

Politechnika Poznańska
Wydział Inżynierii Mechanicznej

Praca Doktorska

**Kształtowanie odporności na zużycie
ścierne powłok nakładanych cieplnie**

mgr inż. Dawid Romek

Promotor:

dr hab. inż. Jarosław Selech, prof. PP

Promotor pomocniczy:

dr hab. inż. Dariusz Ulbrich

Poznań 2023

STRESZCZENIE

Nowoczesne rolnictwo stawia coraz większe wymagania maszynom do uprawy gleby. Narzędzia pracujące w gruncie powinny zapewniać trwałą i niezawodną pracę w różnych warunkach masy ścierniej. Dlatego w ramach pracy podjęto tematykę kształtowania odporności na zużycie ściernie elementów maszyn, które są narażone na oddziaływanie gruntu podczas pracy. Głównym celem badań było wyznaczenie wpływu parametrów glebowej masy ścierniej oraz właściwości powłok technicznych na mechanizm procesu zużywania, jego intensywność oraz transformację kształtowo-wymiarową badanych elementów.

W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu powłok nanoszonych cieplnie na zużycie elementów pracujących w masie ścierniej. W wynikach badań wzięto pod uwagę wpływ parametrów masy ścierniej oraz rodzaj naniesionych cieplnie powłok. Na podstawie danych z analizy literaturowej wytypowano pięć rodzajów stali trudnościeralnych oraz dwa rodzaje powłok nakładanych cieplnie (napoina konwencjonalna, napoina laserowa).

Badania podzielono na cztery etapy. Pierwszym etapem była analiza mechaniczna właściwości stali oraz naniesionych powłok, w skład których wchodziły badania twardości oraz obserwacje powstałych mikrostruktur. Kolejnym etapem była analiza chropowatości elementów przed oraz po teście tribologicznym. W skład tego etapu wchodziło również wykonanie zdjęć powierzchni po przeprowadzonym teście tribologicznym. Trzeci etap obejmował badania z wykorzystaniem technologii scaningu 3D, które obejmowały zeskanowanie badanych elementów przed oraz po teście tribologicznym. Na podstawie badań wskazano ubytki w geometrii elementów poddanych testom.

W czwartym etapie badań wykonano eksperyment tribologiczny w zmiennym medium ściernym. Wybrano cztery różne warianty ścierniwa. Badania odbywały się na zaprojektowanym oraz wykonanym prototypowym stanowisku badawczym odwzorowującym pracę urządzeń rolniczych.

Wyniki badań wskazują na zwiększenie odporności na zużycie ściernie napoiny konwencjonalnej dla ścierniwa o parametrach W0%, pH7 oraz W0%, pH10 w stosunku do materiału rodzimego. Ponadto wykazano, że napoina laserowa zmniejszyła zużycie ściernie dla masy ścierniej o parametrach W10% i pH7. Natomiast dla wilgotności W10% i pH10 nie stwierdzono wpływu powłok nanoszonych cieplnie na wyniki zużycia uzyskane w teście tribologicznym. Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano wnioski poznawcze, uytylitarne oraz komercyjne jak i wyznaczono dalsze kierunki badań w zakresie ograniczenia zużycia ściernego elementów maszyn rolniczych i roboczych.

ABSTRACT

Modern agriculture places increasing demands on soil heavy machinery. Machines working in the soil should ensure durable and reliable operation under various abrasive mass conditions. Therefore, the study focuses on the formation of abrasive wear resistance of machine components that are exposed to soil during operation. The main objective of the study was to determine the influence of the soil abrasive mass parameters and the properties of technical coatings on the wear process, its intensity and the shape-dimensional transformation of the studied components.

The study presents the results showing the impact of the thermally applied coatings on overwearing of components working in an abrasive mass. The results of the study took into account the influence of the parameters of the abrasive mass and the type of thermally applied coatings. Based on the data from the literature analysis, five types of wear-resistant steels and two types of thermally applied coatings (conventional surfacing, laser surfacing) were selected.

The research was divided into four stages. The first stage was a mechanical analysis of the properties of the steel and applied coatings, which included hardness tests and observations of the resulting microstructures. The next stage was the analysis of the roughness of the steel surface before and after the tribological test. This stage also included taking pictures of the surface after the tribological test. The third stage involved testing using 3D scanning technology, which included scanning of the tested elements before and after the tribological test.

Based on the research, defects in the geometry of the tested components were indicated. The results show the resistance increase of (conventional surfacing) on abrasive wear for the abrasive with parameters W0%, pH7 and W0%, pH10 compared to the native material. In addition, it was shown that the laser surfacing reduced abrasive wear for the abrasive mass with parameters W10% and pH7. On the other hand, for W10% and pH10, there was no effect of heat-applied coatings on the wear results obtained in the tribological test. On the basis of the conducted research, cognitive, utilitarian and commercial conclusions were formulated, as well as further research directions were set in the field of reducing abrasive wear of agricultural and working machinery components.

Based on the research, cognitive, utilitarian and commercial conclusions were formulated, as well as further research directions.

SPIS TREŚCI

1. WPROWADZENIE	7
1.1. Geneza tematu	7
1.2. Zakres pracy i jej układ	9
2. ANALIZA STANU WIEDZY	12
2.1. Charakterystyka podstawowych terminów	12
2.2. Rodzaje zużycia elementów maszyn roboczych.....	21
2.3. Mechanizmy zużywania w masie ścierniej.....	33
2.4. Stanowiska laboratoryjne do badania zużycia ściernego	40
2.5. Materiały stosowane w budowie maszyn	54
2.6. Metody ograniczenia zużycia ściernego maszyn	56
2.7. Podsumowanie analizy stanu wiedzy	61
3. SFORMUŁOWANIE PROBLEMATYKI BADAWCZEJ	63
3.1. Problem badawczy	63
3.2. Cele i zadania badawcze	64
4. METODYKA BADAŃ	68
4.1. Plan metodyki badawczej	68
4.2. Opis procesu badawczego	69
4.2.1. Uzasadnienie wyboru materiałów	69
4.2.2. Kryterium doboru kształtu próbek	70
4.2.3. Kryterium doboru obróbek warstwy wierzchniej	71
4.3. Opis procedur badawczych.....	72
4.3.1. Przygotowanie próbek	72
4.3.2. Koncepcja stanowiska badawczego	76
4.4. Opis metod badawczych	80
4.4.1. Opis badań tribologicznych	80
4.4.2. Opis badań uzupełniających	83
5. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ.....	85
5.1. Wyniki badania wybranych właściwości próbek	85
5.1.1. Wyniki badania twardości próbek	85
5.1.2. Wyniki metalograficznych badań mikroskopowych próbek	90
5.1.3. Analiza wyników badań wybranych właściwości próbek	96
5.2. Wyniki eksperymentu tribologicznego	96
5.2.1. Wyniki objętościowego zużycia próbek	96
5.2.2. Porównawcza analiza struktury powierzchni próbek	101
5.2.3. Analiza wyników eksperymentu tribologicznego.....	105
5.2.4. Podsumowanie wyników eksperymentu tribologicznego.....	110

6. ZAKOŃCZENIE	111
6.1. Wnioski i podsumowanie celów pracy	111
6.2. Podsumowanie i kierunki dalszych badań	113
 LITERATURA	 114

1. WPROWADZENIE

1.1. Geneza tematu

Maszyna robocza to urządzenie mechaniczne lub elektryczne, które jest zaprojektowane i wykorzystywane do wykonywania różnych zadań związanych z pracami ziemnymi. Podstawowe maszyny robocze służą do robót drogowych i rolniczych. Maszyny te są najczęściej wyposażone w narzędzia, które wykonują ruch ziemi. Do takich maszyn można zaliczyć np. koparki lub pługi rolnicze.

Maszyny robocze są wykorzystywane w wielu branżach i sektorach, a ich rozwój pozwolił na znaczne zwiększenie wydajności i efektywności procesów produkcyjnych. W pracy skupiono się głównie na maszynach wykonujących pracę w masie ścierniej oraz rozpatrywano zagadnienie zużycia elementów roboczych tych maszyn. Ubytek materiału występujący na powierzchni elementów roboczych jest głównym problemem związanym ze zmianą ich kształtu. Według autora [94] jedynie ok 15 - 20% wymiany elementów stosowanych w budowie maszyn jest spowodowana błędami konstrukcyjnymi. Natomiast aż 85 - 80% zmianą kształtu związaną z ubytkiem materiału. Definicja zużycia tribologicznego została po raz pierwszy opracowana oraz opisana przez Lukrecjusza w dziele o nazwie „De rerum natura” w którym, przedstawiono ubytek masy różnych elementów wskutek tarcia, oraz zasugerowano oddzielanie się poszczególnych cząstek od siebie, które nie są widoczne dla ludzkiego oka [73].

Na zużycie oraz proces zużywania tribologicznego może wpływać wiele czynników zewnętrznych [20, 68]. Podstawowym czynnikiem wpływającym na zużycie jest stosunek twardości materiału ścieranego do twardości elementu ściernego. Zależność tę można wyrazić wzorem:

$$k_t = \frac{H_m}{H_s} \quad (1.1)$$

gdzie:

H_m – twardość materiału,

H_s – twardość ścierniwa.

Wartość k_t jest to wartość krytyczna, która określa dominujący rodzaj zużycia w procesie zużywania. Proces zużywania jest to proces, natomiast zużycie jest to efekt procesu zużywania [8, 19, 20]. Jeśli k_t przyjmuje wartość od 0,5 do 0,7 występuje zużywanie mechaniczne [55], w innym przypadku samo zużycie mechaniczne jest niewystarczające do powstania znaczących ubytków masy elementu narażonego na zużycie ściernie [54]. Degradacja warstwy wierzchniej występuje wskutek współdziałania mechanicznych form zużywania z formami chemicznymi,

które definiowane są jako zużywanie tribochemiczne [87]. Wpływ czynników zewnętrznych na całkowite zużycie oraz określenia korelacji między różnymi czynnikami zewnętrznymi jest wciąż obiektem badań. Odporność na zużycie ściernie jest ściśle związana z materiałem ściernym oraz jego parametrami. Do podstawowych czynników wpływających na wartość zużycia tych samych materiałów wpływa np. wilgotność oraz odczyn masy ścierniej.

Materiały stosowane na elementy robocze są to najczęściej stale odporne na zużycie ściernie takie jak np. stale borowe. Stosuje się również stale z dodatkowymi warstwami umieszczanymi na całej powierzchni elementu lub w miejscach najbardziej narażonych na zużycie. Takie materiały posiadają znacznie wyższą odporność na zużycie ściernie niż elementy wykonane ze stali konstrukcyjnych lub stali 38 GSA oraz żeliwa ADI. Do grup takich materiałów zalicza się rodzaje stali takie jak Raex, Hardox, lub Boron.

Coraz częstszym zabiegiem technicznym w budowie i eksploatacji maszyn jest nanoszenie powłok ochronnych, które wpływają na zwiększenie odporności na zużycie ściernie poprzez jej utwardzenie. Naniesienie tej powłoki ma na celu zmianę struktury i właściwości warstwy wierzchniej materiału oraz parametrów mechanicznych elementu, który pracuje w masie ścierniej np. glebie. Elementy, które wykorzystuje się do takich zabiegów agrotechnicznych muszą posiadać nie tylko odpowiednią twardość, ale również udarność. Udarność wpływa na odporność elementu na oddziaływanie dużych twardych cząstek materiału ściernego takich jak np. kamienie lub pozostałość nieorganiczne. Rozwój technologii skutkuje zastosowaniem coraz nowszych materiałów na elementy narzędzi do robót ziemnych, które pozwalają wydłużyć czas ich eksploatacji, opisywane są one przez producentów jako materiały nadające się do pracy w glebie lub masie ścierniej. Wydłużenie czasu eksploatacji narzędzi roboczych oraz skrócenie czasu przestojów spowodowanych obsługą lub naprawą wpływa znacząco na poprawę jakości wykonywanej pracy. Rozwój rolnictwa oraz branży związanej z wykorzystaniem nowoczesnych materiałów do obrabiania masy ścierniej takiej jak gleba powoduje ciągły wzrost liczby badań związanych z obróbkami powierzchniowymi, które prowadzą do poprawy jakości wykorzystywanych materiałów. Analizując zagadnienie poprawy trwałości tych elementów postanowiono skupić się na zastosowaniu różnych, nowoczesnych obróbek powierzchniowych.

Nowoczesne obróbki cieplno-chemiczne wpływają na zwiększenie odporności na zużycie ściernie. Podstawowym zabiegiem, stosowanym również w warunkach nieprzemysłowych jest napawanie, którego wpływ został przebadany przez naukowców zajmujących się procesami tarcia w masie ścierniej [17, 41, 55]. Zabieg ten ma na celu zwiększenie twardości materiału rodzimego poprzez dodanie warstwy o określonych właściwościach na powierzchnię elementu poddanego zużyciu ściernemu.

Kolejną obróbką powierzchniową wpływająca na zmianę właściwości warstwy wierzchniej elementu pracującego w masie ścierniej jest proces laserowania. Proces ten polega na naniesieniu warstewki proszku bądź pasty zawierającej wymagane składniki chemiczne, które powodują utwardzenie warstwy wierzchniej. Następnym etapem utwardzania jest działanie na element światłem lasera o wysokiej mocy, który powoduje przetopienie pasty lub proszku na powierzchni obrabianego metalu. Przetopienie powoduje powstanie zmian strukturalnych podobnych jak w przypadku napawania, jednak bez wydzielenia oraz żużlu, które wpływają negatywnie na strukturę materiału rodzimego. Zabieg obróbki laserowej jest to zabieg skomplikowany, który w przeciwieństwie do napawania konwencjonalnego jest niemożliwy do wykonania w warunkach nieprzemysłowych, ponieważ wymaga zaawansowanej technologii oraz urządzeń [78]. Głównymi pierwiastkami zawartymi w elektrodzie podczas procesu napawania oraz pierwiastkami zawartymi w proszku lub paście do laserowania jest dodatek chromu, który wpływa utwardzająco na materiał oraz WC (węgielk wolframu) [3].

Ukształtowanie powłoki naniesionej na warstwę wierzchnią stali trudnościeralnych jest szczególnie istotne ze względu na trwałość eksploatacyjną oraz na okres użytkowania danego elementu roboczego. Zastosowanie powłoki naniesionej na warstwę wierzchnią, powoduje zużywanie tego fragmentu elementu roboczego, chroniąc powierzchnię materiału bazowego. Istotnym aspektem zużywania naniesionych powłok jest również profil przepływu masy ścierniej. Napór masy ścierniej wywierany jest bezpośrednio na powłokę, a nie materiał bazowy. Materiał bazowy dopiero po zużyciu naniesionej warstwy zostaje poddany procesom zużywania ściernego. Kształt pierwotny elementu roboczego nie ulega intensywnemu zużyciu ściernemu w pierwszym etapie pracy. Powłoki nakładane cieplnie ze względu na skład chemiczny nanoszonej warstwy powodują modyfikację strukturalną, które wpływają na zmianę parametrów oraz właściwości mechanicznych warstwy wierzchniej narzędzia roboczego.

Podstawowym obiektem badań naukowych są materiały powszechnie stosowane na rynku w postaci wyjściowej lub jedynie po niewielkich modyfikacjach powierzchniowych. Brak jest jednoznacznego określenia wpływu obróbki powierzchniowej materiału na ograniczenie zużycia ściernego stali trudnościeralnych. Dotychczas prowadzone badania naukowe skłoniły do podjęcia próby ukształtowania odporności na zużycie ściernie powłok nakładanych cieplnie i jej weryfikację na zaprojektowanym i zbudowanym stanowisku laboratoryjnym.

1.2. Zakres pracy

W niniejszej pracy przedstawiono badania materiałów stosowanych na narzędzia robocze elementów maszyn do pracy w masie ścierniej. Parametry masy ścierniej takie jak wilgotność oraz poziom pH były modyfikowane w celu określenia ich wpływu na efekt zużycia ściernego.

Warstwa wierzchnia materiałów została zmodyfikowana z wykorzystaniem powłok nakładanych cieplnie. Jako proces wytwarzania powłok zostało wybrane napawanie konwencjonalne oraz utwardzanie laserowe pasty naniesionej na powierzchnię zewnętrzną materiału. Nanoszenie powłok cieplnych odbywało się w sposób zrobotyzowany w określonych warunkach technologicznych.

Wśród dostępnej aparatury badawczej stwierdzono brak stanowiska badawczego spełniającego założenia wykonania badań tribologicznych. Stanowiska badawcze do badań zużycia nie zapewniają zastosowania małej ilości masy ścierniej oraz kontroli parametrów eksperymentu, w trakcie jego realizacji. Spowodowało to konieczność zaprojektowania oraz wykonanie autorskiego stanowiska badawczego. Podczas badań monitorowano nie tylko kluczowe parametry maszyny, ale również masy ścierniej za pomocą urządzeń pomiarowych. Jako kluczowe parametry niezmiennie w procesie badania przyjęto dwie grupy. Pierwszą grupą są to parametry związane z fizycznym oddziaływaniem masy ścierniej na element takie jak głębokość zanurzenia próbek w masie ścierniej oraz ilość masy ścierniej. Do drugiej grupy parametrów zalicza się prędkość obrotową oraz dystans, na którym zrealizowano eksperyment tribologiczny. Pozwoliło to na wyeliminowanie niekontrolowanych czynników zewnętrznych zakłócających przebieg badań eksperymentalnych.

Praca składa się z 6 rozdziałów. Pierwszy rozdział podzielono na dwie zasadnicze części. W pierwszej przedstawiono uzasadnienie wyboru tematu rozprawy, natomiast w kolejnej części przedstawiono zakres pracy.

Drugi rozdział zawiera informacje dotyczące aktualnego stanu wiedzy. Rozdział ten został podzielony na 7 podrozdziałów, w których opisane zostały takie aspekty jak terminy tribologiczne oraz ich charakterystyka. Ponadto, przedstawiono rodzaje zużycia elementów w masie ścierniej maszyn roboczych wraz z ich mechanizmami. Kolejnym aspektem, na który zwrócono uwagę są stanowiska do badań tribologicznych, zwłaszcza badań w masie ścierniej. Przedstawione zostały również obecnie stosowane tribotestery powszechnie stosowane w badaniach laboratoryjnych. Następnym etapem w rozdziale drugim było przedstawienie materiałów stosowanych w budowanie maszyn roboczych, które bezpośrednio pracują w gruncie oraz są narażone na największe zużycie ścierniej spowodowane naporem cząstek

nieumocowanych takich jak cząsteczki piasku, lub ziemi. W podrozdziale tym zostały przedstawione również wyniki badań, które pokazują tendencje w zastosowaniu materiałów w konstrukcji maszyn rolniczych i roboczych. Podrozdział kolejny wskazuje na drogi prowadzące do ograniczenia zużycia ściernego. Jako sposoby ograniczenia zużycia zostały uwzględnione metody cieplne, cieplno-chemiczne, chemiczne oraz mechaniczne modyfikujące warstwę wierzchnią. Opisane metody zostały wsparte wynikami badań oraz przykładami ich zastosowania w procesie zmiany parametrów warstwy wierzchniej. Rozdział został zamknięty podsumowaniem stanu wiedzy.

