzie:
d– średnica zewnętrzna nagniataka trzpieniowego [mm],
d_1– średnica wewnętrzna tulei po nagniatającym przepychaniu ślizgowym [mm],
d_0– średnica wewnętrzna tulei przed nagniatającym przepychaniem ślizgowym [mm].

Całkowite odkształcenie nierówności po procesie obróbki poprzedzającej określa się z przybliżonej siły nagniatania, wyliczonej z nacisków jednostkowych nagniatania. W sposób analityczny nacisk jednostkowy nagniatania można obliczyć z równania [11, 43, 116, 117, 132]:

$$q_{nc} = \frac{w}{d_1} \cdot \frac{E}{\frac{D^2+d_0^2}{D^2-d_0^2}+\nu} \tag{7.6}$$

D– średnica zewnętrzna tulei [mm],
E– moduł Younga (współczynnik sprężystości podłużnej) [GPa],

w– wcisk nagniatania [mm],
ν– liczba Poissona.

Tab. 7.1. Wymiary geometryczne i wskaźniki odkształceń plastycznych tulei stalowych po procesie nagniatającego przepychania ślizgowego

Numer	D [mm]	d_1 [mm]	d [mm]	d_0 [mm]	w [mm]	ε_{np} [%]	Δd [mm]	Δd_s [mm]	F [kN]	q_{nc} [MPa]
1	45	21,98	22,02	21,97	0,05	0,23	0,01	0,04	10	250,64
2	45	21,94	22,02	21,92	0,10	0,46	0,02	0,08	20	503,18
3	45	21,98	22,04	21,89	0,15	0,69	0,09	0,06	25	754,29
4	45	21,99	22,02	21,82	0,20	0,92	0,17	0,03	30	1008,01
5	45	21,94	22,03	21,78	0,25	1,15	0,16	0,09	40	1264,85
6	45	22,01	22,04	21,74	0,30	1,38	0,27	0,03	50	1515,34

Z uzyskach wyników można zaobserwować, że czym większy wcisk bezwzględny tym większe odkształcenia plastyczne w nagniatanej próbce. Ze zwiększeniem bezwzględnego wcisku nagniatania wzrasta bezwzględne odkształcenie sprężyste i plastyczne. Poprawę wytrzymałości materiału uzyskuję się poprzez zgniot struktury warstwy wierzchniej materiału w wyniku odkształcenia plastycznego na zimno, które powoduje jej umocnienie i wzrost wytrzymałości. Zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej powstaje poprzez ściskające naprężenia własne w wyniku wzrostu gęstości dyslokacji.

7.3.2. Struktura geometryczna po nagniataniu

Próbki do nagniatającego przepychania ślizgowego zostały wykonane ze stali S235JR, AISI 316L, C45 i poddane procesowi nagniatania. Uzyskane wyniki pomiarów chropowatości przedstawiono w tabelach 7.2–7.4.

Tab. 7.2. Zestawienie wyników pomiarów chropowatości po nagniataniu dla stali S235JR

S235JR	**Ø21,70**	**Ø21,75**	**Ø21,80**	**Ø21,85**	**Ø21,90**	**Ø21,95**
Rt [µm]	6,52	7,81	12,78	13,14	14,24	15,19
Rz [µm]	3,91	3,86	4,68	5,14	4,42	4,24
KRt [µm]	2,72	2,49	1,73	2,52	2,11	1,79
KRz [µm]	2,97	3,34	5,61	4,51	3,48	4,07

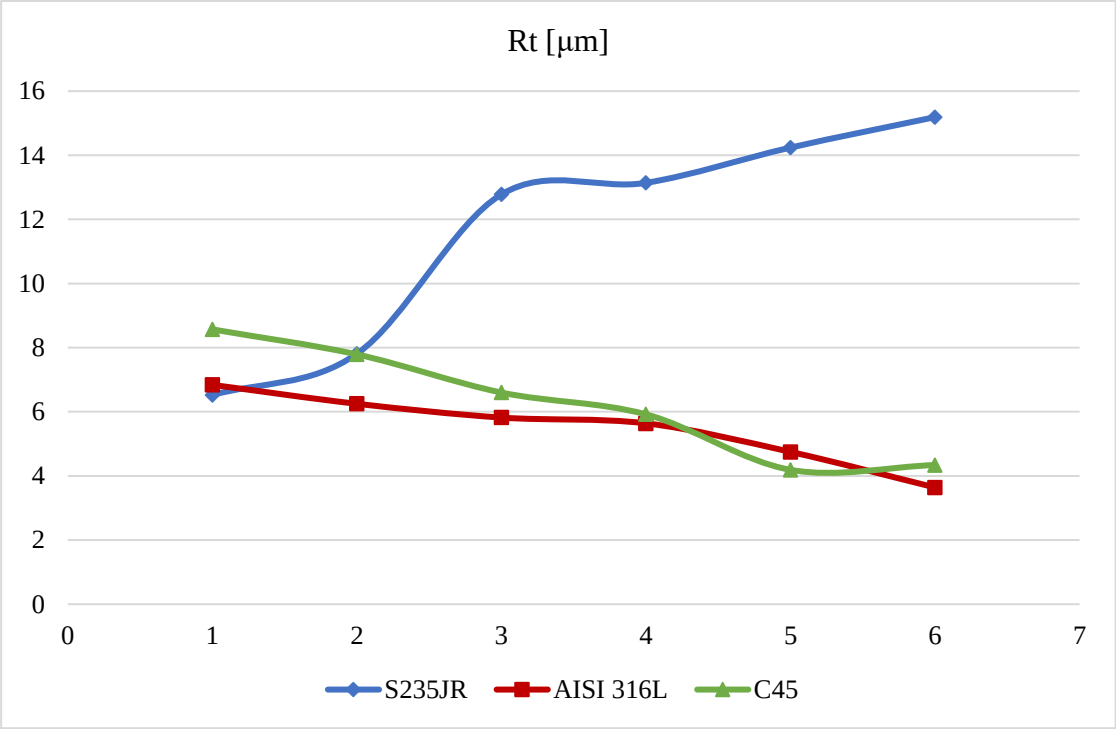
Tab. 7.3. Zestawienie wyników pomiarów chropowatości po nagniataniu dla stali AISI 316L

AISI 316L	Ø21,70	Ø21,75	Ø21,80	Ø21,85	Ø21,90	Ø21,95
Rt [µm]	6,84	6,25	5,82	5,64	4,75	3,64
Rz [µm]	3,69	3,86	3,98	5,14	4,68	4,43
KRt [µm]	2,37	2,53	2,41	2,60	2,37	3,31
KRz [µm]	3,25	3,08	3,65	2,76	2,25	2,51

Tab. 7.4. Zestawienie wyników pomiarów chropowatości po nagniataniu dla stali C45

C45	Ø21,70	Ø21,75	Ø21,80	Ø21,85	Ø21,90	Ø21,95
Rt [µm]	8,57	7,79	6,6	5,92	4,19	4,34
Rz [µm]	3,72	3,14	5,74	5,35	4,62	4,29
KRt [µm]	2,27	2,24	2,47	2,56	2,87	3,17
KRz [µm]	3,66	4,37	2,68	2,77	2,23	2,92

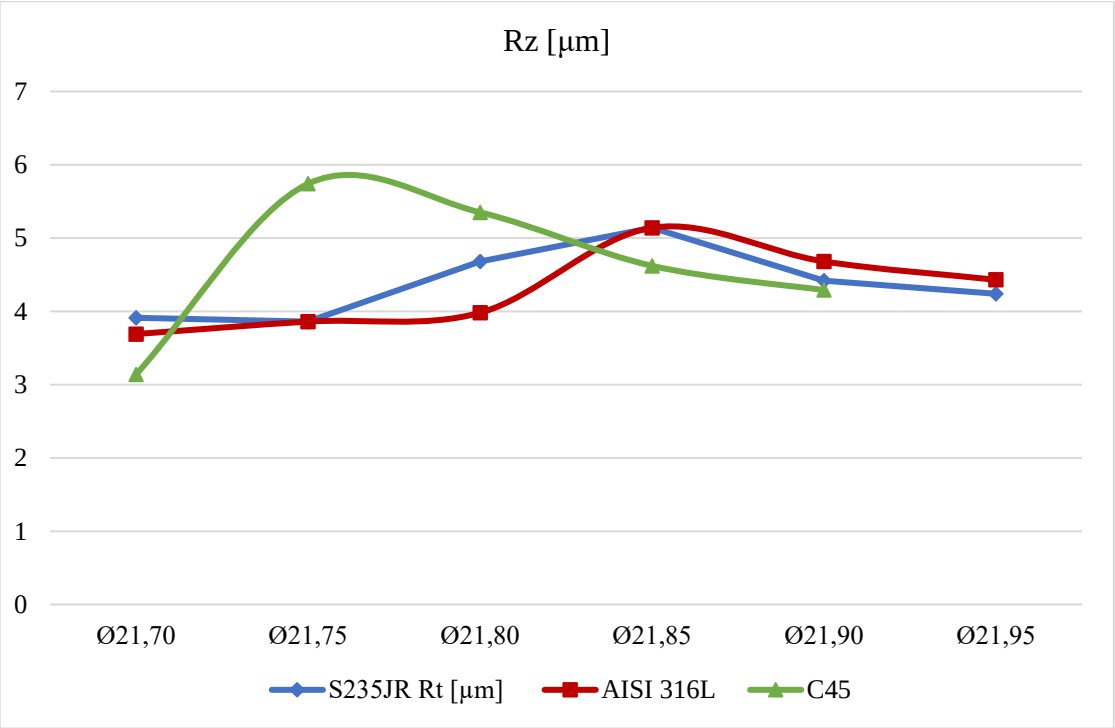
Na rysunku 7.13 zaprezentowano wykres porównujący otrzymane parametry Rt dla poszczególnych rodzajów stali.



Rys. 7.13. Wykres parametru Rt dla wszystkich wariantów badanych materiałów

Najkorzystniejsze zmiany chropowatości powierzchni po procesie nagniatania uzyskano dla stali AISI 316L KRt= 3,31, dla stali C45 KRt=3,17 oraz dla S235JR KRt=2,72.

Na rysunku 7.14 przedstawiono wykres porównujący otrzymane parametry Rz dla poszczególnych rodzajów stali.



Rys. 7.14. Wykres parametru Rz dla wszystkich wariantów badanych materiałów

Najkorzystniejsze zmiany chropowatości powierzchni po procesie nagniatania uzyskano dla stali S235JR KRz=5,61, dla stali C45 KRz=4,37 i dla stali AISI 316L KRz= 3,65. Wartość wskaźników zmniejszenia chropowatości wyższej od 1 wyjaśnia uzyskanie założonego efektu po procesie nagniatania, poprzez wzrost gładkości materiału.

W tym zakresie sił docisku zależność Rt dla stali 316L spada liniowo, przy wartości 8350 N parametr osiąga minimalną wartość Rt= 6,84 µm, dla C45 Rt= 8,57 µm. Dla stali S235JR przy wzroście sił docisku następuję spadek Rt= 15,19 µm.

Dla AISI 316L wzrost sił docisku skutkuje liniowym spadkiem do wartości Rz= 5,14 µm, natomiast dla stali C45 Rz= 5,74 µm. Parametr Rz dla stali S235JR przy zwiększonej sile docisku Rz= 5,12 µm.

Obróbka nagniataniem umożliwiła uzyskanie niższej wartości chropowatości dla każdego z badanych parametrów. Parametry profilu chropowatości Ra zmniejszyły się od 2 do 7–razy, parametr Rt zmalał od 1 do ponad 3–razy, a wartość parametru Rz spadła od 2 do prawie 6–razy.

Natomiast porównując badania dla wszystkich średnic wewnętrznych na każdym materiale największy spadek chropowatości Ra zaobserwowano dla tulei o wymiarze otworu Ø21,70 mm, dla wymiaru otworu Ø21,75 mm i Ø21,80 mm parametr Rt przebiegał podobnie. Dla parametru Rz najkorzystniejsze wyniki uzyskano dla wymiaru Ø21,75 mm oraz Ø21,80 mm. Obróbka gładkościowo–umacniająca umożliwiła uzyskanie niskich wartości parametrów chropowatości dla wszystkich badanych próbek [6, 68, 134].

Na podstawie wzoru (7.7) wyznaczono wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni K_{Ra}:

$$K_{Ra} = \frac{R_a'}{R_a} \tag{7.7}$$

gdzie:

K_{Ra}– wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni,

R_a'– chropowatość powierzchni przed powierzchniową obróbką plastyczną,

Ra– chropowatość powierzchni po powierzchniowej obróbce plastycznej.