Trzeci rozdział zawiera określenie problemu badawczego, którego rozwiązanie zostało przedstawione w dalszych rozdziałach pracy. Ponadto określono cel naukowy oraz cele cząstkowe, które doprowadziły do postawienia zadań badawczych niezbędnych do realizacji celu głównego. Do zadań badawczych należy zadanie główne oraz zadania dodatkowe.

Czwarty rozdział zawiera metodykę badawczą pracy, a w jego skład wchodzi cztery podrozdziały. W podrozdziale pierwszym przedstawiono plan metodyki badawczej zawartej w rozdziale. W drugim podrozdziale przedstawiono oraz opisano proces badawczy. Podrozdział składa się z trzech fragmentów. Pierwszy uzasadnia wybór materiałów do badań, drugi podrozdział opisuje kryterium doboru próbek, natomiast ostatni obejmuje zagadnienia związane z doбором obróbek warstwy wierzchniej. Trzeci fragment zawiera opis procedur badawczych, w skład tego podrozdziału wchodzi dwa fragmenty. Pierwszy opisuje proces przygotowania próbek. Kolejny fragment zawiera szczegółowy opis koncepcji stanowiska badawczego. Ostatni podrozdział zawiera opis metod badawczych. Składa się on z opisu badań tribologicznych oraz opisu badań dodatkowych wykonanych w ramach pracy.

Rozdział piąty zawiera opis otrzymanych wyników eksperymentu tribologicznego oraz badań własności mechanicznych próbek. Rozdział został podzielony na dwa podrozdziały. W pierwszym podrozdziale zostały opisane wyniki wykonanych badań własności próbek. Kolejny podrozdział zawiera wyniki eksperymentu tribologicznego w postaci zużycia objętościowego z wykorzystaniem metody scaningu 3D, analizę struktury powierzchni próbek zarówno po wykonaniu eksperymentu oraz przed eksperymentem, jak również wyniki zużycia masowego próbek.

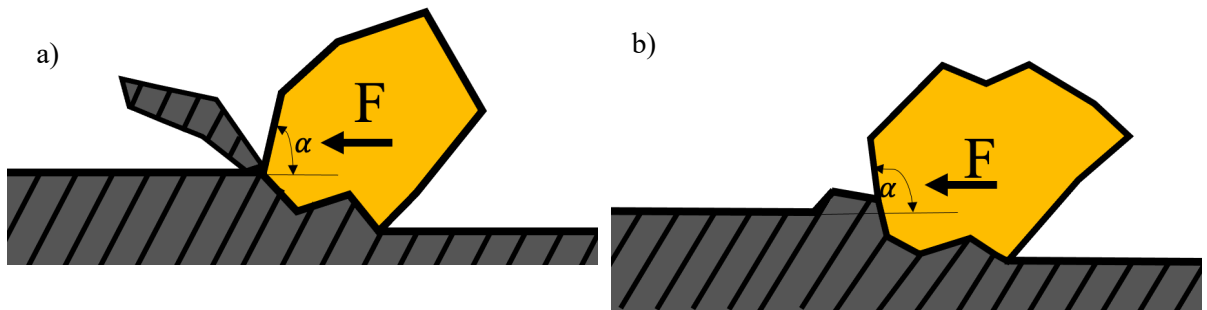
Rozdział szósty zawiera dwa podrozdziały. W pierwszym podrozdziale zawarte jest podsumowanie wraz z wnioskami, w którym zostały opisane osiągnięte cele pracy z uwzględnieniem aspektów użytkowych. Kolejny podrozdział zawiera wytyczenie dalszych kierunków prac badawczych, w aspekcie ograniczenia zużycia elementów maszyn pracujących w glebie.

2. ANALIZA STANU WIEDZY

2.1. Charakterystyka podstawowych terminów

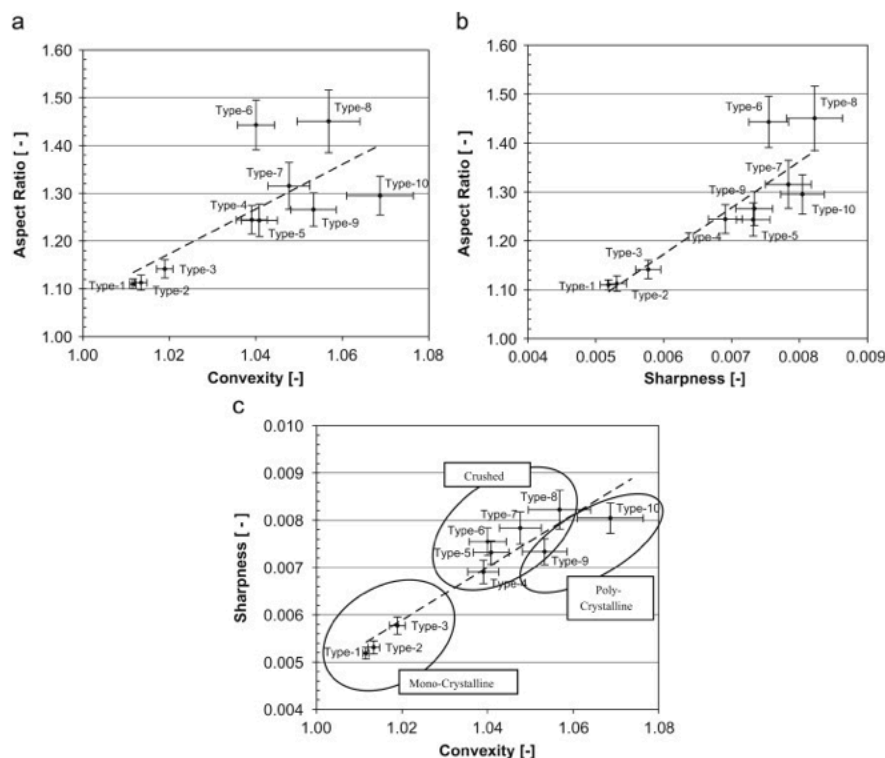
Analizując procesy występujące podczas zjawiska tarcia ściernego należy zdefiniować podstawowe terminy związane z zużyciem materiałów podczas pracy w masie ściernej.

Masa ścierna jest to zespół cząstek ściernych, najczęściej o wysokiej twardości oraz nieregularnym kształcie, która podczas przemieszczania po powierzchni materiału powoduje zagłębianie się w niego. Kształt cząsteczek masy ścierniej jest odpowiedzialny za dominujący rodzaj zużycia, a najistotniejszy jest kąt, z którym masa ścierna napiera na powierzchnię elementu roboczego [19, 105]. Na rysunku 2.1. przedstawiono różne cząstki napierające na element, na którym występuje ubytek masy powstały wskutek tarcia.



Rys. 2.1. Wpływ kształtu masy ścierniej na rodzaj zużycia; a) mikroskrawanie;
b) mikrobruzdowanie; F – kierunek siły, α – kąt rozwarcia

Kształt cząstki napierającej na element z określoną siłą jest istotnym czynnikiem wpływającym na szybkość zużywania materiału. W pracy [81] Dennis V. De Pellegrin wykazał zależność kształtu cząstek w stosunku do szybkości zużywania. Podczas badań sprawdzany został ponadto współczynnik proporcji cząstki masy ścierniej mający wpływ na wypukłość. Pod uwagę brał on 10 typów cząstek o różnych kształtach. Poniżej, na rysunku 2.2. przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań.



Rys. 2.2. Wpływ kształtu cząstek masy ścierniej na parametry zużycia [81];

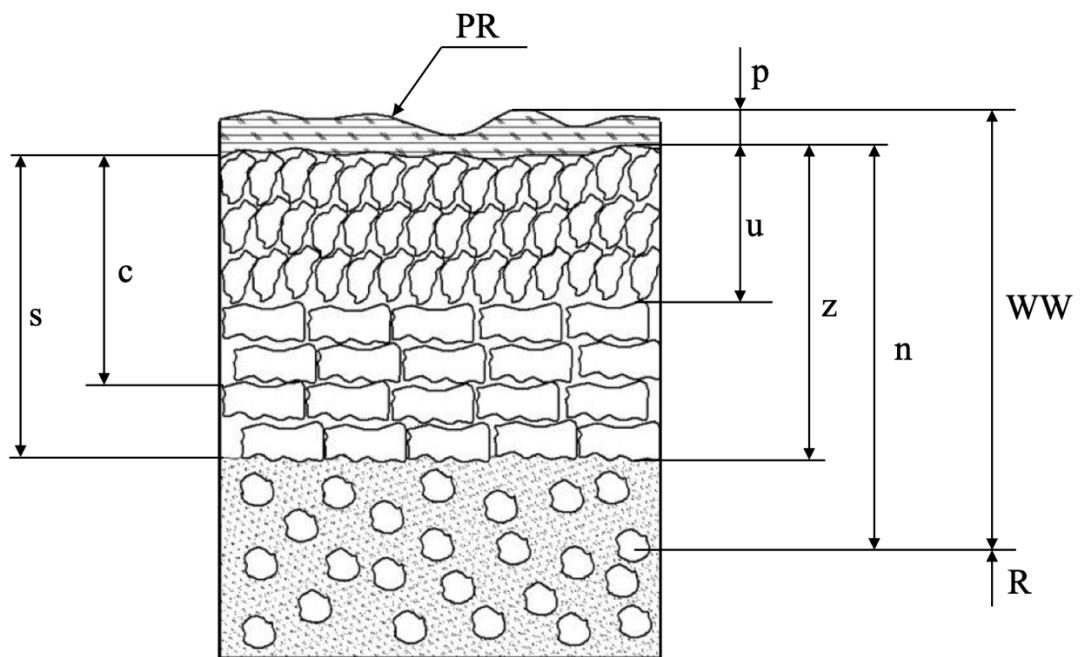
- a) współczynnik proporcji do współczynnika wypukłości, b) współczynnik proporcji do ostrości, c) współczynnik ostrości do wypukłości

Masa ścierna jest często utożsamiana z glebą, która jest definiowana jako zespół cząsteczek wraz z cząstkami organicznymi powstałymi wskutek procesów geologicznych oraz biologicznych takich jak rozkład organicznych resztek roślinnych i zwierzęcych, wietrzenie skał, erozja, akumulacja i przemieszanie materii mineralnej. Masa ścierna oddziałująca na element wpływa również na cechy mechaniczne materiałów. Materiały muszą posiadać odpowiednie cechy fizyczne oraz mechaniczne w celu wykonywania zadanej pracy.

Własności mechaniczne materiałów to zespół cech fizycznych, które określają zdolność materiału do przenoszenia wymaganych obciążeń w zależności od przeznaczenia, wytrzymałości na zużycie ściernie, rozciąganie oraz zginanie. Własności fizyczne bada się za pomocą znormalizowanych przyrządów badawczych w celu porównywania cech oraz określania ich przydatności do wykorzystania w określonych warunkach pracy. Własności fizyczne mogą być badane na wskroś w różnych miejscach całego elementu badanego lub jedynie w obszarze warstwy wierzchniej.

Warstwa wierzchnia to część materiału, która ogranicza powierzchnię elementu. Wraz z odległością od jej powierzchni rzeczywistej następują zmiany strukturalne, fizyczne oraz

niekiedy chemiczne różniące ją od rdzenia elementu. Zmiany właściwości w parametrach są wywołane w sposób zamierzony w celu uzyskania innych właściwości mechanicznych lub fizycznych. Mogą też być efektem ubocznym powstałym podczas obróbki elementu, np., podczas walcowania na zimno lub procesu obróbki powierzchniowej [52, 75, 112]. Warstwę wierzchnią można podzielić na 5 stref. Model 5-sfrefowy zawarty jest w normie PN-M-0425, a grubość warstwy może wynosić do kilku milimetrów [7, 44].

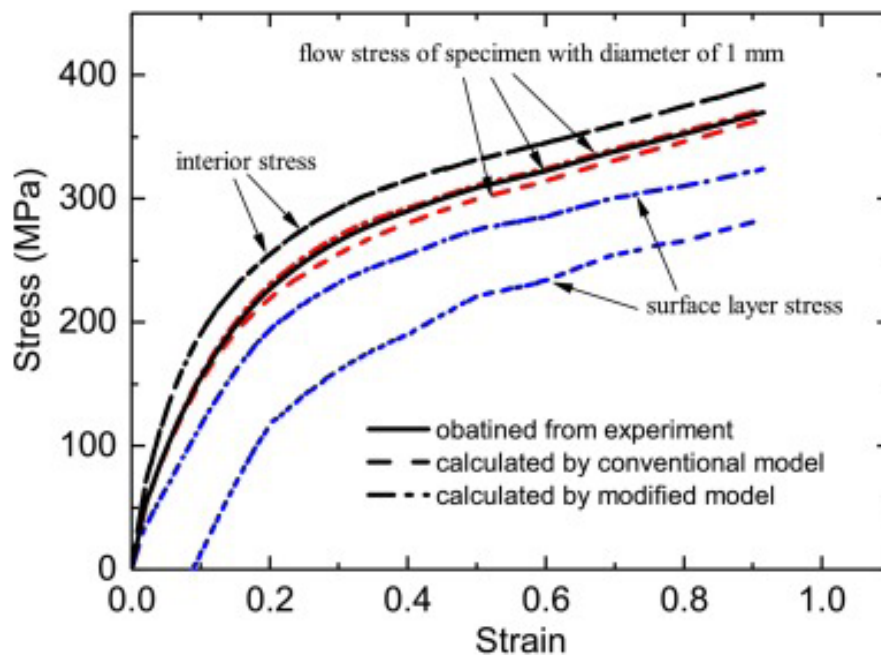


Rys. 2.3. Schemat warstwy wierzchniej [113]; WW – Warstwa wierzchnia, R – rdzeń, n – strefa naprężeń własnych, z – strefa zgniotu, u – strefa ukierunkowania, p – strefa przypowierzchniowa, PR – powierzchnia rzeczywista, c – strefa efektów cieplnych, s – strefa stekstrowania

Strefa przypowierzchniowa jest to część warstwy wierzchniej, która bezpośrednio przylega do powierzchni rzeczywistej. Jest to strefa zbudowana z zaabsorbowanych lub łączonych z materiałem jonów, pochodzących z innych elementów niż materiał rodzimy [44]. Kolejną strefą jest strefa ukierunkowania, która znajduje się pod strefą przypowierzchniową oraz należy do strefy zgniotu. W strefie tej można zauważyć wyraźnie nadany kierunek oddziaływania siły zgniotu oraz naprężeń własnych [26, 104].

Strefę trzecią nazwano „strefą efektów cieplnych”. Strefa ta jest również przestrzenią, w której działają siły zgniotu, natomiast nastąpiły w niej wyraźne zmiany powstałe podczas

procesów cieplnych. Do takich zmian zachodzących w tej strefie, należą m.in. zmiany wielkości ziaren, przemiany fazowe, przemiany fizyczne lub modyfikacje właściwości materiału takie jak twardość, sprężystość oraz odporność na zmęczenie. Czwartą strefą jest strefa stekstrowania, czyli miejsce, które łączy w sobie strefy efektów cieplnych oraz strefę ukierunkowania. W skład tej strefy wchodzi wyraźny zarys kierunku orientacji kryształów lub ziaren. Ostatnią strefą w warstwie wierzchniej jest strefa zgniotu. Jest to strefa, w której w sposób wyraźny nastąpiło oddziaływanie plastyczne w procesie wytwarzania metalurgicznego. Pełne próby zdefiniowania warstwy wierzchniej zostały również podjęte w modelach 6 oraz 8 strefowych, które dokładniej zostały opisane w pracach [20, 75, 76]. Warstwa ta pozostaje również ciągłym obiektem badań. W swojej pracy Jiqiang Zhai opisuje proces deformacji warstwy wierzchniej oraz jej modyfikacji w celu mikroformowania [114]. Poniżej, na rysunku 2.4. przedstawiono wyniki badań, z których wynika, że obliczona grubość za pomocą modelu jest dokładniejsza niż ta wyznaczona na podstawie ziaren w konwencjonalnym modelu powstawania warstwy powierzchniowej. Warstwa wierzchnia jest to najbardziej narażona przestrzeń na ubytek materiału powstały wskutek zużycia ściernego.



Rys. 2.4. Naprężenia warstwy wierzchniej na podstawie standardowego modelu oraz modelu zmodyfikowanego [114]

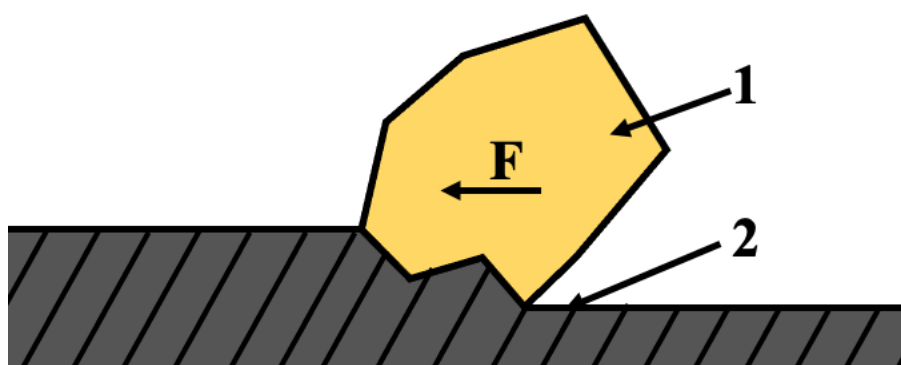
Zużycie ściernie według Hebdy [19] jest to proces niszczenia warstwy wierzchniej wskutek oddziaływania na nią cząstek, które w konsekwencji mikroskrawania, mikrorysowania lub mikrobruzdowania powodują oddzielenie materiału rodzimego od warstwy wierzchniej.

W praktyce jednak termin zużycia ściernego jest trudny do prawidłowego zdefiniowania ze względu na złożoność procesów, które w nim występują [20]. Podział zużycia tribologicznego na podstawowe zjawiska i procesy został przedstawiony w tabeli 2.1.

Tab. 2.1 Klasyfikacja zużycia tribologicznego [20]

	Rodzaj zużycia	Procesy zachodzące na powierzchni materiału
Procesy zużycia tribologicznego	Ubytek materiału	Mikroskrawanie, odrywanie nierówności, kruche odłupywanie, złuszczenie
	Przemieszczenia materiału	Bruzdowanie, polerowanie, wgniot
	Nieciągłości materiału	Rysy powierzchniowe, pęknięcie wgłębne
	Narosty	Namazanie, przeciwcięcia, błony tlenkowe, osady
	Zmiany struktury geometrycznej powierzchni	Zgniot, kierunkowe przesunięcia struktury, przemiany fazowe
	Zmiany składu chemicznego	Nowe składniki, tlenki powierzchniowe

Zużycie ściernie określane jako efekt współpracy elementów, do których dostaje się twardy czynnik mineralny, nazywane jest zużywaniem kontaktowo-ściernym [106], a zachodzący w tym procesie mechanizm został przedstawiony na rysunku 2.5.



Rys. 2.5. Mechanizm zużycia kontaktowo – ściernego [106]; F – kierunek działania siły, 1 – cząstka ścierniwa, 2 – materiał rodzimy

Rozpatrując definicję zużycia ściernego, należy również wziąć pod uwagę wartości geometryczne struktury powierzchni oraz występujące na niej nierówności, które oddziałują na sąsiadujące ze sobą pary trące [69]. Analizując zużycie ściernie można wziąć pod uwagę cztery podstawowe modele elementarnych procesów zużywania, takie jak [58]:

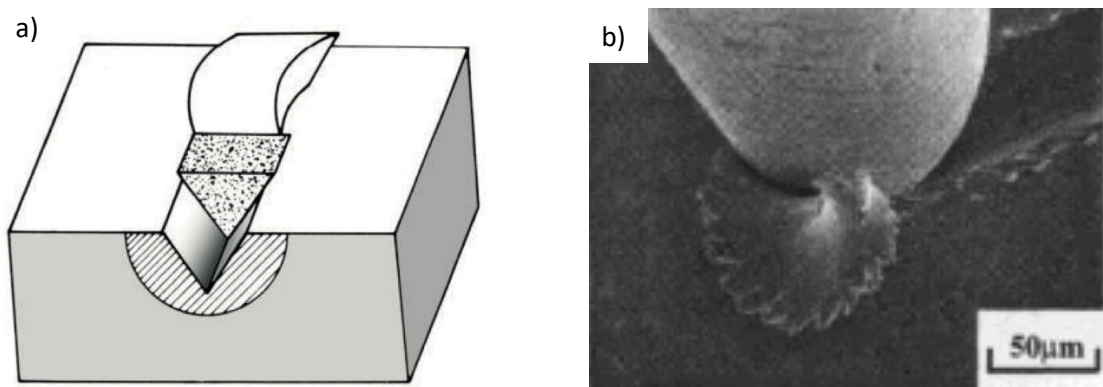
- mikroskrawanie,
- mikrorysowanie,
- ścinanie nierówności,
- odrywanie nierówności.

Poniżej, na rysunku 2.6. zaprezentowano schemat elementarnych procesów występujących podczas zużycia ściernego.

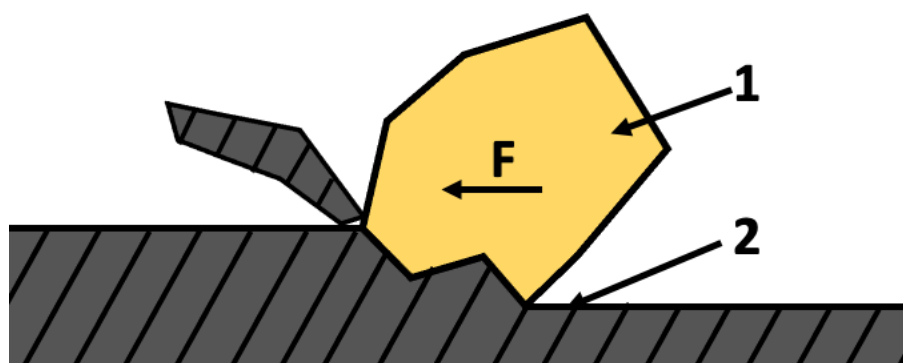


Rys. 2.6. Schemat podstawowych procesów zużycia [58]; a) bruzdowanie, b) ścinanie nierówności, c) ścinanie nierówności ścierniwem, d) odkształcanie plastyczne materiału

Mikroskrawanie – to proces zachodzący na powierzchni elementu wskutek oddzielenia materiału poprzez cząstkę o wyższej twardości, która zagłębia się w materiał o niższej twardości. Mikroskrawanie występuje wskutek nacisku ziaren, posiadających ostry kształt, sprzyjający wnikaniu w głąb materiału oraz rozsuwaniu go na boki a następnie oddzieleniu od materiału rodzimego [6]. Na rysunku 2.7. został przedstawiony schemat mikroskrawania oraz widok procesu z użyciem mikroskopu scaningowego, natomiast na rysunku 2.8. pokazano mechanizm powstawania tego procesu zużycia.

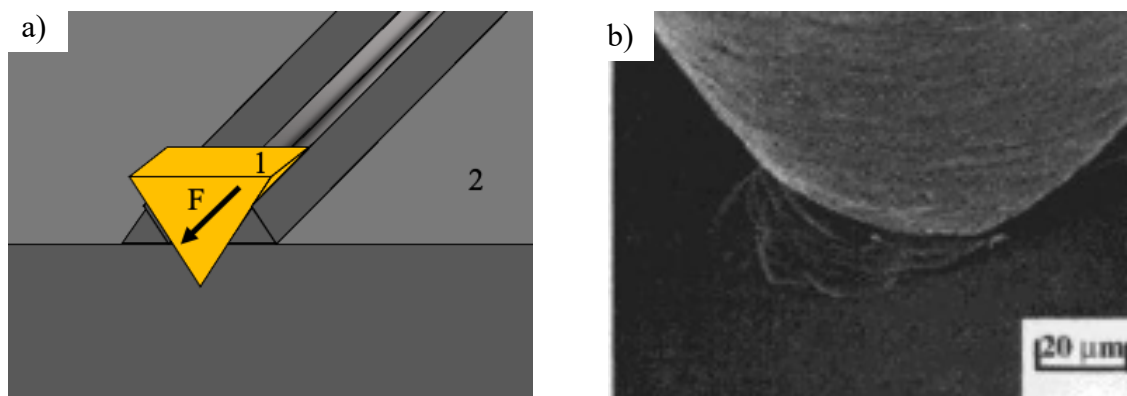


Rys. 2.7. Mikroskrawanie; a) schemat [13], b) widok [22]



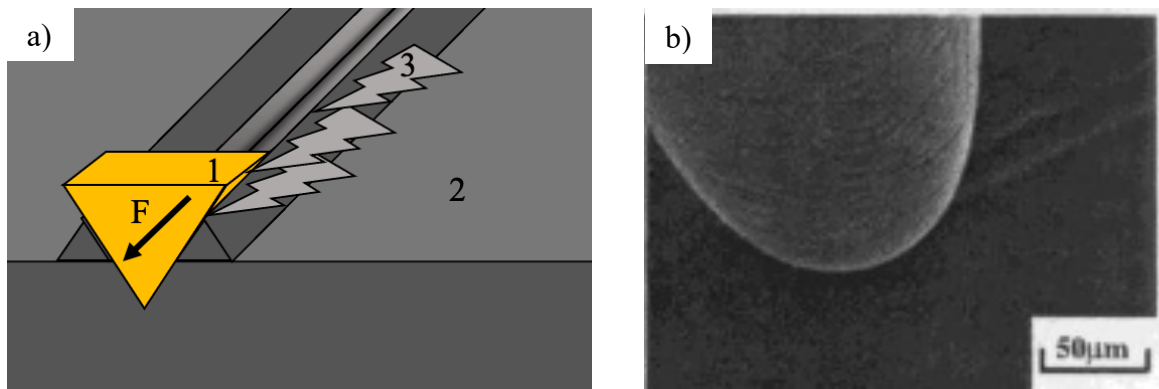
Rys. 2.8. Mechanizm mikroskrawania [106]; F – kierunek działania siły, 1 – cząstka ścierniwa, 2 – materiał

Mikrobruzdowanie – jest to proces podobny do procesu mikroskrawania, jednakże w tym procesie nie następuje oddzielenie materiału a jedynie rozsuniecie go na boki. W konsekwencji wskutek cyklicznego działania siły następuje oddzielenie materiału. Materiał, który napiera na element obrabiany musi posiadać większą twardość od materiału narzędzia roboczego. Dzięki temu następuje zagłębienie się cząstki ścierniwa w materiał o niższej twardości. Kąt, z którym napiera cząsteczka w materiał jest większy niż w przypadku mikroskrawania, przez co, cząstka nie skrawa materiału a jedynie rozsuwa go na boki co zostało zaprezentowane na rysunku 2.9.



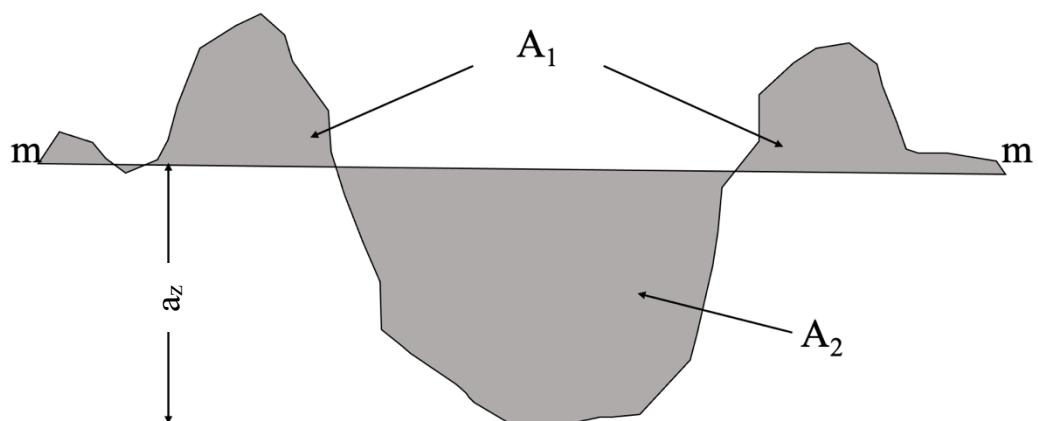
Rys. 2.9. Mikrobruzdowanie; a) schemat [106]; F – kierunek działania siły, 1 – cząstka ścierniwa, 2 – materiał; b) zdjęcie [22]

Mikrorysowanie – jest to proces pośredni między mikrobruzdowaniem a mikroskrawaniem. Podczas tego procesu następuje częściowe odsuwanie materiału na boki, a częściowe skrawanie [12]. Schemat powstawania mikrorysowania oraz przybliżony widok powierzchni zaprezentowano na rysunku 2.11.



Rys. 2.11. Mikrorysowanie; a) schemat mikrorysowania; F – kierunek działania siły, 1 – cząstka ścierniwa, 2 – materiał, 3 – oderwane cząsteczki materiału; b) zdjęcie mikrorysowania [22]

Jeśli stosunek pól A_2/A_1 równa się 1, następuje wtedy odkształcenie plastyczne zwane mikrobruzdzeniem. W przypadku $A_2/A_1 = 0$ wtedy $A_1 = 0$ następuje mikroskrawanie. Jeśli wartość A_2/A_1 znajduje się w pomiędzy 0 a 1 występuje mikroskrawanie [12]. Interpretacja graficzna rodzajów zużycia została zaprezentowana na rysunku 2.13.



Rys. 2.13. Interpretacja graficzna rodzajów zużycia [12]

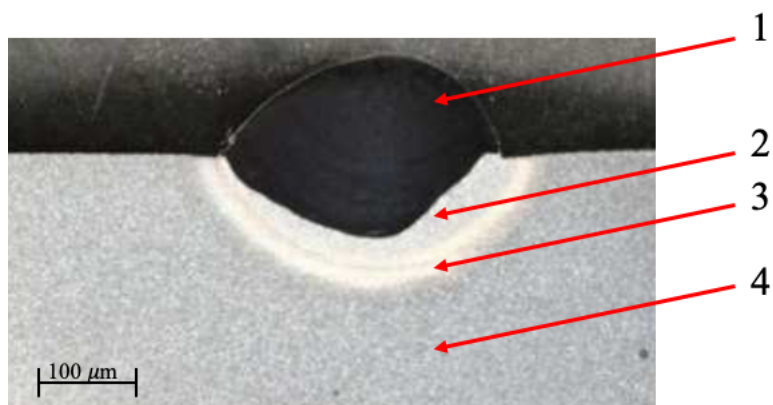
Zużycie w masie ścierniej jest to jeden z trzech podstawowych rodzajów zmian warstwy wierzchniej na skutek degradacji jej kształtu [12]. Do rodzajów zużycia ściernego zalicza się zużycie spowodowane:

- oddziaływaniem cząstek umocowanych,
- cząstkami umieszczonymi pomiędzy elementami,

– poprzez nieumocowane cząstki oddziaływujące z dużą energią kinetyczną, na materiał poddawany ścieraniu.

Ostatni rodzaj odpowiada zużyciu w masie ściernej. Aby zwiększyć twardości warstwy wierzchniej stosuje się różne zabiegi mające na celu podwyższenie tej wartości. Do podstawowych zabiegów można zaliczyć laserowanie i napawanie powierzchni za pomocą metod osadzania warstwy o innym składzie chemicznym w celu podwyższenia parametrów wytrzymałościowych.

Napawanie jest to proces nanoszenia powłoki metalicznej polegającej na przetopieniu materiału nakładanego wraz z wytworzeniem jeziora spawalniczego w celu połączenia dwóch faz o zmieszanej strukturze chemicznej oraz o unikalnych własnościach mechanicznych [21, 41, 99]. Napoina posiada w swojej strukturze w większości własności nakładanego spoiwa, natomiast w głąb materiału następuje wymieszanie się faz oraz powstanie tzw. strefy wtopienia. Następną zauważalną fazą jest strefa wpływu ciepła powstała podczas zabiegu nanoszenia powłoki. Jej powstanie jest efektem ubocznym temperatury, uzyskanej w procesie przetopu elektrody [78]. Wewnątrz struktury materiału można zauważyć zanikanie przemian strukturalnych związanych z wpływem ciepła. Widocznym jest jedynie rdzeń materiału rodzimego. Napoinę nanosi się w celu uzyskania warstwy o wyższych twardościach, zwiększonej odporności na ścieranie lub odporności na korozję [1, 21, 53]. Strukturę napoiny zaprezentowana na rysunku 2.14.



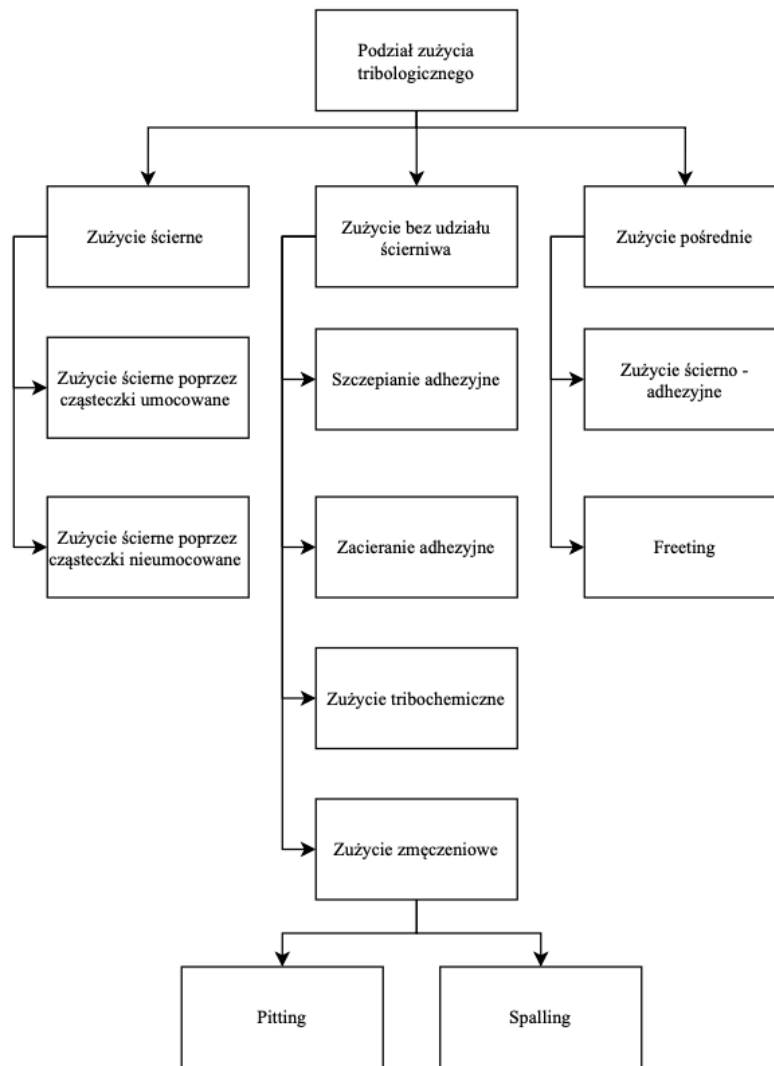
Rys. 2.14. Struktura warstwy wierzchniej z napoiną [99]; 1 – napoina, 2 – strefa wpływu ciepła I, 3 – strefa wpływu ciepła II, 4 – materiał rodzimy

Laserowanie jest to proces nadtopienia materiału podanego w postaci proszku lub drutu za pomocą energii wiązki promieniowania laserowego. W przypadku napawania laserowego potrzebny jest gaz osłonowy. Nadtopienie warstwy materiału bazowego oraz przetopienie

naniesionej powłoki wytwarza zmodyfikowaną warstwę wierzchnią. W praktyce przemysłowej najczęściej stosowanym gazem osłonowym jest argon [41].

2.2. Rodzaje zużycia elementów maszyn roboczych

W zależności od miejsca zastosowania elementu maszyny roboczej, mogą wystąpić różne źródła powstawania zużycia [91]. W maszynach roboczych ze względu na szczególne narażenie elementów i części na trudne oraz zmienne warunki pracy występują różne rodzaje zużycia ściernego podzespołów. Podział zużycia tribologicznego został przedstawiony na rysunku 2.15.



Rys. 2.15. Podział zużycia tribologicznego

Zużycie elementów w masie ścierniej odbywa się poprzez niemocowane cząstki materiału napierające z energią kinetyczną na powierzchnie trącą. Skutkuje to zmianą kształtu elementów roboczych oraz brakiem spełniania funkcji, do których zostały przeznaczone np. wykonywanie orki. Takie zużycie ściernie występuje m.in. na powierzchni elementów, które pracują

bezpośrednio w glebie. Elementami, najbardziej narażonymi na zużycie ściernie są narzędzia służące do odspajania gleby oraz do załadunku i transportu urobku. Za takie narzędzia można uznać np. [10]:

- dłuta oraz lemiesze płużne,
- zęby kultywatora,
- zęby łyżki koparek,
- łyżki koparek,
- zęby zrywarek,
- świdry,
- naczepy oraz przyczepy transportujące urobek (wozidła).

Według Kołakowskiego w ostatnim czasie wozidła oraz naczepy sklasyfikowano pod względem rodzajów zużycia [45]. Jest to spowodowane przesuwaniem się materiału o dużej twardości po powierzchni skrzyni ładunkowej, co w konsekwencji dużej siły naporu spowodowanej masą ładunku skutkuje wgłębieniem kruszywa w strukturę materiału skrzyni. Czołowi producenci naczep oraz wozideł na swoje skrzynie ładunkowe wykorzystują stale trudnościeralne, dla zwiększenia jakości i trwałości swoich wyrobów [24]. Elementami narażonymi na zużycie ściernie są również wszystkie zespoły mechaniczne. Luźne ścierniwo, które podczas pracy przenika do pozornie osłoniętych i współpracujących części maszyn jest w stanie przyspieszyć zużycie nawet dziesięciokrotnie [19, 39, 40].