Przykładowe obliczenia dla tulei Ø21,70 mm dla S235JR:

$$K_{Ra} = \frac{9{,}88}{1{,}56} = 6{,}33 \tag{7.8}$$

Tab. 7.5. Wyniki obliczeń wskaźnika zmniejszenia chropowatości powierzchni dla nagniatanego elementu ze stali S235JR

Średnica tulei [mm]	**Ø21,70**	**Ø21,75**	**Ø21,80**	**Ø21,85**	**Ø21,90**	**Ø21,95**
Parametr Ra [µm]	0,83	1,33	1,43	1,56	2,36	1,89
K_{Ra}	5,46	3,64	5,90	5,29	2,73	3,19

Tab. 7.6. Wyniki obliczeń wskaźnika zmniejszenia chropowatości powierzchni dla nagniatanego elementu ze stali AISI 316L

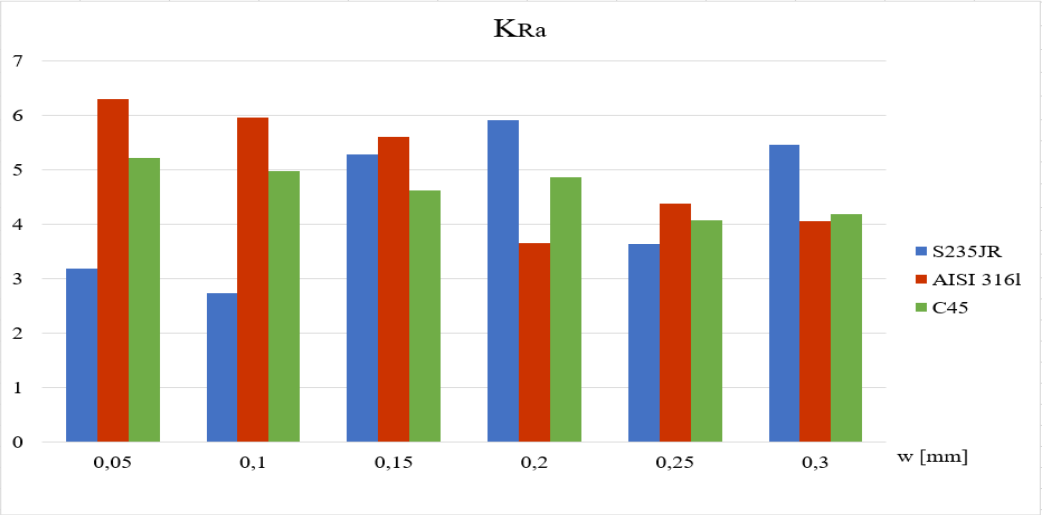
Średnica tulei [mm]	**Ø21,70**	**Ø21,75**	**Ø21,80**	**Ø21,85**	**Ø21,90**	**Ø21,95**
Parametr Ra [µm]	0,55	0,47	0,54	0,36	0,32	0,26
K_{Ra}	4,05	4,38	3,65	5,61	5,97	6,31

Tab. 7.7. Wyniki obliczeń wskaźnika zmniejszenia chropowatości powierzchni dla nagniatanego elementu ze stali C45

Średnica tulei [mm]	Ø21,70	Ø21,75	Ø21,80	Ø21,85	Ø21,90	Ø21,95
Parametr Ra [µm]	0,60	0,55	0,71	0,68	0,45	0,41
K_{Ra}	4,18	4,07	4,86	4,63	4,98	5,22

Powyższe tabele (7.2–7.4) przestawiają zestawienie parametru chropowatości Ra dla trzech rodzajów stali. Z wyników można wywnioskować, że dla większości badań im mniejsza średnica nagniatanego elementu (tulei) tym niższa wartość chropowatości.

Średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości powierzchni Ra jest tym niższa, im większa jest siła docisku. Ze wzrostem sił docisku pojawia się większa zgodność, dla stali AISI 316L wartość parametru Ra= 0,26 µm, dla C45 Ra= 0,41 µm, natomiast S235JR Ra= 0,83 µm.



Rys. 7.15. Przedstawia zależność wskaźnika K_{Ra} od średnicy wewnętrznej nagniatanego elementu

Porównywalne wskaźniki zmniejszenia chropowatości uzyskano dla wcisku równego wartości, w =0,3 mm i w=0,25 mm (rysunek 7.15). Wartości KRa są zbliżone dla wcisku w=0,15 mm. Najwyższy wskaźnik zmniejszenia chropowatości uzyskano przy wcisku w=0,05 mm dla AISI 316L KRa= 6,31 i dla stali C45 KRa= 5,22, natomiast dla stali S235JR przy wcisku w=0,20 mm KRa= 5,90. Wpływ na wyniki miały parametry nagniatania oraz promień zaokrąglenia nagniataka trzpieniowego.

Dla wcześniejszych wymiarów Ø21,70 mm i Ø21,75 mm wyniki są stabilne. A dla skoku Ø21,85 mm i Ø21,75 mm autor nie odnotował różnicy. Na uzyskane wyniki mają wpływ skład chemiczny i grupa materiałowa.

7.3.3. Właściwości powierzchni otworów po obróbce nagniataniem

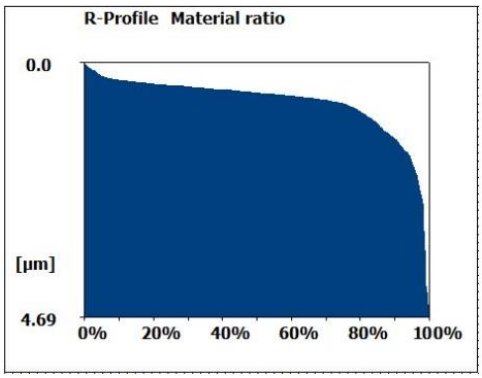
Jednym z zadań nagniatania ślizgowego jest otrzymanie otworu o ustalonej średnicy. Do tego niezbędne jest określenie średnicy otworu przed przepychaniem (przyrost średnicy otworu Δd). Zaobserwowano następującą zależność: wzrost przyrostu średnicy zwiększa się ze wzrostem wcisku względnego. Zwiększenie średnicy otworu wzrasta ze wzrostem wcisku bezwzględnego przy stałym wcisku względnym. Proces nagniatającego przepychania wpływa znacząco na poprawę właściwości obrabianych otworów. W trakcie obróbki narzędzie nagniatające wywołuje wypłaszczenie nierówności powierzchni otworu, przy tym zmniejszając chropowatość jej powierzchni. W wyniku wielkiego nacisku jednostkowego warstwa wierzchnia obrabianego otworu jest zgniatana, poprawiając właściwości fizyczne warstwy materiału [25].

Wybrany rodzaj obróbki wpływa na zmniejszenie chropowatości obrabianego otworu, a jej chropowatość zależy od obrabianego materiału, średnicy otworu, chropowatości powierzchni przed procesem i parametrem wcisku. Nagniatające przepychanie ślizgowe pozwoliło na uzyskanie małej chropowatości powierzchni. W przeprowadzonych badaniach chropowatość powierzchni mieściła się w zakresie Ra= 0,26–0,55 μm dla stali AISI 316L i Ra= 0,41–0,71 μm dla C45, a dla stali S235JR Ra= 0,41–2,36 μm [105]. Zastosowanie obróbki pozwoliło na wzrost mikrotwardości warstwy wierzchniej obrabianego elementu. Po przepychaniu otworów w próbkach z wybranych stali o średnicy d= 22 mm z wciskiem w= 0,05–0,30 mm, stopień względnego odkształcenia plastycznego wynosił od 0,23% do 1,38%.

Naprężenia własne mają znaczący wpływ na wytrzymałość zmęczeniową, będąc najważniejszą właściwością warstwy wierzchniej [106, 153, 165]. Po nagniatającym przepychaniu ślizgowym w warstwie wierzchniej badanego otworu formowane są ściskające naprężenia własne, które są zauważalne na pewnej głębokości. Dla przykładu

w próbkach ze stali w badanym zakresie wcisku względnego ściskające naprężenia własne powstają na głębokości ok. 1,00 mm [152, 178].

Poniżej przedstawiono przykładową krzywą udziału nośnego dla próbki o średnicy Ø21,70 mm ze stali austenitycznej.



Rys. 7.16. Krzywa materiałowa dla próbki ze stali AISI 316L po procesie nagniatania

Wykres Abbotta-Firestone'a wskazuje na dobre właściwości warstwy wierzchniej. Po nagniatającym przepychaniu ślizgowym uzyskana wartość parametru Rpk jest niska równa 0,12 µm. Oznacza to, poprawę odporność na zużycie. Mała wartość parametru Rk= 0,34 µm oraz duże różnice pomiędzy Mr1, a Mr2 cechuje dobra nośność powierzchni oraz wysoka odporność w warunkach dużych naprężeń. Parametr Rvk opisuje średnią wielkość wgłębień pozostających poniżej profilu, dla badanej próbki wynosiła 1,62 µm. Krzywe nośności oznaczają dobre właściwości warstwy wierzchniej, które w przypadku niektórych części decydują o zapewnieniu szczelności, jak i zachowaniu równoległości powierzchni. Jest to szczególnie istotne w przypadku elementów wymagających dobrego smarowania tj. tuleje cylindryczne.

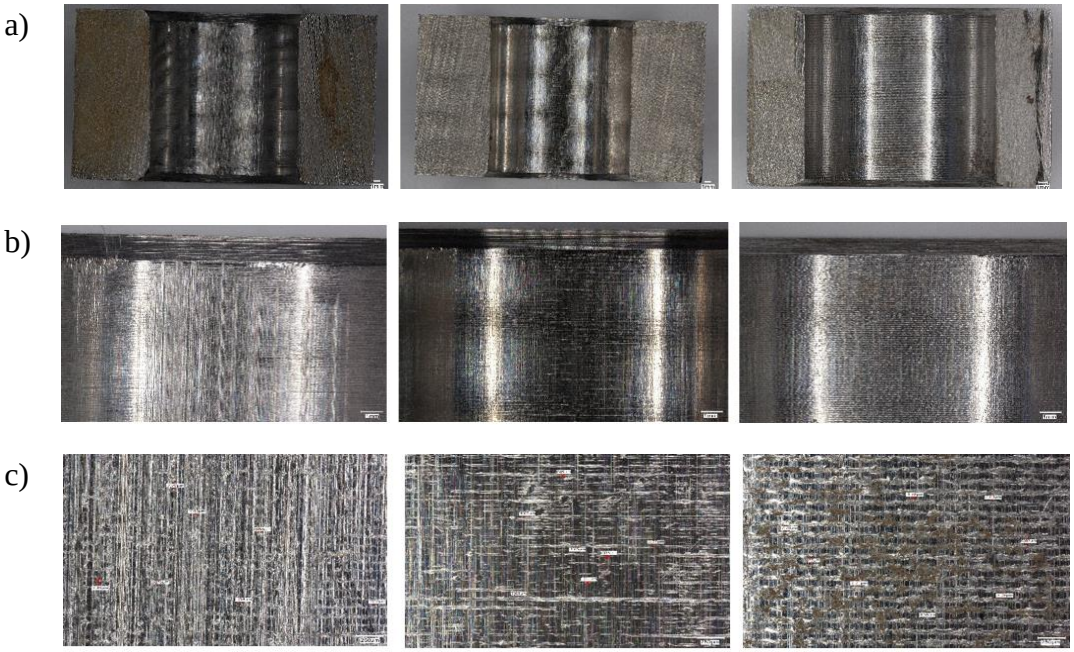
7.4. Badanie makro i mikrostruktury

W celu oceny makroskopowej dla trzej rodzajów stali (S235JR, AISI 316L, C45) użyto cyfrowego mikroskopu. Mikroskop VHX-700 firmy KEYENCE umożliwia obserwację i fotografowanie struktur z wysoką rozdzielczością i ostrością. Obiektyw, kamera i silnik graficzny zapewniają stabilny obraz pomiędzy jasnością a wysoką

ostrością. Umożliwia wysoką rozdzielczość pomiaru 2D/3D m.in. chropowatości, wielkości ziarna.

Rys. 7.17. Cyfrowy mikroskop KEYENCE VHX-700

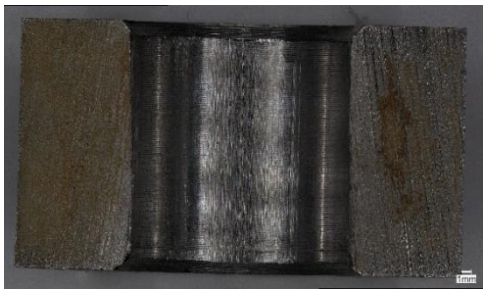
Po przeprowadzeniu oględzin, próbkę umieszczono na stoliku zmotoryzowanym eucentrycznie. Wybrano rodzaj badania na ekranie startowym z obrazem poglądowym, zdefiniowano układ współrzędnych badanej próbki, regulowano ostrość i ustalono rozmiar powiększenia. Następnie określono obszar optymalizując uzyskany obraz na mikroskopie oraz nazwano próbkę.



Rys. 7.18. Obraz rozciętych próbek do badań mikrostruktury dla stali: a) S235JR; b) AISI 316L; c) C45

Przeprowadzono badania, skanując powierzchnię o charakterze makroskopowym.

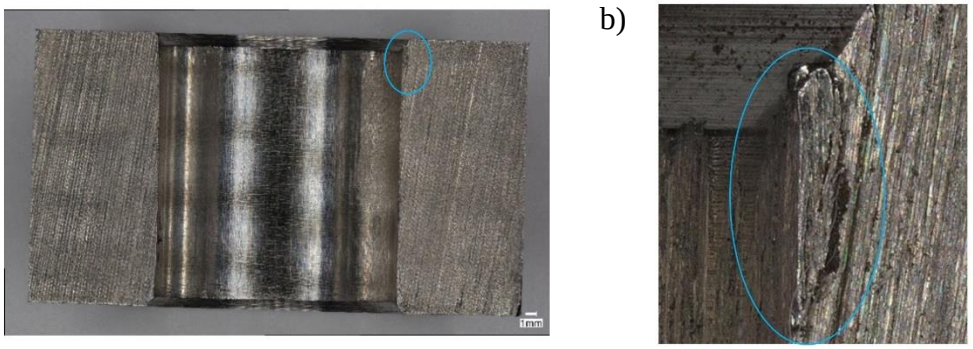
Na próbkach obserwuję się różnego typu wady materiału tj.: pory, pęknięcia, wtrącenia niemetaliczne. Istotną kwestią jest analiza jednolitości struktury wielkości ziarna i brak uszkodzeń materiału. Chropowatość wewnętrzna jest wynikiem procesu nagniatania.



Rys. 7.19. Badania makroskopowe przeciętej próbki stali konstrukcyjnej S235JR

Zaobserwowano przerwy w ciągłości struktury próbki w postaci rys i pęknięć. Rysy powstałe w środkowej części po wyrwaniu narzędzia. Widoczny jest efekt odkształcenia, wyrwania przy braku pełnej gładkości. Z boku próbki zauważono odsłoniętą powierzchniowo warstwę wierzchnią odkształcenia. W procesie wprowadzenia nagniataka trzpieniowego widoczne rysy oderwanie przy fazowaniu. Lokalne duże siły są wystarczające, żeby przekroczyć granicę niestabilności początkowej procesu. Wokół rys pojawiły się pęknięcia.

a) b)



Rys. 7.20. Badania mikroskopowe dla stali AISI 316L: a) przekrój wzdłużny; b) wycinek obszaru w powiększeniu

W otrzymanym obrazie makroskopowym stali AISI 316L u góry zdjęcia widoczne są wyrwy. Po prawej stronie sfazowane (kształt połówki serca), przy sfazowaniu delikatny fragment pęknięcia, ale materiał nie jest przerwany. Fragment ze względu na geometrię powierzchni ziarna odkształcony w formie rybiej łuski, która uwidoczniła powierzchnię odkształconych ziaren. W sposób negatywny pokazała

podłużne ziarna. Wydłużenie w kierunku działania siły pozwoliło na uwidocznienie całej płaszczyzny odkształcenia. W całej płaszczyźnie została przekroczona granica plastyczności. Powierzchniowa warstwa ziarn układa się kierunkowo. Zamierzony efekt został uzyskany, a fragment uszkodzony poprzez zatarcia, to efekt strukturalny.