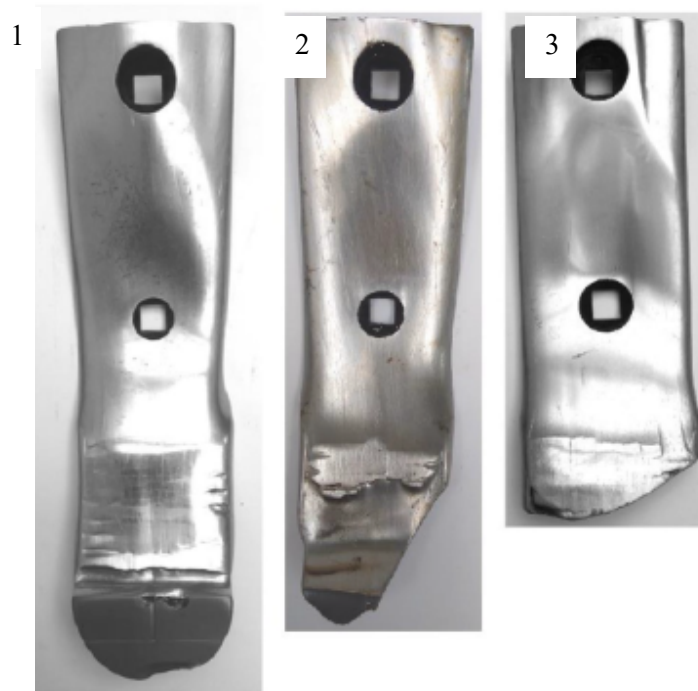
Również zęby koparek są narażone na wzmożone zużycie, które można ograniczyć poprzez zastosowanie stali stopowych o wyższej zawartości chromu, co zostało przedstawione w tabeli 2.2. [98].

Tab. 2.2. Wyniki ubytku masy zębów koparek narażonych na działanie masy ścierniej [98]

Próbka	Masa początkowa [kg]	Masa końcowa [kg]	Ubytek Masy [g]	Ubytek masy [%]
OK 84.78 (Green)	2,65	2,306	0,344	12,98
OK 83.50 (Red)	2,6	1,91	0,69	26,54
OK 83.65 (Yellow)	2,65	1,732	0,918	34,64
OK 84.80 (White)	2,5	2,113	0,387	15,48
Un-Hard faced	2,35	1,435	0,915	38,94

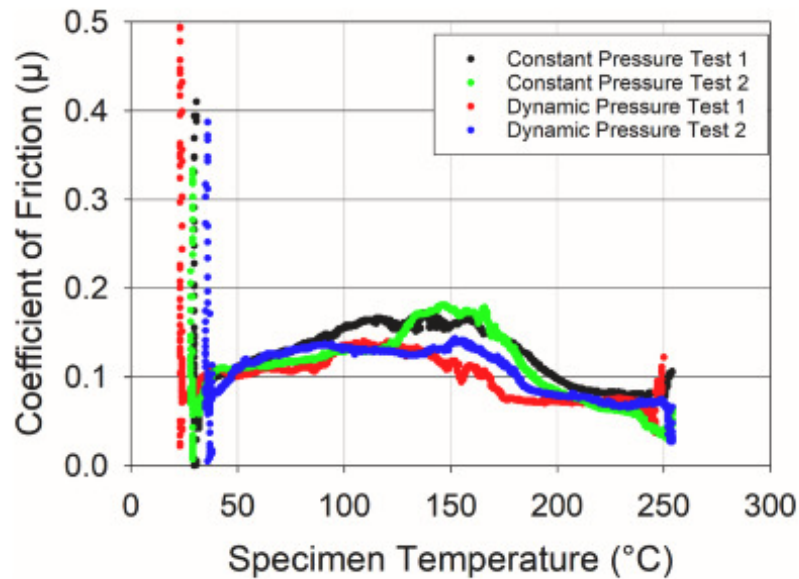
Według Kostenckiego praca maszyn roboczych w zmiennym uziarnieniu masy ścierniej wpływa znacząco na zmianę kształtu elementów. W pracy wskazuje on na różne etapy zużywania w zależności od miejsca zamocowania próbek na kultywatorze rolniczym, co zostało zaprezentowane na rysunku 2.16. Badania wskazują również podobnie jak

w przypadku [98], że elementy o wyższej twardości ulegają mniejszemu zużyciu w porównaniu do elementów posiadających niższą twardość [43, 45].



Rys. 2.16. Etapy zużycia elementów rolniczych pracujących w glebie [47]; 1 – etap pierwszy zużycia, 2 – drugi etap zużycia, 3 – etap trzeci zużycia

Zużycie ścierno-adhezyjne (scuffing), jest to zużycie łączone podczas którego, współdziałają ze sobą takie rodzaje zużycia jak zużycie ściernie oraz ściernie wraz z zużyciem adhezyjnym [9, 35, 44]. Następuje ono wskutek ekstremalnie szybkiego procesu degradacji powierzchni elementów, który powstaje w przypadku nagłego spadku smarowania oraz zerwania filmu olejowego. Film olejowy, który posiada zbyt cienką warstwę w stosunku do wysokości najwyższych punktów chropowatości powierzchni skutkuje zetknięciem się wierzchołków par trących oraz jednoczesnym ścierniem wraz z adhezyjnym połączeniem wierzchołków i oderwaniem ich. Walker [109] w swojej pracy postanowili odtworzyć proces powstawania scuffingu w warunkach eksperymentalnych. Wykazał, że możliwe jest odtworzenie dynamicznych nacisków na stanowisku tribologicznym. Wyniki badań wskazują, że zmiany nie zależą od profilu ciśnienia dynamicznego, ale od temperatury powierzchni. Wyniki przedstawiono na rysunku 2.17.

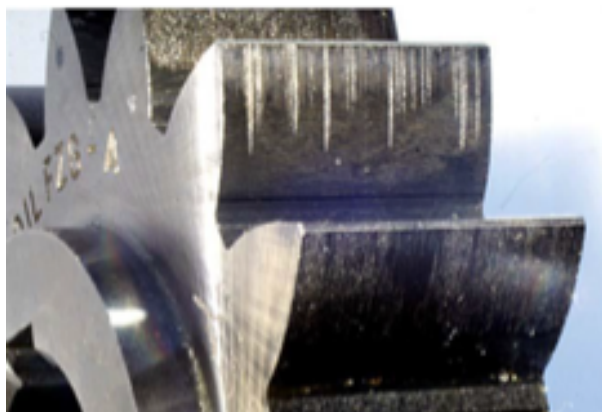


Rys. 2.17. Wpływ temperatury na współczynnik tarcia podczas występowania scuffingu [109]

Według Hebdy [19] rozróżnia się 3 podstawowe rodzaje scuffingu:

- lekki,
- umiarkowany,
- intensywny.

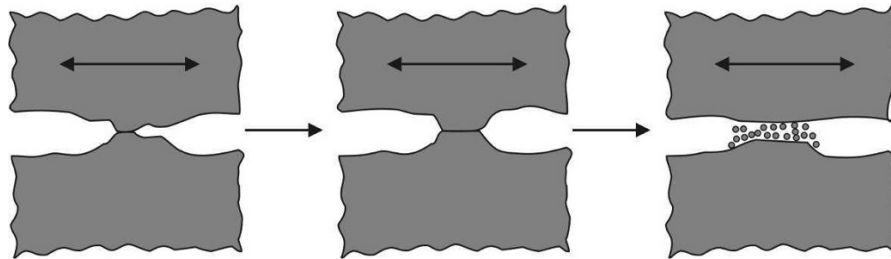
Przykładowy obraz scuffingu intensywnego występującego na kole zębatym został zaprezentowany na rysunku 2.18.



Rys. 2.18. Scuffing intensywny na kole zębatym [90]

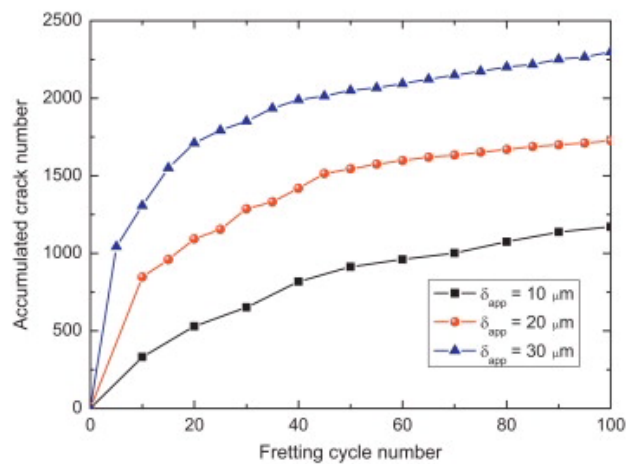
Kolejnym rodzajem zużycia, które występuje w maszynach roboczych jest fretting, czyli zużycie korozyjno-ściernie. Występuje ono w przypadku połączeń elementów spoczynkowych, które podczas niewielkich drgań oddziałują na siebie uszkadzając swoją powierzchnię [2, 19]. Fretting występuje we wszelkiego rodzaju połączeniach czopów osi, kołnierзовych, nitowych

czy też wielowypustach [52]. Na powierzchni elementów współpracujących występuje proszek, który jest efektem ubocznym zużycia ściernego występującego w frettingu [20, 73]. Na rysunku 2.19. zostały zaprezentowane etapy powstawania frettingu.



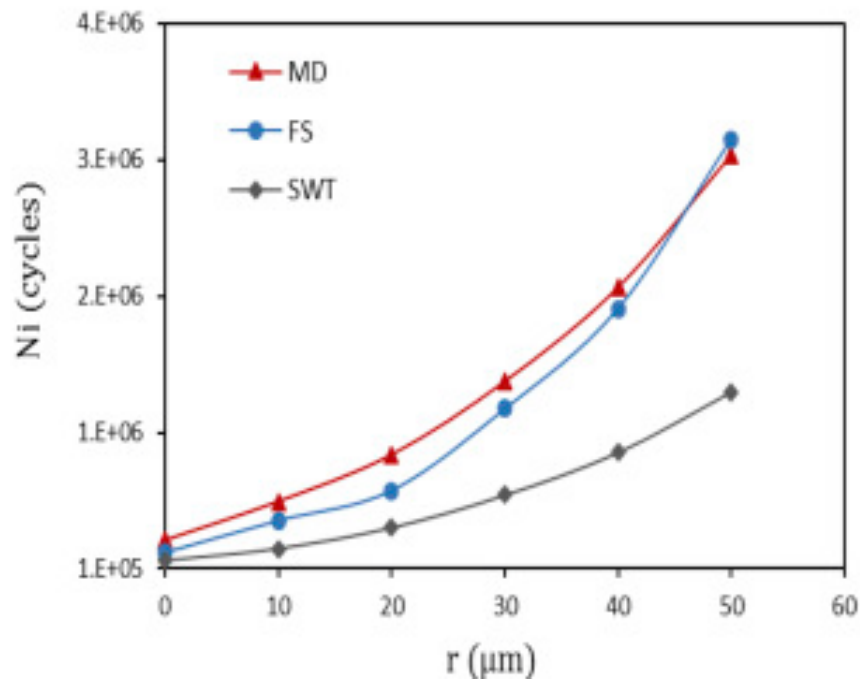
Rys. 2.19. Etapy powstawania frettingu [2]

Wraz z rozwojem technologii zaczęto symulować procesy frettingu za pomocą analizy DEM. Wen Li [56] wraz z zespołem wskazują na możliwości wykorzystania tej analizy do przeciwdziałaniu powstawania frettingu. Badania wskazują na istotny wpływ amplitudy drgań oraz proces usunięcia cząstek ciała trzeciego w przypadku tego rodzaju zużycia. Wyniki badań zostały przedstawione na rysunku 2.20. Wykorzystanie symulacji DEM pozwala na lepsze zrozumienie procesu powstawania tego zużycia.



Rys. 2.20. Występowanie pęknięć w zależności od liczby cyklicznego obciążenia [56]

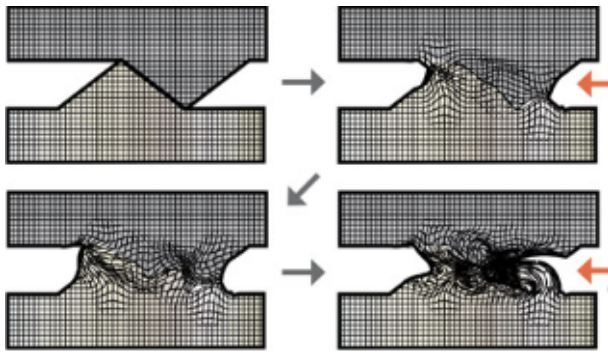
Bhati w swojej pracy [4] doszedł do podobnych wniosków jak Wan Li. W badaniach tych porównywano symulacje komputerową wraz z standardowym badaniem, a wyniki zostały przedstawione na rysunku 2.21. Wskazują oni na możliwość wykorzystania analizy DEM w przypadku badań frettingu.



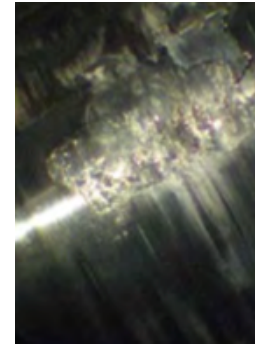
Rys. 2.21. Porównanie symulacji występowania frettingu oraz badań rzeczywistych [4];

MD – McDiarmid, FS – Fatemi Socie, SWT – Smith Watson Topper

Kolejnym rodzajem zużycia występującym w maszynach roboczych jest zużycie adhezyjne. Występuje ono w mikroobszarach, w których następuje plastyczne odkształcenie warstwy wierzchniej, najczęściej w najwyższych wierzchołkach chropowatości. Na najwyższych wierzchołkach występują lokalne szczepienia metaliczne, a następnie niszczenie połączenia wraz z odrywaniem materiału od siebie [63]. Zużycie to występuje przy tarcia ślizgowym, w którym oddziałują na elementy duże siły jednostkowe oraz małe prędkości względne [16, 72, 73]. Tego rodzaju zużycie występuje najczęściej w silnikach spalinowych, w których zakłócony zostaje dopływ oleju smarnego, lub podczas krótkiej pracy, kiedy jeszcze nie zdąży wytworzyć się film olejowy wpływający na poprawne właściwości smarne ośrodka [116]. Na rysunku 2.22. zaprezentowano schemat powstawania etapów szczepiania pierwszego rodzaju, natomiast na rysunku 2.23. pokazano efekt zużycia adhezyjnego.

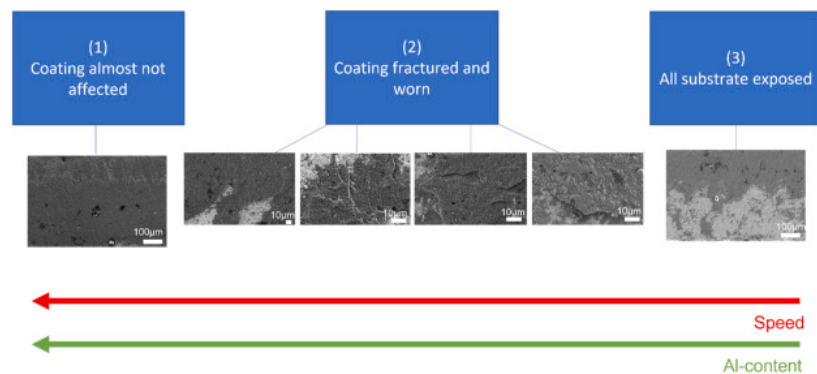


Rys. 2.22. Schemat powstawania szczepienia pierwszego rodzaju [32]



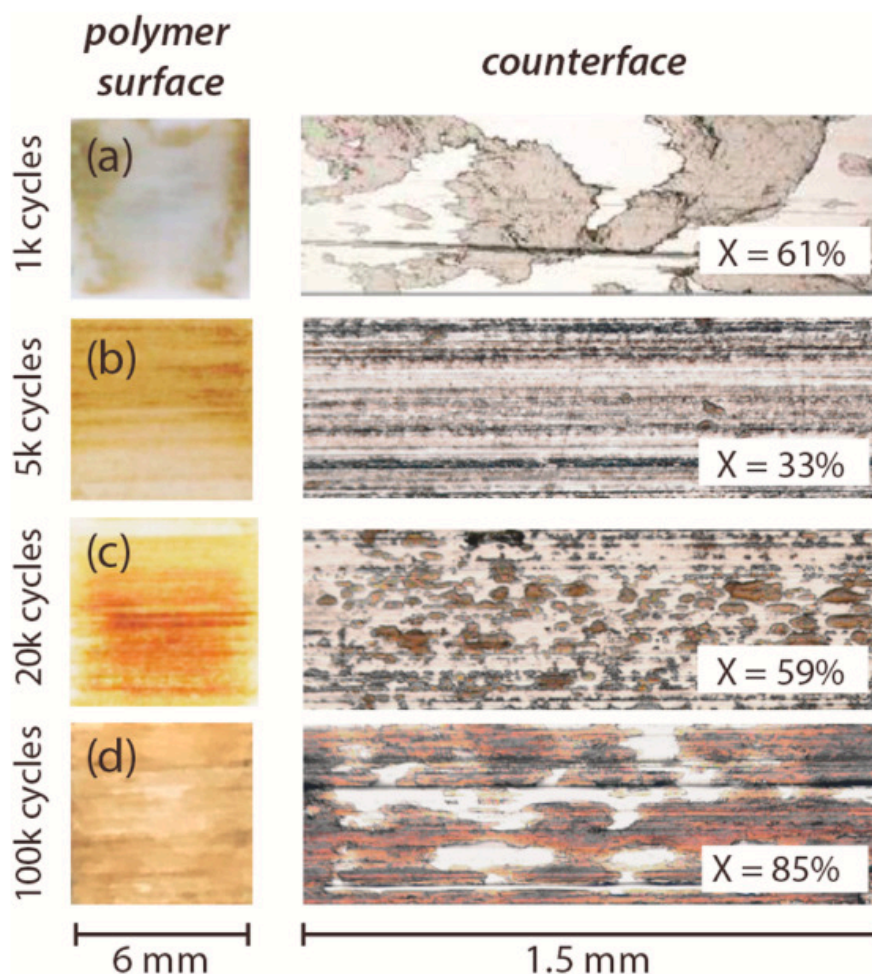
Rys. 2.23. Endoskopowy obraz skutków zużycia adhezyjnego tłoka ze stopu aluminium [46]

Zacieranie adhezyjne jest to wyjątkowy rodzaj zużycia adhezyjnego, w którym szczepieniu zostaje poddana większa liczba nierówności niż w przypadku tradycyjnego zużycia. Jeśli liczba nierówności przekracza wartość graniczną, następuje zacieranie adhezyjne, które charakteryzuje się powiększeniem na obszarze warstwy wierzchniej liczby oderwanych elementów. Zacieranie adhezyjne cechuje się niestabilnością tarcia oraz zwiększoną szybkością spowodowaną większymi ogniskami zużycia. Najczęstszymi elementami, które ulegają zacieraniu adhezyjnemu jest tłok silnikowy lub czopy wałów pracujące w parze ciernej. Badania wykonane przez Moreno wskazują również jednoznacznie na zużywanie adhezyjne w przypadku niskich prędkości skrawania powłok o dużej zawartości AL wykonywanych za pomocą narzędzi pokrytych Ti1-xAlxN [61]. Poniżej, na rysunku 2.24. przedstawiono obrazy powierzchni próbek podczas zacierania dla różnych prędkości procesu. Zdjęcia zostały wykonane mikroskopem skaningowym w celu wykazania dominującego rodzaju zużycia.