Rys. 7.21. Badania mikroskopowe dla stali C45

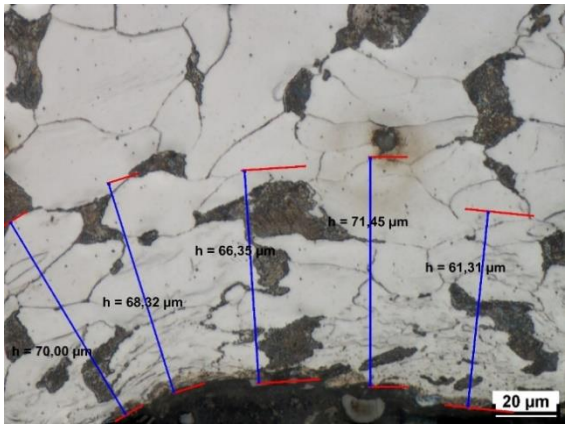
W przypadku stali C45 od góry powierzchni nagniatanej zauważalne są rysy, a w dolnej strefie także warstewka odkształcona. Pokazano ziarna wydłużone w kierunku działania siły, które pozwoliły na uwidocznienie całej płaszczyzny odkształcenia, które zaszło w całej płaszczyźnie.

Różnice pomiędzy poszczególnymi parametrami wynikają z własności mechanicznych, zależności materiałowych, ponieważ to rodzaj materiału odgrywa kluczową rolę w badaniach.

W celu oceny struktury warstwy wierzchniej użyto mikroskopu optycznego Nikon Eclipse MA-200.

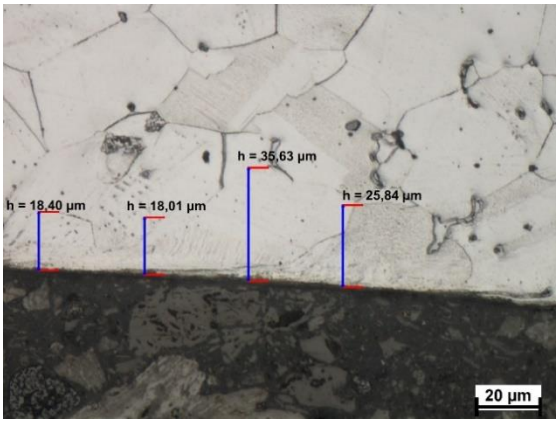
Mikroskop umożliwia obserwację w świetle odbitym techniką obserwacji w polu ciemnym, jasnym, a także zakresie polaryzacji światła. Głębokość odkształceń zależy od mikrostruktury. Zakres stosowanych powiększeń wynosi od 50x do 3000 x. Mikroskop optyczny jest połączony z komputerem, na którym zainstalowane jest oprogramowanie NIS-Elements-D.

Rys. 7.22. Mikroskop optyczny Nikon Eclipse MA-200



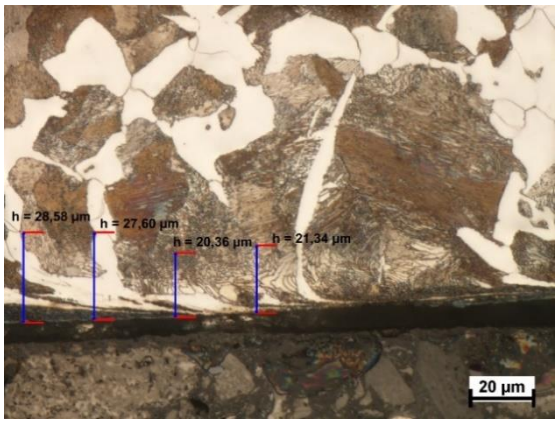
Rys. 7.23. Mikrostruktura warstwy wierzchniej stali S235JR z oznaczoną głębokością zalegania odkształceń przy 500x krotnym powiększeniu

Do oceny ułożenia ziaren użyto komputera z oprogramowaniem NIS-Elements-D. Zaobserwowano odkształcenie warstwy na głębokości odkształcenia ok. 60 µm z zawartością ferrytu z perlitem ok. 15% z ułożeniem ziaren. Odkształcenie w próbce S235JR jest 3-krotnie większe od stali AISI 316L.



Rys. 7.24. Mikrostruktura warstwy wierzchniej stali AISI 316L z oznaczoną głębokością zalegania odkształceń przy 500x krotnym powiększeniu

Zatarcia z punktu materiałowego pokazują ułożenie ziaren. Na obrazie widoczne są linie od brzegu, współosiowe z wydłużeniem ziarna, nie występują mikropęknięcia. W wyniku wykonania zgładu widoczne są wyrwy. Przykład zdjęć mikrostruktury warstwy wierzchniej potwierdzający mikroróżnice w numeryce i badaniach fizycznych.



Rys. 7.25. Mikrostruktura warstwy wierzchniej stali C45 z oznaczoną głębokością zalegania odkształceń przy 500x krotnym powiększeniu

Mikrostruktura ferrytyczno-perlityczna po wyżarzaniu normalizującym i po powierzchniowym odkształceniu plastycznym. Ziarna perlitu formują się ku górze ukazując stronę odkształcenia. Zgłady były wykonane prostopadle do kierunku odkształcenia, oddziaływanie nie wpłynęło na dokładność wynikową. Głębokość odkształceń jest zależna od mikrostruktury.

Tab. 7.8. Głębokość zalegania odkształceń

Materiał	h_1 [µm]	h_2 [µm]	h_3 [µm]	h_4 [µm]	$h_{śr}$ [µm]
S235JR	70,00	68,32	66,35	71,45	69,03
AISI 316L	15,27	20,75	17,42	20,36	18,45
C45	23,88	22,71	19,57	28,77	23,73

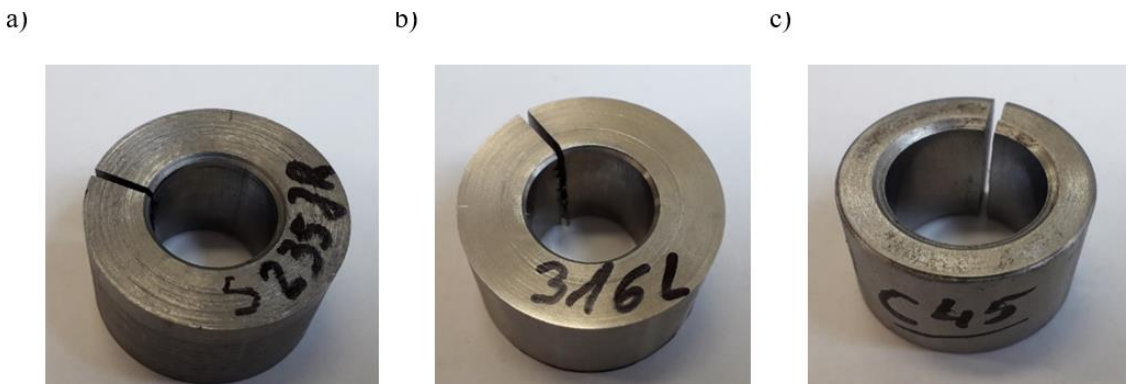
Powyższa tabela 7.8. przedstawia wartość pomiarową i średnią wartość głębokości zalegania odkształceń dla badanych próbek ze stali S235JR, AISI 316L i C45. Uzyskane wyniki wykazały wyraźną różnicę pomiędzy poszczególnymi grupami materiałowymi. Badania oceny zrealizowano przy powierzchni i rdzeniu celem porównawczym. Dla stali S235JR głębokość zalegania odkształceń jest największa

i wynosi 70,00 µm, natomiast stal AISI 316L wyróżnia najniższa głębokość zalegania 15,27 µm. Wartości głębokości zalegania dla stali C45 wahają się od 19,57 µm do 28,77 µm.

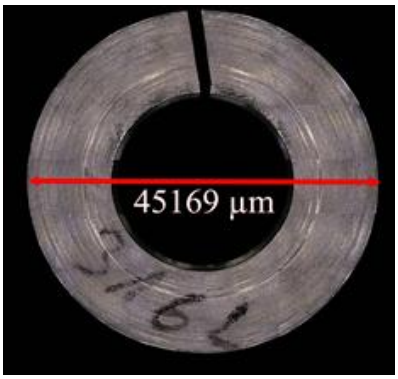
7.5. Wyznaczenie naprężeń własnych metodą średnich odchyleń

Powierzchniowa obróbka plastyczna została zrealizowana poprzez nagniatające przepychanie ślizgowe. Głębokość zalegania odkształceń określa się na podstawie naprężeń własnych. Kształtowanie metalu doprowadza do powstania naprężeń własnych. Pomiar tulei, jej średnicy wewnętrznej, zewnętrznej, a także średnicy zewnętrznej po przecięciu wzdłuż próbki przeprowadzono na cyfrowym mikroskopie pomiarowym. Cyfrowy mikroskop Smartzoom 5 wykonany przez firmę Zeiss, zaprojektowany jest do przeprowadzania pomiaru z dokładnością $1x10^{-3}$ mm. Umożliwia wykonywanie zdjęć 2D/3D przy pomocy tzw. skrawków optycznych.

Rys. 7.26. Cyfrowy mikroskop pomiarowy (Smartzoom 5)



Rys. 7.27. Zdjęcia rozciętych próbek ze stali: a) S235JR; b) AISI 316L; c) C45



Rys. 7.28. Zdjęcia z mikroskopu Smartzoom 5 dla stali AISI 316L po procesie nagniatania dla średnicy zewnętrznej po przecięciu wzdłuż próbki

W celu oszacowania naprężeń własnych w tulejach stosuje się metodę średnich odchyleń [44].

Naprężenia własne zostały wyliczone z równania metody średnich odchyleń [44]:

$$\sigma_C = E \cdot g_t \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{D_1}\right) \tag{7.9}$$

gdzie:

D – średnica zewnętrzna tulei po nagniatającym przepychaniu ślizgowym [mm],

D_1– średnica zewnętrzna tulei po nagniatającym przepychaniu ślizgowym po przecięciu wzdłuż próbki [mm],

E – moduł Younga, współczynnik sprężystości podłużnej (E=210 GPa),

g_t – grubość ścianki tulei [mm].

Przeprowadzono weryfikację dla wyznaczonych wartość naprężneń własnych. Wyniki naprężeń własnych metodą średnich odchyleń w tulejach po nagniatającym przepychaniu ślizgowym uzyskano z równania (7.9). Przykładowo naprężenia własne dla próbek ze stali konstrukcyjnej S235JR dla wymiaru Ø21,70 mm wyniosły σ_C =12,06 MPa, dla stali austenitycznej AISI 316L σ_C= 9,92 MPa, a dla stali niestopowej C45 σ_C= 33,31MPa.

Z obliczeń numerycznych po przeprowadzonych symulacjach metodą MES dla stali konstrukcyjnej S235JR i AISI 316L zaobserwowano, że po procesie nagniatania, a następnie rozcięciu wzdłużnym próbki przy mniejszym wymiarze otworu tulei następuję wzrost wartości naprężeń własnych. Natomiast dla stali C45 widoczna jest odwrotna tendencja.

7.6. Wdrożenie procesu nagniatającego przepychania ślizgowego w praktyce przemysłowej

Rozwój przedsiębiorstw tworzy się poprzez inwestycje, które często stanowią szansę rozwoju, ale również są obarczone stopniem ryzyka. Analiza szans i zagrożeń pozwala na uniknięcie ryzyka. Planowanie rozwoju inwestycji poprzedza opracowanie szerokiej analizy techniczno-ekonomicznej przedsiębiorstwa. Wdrażanie nowych innowacji wymaga indywidualnego podejścia i strategii dla każdego podmiotu.

Analiza efektywności wdrożenia technologii nagniatającego przepychania ślizgowego to przedsięwzięcie, które wymaga indywidualnego podejścia i przystosowania się do zmiennych warunków otoczenia [138].

Analiza potencjału wdrożenia technologii nagniatającego przepychania ślizgowego tulei stali trudnoobrabialnych zrealizowano na przykładzie przedsiębiorstwa Euro-Tech Spółka z o.o. – Obróbka metali Frezowanie CNC Toczenie CNC Odlewnictwo w Gdyni. Przedsiębiorstwo powstało w 1993 roku. Podkreśla, że dzięki wysokiej dbałości o jakość i wytężonej pracy zbudowano nowoczesne centra maszynowe. Wyspecjalizowana kadra, ogromne doświadczenie w technologii obróbki metali i odlewnictwa sprawia, że podmiot jest w stanie sprostać potrzebą odbiorców. Specjalizuje się w toczeniu, frezowaniu CNC, odlewanie aluminium i brązu w produkcji od małoseryjnej do wielkoseryjnej różnego rodzaju metali tj. brązu, aluminium, stali nierdzewnych i kwasoodpornych.

Podstawą wyboru podmiotu Euro-Tech Sp. z o.o. do oceny wdrożenia dotyczącego nagniatania stali trudnoobrabialnych stanowi:

– profil przedsiębiorstwa;
– nowoczesny park maszynowy z centrum toczenia CNC stali trudnoobrabialnych;
– doświadczenie w technologii mechanicznej stali;
– otwartość na kreatywność i innowacyjność.

Źródłem innowacji procesowej jest przedmiotowe rozwiązanie, będące następstwem zmiany w używanej metodzie wytwarzania oraz skorelowanych z nią udoskonalonych właściwości produktu. Działania operacyjne uszczegóławiają zakres czasowy oraz przypuszczalne efekty przedsięwzięcia. Jego nadrzędne cele, to:

– rozwój i innowacja inwestycji poprzez wdrożenie nowej technologii;
– poprawa wyrobów;
– umacnianie przewagi konkurencyjnej.

Potencjalne korzyści z wdrożenia technologii identyfikuje się poprzez:
– spadek kosztów działalności produkcyjnej;
– wzrost sprzedaży towarów;
– wzrost jakości produktów.
Uwzględniając zakres czasowy inwestycji należy przyjąć ją jako krótkoterminową. Źródłem inwestycji były środki własne firmy. Wdrożenia technologii nagniatania pełni rolę inwestycji taktycznej, opartej na planowaniu, niskich kosztach, krótkim okresie zwrotu środków inwestycyjnych, jak również przy niskim ryzyku innowacji.

Bezwzględną ocenę wdrożenia technologii nagniatania stali trudnoobrabialnych zastosowano wielokryteriową metodę tj. technologiczną, finansową, rynkową, zasoby, rodzaj inwestycji zgodny ze strategią zakładu. W dodatkowych kryteriach wzięto pod uwagę specyfikę przedsiębiorstwa, kompetencję kadry oraz wcześniejsze doświadczenie w przeprowadzonych innowacjach.

Badania przedmiotowe stawiają za cel wdrożenie inwestycji technologii nagniatania staliwa trudnoobrabialnego. Badania zrealizowano w przedsiębiorstwie, sporządzono dane na podstawie informacji uzyskanych od zakładu, tj. potencjał produkcyjny, techniczny sposób realizacji z uwzględnieniem procesu nagniatania. Kosztorys wyrobu finalnego powstał na bazie danych procesowych oraz wiedzy doświadczonych pracowników.

W oparciu zgromadzonych danych wyznaczono podstawowe kryteria wpływające korzystnie na ocenę inwestycji (tabela 7.9). Do każdego z kryterium przydzielono jej wagę.

Tab. 7.9. Ocena atrakcyjności inwestycji [138]. Opracowanie własne

Kryterium	Waga kryterium	Punkty	Punkty po wyliczeniu	Otrzymana liczba punktów
Kryterium progowe- inwestycja zgodna ze strategią przedsiębiorstwa	20%		2	**2,0**
Całkowita zgodność		10	2	
Zgodność w dużym stopniu		7	1,4	
Częściowa zgodność		5	1,0	
Zgodność w małym stopniu		2	0,4	
Zerowa zgodności		0	0	

Tab. 7.9. Ocena atrakcyjności inwestycji [138]. Opracowanie własne (cd.)

Rodzaj inwestycji	5%		0,25	**0,15**
Rozwojowa		5	0,25	
Innowacyjna		3	0,15	
Odtwórcza		1	0,05	
Zgodność z zewnętrznymi regulacjami	10%		1,5	**1,5**
Całkowita		10	1,5	
Częściowa		2	0,3	
Wydajność rynkowa	10%		1,5	**1,05**
Znaczna		10	1,5	
Akceptowalna		7	1,05	
Niewielka		5	0,75	
Brak		1	0,1	
Finansowe OZN	20%		2	**2,0**
Rentowna		10	2	
Opłacalna w niedużym stopniu		5	1	
Zrównoważona		2	0,4	
Nieekonomiczna		0	0	
Finansowe (ocena ryzyka)	20%			**2,0**
Dopuszczalna		10	2	
Niedopuszczalna		0	0	
Wydajność operacyjna	10%			**0,5**
Znaczna		5	0,5	
Wysoka		4	0,4	
Zadowalająca		2	0,2	
Dopuszczalna		2	0,2	
Niedopuszczalna		0	0	
Rozwojowe	5%		0,25	**0,25**
Procesowa		5	0,25	
Produktowa		5	0,25	

Tab. 7.9. Ocena atrakcyjności inwestycji [138]. Opracowanie własne (cd.)

Organizacyjna		3	0,15	
Marketingowa		3	0,15	
Brak		0	0	
Oszacowanie potencjału wdrożenia przepychającego nagniatania ślizgowego w przedsiębiorstwie				**Wynik**
				Σ=9,45

Nagniatające przepychanie ślizgowe wewnętrznej średnicy tulei z użyciem nagniataka trzpieniowego o zasugerowanej formie oraz kalibracji to innowacyjna metoda na wdrożenie przemysłowe, które jest decydujące uwzględniając jakość technologiczną produktów w różnych rodzajach przemysłu. Szacowany potencjał wdrożenia potwierdza dodanie korzyści dla przedsięwzięcia poprzez efektywności rynku między 5–10% wzrostu obrotu z dopuszczalną oceną ryzyka.

Kryterium finansowe za okres zwrotu nakładów OZN (ang. Payback Period) zostało określone jako opłacalne. Wdrożenie przepychającego nagniatania pomyślnie kształtuje wydajność przy spadku nakładów i wzroście wyników. Ostateczna nota potencjału wdrożenia nagniatania stali trudnoobrabialnych wynosiła 9,45 pkt, kwalifikując inwestycje zasadną ekonomicznie do adaptacji w przemyśle.

7.7. Opracowanie empirycznego wzoru na głębokość odkształceń i naprężeń nagniatającego przepychania ślizgowego

W celu określenia stanu naprężeń i odkształceń plastycznych została użyta analiza numeryczna opierająca się na metodzie MES. W obróbce nagniataniem badania głębokości zalegania odkształceń plastycznych są istotne podczas projektowania i wykonywania procesu nagniatania. Na bazie teorii sprężystości i plastyczności wyznaczono metodą analityczną oraz numeryczną strefy kontaktu ciał odkształcalnych. Obliczenia głębokości odkształcenia plastycznego zostały wykonane na podstawie badań inżynierskich i analizy numerycznej. Uwzględnione w metodzie elementów skończonych warunki brzegowe oraz parametry technologiczne posłużyły do zbadania zależności pomiędzy głębokością zalegania odkształceń plastycznych a odkształceniem bezwzględnym (wciskiem nagniatania), którą opisano równaniem:

$$h_\delta = 0{,}8132w^{1{,}7172} \tag{7.10}$$

Głębokość zalegania odkształceń została wyliczona na podstawie pól naprężeń i odkształceń plastycznych.

Po obróbce nagniataniem w stanie plastycznym rośnie objętość właściwa materiału warstwy wierzchniej, utrzymana poprzez naprężenia własne ściskające. Naprężenia ściskające w warstwie powierzchniowej są użyteczne przez wzgląd na wzmocnienie właściwości użytkowych, a w głównej mierze na zużycie tribologiczne i zwiększenie wytrzymałości materiału. Struktura i kierunek ziarna materiału, a czasem ich rozdrobnienie i przemiany fazowe opisują stan zgniotu po procesie nagniatania. Wartości bezwzględne naprężenia uzyskują ekstremum bezpośrednio przy nagniatanej powierzchni.

Zrealizowana analiza eksperymentalna i numeryczna przy użyciu metody elementów skończonych nagniatającego przepychania ślizgowego dla odkształceń sprężysto–plastycznych umożliwiła określenie matematycznych zależności pomiędzy określonymi parametrami odkształceń plastycznych.

Po przeprowadzeniu badań stwierdzono, że uzyskane wyniki badań wykazały zgodność z przyjętymi założeniami modelu analizy teoretycznej i numerycznej.

Podsumowanie i wnioski końcowe

W pracy omówiono zagadnienia nagniatania stali trudnoobrabialnych bazujących na teorii lepkości, sprężystości i plastyczności. Stosowanie metod do analizy procesu nagniatającego przepychania ślizgowego dla wyrobów z materiałów trudnoobrabialnych w tym stali austenitycznych pozwala na wzrost wytrzymałości i trwałości nagniatanych konstrukcji. Jak również ułatwia przygotowanie według własnego opracowania rozszerzonego modelu matematycznego naprężeń własnych występujących w tulejach.

Główną zaletą obróbki nagniataniem jest zmniejszenie chropowatości powierzchni i umocnienie warstwy wierzchniej w granicach mikronierówności, jak również wzrost wytrzymałości zmęczeniowej. Proces nagniatania skutkuje wzrostem objętości właściwej materiału wyrobu podczas zgniotu, prowadząc do ukonstytuowania ściskających naprężeń własnych w warstwie wierzchniej. Najwyższe wartości naprężeń własnych pojawiają się zaraz pod powierzchnią obrabianą.

Zaprezentowano w pracy założenia teoretyczne i doświadczalne procesu nagniatającego przepychania ślizgowego dla elementu nagniatającego w formie nagniataka trzpieniowego na próbce tulei, jak również przeprowadzono analizę zjawisk fizycznych i tribologicznych. Niniejsza dysertacja opierała się na wynikach badań własnych poruszających problematykę modelowania komputerowego, badań numerycznych opartą na metodzie elementów skończonych (MES) oraz ocenę badań doświadczalnych, celem optymalizacji konstruowania i przeprowadzania skomplikowanych procesów obróbkowych.

Istotnym etapem dysertacji było wnikliwe badanie efektywności wdrożenia technologii procesu nagniatania ślizgowego tulei ze stali trudnoobrabialnych. Analizę zrealizowano w przedsiębiorstwie Euro-Tech Spółka z o.o. – Obróbka metali Frezowanie CNC Toczenie CNC Odlewnictwo w Gdyni.

1. Podczas wykonywania wyznaczonego zakresu pracy zrealizowano wieloaspektowy plan badań, praca badawcza obejmowała:

– ustalenie wpływu obróbki nagniataniem na fizyczne właściwości warstwy wierzchniej;
– określenie odkształcenia sprężysto–plastycznego po usunięciu nagniataka trzpieniowego z badanej próbki;
– dla określonych parametrów technologicznych ocena wpływu nagniatającego

przepychania ślizgowego w warstwie wierzchniej na rozkład naprężeń własnych dla próbek ze stali S235JR, AISI 316L oraz C45;

- sporządzenie projektu nagniataka trzpieniowego i tulei w programie CAD;
- implementację modelu do programu FORGE NxT 2.1 oraz wykonanie symulacji numerycznych procesu nagniatania;
- wyznaczenie zależności głębokości zalegania odkształceń w badanych materiałach;
- analiza właściwości próbek uzyskanych po procesie nagniatającego przepychania ślizgowego;
- analizę numeryczną za pomocą metody elementów skończonych i doświadczalną odkształceń po procesie nagniatania oraz weryfikację otrzymanych wyników.

2. Przeprowadzono szczegółową analizę zjawisk sprężysto–plastycznych z wykorzystaniem równań konstytutywnych dla tego typu ciał z zastosowaniem kroku czasowego.
3. Przeprowadzono analizę procesu nagniatania i jej granicznego stanu naprężeń na podstawie równania Treski.
4. Wykonano obliczenia odkształceń materiałów trudnoobrabialnych na bazie prawa Nortona–Hoffa.
5. Wdrożono metodę obliczeń numerycznych z określeniem warunków brzegowych dla nagniatającego przepychania ślizgowego oraz zrealizowano symulacje komputerowe z uwzględnieniem parametrów technologicznych i różnych rodzajów badań: rozkładu temperatury, rozkładu prędkości odkształcenia, intensywności naprężenia i odkształcenia oraz naprężenia średniego.
6. Opracowano rozszerzony model matematyczny naprężeń własnych dla nagniatania przepychająco ślizgowego dla wyrobów z materiałów trudnoobrabialnych.

Kluczowym założeniem pracy doktorskiej jest ocena wpływu nagniatającego przepychania ślizgowego na odkształcenia sprężysto–plastyczne wpływające na właściwości warstwy wierzchniej za pomocą numerycznej implementacji MES w programie FORGE NxT 2.1. W pracy przeprowadzono analizę stanu naprężeń własnych za pomocą nagniatającego przepychania ślizgowego na zimno. Na podstawie opracowanego modelu matematycznego określono głębokość zalegania odkształceń w materiale. W badanym zakresie parametrów głębokość nagniatania nie wpływa istotnie na chropowatość powierzchni. Dla małych sił nagniatania nie otrzymano równomiernego i całościowego usunięcia nierówności. Jednak zbyt duże siły nagniatania skutkują pogorszeniem chropowatości powierzchni. Celem

przeprowadzonych badań był wzrost twardości oraz zmniejszenie chropowatości wewnętrznej powierzchni tulei.

Po realizacji przeglądu literaturowego, przeprowadzeniu badań eksperymentalnych i numerycznych dokonano licznych obserwacji i określono cele poznawcze i utylitarne.

Na uzasadnienie postawionej hipotezy leżą naukowe przesłanki. Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Hipoteza pracy została potwierdzona poprzez zastosowanie nagniatającego przepychania ślizgowego stali na bazie zróżnicowanych próbek. Stanowi potwierdzenie w uzyskanych wynikach technologicznych i ekonomicznych w związku z tym posiada potencjał wdrożeniowy do praktyki przemysłowej.
2. Uzyskane wyniki rozwiązania analitycznego potwierdzają uzyskane wyniki w badaniach numerycznych. Zróżnicowanie w wynikach dla wcisków nagniatania w= 0,05 mm i w= 0,10 mm może być wywołane skomplikowanymi obliczeniami numerycznymi w programie FORGE NxT 2.1.
3. W strefie odkształcenia określono rozkład temperatury na powierzchni kontaktu elementu nagniatającego z wewnętrzną ścianą tulei. Maksymalny wzrost temperatury wyznaczono w odległości 0,55 mm. Najwyższe wartości rozkładu temperatury odnotowano dla stali AISI 316L ok. 72,01°C, natomiast najniższą tendencję zaobserwowano dla stali S235JR. Dla każdej ze stali zaobserwowano tendencje wzrostową.
4. Na podstawie badań można stwierdzić, że prędkość odkształcenia przyjmuje niższe wartości dla większych wartości średnic. W największym stopniu rozkład jest zauważalny na powierzchni kontaktu odkształcanej tulei z nagniatakiem trzpieniowym. Zaobserwowano, że w przypadku tej samej prędkości nagniatania i wymiaru średnicy wewnętrznej najwyższe wartości uzyskuje się dla stali S235JR, natomiast najniższe dla stali AISI 316L. Wraz ze wzrostem prędkości nagniatania gwałtownie rośnie rozkład prędkości odkształcenia. W przypadku analizy rozkładu prędkości odkształceń dla każdej z badanych stali zaobserwowano rosnący trend.
5. Ze wzrostem wcisku nagniatania rośnie parametr intensywności odkształcenia. Dla badanych próbek odnotowano wzrostowy trend. Stal konstrukcyjna S235JR najszybciej ulega umocnieniu i jest łatwo podatna na działanie intensywności odkształceń. Wartość intensywności odkształcenia również są stabilne.