Rys. 2.24. Wpływ prędkość przemieszczania na powstawanie frettingu [61]

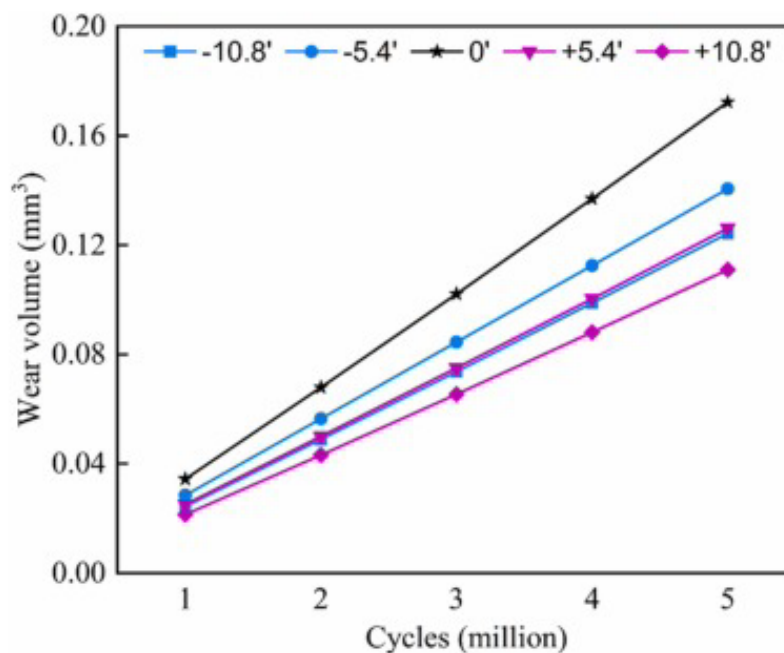
Podczas badań zużycia adhezyjnego Wei Sun wykazała, że już niewielka ilość nanonapełniaczy (α -aluminy) przyczynia się do 1000-krotnego zmniejszenia zacierania adhezyjnego [103]. Wyniki badań wskazują również na istotny wpływ dodatków nanonapełniaczy na twardość tribofilmu oraz na malejącą liczbę zatrzymywania luźnych odłamków wraz ze wzrostem chropowatości transferowej. Poniżej, na rysunku 2.25. zaprezentowano kształt powierzchni po wykonanych badaniach zużycia adhezyjnego.



Rys. 2.25. Powstawanie zużycia adhezyjnego w zależności od liczby cykli [103]

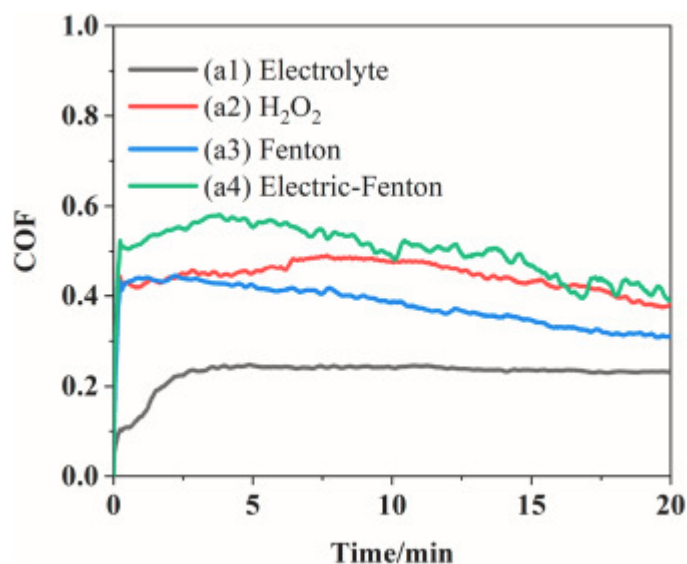
Zużycie tribochemiczne jest to proces degradacji warstwy wierzchniej elementu, wskutek działania na niego zużycia ściernego, chemisorpcji oraz reakcji chemicznych [82, 83]. Zużycie zachodzi w wyniku absorpcji czynników chemicznych z otoczenia, które wnikają w warstwę wierzchnią powodując jej uszkodzenie, często wraz z podwyższoną temperaturą pracy [14, 60, 101]. Zużycie chemiczne wpływa na mechanizm zużycia ściernego, może jednak wytworzyć specyficzny przebieg tego procesu. Jako przykłady takiego zużywania można przedstawić elementy wykorzystywane jako implanty wszczepiane w ciało ludzkie. Implanty te muszą

cechować się brakiem powstawania tribokorozji oraz chemicznego wpływu na wszczepiony implant. Guoxian Zhang w swoich badaniach [115] sprawdził wpływ niedopasowania stożka wykonanego z CoCr/Ti6Al4V na zużycie związane z wpływem chemicznym i mechanicznym procesem zużycia. Podczas badań wykazał, że wpływ niedopasowania wpływa aż na 26% zwiększenie zużycia materiału. Badania odbywały się na stanowisku „ball-on-disc”. Wyniki wskazujące na objętościowe zużycie w zależności od wykonanych cykli pokazano na rysunku 2.26.



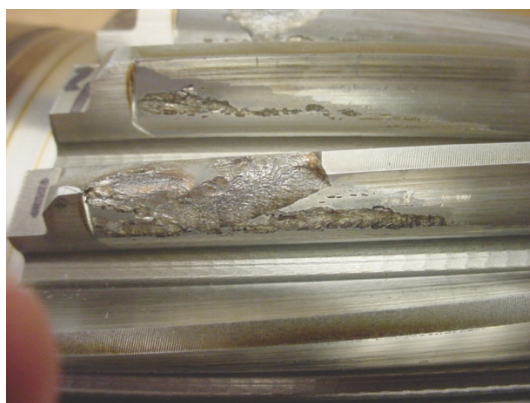
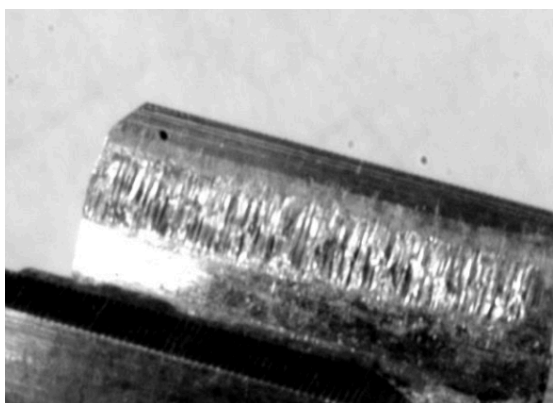
Rys. 2.26. Wpływ niedopasowania stożka implantu biomedycznego na zużycie objętościowe [115]

Jisheng Pan przeanalizował zużycie z wykorzystaniem różnego medium ściernego [80]. Podczas badań udowodniono, że w różnym medium współczynnik tarcia się znacząco różni. Autor w badaniach wykazał, że wzrost współczynnika jest zależny od stanu powierzchni trącej, oraz że w przypadku elektro-fenton, który jest używany do wytworzenia rodników hydroksylowych z nadtlenku wodoru, odpryski powstałe wskutek zużycia tribochemicznego zostają szybciej usunięte z powierzchni niż w przypadku innych mediów ściernych. Dodatkowo, wykazał, że powierzchnia w przypadku potraktowania jej środkami chemicznymi staje się gładzsza wraz z przebiegiem zużywania. Wyniki tych badań zostały zaprezentowane na rysunku 2.27.



Rys. 2.27. Współczynnik tarcia w zależności od obecności medium chemicznego [80]

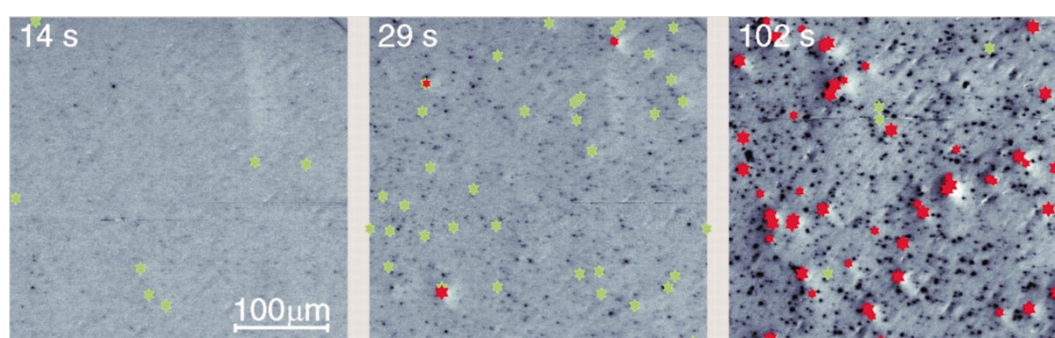
Zużycie zmęczeniowe jest to zużycie, które jest efektem oddziaływań cyklicznych na materiał poprzez wywieranie na niego siły lub obciążenia z określoną częstotliwością, wskutek czego powstaje zmęczenie powierzchniowe [19]. Zużycie to, często wstępuje również w przypadku połączeń posiadających dobre właściwości smarne. Zużycie zmęczeniowe występuje przy niewielkich siłach tarcia oraz przy braku adhezji. Naprężenia kontaktowe, które występują na styku pary trącej są najczęściej spowodowane krzywizną współpracujących elementów [28, 110]. Można wyróżnić dwa podstawowe rodzaje zużycia zmęczeniowego – pitting oraz spalling [20, 36, 74], które zostały przedstawione na rysunku 2.28. oraz na rysunku 2.29.



Rys. 2.28. Efekt powstawania pittingu [110]

Rys. 2.29. Efekt powstawania spallingu [28]

Pierwszy z rodzajów zużycia zmęczeniowego jest pitting, czyli wykruszanie lub powstanie ubytków materiału wskutek cyklicznego działania siły punktowej o lokalnym działaniu oraz fizykochemicznego oddziaływania na nią substancji smarnej. Takie zużycie występuje np. w łożyskach kulkowych. Punckt [85] w swoich badaniach przedstawił etapy powstawania pittingu, wykazał on również niestabilność powstawania wżerów w zależności od czasu działania cyklicznego obciążenia. Badania, które przeprowadził w sposób eksperymentalny, pozwalają na dokładniejsze zobrazowanie procesu oraz zrozumienie schematu działania pittingu. Schemat działania w zależności od czasu ekspozycji został przedstawiony na rysunku 2.30.



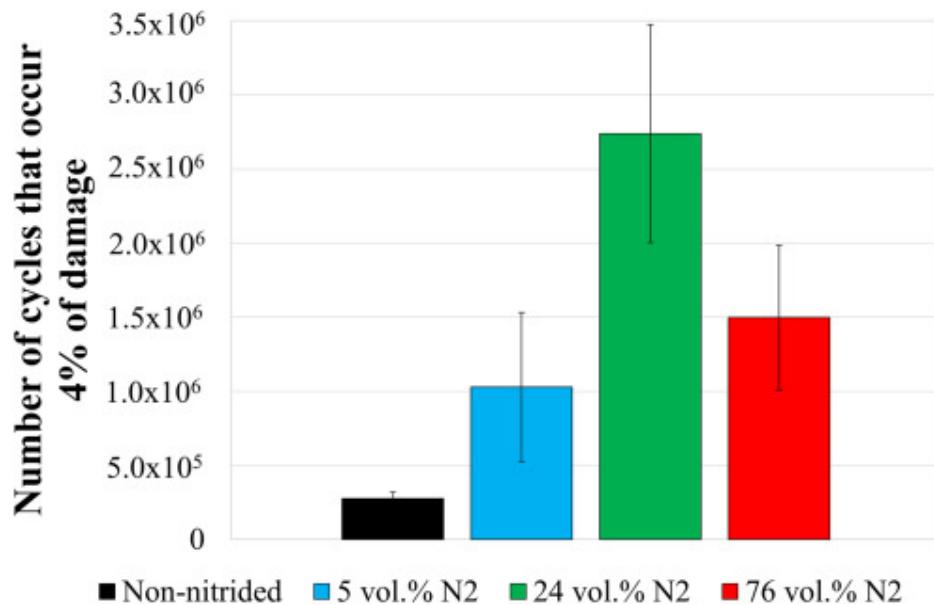
Rys. 2.30. Schemat działania pittingu korozyjnego [85]

Kolejnym rodzajem zużycia zmęczeniowego jest spalling, czyli łuszczenie materiału wywołane tarciami suchym o cyklicznym oddziaływaniu. Wskutek działania siły powstają mikropęknięcia, które przemieszczają się w głąb materiału. W spallingu często występuje również utlenianie materiału w miejscu pęknięcia. Łuski posiadają nieregularne kształtu oraz ostre krawędzie [55, 108], a przykładowe etapy powstawania spallingu zostały zaprezentowane na rysunku 2.31.



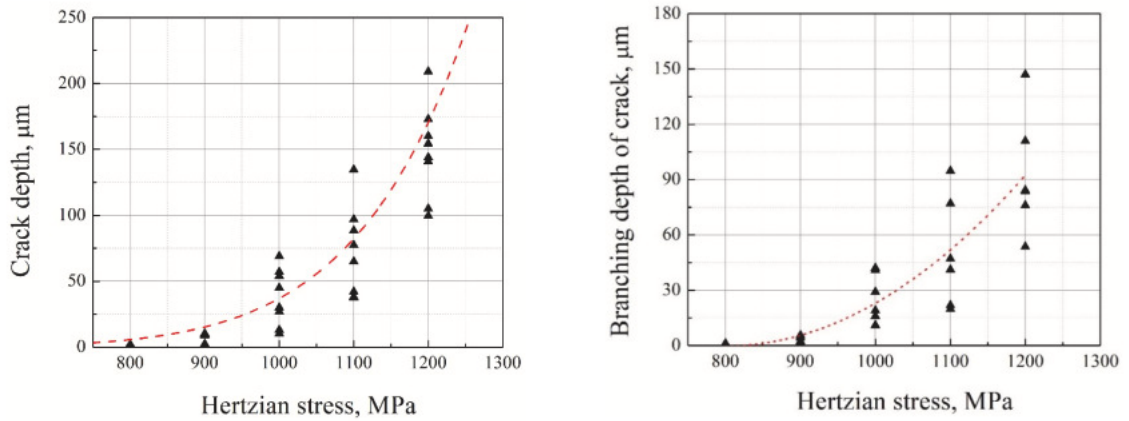
Rys. 2.31. Etapy powstawania spallingu [33]

Rafael Dalcin podczas analizy kół zębatych wykazał przydatność azotowania plazmowego w celu ochrony przed powstawaniem pittingu [11]. Podczas analizy przetestował różne ilości wykorzystywanego azotu w procesie obróbki warstwy wierzchniej. Bogaty skład azotu wzmacniał twardość powierzchni oraz pozytywnie wpływał na zmniejszenie pęknięcia powierzchni, jak również powstawania pittingu. Najlepszą odpornością cechowała się mieszanka o zawartości 24% N₂. Wyniki badań zostały zaprezentowane na rysunku 2.32.



Rys. 2.32. Wpływ ilości azotu na liczbę cykli potrzebnych do uszkodzenia koła zębatego [11]

Zużycie elementów, w których udział bierze ścierniwo może zostać zintensyfikowane ze względu na parametry tego medium. Xiaolong Liu [57] przeanalizowała wpływ twardości materiału w przypadku powstawania spallingu na głębokość powstałych wgłębień. Wykazała ona, że wraz ze wzrostem twardości głębokość powstających pęknięć maleje. Na podstawie przeprowadzonych badań zaproponowano model bazujący na modelu zniszczenia Hirakawa, który opisuje wpływ twardości na wykruszanie się kół stalowych podczas pracy. Poniżej zaprezentowano porównanie głębokości pęknięć w zależności od twardości. Wyniki związane z wpływem twardości na głębokość pęknięć zaprezentowano na rysunku 2.33.



Rys. 2.33. Porównanie głębokości pęknięć w zależności od twardości materiału [57]

2.3. Mechanizmy zużycia w masie ścierniej

Mechanizmy zużycia elementów w masie ścierniej to złożone i niejednorodne procesy. Wg Nosala [74] zużycie ściernie występujące w glebie, utożsamianej z masą ścierną ma bezpośredni związek z 3 grupami czynników:

- zastosowaniem elementu roboczego,
- siłami, które działają na dany element roboczy,
- własnościami mechanicznymi, fizykochemicznymi oraz glebotwórczymi masy ścierniej.

Według Napiórkowskiego [68] zużycie w masie ścierniej można wyrazić w następujący sposób:

$$Z_v = f(P, E, G, t) \quad (2.1)$$

$$P = \{p, v\} \quad (2.2)$$

$$E = \{K, M, S, H\} \quad (2.3)$$

$$G = G_w \cup G_L \quad (2.4)$$

$$G_w = \{g_{w1}, g_{w2}, g_{w3}, g_{w4}\} \quad (2.5)$$

$$G_L = \{g_{l1}, g_{l2}, g_{l3}\} \quad (2.6)$$

gdzie:

Z_v – zużycie objętościowe narzędzia roboczego,

P – wymuszenia zewnętrzne które działają na narzędzie,

p – nacisk gleby na powierzchnię roboczą,

v – prędkość przemieszczania się cząstek gleby po warstwie wierzchniej narzędzia,
E – właściwości narzędzia,
K – kształt narzędzia,
M – materiał z jakiego wykonane jest narzędzie,
S – struktura materiału,
H – twardość,
G – właściwości gleby,
G_w – właściwości glebowe powstałe podczas procesu glebotwórczego,
g_{w1} – skład chemiczny,
g_{w2} – skład granulometryczny,
g_{w3} – twardość ziaren ściernych,
g_{w4} – kształt ziaren ściernych,
G_L – właściwości gleby zmienne w czasie,
g₁₁ – zwięzłość,
g₁₂ – wilgotność,
g₁₃ – odczyn,
t – czas trwania zużycia.

Innym rodzajem przebiegu zużycia jest wzór wyrażony jako zużycie wielofazowe [106]:

$$(N + F + v_t + C_p + \dots) \rightarrow \{[M_r \vee \uparrow D_r \vee U_r] \downarrow \vee T \downarrow \vee O \downarrow \vee H_w \downarrow \vee \dots\} \supset Z \quad (2.7)$$

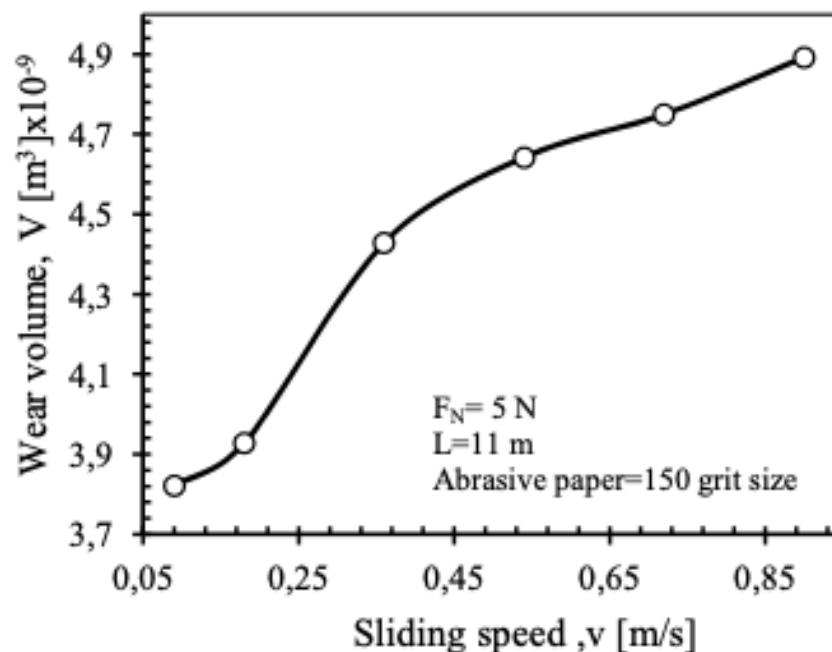
gdzie:

N – siła normalna,
F – siła tarcia,
v_t – prędkości posuwu cząstek,
C_p – środowisko glebowe,
M_r – mikoskrawanie,
D_r – proces deformacji,
U_r – naruszenie struktury materiału,
T – temperatura,
O – utlenianie,
H_w – nawodorowanie,
Z – zużycie.

Analizując powyższą zależność (2.7) można zauważyć, że zużycie jest to suma czynników fizycznych, które następnie przechodzą (\rightarrow) w procesy lokalnego zgniotu (\uparrow) i proces usunięcia produktów zniszczenia warstwy wierzchniej, pod wpływem kontaktu.

Parametry opisane jako $[M_r \vee \uparrow D_r \vee U_r]$ są to procesy, które znacząco wpływają na niszczenie materiału, natomiast, kolejne czynniki wzoru to zjawiska, które występują podczas pracy w masie ścierniej.

Podstawowe ujęcie mechanizmów występujących podczas niszczenia warstwy wierzchniej w procesie zużywania w masie ścierniej zależy od wpływu poszczególnych parametrów przedstawionych powyżej. Bardzo istotnymi czynnikami jest wpływ nacisku oraz prędkości cząstek, które napierają na element roboczy. Według badań [77] wpływ prędkości na zużycie nie jest jednoznaczny. Z jednej strony wyższa prędkość sprawia, że czas ekspozycji materiału na oddziaływanie ścierniwa jest mniejszy, natomiast z drugiej strony miękki materiał jest bardziej podatny przy wyższej prędkości na zużycie ściernie. Według Durmuş Odabaş szybkość zużycia rośnie liniowo wraz z czasem trwania procesu [77]. Na rysunku 2.34. zaprezentowano wyniki objętościowego zużycia próbek w zależności od prędkości ślizgania.



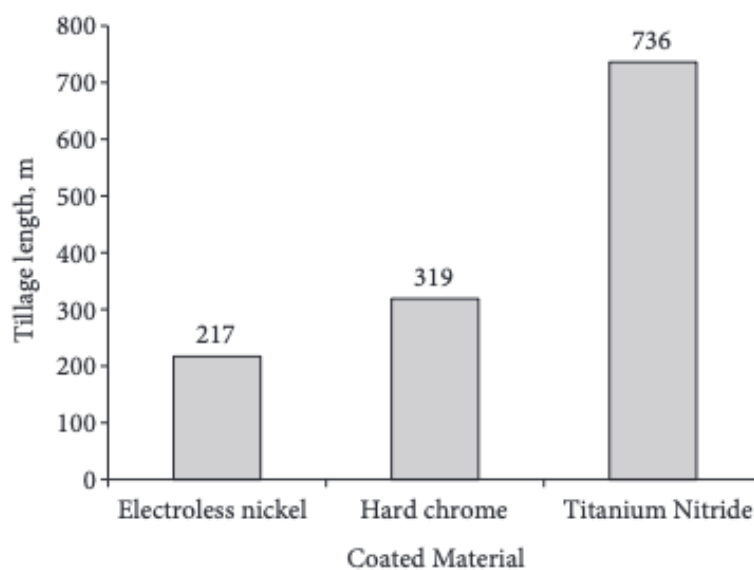
Rys. 2.34. Wpływ prędkości ślizgania na zużycie objętościowe [77]

Kolejnym parametrem kluczowym dla mechanizmów zużycia jest wpływ miejsca zastosowania elementu roboczego oraz jego przeznaczenie [47, 74]. Każde narzędzie robocze odpowiada za różne zadania podczas wykonywania pracy [3,65], a co w związku z tym posiada inne parametry eksploatacyjne oraz kształt.

Narzędzia przeznaczone do pracy w gruncie można podzielić na aktywne oraz bierne [74]. Grupa elementów biernych, to takie które nie wykonują dodatkowej pracy. Za tego typu

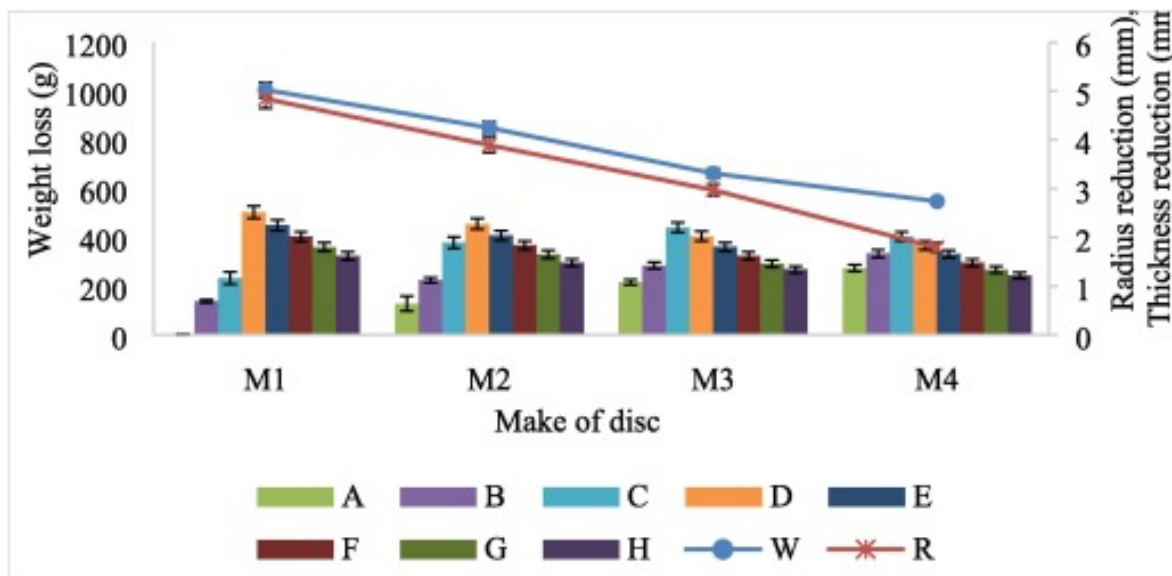
elementy można uznać wszystkie statyczne narzędzia. Przykładem są lemiesze, zęby kultywatora czy też zęby bron. Istnieje również rozróżnienie zużycia w elementach biernych. Z badań [3, 47, 48] wynika, że wśród elementów, które pracują w sposób bierny bardziej narażone na zużycie ściernie są elementy, które odspajają glebę od jej litej formy.

Przykładowe badania nad biernymi elementami wykonał Nalbant, który opisał różne rodzaje twardości materiałów poddanych zużyciu ściernemu [64]. Badania wykonywał w stanowisku typu soil bin na otwartej powierzchni. Wykazał, że wraz ze wzrostem twardości zużycie maleje. Wyniki badań zostały przedstawione na rysunku 2.35.



Rys. 2.35. Badania biernego narzędzia roboczego [64]

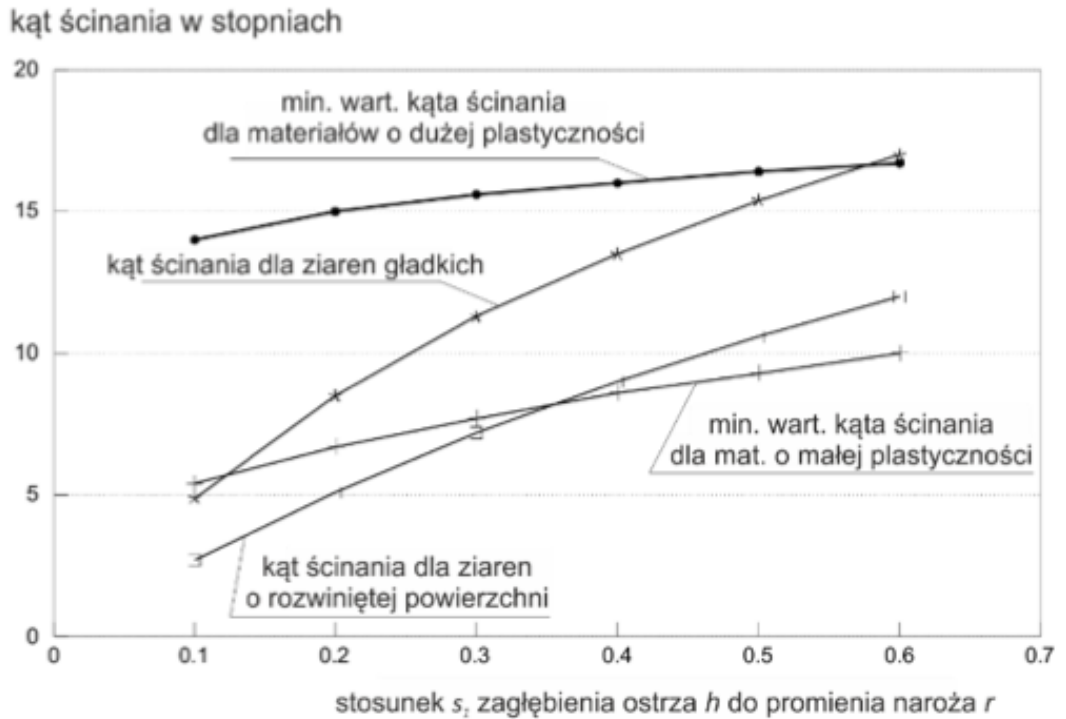
Mniejszym zużyciem charakteryzują się elementy, które tę glebę obracają oraz te części, na które masa ścierna działa w sposób kontaktowy (stykowy), nieciągły. Za takie elementy można uznać walce, wały uprawowe lub drogowe oraz nawet opony pojazdów [5]. Badania ruchomych elementów maszyn wykonane zostały przez Rani, który zrealizował badania elementów roboczych brony talerzowej [86]. Wskazują one na różne ubytki masy w zależności od przebytego dystansu, można na ich podstawie stwierdzić, że tarcza numer 4, która cechowała się najwyższą twardością. Szczegółowe wyniki pokazujące ubytek masy zostały zaprezentowane na rysunku 2.36.



Rys. 2.36. Zużycie masowe tarczy brony talerzowej w zależności od materiały [86]; A-H – miejsce pomiaru grubości, M1, M2, M3, M4 – oznaczenie materiału

Elementy aktywne to elementy posiadające niezależny układ wprawiający je w dodatkowy ruch pozwalający na wykonanie pracy. Za takie elementy można uznać np. brony aktywne, zęby glebogryzarki czy też maszyny do zbioru kamieni.

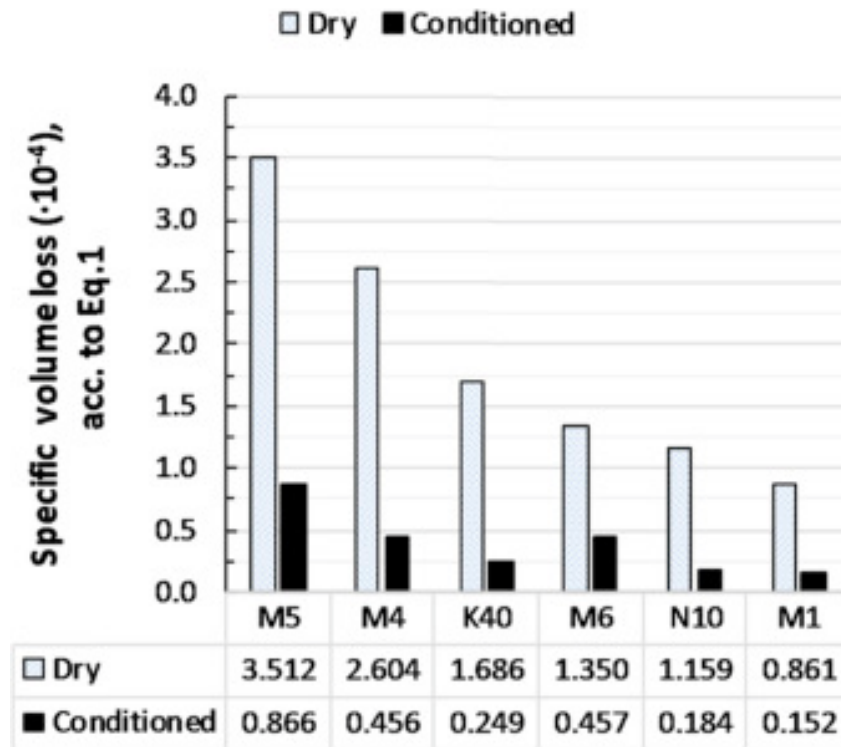
Następnym czynnikiem, który w dużej mierze determinuje mechanizm zużywania się elementów w masie ścierniej są właściwości masy ścierniej. Najistotniejszym z nich jest uziarnienie, które według definicji [84] jest procentową zawartością poszczególnych cząstek (ich wielkości) w całym materiale. Według [37, 70], istnieje związek poszczególnych frakcji ze zużyciem ściernym. Parametrem, który również wpływa na całkowite ilościowe zużycie ściernie jest rodzaj ścierniwa [43, 68]. Badania [37] wykazały, że różne rodzaje ścierniwa powodują inne mechanizmy zużycia, co pokazano na rysunku 2.37. Kąt ścinania wpływa na zagłębienia ostrza w zależności od parametrów ziaren co zostało zaprezentowane również w poprzednim rozdziale.



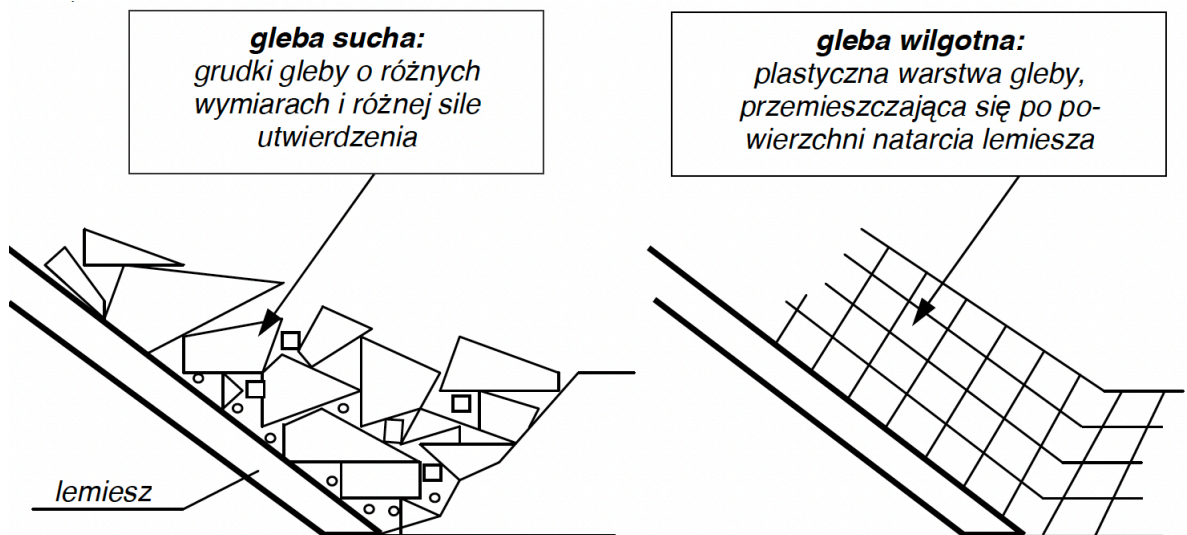
Rys. 2.37. Wpływ kąta ścinania na zagłębienie ostrza [37]

Wzrost twardość cząstek wpływa na zmiany stosunku twardości materiału skrawającego do skrawanego, przez co w materiale o niższej twardości zachodzi większe zużycie niż w przypadku materiału, w którym stosunek twardości ścierniwa do materiału ścieranego jest niższy.

Wilgotność gleby, która jest definiowana jako zawartość wody w masie, wpływa na napór cząstek na powierzchnie elementu obrabianego [6]. Wilgotność jest odpowiedzialna za zwięzłość gleby, a co za tym idzie na zużycie elementu roboczego. Zostało to przedstawione na rysunku 2.38. Mechanizm pokazujący wpływ wilgotności na rozkład masy ścierniej na badanym elemencie przedstawiono na rysunku 2.39. Rysunek obrazuje zużycie objętościowe materiału w dwóch różnych warunkach masy ścierniej.