6. Intensywność naprężenia dla małych wartości średnic tulei przyjmuję spadek wartości. Najwyższe wartości odnotowano dla AISI 316L, najniższe dla S235JR. Ze wzrostem prędkości nagniatania rośnie intensywność naprężeń. Wartość intensywności naprężenia jest stała dla wszystkich rodzajów stali.
7. Naprężenia średnie zależą od średnicy wewnętrznej nagniatanej tulei. Maksymalne wartości zauważono w przypadku mniejszych średnic wewnętrznych nagniatanej próbki. Najwyższe wartości naprężeń średnich uzyskano dla stali AISI 316L. Po analizie intensywności naprężeń odnotowano rosnący trend dla każdej z trzech rodzajów stali. Maksymalne naprężenia formują się w obszarach największych odkształceń, czyli w miejscu zmiany wymiaru średnicy. Dla każdej ze stali odnotowano wzrostową tendencję, a przy zwiększeniu prędkości nagniatania rosną naprężenia średnie.
8. Największe naprężenia formują się w miejscu największych odkształceń, czyli w miejscu zmiany wymiaru średnicy. Między stalami odnotowano dużą różnicę w wartościach. Spowodowane jest to własnościami materiału, stal AISI 316L jest twardsza, ma większą gęstość. Technologiczna warstwa wierzchnia w procesie nagniatającego przepychania ślizgowego jest kształtowana przez naprężenia własne.
9. Weryfikacja naprężeń ściskających pokazała zbliżone wartości uzyskanych wyników badań eksperymentalnych i numerycznych.
10. Zaobserwowano zależność chropowatości od zadanej siły i wcisku w tulei. Parametr Rz osiąga podobne wartości dla wszystkich stali. Dla stali AISI 316L i C45 wartość parametru Rt są zbliżone. Proces nagnitania znacznie obniża parametr chropowatości Ra.
11. Nagniatanie stal S235JR, AISI 316L, C45 pozwala na kształtowanie struktury geometrycznej i uzyskanie w niektórych przypadkach IT9 klasy chropowatości.
12. Z otrzymanych wyników można stwierdzić, że ze wzrostem wcisku nagniatania rośnie bezwzględne odkształcenie plastyczne.

Wzrost jakości technologicznej produktów przyczynia się do zwiększenia dokładności wymiarowej modelowania oraz procesu wytwarzania. Opisane w pracy zagadnienia procesów obróbki plastycznej w znaczący sposób pozwalają usprawnić proces projektowania procesu nagniatania, poprzez dobór optymalnych parametrów

technologicznych w ujęciu jakości wyrobu. Na podstawie zrealizowanych badań numerycznych i symulacji można ustalić, iż parametry technologiczne wpływają na pola odkształceń i naprężeń w materiale determinują o jej jakości w aspekcie technologicznym. Odkształcenia dla modelu ciała sprężystego pozostają w bliskiej zależności liniowej od naprężeń. W zakresie sprężystym związki między naprężeniem a odkształceniem opisuje prawo sprężystości [35, 39]. Zrealizowane badania eksperymentalne potwierdziły tendencje wyników uzyskanych z symulacji komputerowej.

W związku z przeprowadzoną analizą, oraz obszernymi badaniami można wywnioskować, że założona teza została potwierdzona, a założony cel osiągnięty. Zgodnie z powyższym można stwierdzić, że praca doktorska została zrealizowana zgodnie z wytycznymi.

LITERATURA

1. Adamczak S., Pomiary geometryczne powierzchni, zarysy kształtu, falistości i chropowatości, Wydawnictwo Naukowo–Techniczne, Warszawa 2008.
2. Adamson A. W., Physical Chemistry of Surface, Wiley, New York, 1976.
3. Andreasen J.L., Bay N., De Chiffre L., Quantification of Galling in Sheet Metal Forming by Surface Topography Characterisation, International Journal of Machine Tools and Manufacture, t. 38, nr 5–6, 1998, s. 503–510.
4. Avilés R., Albizuri J., Rodriguez A., López de Lacalle L.N., Influence of low-plasticity ball burnishing on the high-cycle fatigue strength of medium carbon AISI 1045 steel, International Journal of Fatigue, nr 55, 2013, s. 230–244.
5. Ballanda P., Tabourota L., Degrea F., Moreaub V., Mechanics of the burnishing process, Precision Engineering, nr 37, 2013, s.129– 134.
6. Baryła K., Świrad S., Analiza struktury geometrycznej powierzchni brązu po obróbce nagniataniem [w:] Metody statystyczne w praktyce inżynierskiej, pod red. Gałda L., Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2015, s. 9–25.
7. Bednarski T., Mechanika plastycznego płynięcia metali. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1993.
8. Bhushan B., Introduction to Tribology, John Wiley & Sons, Inc, New York 2002.
9. Blicharski M., Inżynieria powierzchni, Wydawnictwo Naukowo–Techniczne, Warszawa 2012.
10. Blicharski M., Wstęp do inżynierii materiałowej, Wydawnictwo Naukowo–Techniczne, 2012.
11. Błachnio J., Określenie rozkładu naprężeń własnych w funkcji głębokości warstwy wierzchniej elementu maszyny, DIAGNOSTYKA, t. 3, nr 39, 2006, s. 101–108.
12. Bławucki S., Zaleski K., Nagniatanie dynamiczne kompozytów o osnowie metalowej, Mechanik, nr 3, 2015, s. 163–167.
13. Błażewski S., Mikoszewski J., Pomiary twardości metali, wydawnictwo Naukowo–Techniczne, Warszawa 1981.
14. Bojarski Z., Morawiec H., Metale z pamięcią kształtu, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1989.
15. Brevern P.V., El-Tayeb N.S.M., Low K.O., Influence of roller burnishing contact width and burnishing orientation on surface quality and tribological behaviour of Aluminium, Journal of Materials Processing Technology, nr 186, 2007, 272–278.
16. Brzoska Z., Wytrzymałość materiałów, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1972.
17. Bucior J., MECHANIKA: Kształtowanie trwałości i niezawodności wybranych elementów maszyn w procesach obróbki powierzchniowej, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, z. 87, Gliwice 1987.
18. Buckley D. D., Johnson R. L., The influence of crystal structure and some properties of hexagonal metals on friction and adhesion, Wear 1968.
19. Burakowski T., Wierzchoń T., Inżynieria powierzchni metali, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1995.
20. Butnicki S., Ćwiek J., Degórski A., Głowacka M., Hucińska J., Jankowski T., Królikowski Z., Krzysztofowicz T., Łabanowski J., Rynkiewicz S., Serbiński S., Stryjewski J., Zaczek Z., Metaloznawstwo- praca zbiorowa, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 1996.
21. Charchalis A., Labuda W., Wpływ nagniatania na poprawę właściwości eksploatacyjnych wałów pomp wodnych silników okrętowych, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej, nr 1 (184), 2011, s. 13–18.

22. Charchalis A., Starosta R., Labuda W., Ocena wpływu nagniatania na zmiany właściwości powierzchni stali stosowanej na wały pomp okrętowych, INŻYNIERIA MATERIAŁOWA, z .4, 2011, s. 363–375.
23. Cheluszka P., Mikuła S., Mikuła J., Wykorzystanie zgniotu powierzchniowego do polepszenia trwałości eksploatacyjnych trzonków noży kombajnów górniczych, Przegląd Górniczy nr 12, Katowice 2019, s. 38-45.
24. Chmielik P., Czarnecki H., Zaborski A., Pomiar stereometrii strefy deformacji w procesie nagniatania, Mechanik, nr 8–9, 2014, s.430–437.
25. Courbona C., A. Sovaa A., Valiorguea F., Pascala H., Sijoberta J., Kermoucheb G., Bertranda Ph., Recha J., Near surface transformations of stainless steel cold spray and laser cladding deposits after turning and ball-burnishing, Surface & Coatings Technology, nr 371, 2019, s. 235–244.
26. Czarnecki H., Komputerowa analiza naprężeń i odkształceń mikroprofilu powierzchni w procesie tarcia suchego, Kształtowanie tribologicznych właściwości węzłów tarcia. Teoria i praktyka, Zielona Góra 1999, s. 23-28.
27. Czarnecki H., Tagowski M., Modelowanie struktury geometrycznej warstwy wierzchniej zęba koła zębatego w procesie nagniatania dynamicznego, nr 4, 2015, s. 45–56.
28. Czarnecki H., Tubielewicz K., Zmiany własności warstwy wierzchniej w procesie tarcia. Tribologia, nr 5, 1997, s. 551–558.
29. Czarnecki H., Udział warstwy wierzchniej w kształtowaniu odporności na zużycie tribologiczne, Częstochowa 2008.
30. Czechowski K., J. Kalisz, Wybrane aspekty procesu nagniatania, Mechanik, nr. 5–6, 2015, s. 452-455.
31. Czechowski K., Toboła D., Gładkościowe nagniatanie ślizgowe stopów metali i kompozytów na osnowie metalowej, Mechanik, nr 7, 2017, s. 552–554.
32. Czechowski K., Toboła D., Wronska I., Jarosz R., Bąk M., Modyfikacja warstwy wierzchniej części roboczych narzędzi, Mechanik, nr 11, 2015, s. 866–869.
33. Darlejewski J., Postępy w obróbce wiórowej, PTMiU, t. 20, nr 3, 1996, s. 5-22.
34. Davim J., P., Machinig of Titanium Alloys, Springer, London 2014.
35. Dobrzański L., Metalowe materiały inżynierskie, Wydawnictwo Naukowo–Techniczne, Warszawa 2009.
36. Dobrzański L., Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo, Wydawnictwo Naukowo–Techniczne, Warszawa 2002.
37. Dobrzyński M., Javorek L., Orłowski K. A., Przybylski W., Tehe effect of an active force while slide diamond burnishing of Woodem shafts upon process quality, Journal of Machine Construction and Maintenance, t. 112, nr 1, 2019, s. 7–15.
38. Dyl T., Analiza możliwości zastosowania w przemyśle okrętowym powłok stopowych Ni–Al i kompozytowych po obróbce plastycznej, Inżynieria Materiałowa, t. 5, nr 207, 2015, s. 242–246.
39. Dyl T., Ballizing process impact on the geometric structure of the steel tubes, Solid State Phenomena, t. 199, nr 3, 2013, s. 384–390.
40. Dyl T., Dolny K., The influence of the burnishing on technological quality of elements of part shopping machines, Journal of Kones Powertrain and Transport, t. 17, nr 2, 2010, s. 89–95.
41. Dyl T., Effect of relative strain ratio on the reduce roughness surface layer tube holes after burnishing process, Journal of KONES Powertrain and Transport, t.2, nr 2, 2012, s. 137–143.

42. Dyl T., Nagniatanie powierzchni płaskich elementów części maszyn okrętowych, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, Eksploatacja Urządzeń Okrętowych, Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni, nr 71, Gdynia 2011, 38-48.
43. Dyl T., Numeryczna analiza nagniatającego przepychania ślizgowego, Scientific Journal of Gdynia Maritime University, nr 100, 2017, s. 63–75.
44. Dyl T., Numeryczna i eksperymentalna analiza procesu nagniatania z wykorzystaniem teorii sprężystości i plastyczności, Prace Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, Wydawnictwo Akademii Morskiej, Gdynia 2014.
45. Dyl T., Rydz D., Stradomski G., Nagniatanie staliwa typu dupleks w aspekcie zwiększenia twardości i zmniejszenia chropowatości powierzchni, Scientific Journal of Gdynia Maritime University, nr 100, 2017, s. 76–86.
46. Dyl T., Starosta R., Badanie wpływu wielkości odkształcenia plastycznego na wybrane właściwości powłok niklowo–aluminiowych, Obróbka Plastycznych metali, t. 19, nr 2, 2008.
47. Dyl T., Starosta R., Obróbka Powierzchniowa, Wydawnictwo Akademii Morskiej, Gdynia 2008.
48. Dyl T., Starosta R., Rydz D., Koczurkiewicz B., Kuśmierska-Matyszczak W., The Experimental and Numerical Research for Plastic Working of Nickel Matrix Composite Coatings, Materials, nr 13, 2020, 3177.
49. Dyl T., Starosta R., Skoblik R., Obróbka wykańczająca powłok MMC w aspekcie umocnienia i zmniejszenia chropowatości powierzchni, Kompozyty, t. 8, nr 2, 2008, s. 147–151.
50. Dyl T., Starosta R., Wstępna analiza możliwości zastosowania powłok stopowych Ni-Al na złącza kołnierzowe rurociągów okrętowych, Rudy i Metale Nieżelazne, R. 55, nr 11, 2010, s. 784–789.
51. Dyl T., The burnishing strengthen shafts Neck of centrifugal pumps, Journal of Kones and Transport, t.18, nr 2, 2011, s. 123–128.
52. Dyl T., The effect of parameters burnishing rolling–pressuring process in aspect to technological quality surface layer of 316L stainless steel, Journal of KONES Powertrain and Transport, t. 25, nr 1, 2018, s.75–81.
53. Dyl T., The influence of effective strain on the reduce roughness and strain hardening surface layer ship machine elements, Journal of Kones Powertrain and Transport, 2010, t. 17, nr 3, s. 75–78.
54. Dyl T., Wijata M., Kuśmierska-Matyszczak W., The slide broaching burnishing and the influence of deformation on roughness of 314L stainless steel sleeves, Scientific Journal of Gdynia Maritime University, nr 116/20, 2020, s. 15–28.
55. Dyl T., Wpływ gniotu względnego na wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni powłok z faz międzymetalicznych, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, nr 60, Gdynia 2009, s. 94–99.
56. Dyl T., Wpływ nagniatania na umocnienie elementów części maszyn okrętowych, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, nr 64, Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia 2010, 36–42.
57. Dyl T., Wpływ odkształcenia względnego na wskaźnik zmniejszenia chropowatości i stopień umocnienia warstwy powierzchniowej po obróbce nagniataniem, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni, nr 60, Gdynia 2009, s. 100–104.
58. Dzionk S., Przybylski W., Surface waviness of components amchined by burnishing method, Archives of Mechanical Technology and Automation, t. 32, nr 3, 2012, s. 25 –33.

59. Dzionk S., Scibiorski B., Przybylski W., Surface Texture Analysis of Hardened Shafts after Ceramic Ball Burnishing, Materials, t.12, nr 204, 2019, s. 1–15.
60. El-Axir M.H., El-Taweel T.A., Analysis and optimization of the ball burnishing process through the Taguchi technique, International Journal Advanced Manufacturing Technology, t. 41, 2009, s. 301–310.
61. El-Tayeb N.S.M., Low K.O., Brevern P.V., Influence of roller burnishing contact width and burnishing orientation on surface quality and tribological behaviour of Aluminium 6061, Journal of Materials Processing Technology, nr 186, 2007, s. 272–278.
62. Feld M., Technologia budowy maszyn: techniki wytwarzania, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1995.
63. Feng Lei Li, Wei Xia, Zhao Yao Zhou, Jing Zhao, Zheng Qiang Tang, Analytical prediction and experimental verification of surface roughness during the burnishing process, International Journal of Machine Tools & Manufacture 62, 2012, s. 67–75.
64. Fularczyk M., Wyzwania technologiczne powstałe przy budowie korwety typu GAWRON, Projektowanie i konstrukcje inżynierskie, nr 82/83, 2014, s. 48–53.
65. Gajare C., Shirsat U., Effect of Burnishing Force on Surface Roughness and Hardness of Low Carbon Steel Spur Gear by using Diamond Gear Burnishing, IJIRST –International Journal for Innovative Research in Science & Technology, t. 3, nr 06, 2016, s. 100–104.
66. Gierzyńska M., Tarcie, zużycie i smarowanie w obróbce plastycznej metali, Wydawnictwo Naukowo–Techniczne, Warszawa 1983.
67. Głowacka M., Stale stopowe konstrukcyjne, [w:] Metaloznawstwo. Materiały do ćwiczeń laboratoryjnych, pod red. Hucińskiej J., Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 1995, s. 142–158.
68. Górecka R., Polański Z., Metrologia warstwy wierzchniej, Wydawnictwo Naukowo–Techniczne, Warszawa 1983.
69. Górski E., Fic S., Możliwości i warunki stosowania obróbki elektromechanicznej powierzchni walcowych w świetle badań własnych. Materiały IV Konferencji NT „Postępy w teorii i technice obróbki materiałów", Kraków IOS 1973.
70. Grochała D., Berczyński S., Grządziel Z., Stress in the surface of objects burnished after milling, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, nr 72, 2014, s. 1655–1663.
71. Grochała D., Berczyński S., Grządziel Z., Testing of the state of stresses after finish burnishing items, Journal of Machine Construction and Maintenance, nr 108, 2018, s. 45–52.
72. Gryglicki R., Kukiełka L., Kształtowanie przeciwzużyciowej warstwy wierzchniej słupów nośnych form wtryskowych metodą nagniatania ślizgowego, XII Konferencja Naukowa Technologia obróbki przez nagniatanie, Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Mechaników Polskich, t. 14, 2014, s. 111–117.
73. Grzesik W., Podstawy skrawania materiałów metalowych, Wydawnictwo Naukowo–Techniczne, Warszawa 1998.
74. Grzesik W., Zak K., Prazmowski M., Surface integrity of hard turned parts modified by ball burnishing, Journal of Machine Engineering, t. 12, nr 1, 2012, s. 18–27.
75. Hadasik E., Metodyka wyznaczania charakterystyk plastyczności w próbie skręcania na gorąco: HUTNICTWO, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, z. 63, Gliwice 2002.
76. Hebda M., Janecki J., Tarcie, smarowanie i zużycie części maszyn, Wydawnictwo Naukowo–Techniczne, Wyd. II, Warszawa 1972.
77. Hebda M., Wachal A., Tribologia, Wydawnictwo Naukowo–Techniczne, Warszawa 1980.

78. Hutchings I., Shipway P., Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, Butterworth-Heinemann 2017.
79. Ikawa N., Donaldson R., Komanduri R., Konig W., Aachen T., McKeown P., Moriwaki T., Stowers I., Ultraprecision metal cutting – The past, the present and the future, CIRP, t. 40, nr 2, 1991, s. 587-594.
80. Janczewski Ł., Toboła D., Brostow W., Czechowski K., Hagg Lobland H.E., Kot M., Zagórski K., Effects of ball burnishing on surface properties of low density polyethylene, Tribology International, nr 93, 2016, s. 36–42.
81. Janecki J., Tarcie i zużycie – wrogowie maszyn, Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej, Warszawa 1971.
82. Jankowiak M., Kawalec M., Król G.: Analityczne określenie minimalnej grubości warstwy skrawanej dla różnych modeli składowych siły skrawania. Archiwum Technologii Maszyn i automatyzacji, z. 11, 1993, s. 153-160.
83. Kaczmarek J., Przybylski W., The surface characteristic after sliding and rolling burnishing, Advanced in Manufacturing Science and Technology, KBN PAN Rzeszów, t. 26, Nr 1, 2002.
84. Kolman R., Mechaniczne wzmacnianie powierzchni części maszyn, WNT, Warszawa 1965.
85. Korzynski M., Pacana A., Cwanek J., Fatigue strength of chromium coated elements and possibility of its improvement with slide diamond burnishing, Surface & Coatings Technology, nr 203, 2009, s. 1670–1676.
86. Korzyński M., A model of smoothing slide ball-burnishing and an analysis of the parameter interaction, Journal of Materials Processing Technology, nr 209, 2009, s. 625–633.
87. Korzyński M., Dudek K., Kruczek B., Kocurek P., Equilibrium surface texture of valve stems and burnishing method to obtain It, tribology International, t.124, 2018, s.195–199.
88. Korzyński M., Koszela W., Kształtowanie reliefów na powierzchniach łożysk ślizgowych metodami nagniatania, Problemy niekonwencjonalnych układów łożyskowych, Łódź 1999, s. 119-123.
89. Korzyński M., Modeling and experimental validation of the force–surface roughness relation for smoothing burnishing with a spherical tool, International Journal of Machine Tools & Manufacture, t. 47, 2007, s. 1956–1964.
90. Korzyński M., Nagniatanie ślizgowe, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2014.
91. Korzyński M., Pacana A., Cwanek J., Fatigue strength of chromium coated elements and possibility of its improvement with slide diamond burnishing, Surface & Coatings Technology, nr 203, 2009, s. 1670–1676.
92. Koziarski C., Ferenc Z., Badanie zacierania w tarciu toczno–poślizgowym [w:] Tribologia. Teoria i praktyka, Oficyna Wydawnicza SIMP-SIMPRESS, nr 4 (178), Warszawa 2001, s. 625–638.
93. Kuczmaszewski J., Zaleski K., Matuszak J., Pałka T., Garwacki R., Wpływ średnicy frezu na jego zużycie podczas obróbki stopu tytanu Ti6AI4V, Mechanik, nr 3, 2017, s. 198–200.
94. Kukiełka K., Kukiełka L., Patyk R., Szczepanik K., Optymalizacja wielokryterialna na podstawie równań regresji procesu nagniatania wybranych części maszyn rolniczych, Inżynieria Rolnicza 5 (130), 2011, s. 149-156.
95. Kukiełka L., Kukiełka K., Modelowanie i analiza procesów technologicznych metodą elementu skończonego, Mechanik, nr 3, 2015, s. 317–340.
96. Kukiełka L., Kułakowska A., Patyk R., Problematyka kształtowania jakości technologicznej części w procesie nagniatania powierzchniowego, Pomiary Automatyka Kontrola, t.54, nr 4, 2008, s. 196–199.

97. Kukiełka L., Teoretyczne i doświadczalne podstawy powierzchniowego nagniatania tocznego z elektrokontaktowym nagrzewaniem, Wydawnictwo Uczelniane Wyższej Szkoły Inżynierskiej, Koszalin 1994.
98. Kuznetsova T., Zubar T., Chizik S., Miszczak A., Labuda W., Nanoindentation and atomic force microscopy of thin surface layers fordem on the shaft surface after burnishing process, Journal of KONES Powertrain and Transport, t. 23, nr 3, 2016, s. 303–310.
99. Laber A., Warstwa graniczna w procesie tarcia, TRIBOLOGIA, nr 4, 2010, s. 245-261.
100. Labuda W., Starosta R., Dyl T., Estimation of influence of burnishing parameters on steel X5CrNi1810 surface layers strengthening and roughness changes, Journal of KONES Powertrain and Transport, t. 15, nr 3, 2008, s. 259–267.
101. Lacki P., The problem of describing the friction coefficient in numerical simulations of metal working [w:] Tribology Science and Application: Proceedings of the Review Conference, pod red. Franek F., Kajdas C., Vienna, 23– 27 April 2003, s. 146–155.
102. Lawrowski Z., Tribologia, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1985.
103. Leszek W., Lewitowicz J., Fizyczne podstawy warstwy wierzchniej, wybrane zagadnienia, [w:] Materiały z XII Szkoły Tribologicznej, Warstwa wierzchnia elementów maszyn i urządzeń, Częstochowa–Wąsosz 1983, s. 11–33.
104. Lipowczan A., Rozwój zastosowań diagnostyki wibroakustycznej maszyn górniczych [w:] V Kongres Eksploatacyjny, Sekcja III Diagnostyka techniczna, Sekcja IV Trybologia Materiały eksploatacyjne, Warszawa 1983, s. 21-27.
105. Lipski J., Kuczmaszewski J., Zaleski K., Zastosowanie sieci neuronowej do modelowania stanu warstwy wierzchniej po nagniatającym przepychaniu ślizgowym, Materiały III Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Wpływ technologii na stan warstwy wierzchniej", Gorzów Wielkopolski – Lubniewice 1996, s. 433–436.
106. Lipski J., Zaleski K., Modelowanie rozkładu naprężeń własnych w przedmiotach obrabianych nagniatającym przepychaniem ślizgowym, EKSPLOATACJA I NIEZAWODNOŚĆ, nr 4, 2004, s.18–21.
107. Łabędź J., Skorupka A., Wpływ nagniatania ślizgowego elementem diamentowym na wytrzymałość zmęczeniową stopu aluminium PA6. Materiały VII Konferencji Naukowo-Technicznej „Technologia obróbki przez nagniatanie", Bydgoszcz 2000.
108. Matuszak J., Zaleski K., Właściwości warstwy wierzchniej w obrębie krawędzi po obróbce szczotkowaniem, Mechanik, nr 8–9, 2016, s. 1064–1065.
109. Metaloznawstwo. MATERIAŁY DO ĆWICZEŃ LABORATORYJNYCH, pod red. Hucińskiej J., Wydawnictwo Politechnika Gdańska, nr 679/47, Gdańsk 1995.
110. Mohammad K. A., Zainudin E. S., Salit S., Zahari N. I., Ali A., Fatigue Life for Type 316L Stainless Steel under Cyclic Loading, Advanced Materials Research, t. 701, 2013, s. 77–81.
111. Molenda J., Charchalis A., Wpływ twardości materiału obrabianego na jakość powierzchni po docieraniu, Logistyka, Sieć Badawcza Łukasiewicz–Instytut Logistyki i Magazynowania, nr 3, 2015, s. 3363–3370.
112. Morawiecki M., Sadok L., Wosiek E., Przeróbka plastyczna. Podstawy teoretyczne, Wydawnictwo Śląskie, Katowice 1986.
113. Owers C., Industrial diamond: applications, economics and a view to the future, Industrial Diamond Review, 3, 2000, s. 176–181.
114. Özkul I., Ball burnishing process effects on surface roughness for Al 6013 alloy, Turkish Journal of Engineering, t. 3, nr 1, 2019, s. 9-13.
115. Pater Z., Samołyk G., Podstawy teorii i analizy obróbki plastycznej metali, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2011.

116. Patyk R., Patyk S., Kukiełka L., Określenie głównej siły nagniatania chropowatej powierzchni walcowej o regularnym zarysie nierówności metodami numerycznymi, Mechanik, nr 3, 2015, s. 270–280.
117. Patyk S., Patyk R., Kukiełka L., Kułakowska A., Eksperymentalne i numeryczne metody określania parametrów siłowych w procesie nagniatania tocznego powierzchni chropowatej, Pomiary Automatyka Kontrola, t.56, nr 6, 2010, s.620–623.
118. Pawłowski D., Analiza wpływu parametrów technologicznych nagniatania ślizgowego poprzez przepychanie na jakość technologiczną tulei stalowych, Uniwersytet Morski w Gdyni, Gdynia 2021.
119. Płaza S., Fizykochemia procesów tribologicznych, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 1997.
120. Podręcznik szkoleniowy– obróbka metali skrawaniem, SANDVIK Coromant, 2017.
121. Polański Z., Sołkowski T., Okoński S., Dogniatanie toczne powierzchni walcowych zewnętrznych. Krążkowanie i kulkowanie, Normatywy Technogiczne, Wydawnictwo Przemysłu Maszynowego WEMA, Warszawa 1974.
122. Polowski W., Bednarski P., Toboła D., Czechowski K., Rusek P., Wybrane aspekty kształtowania warstwy wierzchniej ślizgowym nagniataniem diamentem, Inżynieria Materiałowa, nr 4, 2011, 676-679.
123. Polowski W., Technologia i warunki obróbki dogniatania tocznego otworów w stalach oraz dogniatania tocznego wałków przy obróbce stali, żeliw, stopów aluminium i stopów miedzi, Normatywy Technologiczne, Wydawnictwo Przemysłu Maszynowego WEMA, Warszawa 1976.
124. Poradnik obróbki skrawaniem, Hoffmann Group, Műnchen 2016.
125. Prevéy P.S., Cammett J. T., The Influence of Surface Enhancement by Low Plasticity Burnishing on the Corrosion Fatigue Performance of AA7075-T6, International Journal of Fatigue, t. 26, nr 9, s. 975–982.
126. Przybylski W., Dzionk S., Hybrid Processing by Turning and Burnishing of Machine Components [w:] Advances in Manufacturing, Springer, Switzerland 2018, s. 587-598.
127. Przybylski W., Integrated production technology of cylindrical surfaces by turning and burnishing, Advances in Manufacturing Science Technology, t. 40, nr 3, 2016, s. 29–42.
128. Przybylski W., Nagniatanie powierzchni cylindrycznych, płaskich i kształtowych na tokarkach, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2005.
129. Przybylski W., Obróbka nagniataniem, technologia i oprzyrządowanie, Wydawnictwo Naukowo–Techniczne, Warszawa 1979.
130. Przybylski W., Technologia obróbki nagniataniem, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1987.
131. Przybylski W., Warunki nagniatania ślizgowego elementem diamentowym stali hartowanej [w:] Postęp w dziedzinie rozwoju obróbki nagniataniem, Materiały z narady naukowo-technicznej, Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Mechaników Polskich, Częstochowa 1978, s. 92-100.
132. Przybylski W., Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2008.
133. Przybylski W., Zastosowanie obróbki nagniataniem w technologii siłowników hydraulicznych, Postęp Nauki i Techniki, nr 6, 2011, s. 196-201.
134. Przybyłowicz K., Metaloznawstwo, Wydawnictwo Naukowo–Techniczne, Warszawa 2007.
135. Radziejewska J., Laserowa modyfikacja właściwości warstwy wierzchniej wspomagana nagniataniem, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa 2011.