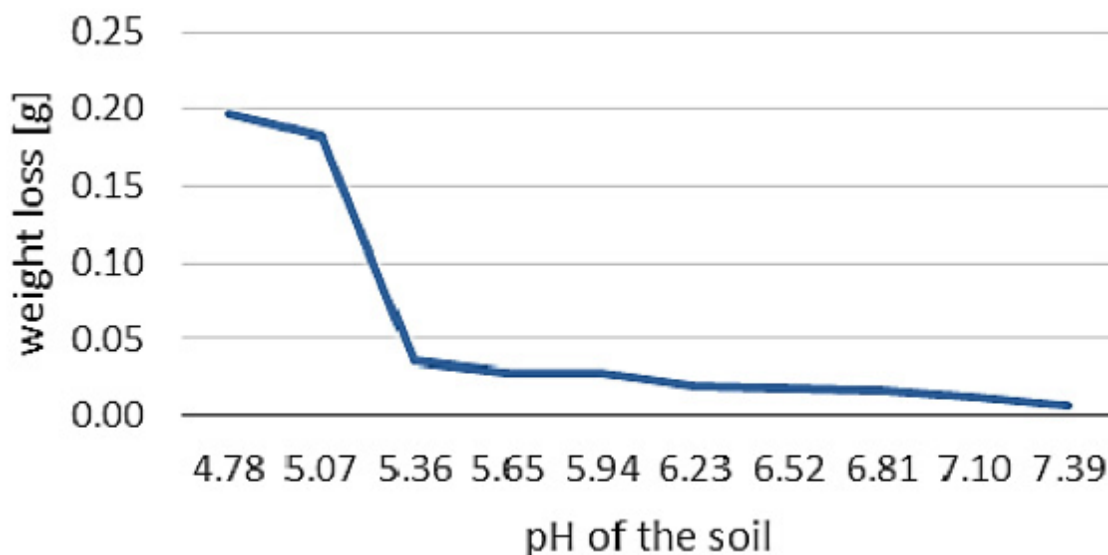


Rys. 2.38. Wpływ wilgotności gleby na zużycie ściernie [6]



Rys. 2.39. Wpływ wilgotności na rozkład masy ścierniej na lemieszu [48]

Odczyn gleby, jest to parametr szczególnie istotny dla mechanizmów zużycia ściernego oraz zamianie zużycia mechanicznego w zużycie tribochemiczne. Jak wykazano w badaniach [66] pH zasadowe oraz kwaśne wpływa na zwiększenie zużycia ściernego poprzez przyspieszoną degradację warstwy wierzchniej. Rysunek 2.40. pokazuje ubytek masy w zależności od pH gleby.



Rys. 2.40. Wpływ pH gleby na ubytek masy badanych elementów [66]

Analizując powyższe parametry wpływające na proces zużycia ściernego można jednoznacznie stwierdzić, że występujące mechanizmy nie są jedynie procesem ślizgania się po powierzchni syku twardych cząstek i wbijaniu się w nie [19, 95]. Duża liczba czynników wpływających na mechanizmy zużywania i efekty w postaci zużycia powoduje, że poza aspektem stosunku twardości metalu do medium ściernego istotny jest również kształt ziaren, ich parametry, odczyn czy wilgotność. Mechanizmy podstawowe takie jak mikrorysowanie, mikroskrawanie czy mikrobrzdowanie są w zależności od cząstek albo wzmocniane, przez co następuje większe zużycie, lub łagodzone.

Analizując dane literaturowe związane z rodzajami powstawania zużycia postanowiono przeanalizować stanowiska do badań tribologicznych.

2.4. Stanowiska laboratoryjne do badania zużycia ściernego

Rozwój badań nad procesami tribologicznymi wytworzył potrzebę przygotowania odpowiedniego zaplecza eksperymentalnego. W tym celu określono wytyczne konstrukcyjne dla stanowisk badawczych. Według Napiórkowskiego [70] maszyny tribologiczne są podzielone na dwa podstawowe rodzaje.

Pierwsza grupa stanowisk badawczych, to stanowiska, które wykonują testy pozwalające na określenie procesów oraz mechanizmów tarcia i zużycia. Badania te pozwalają lepiej zobrazować i poznać zmiany, zachodzące na powierzchni materiału podczas ekspozycji na działanie materiału ściernego.

Druga grupa maszyn badawczych, to stanowiska do ilościowego oraz objętościowego określenia wpływu masy ścierniej na badany element. Takie maszyny odzwierciedlają

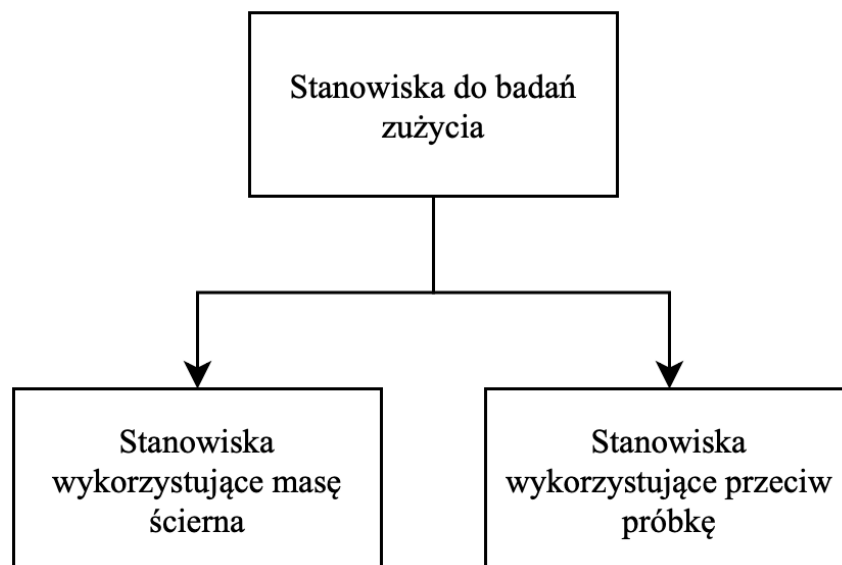
wykonywanie pracy podczas rzeczywistych (polowych) warunków eksploatacji. Maszyny te pozwalają na wykonanie badań zróżnicowanych materiałów oraz powłok. Umożliwiają również określenie ich wpływu na zmianę kształtu narzędzia roboczego. Badania z wykorzystaniem maszyn do oceny ilościowej zużycia pozwalają na określenie intensywności zużycia elementów w funkcji czasu oraz umożliwiają sprawdzenie wpływu parametrów masy ścierniej na objętościowy ubytek masy. Maszyny do badań tribologicznych poza standardem wykorzystania masy ścierniej, którą określa np. norma ASTM G65 nie posiadają jednoznacznych wytycznych konstrukcyjnych. Parametry, z którymi pracują maszyny, oraz rodzaj zastosowanej masy ścierniej jest dostosowany indywidualnie do potrzeb eksperymentu. Dowolność dobrania parametrów masy ścierniej ma na celu zbliżenie parametrów eksperymentu oraz ocenę zużycia tribologicznego do warunków rzeczywistych.

Wielu badaczy [29, 34, 88] do określonych badań oraz w celu symulowania rzeczywistych warunków pracy zaprojektowało oraz skonstruowało własne stanowiska, pozwalające w największym możliwym stopniu odzwierciedlić rzeczywiste warunki panujące w czasie eksploatacji elementów maszyn pracujących w gruncie. Głównym problemem konstrukcji prototypowych jest określenie sposobu pomiaru ubytku masy podczas pracy. Kolejnym problemem występującym przy skonstruowaniu maszyny, jest odwzorowanie w maksymalnym możliwym stopniu kontaktów oraz skojarzenia ciernego par trących, które występują podczas pracy. Częstym zabiegiem, który stosuje się w badaniach laboratoryjnych jest wyznaczenie kluczowych parametrów wpływających na mierzalną wielkość zużycia oraz skonstruowanie maszyny, która posiada jedynie jeden lub dwa zmienne parametry odpowiadające za zużycie, pozostawiając pozostałe parametry na stałym poziomie. Przy projektowaniu maszyn prototypowych do badań tarcowych istotna jest wielofunkcyjność oraz możliwość adaptacji maszyny do określonych, zmiennych warunków pracy. Kluczowa jest możliwie największa kontrola parametrów pracy, które w głównej mierze, poza ośrodkiem trącym odpowiadają za przebieg zużycia. Maszyny do badań tribologicznych można podzielić według następującego schematu przedstawionego w tabeli 2.2.

Tab. 2.2. Charakterystyczne cechy maszyn tribologicznych [19]

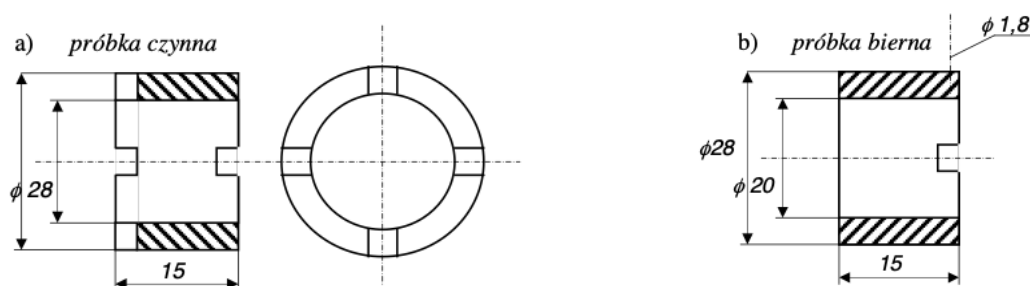
Charakterystyczne cechy maszyn tribologicznych	Rodzaj ruchu	toczne	
		ślizganie	ciągły
			okresowy
	Geometria styku	płaszczyzna	
		walec płaszczyzna	
		walec	
		inny	
	Kształt próbki	klocek płaski	
		klocek walcowy	
		krążek	
		tuleja	
		inny	
	Kształt przeciwpróbki	klocek płaski	
		klocek walcowy	
		krążek	
		tuleja	
		inny	
	Sposób obciążenia	ciężarem	
		nap. sprężyny	
	Nacisk podczas badań	stały	
		zmienny	
	Warunki tarcia	tarcie suche	
		tarcie w obecności smaru	
		ścierne	
Warunki wymiany ciepła	wymiana z otoczeniem		
	chłodzenie zewnętrzne		
	chłodzenie wewnętrzne		

Badania zużycia ściernego mogą się odbywać zgodnie z przedstawionym na rysunku 2.41. podziałem.



Rys. 2.41. Podział stanowisk do badań zużycia

Badania, które posiadają przeciwpróbki powinny mieć zapewnione odpowiednie parametry geometryczne elementów trących. Jako przykład takiego urządzenia można wskazać maszynę UMT – 2168 [92], w której przeciwpróbka współpracuje z badanym materiałem w skojarzeniu ciernym. Jest to próbka, w której parametry geometryczne są określone w wytycznych urządzenia. Kształt i wymiary próbki zostały zaprezentowane na rysunku 2.42.



Rys. 2.42. Rysunek próbki (a) i przeciwpróbki (b) wykorzystanej w badaniach [92]

Najbardziej rozpowszechnione rodzaje przeciwpróbek to [20]:

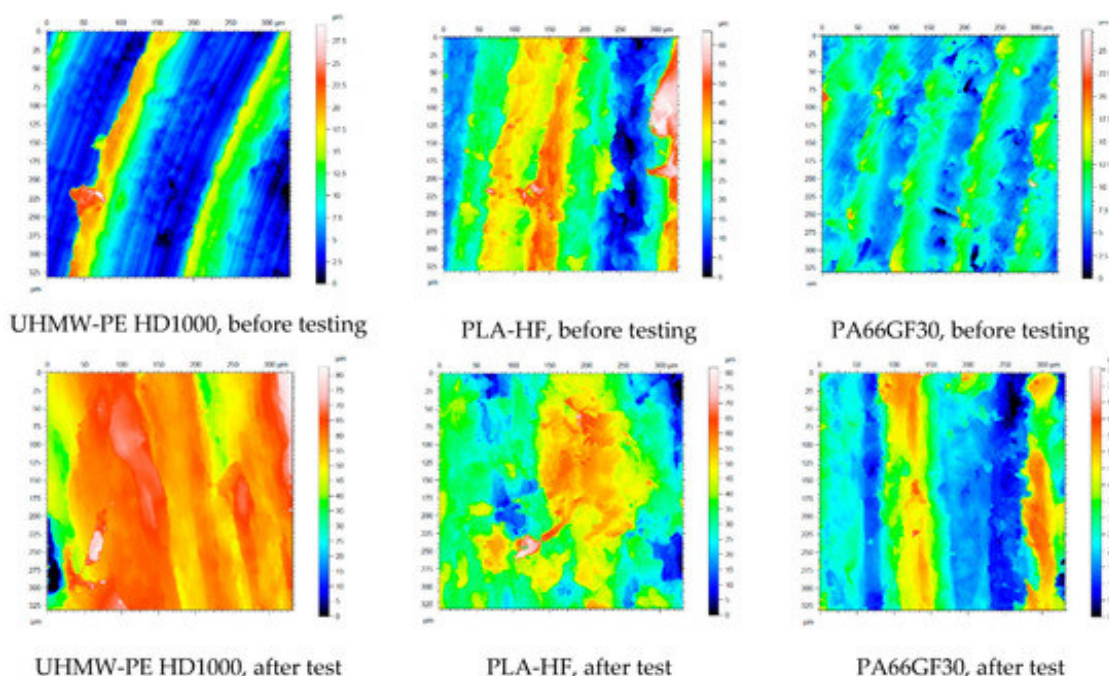
- klocek płaski,
- krążek,
- tuleja,
- tarcza,
- inne prototypowe.

Najczęściej używane podczas testów trybologicznych medium ściernie to:

- piasek kwarcowy,

- korund (tlenek glinu),
- płótno ścierne.

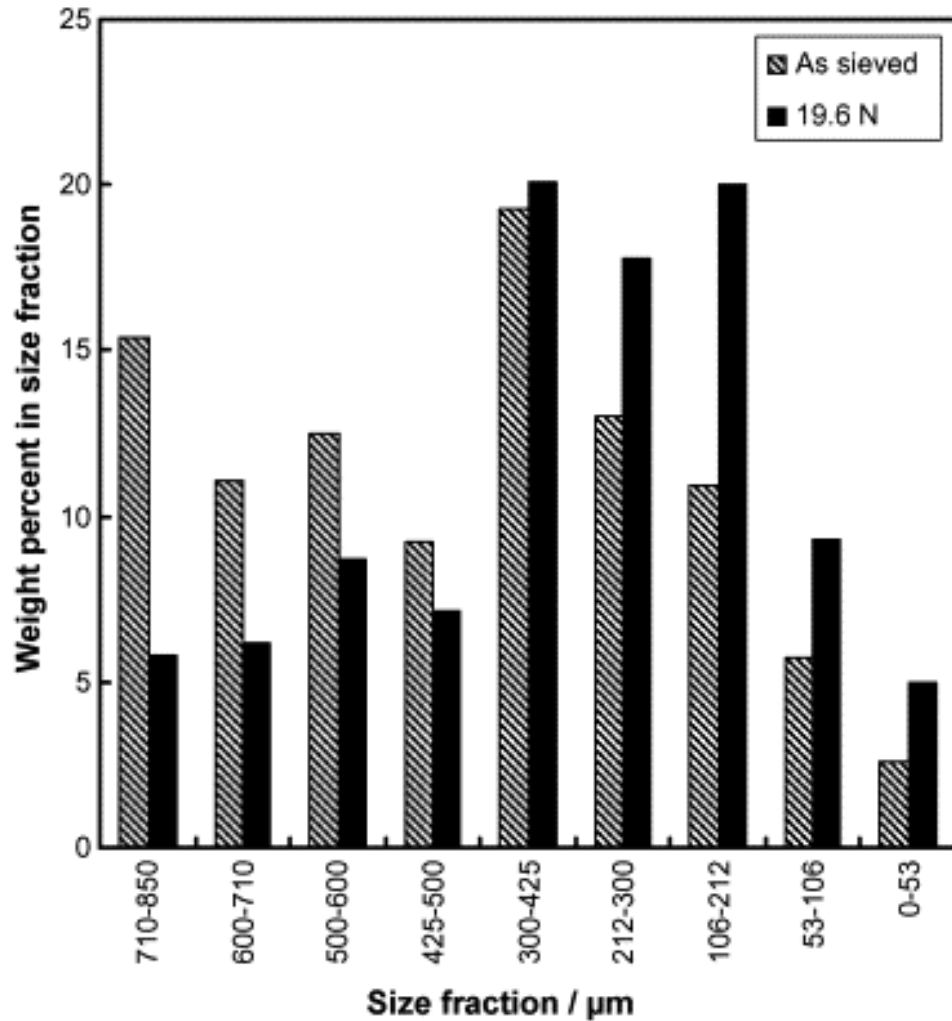
Istnieją również media ścierne dobierane indywidualnie w zależności od przeznaczenia badanego obiektu. Jako przykład należy wymienić badania przeprowadzane z użyciem bentonitu oraz piasku kwarcowego [62, 88] jak również procesy ściernie wykonane na stanowisku do obróbki strumieniowo ścierniej, w którym badania są wykonywane również z wykorzystaniem rozdrobnionego szkła [112]. Badania „pin on plate” przeprowadzone przez Muhandes [62] wskazują na znaczne różnice w chropowatości po wykonanym teście tribologicznym, co przekłada się na kierunek zużycia. Dokładne wyniki badań powierzchni zaprezentowano na rysunku 2.43.



Rys. 2.43. Kierunek postępującego zużycia podczas badania metodą pin on plate [62]

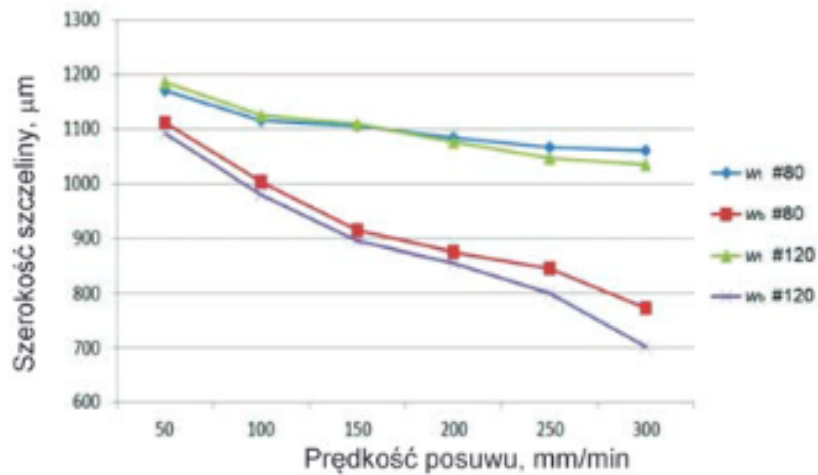
Stosowane w innych badaniach szkiełkowanie miało na celu oddziaływanie na warstwę wierzchnią w celu nadania wymaganej chropowatości powierzchni. Wpływają one na podwyższenie odporności na korozję materiałów bez potrzeby nanoszenia dodatkowej warstwy ochronnej. Częstym problemem występującym podczas badań tribologicznych z użyciem medium ściernego jest zmiana jego kształtu wraz z czasem. Najczęściej jest to zaokrąglenie krawędzi cząstek, co istotnie wpływa na intensywność zużywania w trakcji badania [51, 67]. Według badań Shipway [96] cząsteczki wraz z czasem zmieniają swoją wielkość. Ponadto, sprawdził on wpływ siły nacisku na zużycie stali Hardox. Wykazał, że największym

rozdrobnieniem po teście tribologicznym cechowały się cząstki o wielkości 710-850 μm . Wpływ rozdrobienia cząstek oraz ich procentowy udział został przedstawiony na rysunku 2.44.