136. Radziejewska J., Skrzypek S. J., Microstructure and residua stresses in surface layer of simultaneously laser alloyed and burnished steel, Journal of Materials Processing Technology, nr 209, 2009, s. 2047–2056.
137. Reynolds O., On rolling friction, Philosophical Transactions The Royal Society, London 1876, s. 155-174.
138. Rogowski W., Rachunek efektywności inwestycji. Wyzwania teorii i praktyki, Wydawnictwo Nieoczywiste, Warszawa 2018.
139. Rotella G., Filice L., Micari F., Improving surface integrity of additively manufactured GP1 stainless steel by roller burnishing, CIRP Annals - Manufacturing Technology, nr 00, 2020, s. 1–4.
140. Rudnik S., Metaloznawstwo, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1980.
141. Scheers J., Vermeulen M., De Mare C., Meseure K., Assessment of steel surface roughness and waviness in relation with paint appearance, International Journal of Machine Tools and Manufacture, t. 38, nr 5–6, 1998, s. 647–656.
142. Schulz H., Moriwaki T., High-speed machining, Annals CIRP, t. 41, nr 2, 1992, s. 637-642.
143. Sękowska A., Sękowski S., Metale w naszym domu, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1988.
144. Skalski K., Morawski A., Przybylski W., Analysis of contact elastic–plastic strains during the process of burnishing, International Journal of Mechanical Sciences, t. 37, 1995, s. 461–472.
145. Skoczylas A., Zaleski K., Studies on the selected properties of C45 steel elements surface layer after laser cutting, finishing milling and burnishing, Advances in Science and Technology Research Journal, t. 10, nr 32, 2016, s. 118–123.
146. Sokolski P., Ziemba S., Zagadnienia tarcia suchego, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1965.
147. Szczepanik K., Kukiełka L., Patyk R., Symulacja numeryczna zjawisk fizycznych podczas nagniatania tocznego w procesie regeneracji części maszyn rolniczych, Inżynieria Rolnicza, t. 5, nr 130, 2011, s. 283-290.
148. Szczerek M., Wiśniewski M., Tribologia i trybotechnika, Wydawnictwo Instytutu Eksploatacji, Radom 2000.
149. Szyc M., Kukiełka L., Legutko S., Komputerowe wspomaganie procesu dynamicznego nagniatania śrutem kulistym, XII Konferencja Naukowa Technologia obróbki przez nagniatanie, Mechanik, R. 87, nr 11, 2014, s. 236–253.
150. Świrad S., Influence of parameters of sliding burnishing with cylindrical elements of surface roughness. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. „Mechanika", z. 68, nr 231, Rzeszów 2006, s. 223–228.
151. Świrad S., Wdowik R., Determining the effect of ball burnishing parameters on surface roughness using the Taguchi method, Procedia Manufacturing, nr 34, 2019, s. 287–292.
152. Teimouri R., Amini S., Analytical modeling of ultrasonic surface burnishing process: Evaluation of through depth localized strain, International Journal of Mechanical Sciences, nr 151, 2019, s. 118–132.
153. Teimouri R., Optimization of residual stress field in ultrasonic assisted burnishing Process, International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, nr 2, 2019, s. 346–354.
154. Tomczyk W., Ekologiczno-eksploatacyjne aspekty w procesie użytkowania i odnowy maszyn i urządzeń. Regeneracja części w ekologicznej eksploatacji maszyn. Inżynieria Rolnicza, t. 3, nr 121, Kraków 2010, s. 217-223.

155. Trauth D., Klocke F., Mattfeld P., Time–Efficient Prediction of the Surface Layer State after deep rolling using similarity mechanics approach, Elsevier, Procedia CIRP, nr 9, 2013, s. 29–34.
156. Tubielewicz K., Chmielik I., Michalczuk H., Modelowanie powstawania naprężeń w warstwie wierzchniej, Mechanik, nr 7, 2018, s. 479–481.
157. Tubielewicz K., Jednoczesne skrawanie i nagniatanie powierzchni płaskich [w:] Postęp w dziedzinie rozwoju obróbki nagniataniem, Materiały z narady naukowo-technicznej, Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Mechaników Polskich, Częstochowa 1978, s. 82-91.
158. Tubielewicz K., Technologia nagniatania żeliwnych części maszynowych, Politechnika Częstochowska, Częstochowa 2000.
159. Tubielewicz K., Wpływ obciążenia statycznego na wskaźnik umocnienia warstwy wierzchniej, Materiały Konferencji Naukowej XXV-lecia Politechniki Częstochowskiej, Sekcja Technologii Obróbki Metali, Cz. I, Częstochowa 1974.
160. Tubielewicz K., Zaborski A., Doświadczalne wyznaczanie funkcji konstytuowania warstw wierzchnich modelujących proces obróbki nagniataniem, Inżynieria Materiałowa, nr 5/147, 2005, s. 499–501.
161. Tubielewicz K., Zaborski A., Modelowanie i doświadczalna analiza procesu odkształceń podczas nagniatania i zużycia, Materiały VII Konferencji Naukowo–Technicznej „Technologia obróbki przez nagniatanie", Bydgoszcz, 2000.
162. Tubielewicz K., Zaborski A., Modelowanie i Symulacja Procesów Obróbek Wykańczających Przy Wykorzystaniu MES, Dydaktyka Informatyki 5, 2010, s. 171- 179.
163. Tubielewicz K., Zaborski A., Optymalizacja parametrów użytkowych warstwy wierzchniej po nagniataniu [w:] Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie, pod red. Przybylskiego W., Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2005.
164. Ulutan D., Ozel T., Machining induced surface integrity in titanium and nikel alloys: A review, International Journal of Machine Tools & Manufacture, nr 51, 2011, s. 250–280.
165. Varga G., Ferencsik V., Investigation of the influence of different burnishing parameters on shape correctness and residual stresses, Materials Science and Engineering, nr 448, 2018, s. 1–8.
166. Wachal A., Stan graniczny oleju i jego kryteria [w:] Materiały V Kongresu Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, t. IV, Warszawa 1983 s. 117-123.
167. Waszczur P., Dzionk S., Ścibiorski B., Przybylski W., Wpływ posuwu nagniatania na chropowatość powierzchni przedmiotów ze stali w stanie utwardzonym, Mechanik, nr 12, 2016, s. 1778–1779.
168. Weertman J., Weertman J.R., Podstawy teorii dyslokacji, Wydawnictwo Naukowo–Techniczne, Warszawa 1968.
169. Wesołowski K., Metaloznawstwo, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1966.
170. Wojciechowski Ł., Problemy kształtowania technologicznej warstwy wierzchniej w aspekcie odporności na zacieranie. Część 2– Podejście topologiczne, TRIBOLOGIA, nr 6, 2015, s. 139–154.
171. Wolkenberg A., Fizyka powierzchni (wybrane zagadnienia dla kierunku Metalurgia, specjalność obróbka cieplna i powierzchniowa), Seria: Metalurgia Nr 5, Wydawnictwo Wydziału Metalurgii i Inżynierii Materiałowej Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2000.
172. Wójcik R., Wejman P., Walczak R., Wpływ energii szlifowania powierzchni walcowych na stan naprężeń własnych warstwy wierzchniej stali stopowych, Obróbka metalu, nr 3, 2014, s. 32–38.
173. Xin W., Yang L., Zhao J., Li Y., Morphology on 3D ordered macroporous metals associated to deposition depth, Applied Surface Science, nr 258, 2012, s.7059– 7063.

174. Yang D.Y., Bambach M., Cao J., Duflou J.R., Groche P., Kuboki T., Sterzing A., Tekkaya A.E., Lee C.W., Flexibility in metal forming, CIRP Annals - Manufacturing Technology, nr 67, 2018, s. 743–765.
175. Zaleski K., Skoczylas A., Bławucki S., Obróbka gładkościowa i umacniająca. Ćwiczenia laboratoryjne, Politechnika Lubelska, Lublin 2017.
176. Zaleski K., Skoczylas A., Effect of slide burnishing on the surface layer and fatigue life of titanium Alloy parts, Advances in Materials Science, t. 19, nr 4 (62), 2019, s. 35– 45.
177. Zaleski K., Technologia nagniatania dynamicznego, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2018.
178. Zaleski K., Wpływ nagniatającego przepychania ślizgowego na rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej obrabianego otworu [w:] Technologiczne systemy informacyjne w inżynierii produkcji i kształceniu technicznym, pod red. Świć A., Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin 2001, s. 333–338.
179. Zaleski R., Zaleski K., Positron Annihilation in Steel Burnished by Vibratory Shot Peening, ACTA PHYSICA POLONICA A, t. 110, nr 5, 2006, s. 739–746.
180. Zębala W., Modelowanie procesu toczenia materiałów trudnoskrawalnych, Mechanik, Zeszyt 15, 2011, s. 136-148.
181. Zhang M., Liu Z., Deng J., Yang M., Dai Q., Tianzeng Zhang T., Optimum design of compressive residual stress field caused by ultrasonic surface rolling with a mathematical model, Applied Mathematical Modelling, nr 76, 2019, s. 800–831.

Wykaz Norm:

182. Norma PN -60/M-02102 Tolerancje podstawowe wałków i otworów dla wymiarów do 500 mm.
183. Norma PN–EN ISO 12944–1:2018–01–wersja polska. Farby i lakiery – Ochrona przed korozją konstrukcji stalowych za pomocą ochronnych systemów malarskich – Część 1: Ogólne wprowadzenie.
184. PN– EN 10020:2003– wersja polska, Definicja i klasyfikacja gatunków stali.
185. PN–EN 10025:2002 – wersja angielska, Wyroby walcowane na gorąco z niestopowych stali konstrukcyjnych –Warunki techniczne dostawy.
186. PN–EN 10027–2:2015–07 –wersja polska, Systemy oznaczania stali– Część 2: System cyfrowy.

Źródła internetowe:

187. ABRAMS PREMIUM STAL, WWW.poradnikstali.pl/alternatywy/40HM [08.01.2021].
188. AKROSTAL, Karta katalogowa; https://akrostal.pl/ [08.01.2021].
189. Gatunek Stali: 40HM; 42CrMo4, www.multistal.com.pl [08.01.2021].
190. Gatunek Stali: C45 – 1.0503, www.multistal.pl [08.01.2021].
191. https://www.kronosedm.pl/stal-00h17n14m2-1-4404, [15.09.2021].
192. Krajewska-Śpiewak J., Gawlik J., Wyznaczanie naprężeń własnych za pomocą metody rentgenograficznej w materiałach trudnoskrawalnych, https://docplayer.pl/58154453-Wyznaczanie-naprezen-wlasnych-za-pomoca-metody-rentgenograficznej-w-materialach-trudnoskrawalnych.html [20.11.2021].
193. Kształtowanie struktury i właściwości materiałów metalowych metodami technologicznymi, http://www.pg.gda.pl/mech/kim/8%20Ksztaltowanie%20str%20i%20wl%20metali.pdf, [05.10.2021].

194. Mecmesin, https://www.mecmesin.com/digital-force-gauges/advanced-force-and-torque-indica-tor, [10.08.2021].
195. Prasa hydrauliczna uniwersalna MX-340G, MAQSTOCK, MASZYNY DO OBRÓBKI METALU, https://maqstock.pl/prasa-hydrauliczna-uniwersalana-mx-340/, [15.01.2020].
196. S235JR stal konstrukcyjna, o bardzo szerokim zastosowaniu, http://www.intertubi.pl/blog-pl/S235JR-stal-konstrukcyjna,-o-bardzo-szerokim-zastosowaniu-139.html, (21.08.2021)
197. Smary plastyczne, Rozdział XIX: https://totalenergies.pl/system/files/atoms/files/rozdzial_19_smary_plastyczne.pdf, (20.10.2021).
198. Twardościomierz Qness Q250M, http://wm.umg.edu.pl, [21.05.2021].
199. Wierzbanowski K., 6. Dyfrakcyjne wyznaczanie naprężeń wewnętrznych, http://www.ftj.agh.edu.pl/~wierzbanowski/naprezenia.pdf, [20.06.2021].
200. Własności stali wg EN 10025-2:2004, https://salzgitterstahlhandel.pl/baza-wiedzy/gatunki-i-normy/swiadectwo-badan-wg-1002042004/, [15.11.2021].
201. Wyroby ze stali gatunku S235JR, https://metinvestholding.com/pl/products/steel-grades/s235jr, [17.11.2021].
202. Wyrwał J., Wykłady z Mechaniki materiałów, https://docplayer.pl/72505587-1-5-zwiazki-konstytutywne-strona-fizyczna.html, [20.11.2021].
203. Zewnętrzne przetworniki siły i momentu z wyświetlaczem AFTI, https://www.ita-polska.com.pl/systemy-pomiarowe/systemy-pomiaru-sily-i-momentu/afti, [10.08.2021].
204. Olej maszynowy VECO Megol 32, https://www.vecooil.pl/veco-megol, [03.10.2021].

Spis rysunków

1. **Rys. 2.1.** Podział rodzajów nagniatania. Opracowanie własne…….....…18
2. **Rys. 2.2.** Odmiany naporowego nagniatania ślizgowego. Opracowanie własne…….....27
3. **Rys. 2.3.** Schemat obróbki nagniatającym przepychaczem ślizgowym jednoelementowym przepychaczem walcowo-czołowym……...…….....…28
4. **Rys. 2.4.** Schemat obróbki nagniatającym przepychaczem ślizgowym kulką łożyskową…….....28
5. **Rys. 2.5.** Schemat obróbki nagniatającym przepychaczem ślizgowym przy pomocy przepychacza wieloelementowego składanego……..…….29
6. **Rys. 2.6.** Schemat przepychania otworu nieprzelotowego jednoelementowym trzpieniowym przepychaczem…….....29
7. **Rys. 2.7.** Schemat przepychania otworu łukowego przelotowego kulką łożyskową……...29
8. **Rys. 2.8.** Schemat obróbki otworów nagniatającym przeciąganiem ślizgowym różnorodnym oprzyrządowaniem przy pomocy jednoelementowego przeciągacza walcowo–stożkowym na przeciągarkach pionowych…….....30
9. **Rys. 2.9.** Schemat obróbki wieloelementowym przeciągaczem ślizgowym z równoczesnym skrawaniem na przeciągarkach poziomych…….....30
10. **Rys. 2.10.** Schemat obróbki otworów nagniatającym przeciąganiem ślizgowym wieloelementowym przeciągaczem kulistym giętkim do przepychania otworu kształtowego……..……...31
11. **Rys. 2.11.** Sugerowana technologia odnowy części maszyn rolniczych…….…34
12. **Rys. 3.1.** Wykres zmiany energii potencjalnej w funkcji odległości pomiędzy atomami, jonami albo cząsteczkami……..……..…....40
13. **Rys. 3.2.** Schemat struktury warstwy wierzchniej metali ……...…….....41
14. **Rys. 3.3.** Schemat struktury warstwy wierzchniej po nagniataniu z podziałami na strefy: I– rozdrobnienia, II– odkształceń plastycznych, III– odkształceń sprężystych, IV– wynikowa ściskających naprężeń własnych, V– efektów cieplnych…….…….42
15. **Rys. 3.4**. Schemat rodzajów styków ciernych odnoszący się do geometrii: a) powierzchniowy, b) liniowy, c) punktowy ……...……43
16. **Rys. 3.5.** Schemat modelu odkształceń nagniatania tocznego: a) odkształcenia sprężyste, b) odkształcenia sprężysto–plastyczne, c) odkształcenia plastyczne: e- strefa sprężysta, h_f- wysokość fali materiału, p_l- strefa plastyczna [129] ……..…….....45
17. **Rys. 3.6.** Schemat nagniatania ślizgowego ślizgowego: F– siła dociskająca, p– posuw nagniatania, 1–przedmiot obrabiany, 2– element nagniatający, 3–sprężyna dociskająca…….....46
18. **Rys. 3.7.** Schemat modelu odkształceń plastycznych występujących w warstwie wierzchniej wałka w trakcie nagniatania kulką w przekroju: a) wzdłużnym, b) poprzecznym: F-siła nagniatania, n-prędkość obrotowa przedmiotu obrabianego, p-posuw nagniatania [44, 130] ……48
19. **Rys. 5.1.** Schemat blokowy realizowanych badań……..…….....56
20. **Rys. 5.2.** Tokarka uniwersalna CDS 500X1000…….…58
21. **Rys. 5.3.** Nagniatak trzpieniowy: a) model fizyczny, b) model 3D, c) model konstrukcyjny..…..59
22. **Rys. 5.4.** Próbki do nagniatającego przepychania ślizgowego: schemat konstrukcyjny wymiaru próbek; model 3D…….……60
23. **Rys. 5.5.** Model fizyczny próbek do nagniatającego przepychania ślizgowego…..……60
24. **Rys. 5.6.** Prasa hydrauliczna NARGESA model MX–340G……...……....61

25. **Rys. 5.7.** a) Budowa prasy hydraulicznej MX-340G: 1– nagniatak trzpieniowy, 2–tuleja obrabiana, 3–matryca, 4–konstrukcja unieruchamiająca próbkę przy wyjmowaniu nagniataka, 5–śruby mocujące, 6– konstrukcja unieruchamiająca próbkę w osi narzędzia, 7–podstawa mocująca matryce; b) schemat procesu nagniatającego przepychania ślizgowego……..……....62
26. **Rys. 5.8.** a) Konstrukcja od producenta umożliwiająca na unieruchomienie próbki w osi narzędzia; b) dodatkowa konstrukcja zrealizowana w celu unieruchomienia próbek w trakcie wyjmowania nagniataka trzpieniowego…….....64
27. **Rys. 5.9.** Schemat procesu nagniatającego przepychania ślizgowego…….……65
28. **Rys. 5.10.** a) Wskaźnik sił i momentu obrotowego marki marki Mecmesin AFTI, b) kabel ogniwa obciążnikowego z czujnikiem obciążnikowym……..……65
29. **Rys. 5.11.** Twardościomierz uniwersalny Qness Q250M……....66
30. **Rys. 5.12.** a) Profilometr HOMMEL TESTER T1000; b) Przykładowy pomiar chropowatości……...67
31. **Rys. 6.1.** Model 3D nagniataka trzpieniowego w programie SOLIDWORKS 2019, rzut: a) z przodu; b) lewa strona; c) z góry; d) aksonometryczny trójwymiarowy……..…76
32. **Rys. 6.2.** Widok siatki MES w programie FORGE NxT 2.1…….……..76
33. **Rys. 6.3.** Model 3D tulei w programie SOLIDWORKS 2019, rzut: a) z przodu; b) izometryczny; c) z góry; d) z dołu…….....77
34. **Rys. 6.4.** Widok siatki MES w programie FORGE NxT 2.1…….…….....77
35. **Rys. 6.5.** Model 3D złożeniowy w programie SOLIDWORKS 2019: a) rzut z przodu; b) w początkowej fazie badania; c) w pośredniej fazie badania; d) w końcowej fazie badania…….……78
36. **Rys. 6.6.** Widok siatki MES dla złożenia w programie FORGE NxT 2.1: a) podczas rozpoczęcia symulacji; b) w trakcie badania; c) z widocznym rozkładem intensywności naprężeń……...79
37. **Rys. 6.7.** Widok siatki MES w programie FORGE NxT 2.1…….....79
38. **Rys. 6.8.** Schemat zjawiska poślizgu……...82
39. **Rys. 6.9.** Schemat dyslokacji: a) śrubowej, b) krawędziowej, gdzie: P, Q– krawędź dyslokacji…….……82
40. **Rys. 6.10.** Model oddziaływania pomiędzy wypukłościami powierzchni w trakcie względnego przemieszczenia dla odkształcenia sprężystego..…….....85
41. **Rys.6.11.** Schemat wypolerowanej powierzchni metalu……...……..86
42. **Rys. 6.12.** Model oddziaływania pomiędzy wypukłościami powierzchni w trakcie względnego przemieszczenia dla odkształcenia plastycznego…….....87
43. **Rys. 6.13.** Odkształcenie plastyczne przez bliźniakowanie: a) bez odkształcenia, b) kryształ bliźniaczy…….....……...…88
44. **Rys. 6.14.** Rodzaje naprężeń: a) makro naprężenia, b) sub naprężenia, c) mikro naprężenia…….....89
45. **Rys. 7.1.** Rozkład temperatury uzyskany w symulacji komputerowej nagniatającego przepychania ślizgowego podczas obróbki na zimno dla: a) stali S235JR; b) stali AISI 316L; c) stali C45……...92
46. **Rys. 7.2.** Wykres przedstawia wpływ prędkości nagniatającego przepychania ślizgowego na rozkład temperatury dla stali S235JR, AISI 316L i C45 o średnicy nagniataka trzpieniowego Ø 22mm dla wcisku nagniatania w= 0,25 mm po procesie nagniatania…….……93
47. **Rys. 7.3.** Rozkład prędkości odkształcenia uzyskany w symulacji komputerowej nagniatającego przepychania ślizgowego podczas obróbki na zimno dla: a) stali S235JR; b) stali AISI 316L; c) stali C45……...94
48. **Rys. 7.4.** Wykres przedstawia wpływ prędkości nagniatającego przepychania ślizgowego na rozkład prędkości odkształcenia dla stali S235JR, AISI 316L i C45 o średnicy nagniataka trzpieniowego Ø 22mm dla wcisku nagniatania w= 0,10 mm po procesie nagniatania…….….96

49. Rys. 7.5. Intensywność odkształcenia uzyskana w symulacji komputerowej nagniatającego przepychania ślizgowego podczas obróbki na zimno dla: a) stali S235JR; b) stali AISI 316L; c) stali C45……...…97
50. Rys. 7.6. Wykres przedstawia wpływ prędkości nagniatającego przepychania ślizgowego na intensywność odkształcenia dla stali S235JR, AISI 316L i C45 o średnicy nagniataka trzpieniowego Ø 22mm dla wcisku nagniatania w= 0,20 mm po procesie nagniatania…….….98
51. Rys. 7.7. Intensywność naprężeń uzyskana w symulacji komputerowej nagniatającego przepychania ślizgowego podczas obróbki na zimno dla: a) stali S235JR; b) stali AISI 316L; c) stali C45…….……99
52. Rys. 7.8. Wykres przedstawia wpływ prędkości nagniatającego przepychania ślizgowego na intensywność naprężeń dla stali S235JR, AISI 316L i C45 o średnicy nagniataka trzpieniowego Ø 22mm dla wcisku nagniatania w= 0,20 mm po procesie nagniatania…….....…100
53. Rys. 7.9. Naprężenia średnie uzyskane w symulacji komputerowej nagniatającego przepychania ślizgowego dla: a) stali S235JR; b) stali AISI 316L; c) stali C45……..102
54. Rys. 7.10. Wykres przedstawia wpływ prędkości nagniatającego przepychania ślizgowego na naprężenia średnie dla stali S235JR, AISI 316L oraz C45 o średnicy nagniataka trzpieniowego Ø 22mm dla wcisku nagniatania w= 0,20 mm po procesie nagniatania…….…...103
55. Rys. 7.11. Wykres krzywej płynięcia materiału sprężysto–plastycznego z umocnieniem nieliniowym……....104
56. Rys. 7.12. Przykładowy model krzywej umocnienia przez odkształcenie dla stali AISI 316L o wymiarze Ø21,95 mm…….105
57. Rys. 7.13. Wykres parametru Rt dla wszystkich wariantów badanych materiałów……..108
58. Rys. 7.14. Wykres parametru Rz dla wszystkich wariantów badanych materiałów…..…….109
59. Rys. 7.15. Przedstawia zależność wskaźnika K_{Ra} od średnicy wewnętrznej nagniatanego elementu…….…111
60. Rys.7.16. Krzywa materiałowa dla próbki ze stali AISI 316L po procesie nagniatania……113
61. Rys. 7.17. Cyfrowy mikroskop KEYENCE VHX-700…….114
62. Rys. 7.18. Obraz rozciętych próbek dla stali: a) S235JR; b) AISI 316L; c) C45 do badań mikrostruktury……..……..114
63. Rys. 7.19. Badania makroskopowe przeciętej próbki stali konstrukcyjnej S235JR……..…….115
64. Rys. 7.20. Badania mikroskopowe dla stali AISI 316L: a) przekrój wzdłużny; b) wycinek obszaru w powiększeniu…….....115
65. Rys. 7.21. Badania mikroskopowe dla stali C45…….……..116
66. Rys. 7.22. Mikroskop optyczny Nikon Eclipse MA-200……..…117
67. Rys. 7.23. Mikrostruktura warstwy wierzchniej stali S235JR z oznaczoną głębokością zalegania odkształceń przy 500x krotnym powiększeniu ……..…117
68. Rys. 7.24. Mikrostruktura warstwy wierzchniej stali AISI 316L z oznaczoną głębokością zalegania odkształceń przy 500x krotnym powiększeniu …….……117
69. Rys. 7.25. Mikrostruktura warstwy wierzchniej stali C45 z oznaczoną głębokością zalegania odkształceń przy 500x krotnym powiększeniu…….….118
70. Rys. 7.26. Cyfrowy mikroskop pomiarowy (Smartzoom 5)……...…….……..119
71. Rys. 7.27. Zdjęcia rozciętych próbek ze stali: a) S235JR; b) AISI 316L; c) C45…….....119
72. Rys. 7.28. Zdjęcia z mikroskopu Smartzoom 5 dla stali AISI 316L po procesie nagniatania dla średnicy zewnętrznej po przecięciu wzdłuż próbki……....120

Spis tabel

1. **Tab. 2.1.** Charakterystyka technologiczna metod nagniatania wewnętrznych powierzchni walcowych……...22
2. **Tab. 3.1.** Zestawienie zależności dla obliczeń głębokości zalegania odkształcenia plastycznego dla różnych rodzajów obróbki nagniataniem……..…….....…..50
3. **Tab. 5.1.** Wyniki twardości nagniataka trzpieniowego…….....……66
4. **Tab.5.2.** Wyniki pomiarów twardości stalowych tulei realizowanych metodą Vickers'a……..67
5. **Tab. 5.3.** Właściwości fizyczne rodzajów stali użytych do badań……...……..68
6. **Tab. 5.4.** Skład chemiczny i właściwości mechaniczne stali 40HM (1.7225)…..…….…….68
7. **Tab. 5.5.** Skład chemiczny i właściwości mechaniczne stali S235JR (1.0037)……..……69
8. **Tab. 5.6.** Skład chemiczny i właściwości mechaniczne stali AISI 316L (1.4404)…….…….70
9. **Tab. 5.7.** Skład chemiczny i właściwości mechaniczne stali C45 (1.0503)……..…….....70
10. **Tab. 7.1.** Wymiary geometryczne i wskaźniki odkształceń plastycznych tulei stalowych po procesie nagniatającego przepychania ślizgowego……107
11. **Tab. 7.2.** Zestawienie wyników pomiarów chropowatości po nagniataniu dla stali S235JR…...107
12. **Tab. 7.3.** Zestawienie wyników pomiarów chropowatości po nagniataniu dla stali AISI 316L...108
13. **Tab. 7.4.** Zestawienie wyników pomiarów chropowatości po nagniataniu dla stali C45……...108
14. **Tab. 7.5.** Wyniki obliczeń wskaźnika zmniejszenia chropowatości powierzchni dla nagniatanego elementu ze stali S235JR……...……...……...…110
15. **Tab. 7.6.** Wyniki obliczeń wskaźnika zmniejszenia chropowatości powierzchni dla nagniatanego elementu ze stali AISI 316L……..……...…....110
16. **Tab. 7.7.** Wyniki obliczeń wskaźnika zmniejszenia chropowatości powierzchni dla nagniatanego elementu ze stali C45…….....……....111
17. **Tab. 7.8.** Głębokość zalegania odkształceń……..……....118
18. **Tab. 7.9.** Ocena atrakcyjności inwestycji [138]. Opracowanie własne……..……...122