Rys. 2.44. Wpływ rozdrobnienia cząsteczek po badaniu zużycia [96]

Ścierniwo o zaokrąglonych kształtach nie posiada odpowiedniej funkcji skrawania materiału badanego. Ubytek materiału oraz jego ilość zależy od kątów oraz ostrych krawędzi, które posiadają cząsteczki, co wykazał Spadło [100]. Wskazał on, że wielkość cząstek wpływa na proces cięcia metalu oraz na powierzchnię po procesie cięcia. Wyniki badań zostały zaprezentowane na rysunku 2.45.



Rys. 2.45. Wpływ wielkości cząstek na prędkość cięcia [100]

Podstawowe stanowiska wykorzystujące masę ścierną zgodnie z klasyfikacją przedstawioną wcześniej można dodatkowo podzielić według dwóch kategorii:

- praca elementu badanego,
- praca masy ściernej.

Do pierwszej grupy maszyn można między innymi zaliczyć takie stanowiska jak:

- a) stanowisko do badania metodą soli bin,
- b) ground tunneling,
- c) aparat Millera,
- d) maszyna typu CIAT,
- e) maszyna typu KEWAT – 3.

Druga grupa obejmuje maszyny, w których zasada działania polega na pracy masy ściernej:

- a) metoda wirującej miski,
- b) obróbka strumieniowo – ścierna,
- c) maszyny bazujące na metodzie Hawortha,
- d) test ciągły na ścieranie.

Stanowiska laboratoryjne „Soil bin” jest to stanowisko, w którym element podawany badaniom zużycia przemieszcza się po określonym torze. Misa jest wypełniona odpowiednim rodzajem ścierniwa, które oddziałuje na narzędzie robocze. Jako ścierniwo najczęściej występuje masa glebowa lub piasek kwarcowy. Zaletą tego rozwiązania jest stosunkowo prosty mechanizm pracy, jednak problemem jest duża ilość materiału ściernego potrzebnego do przeprowadzenia badania. Częstym zabiegiem jest stworzenie pierścienia ograniczonego dwiema ściankami, przez co w środku miski z masą ścierną nie znajduje się materiał ścierny.

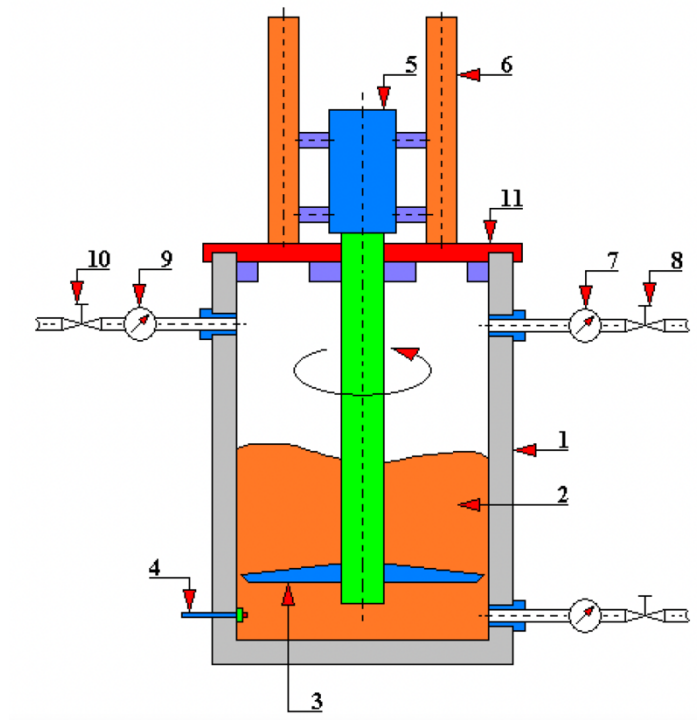
Stanowisko „Soil bin” nieposiadające pierścienia, w którym znajduje się medium ściernie posiada wewnątrz miski materiał, który nie oddziałuje na badany element. Analizując rozwiązania konstrukcyjne zauważono również wersje stanowiska laboratoryjnego funkcjonujące na otwartej przestrzeni. W tym przypadku, całe stanowisko jest wbudowane w podłoże, a jako medium ściernie służy gleba, która pozostaje w naturalnych warunkach środowiska, przez co posiada wilgotność oraz skład chemiczny zbliżony do rzeczywistego. Wadą rozwiązania jest stosunkowo duża masa materiału ściernego, który należy zastosować w celu przeprowadzenia badań. Poniżej, na rysunku 2.46. zaprezentowano zdjęcie poglądowe stanowiska badawczego wykorzystującego metodę soil bin.



Rys. 2.46. Element roboczy w stanowisku soil bin [25]

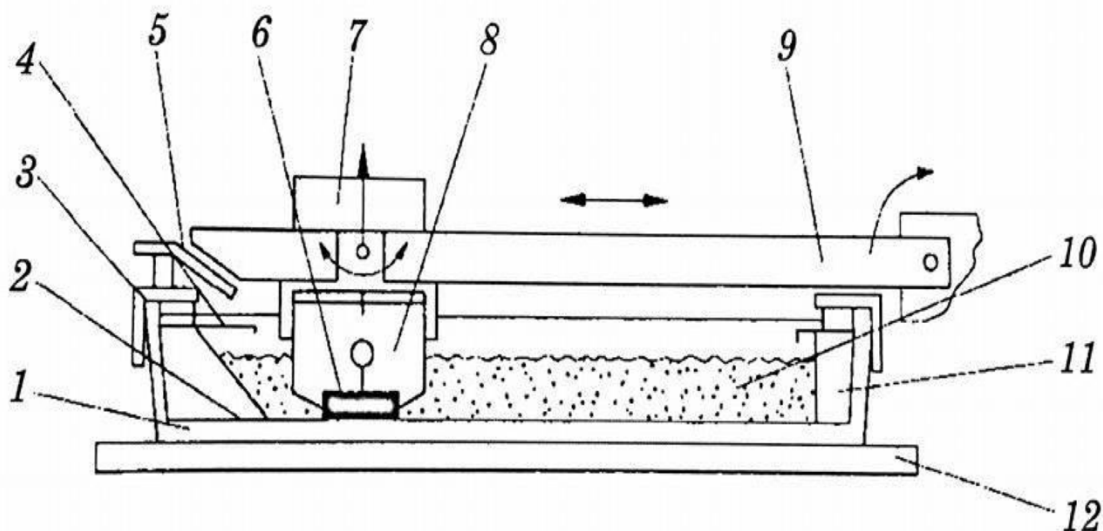
Urządzenie grounding tunneling jest to urządzenie, które przeznaczone jest do badania materiałów, wykorzystywanych na elementy pracujące w głębokich warstwach gleby oraz takich, które pracują w warunkach zmiennego nacisku masy ściernej o wysokich wartościach. Ponieważ warunki pracy, takie jak wilgotność oraz ciśnienie są intensywniejsze, niezbędne jest zabezpieczanie stanowiska za pomocą grubościennych profili, które spełnią wymagania wytrzymałościowe. Zaletą takiego stanowiska jest stosunkowo mała ilość masy ściernej potrzebnej do wykonania badań. Wadami urządzenia jest przeznaczenie stanowiska jedynie do próbek badawczych o określonych wymiarach. W maszynie nie można zastosować narzędzi

roboczych o dużych wymiarach zewnętrznych. Kolejnym ograniczeniem występującym podczas testów jest duża dynamika degradacji parametrów kształtu cząstek masy ścierniej oraz spadek intensywności zużycia wraz z czasem pracy. Schemat urządzenia zaprezentowano na rysunku 2.47.



Rys. 2.47. Schemat urządzenia grounding tunneling [59]; 1 – zbiornik masy ścierniej, 2 – masa ścierna, 3 – elementy badawcze, 4 – zawór spuszczenia wody, 5 – łożysko, 6 – tuleje stabilizujące, 7,9 – manometr, 8,10 – zawór, 10 – pokrywa

Aparat Millera jest to urządzenie, które wykonuje ruch posuwisto – zwrotny w otoczeniu masy ścierniej, najczęściej węgliku krzemu (korundu). W trakcie badań w celu uzyskania odpowiedniej wilgotności medium ściernego dodaje się wodę w odpowiednich proporcjach. Badania aparatem Millera charakteryzują się stałą prędkością i częstotliwością ruchu próbki – odpowiednio $0.254 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ oraz 0.8 Hz . Schemat urządzenia zaprezentowano na rysunku 2.48.



Rys. 2.48. Schemat aparatu Millera [38]; 1 – podkładka, 2 – obudowa, 3 – docisk, 4 – płyta ochronna 5 – podnośnik ramienia, 6 – element badany, 7 – obciążenie, 8 – uchwyt próbki, 9 – ramię, 10 – masa ścierna, 11 – wkład, 12 – podstawa dolna

Maszyna typu CIAT to urządzenie tribologiczne, którego praca polega na obrocie próbek zamocowanych na wewnętrznym wirniku oraz na obrocie zewnętrznego bębna z prędkością niższą niż prędkość wirnika w odwrotnych kierunkach. Bęben wypełniony jest materiałem ściernym. Stosunek prędkości wirnika do bębna to około 60:1 lub więcej, gdyż zakres prędkości pracy wirnika wynosi 60÷650 obr/min, natomiast prędkość bębna to 1÷10 obr/min. Widok stanowiska zaprezentowano na rysunku 2.49.

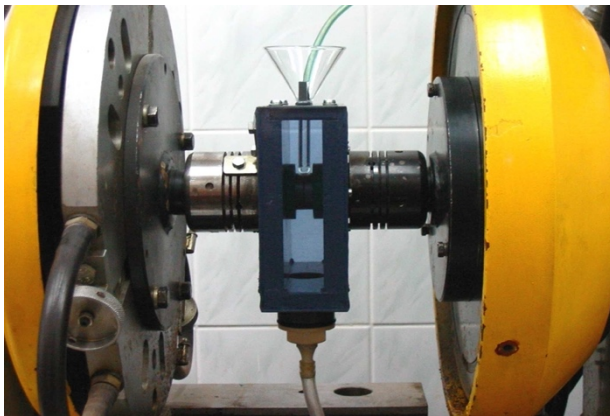


Rys. 2.49. Urządzenia do testów ciągłych typu CIAT [15]

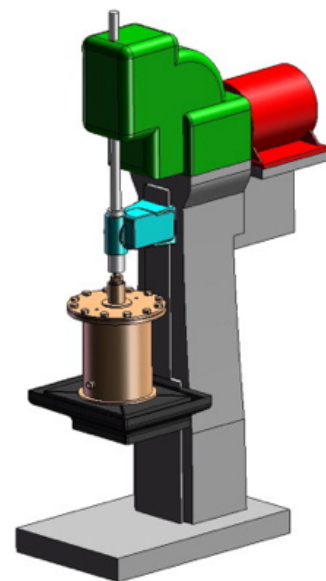
Urządzenie tribologiczne KEWAT – 3 to stanowisko, którego praca polega na ruchu posuwisto-zwrotnym wałka wewnątrz sworznia. Praca ta imituje procesy jakie powstają

odzwierciedlając kinematykę oraz dynamikę obciążenia ogniwa i sworznia pojazdu. Do zjawiska tarcia metalu o metal dochodzi również aspekt związany z medium ściernym.

Maszyny prototypowe – są to najczęściej urządzenia zaprojektowane oraz wykonane na indywidualne potrzeby badawcze. Konstrukcja takich urządzeń często odpowiada parametrom oraz wymaganiom stawianym procesom badawczym. Jako przykład takiego urządzenia można zaprezentować stanowisko badawcze UMT-2168 wykonane w ramach pracy doktorskiej J. Selecha [93] przedstawione na rysunku 2.50., które zostało wzbogacone o komorę do dodawania medium ściernego oraz projekt udoskonalonego urządzenia do grinding tunnelingu pokazane na rysunku 2.51.

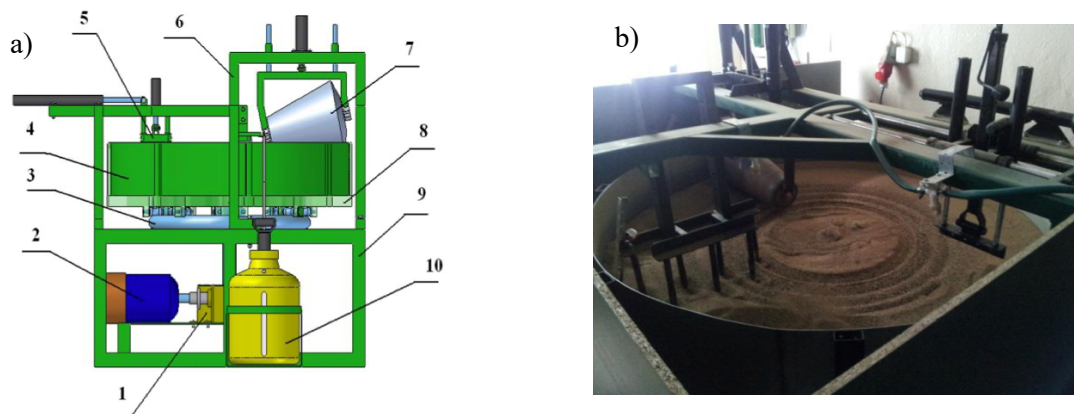


Rys. 2.50. Urządzenie do badań tribologicznych J. Selecha [93]



Rys. 2.51. Prototypowego urządzenia do badań wg Gharahbagh [18]

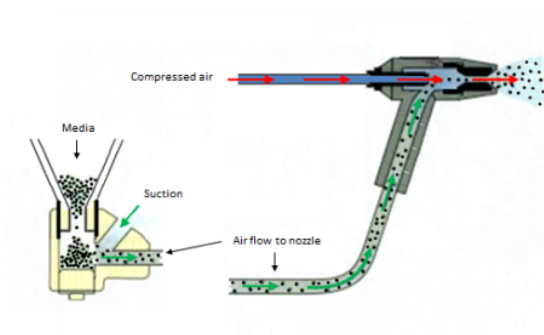
Stanowisko wykorzystujące metodę wirującej misy jest to stanowisko zbliżone do metody soil bin, jednak w tym przypadku element badany pozostaje w bezruchu, natomiast obraca się miska wraz z materiałem ściernym. Głównym problemem tego urządzenia jest siła odśrodkowa, która wypycha materiał ścierny na zewnątrz misy. Kolejnym problemem urządzenia badawczego jest znacząca ilość masy ścierniej, którą po testach należy wymieniać. Schemat urządzenia oraz zdjęcia zaprezentowano na rysunku 2.52.



Rys. 2.52. Stanowisko do badań tribologicznych metodą „wirującej miski”; a) schemat [79]:

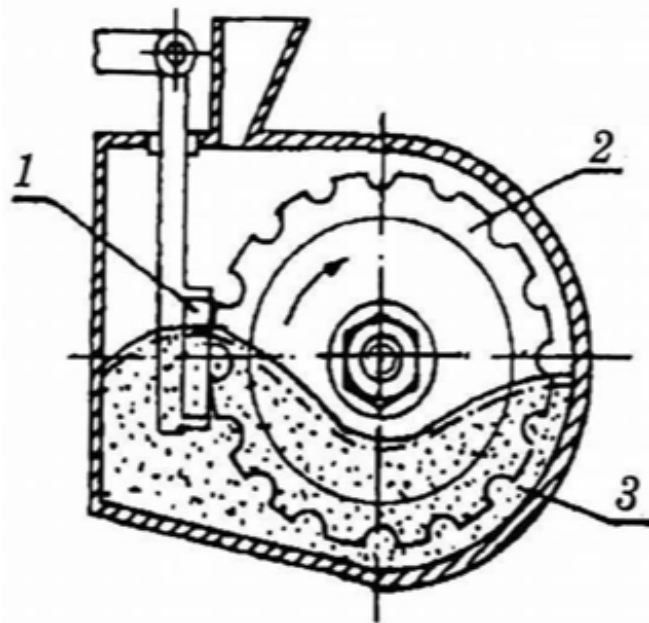
1 – wał, 2 – silnik elektryczny, 3 – prowadnica, 4 – miska z masą ścierną, 5 – uchwyt badanych elementów, 6 – uchwyt wału zagęszczającego, 7 – wał zagęszczający, 8 – rama wirującej miski, 9 – główna rama nośna, 10 – zbiornik na wodę, b) widok

Przykładem stanowiska do obróbki strumieniowo-ściernej jest dysza piaskarki, która wydmuchuje z określonym ciśnieniem cząstki materiału ściernego. Powszechnie stosowanym materiałem ściernym jest piasek kwarcowy. Istnieją również odmiany urządzenia wykorzystujące np. rozdrobnione szkło lub korund. W praktyce przemysłowej występuje również możliwość zastosowania rozdrobnionego metalu, w celu nadania powierzchni określonej chropowatości za pomocą ostrych kształtów w porównaniu do powszechnie wykorzystywanych piasków. Badania odbywające się na tym stanowisku przeprowadzane są w celu poznania procesów towarzyszącym obróbkom ściernym z określonym medium ściernym oraz parametrami pracy stanowiska, takimi jak prędkość strumienia piasku czy ilość ścierniwa. Przykład działania obróbki ścierno-strumieniowej został zaprezentowany na rysunku 2.53.



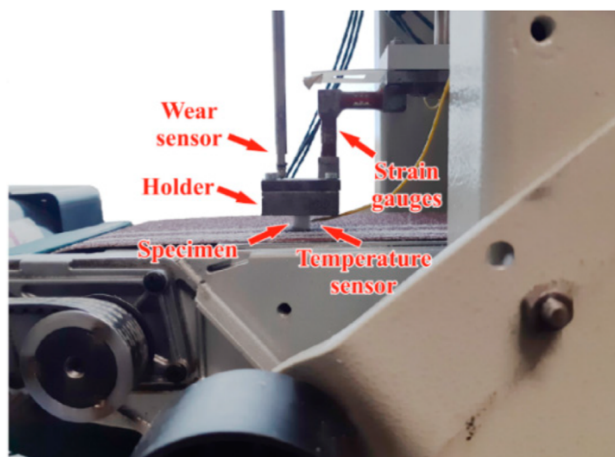
Rys. 2.53. Schemat działania procesu obróbki ścierno-strumieniowej [27]

Metoda Hawortha – urządzenie do badań zużycia wykorzystujące ścierniwo, które za pomocą gumowej rolki zostaje przetransportowane na powierzchnię badanej próbki z wykorzystaniem wypustek w swojej powierzchni. Jako materiał ścierny stosuje się najczęściej piasek kwarcowy zgodny z normą ASTM G65, natomiast docisk próbki odbywa się za pomocą dźwigni, do której zostaje przyłożona siła. Podstawową zaletą metody badawczej Hawortha są kompaktowe wymiary urządzenia oraz standaryzacja w związku z amerykańskim towarzystwem testowania oraz materiałów (ASTM), które określiło wytyczne do badań. Opis oraz schemat działania maszyny został pokazany na rysunku 2.54.



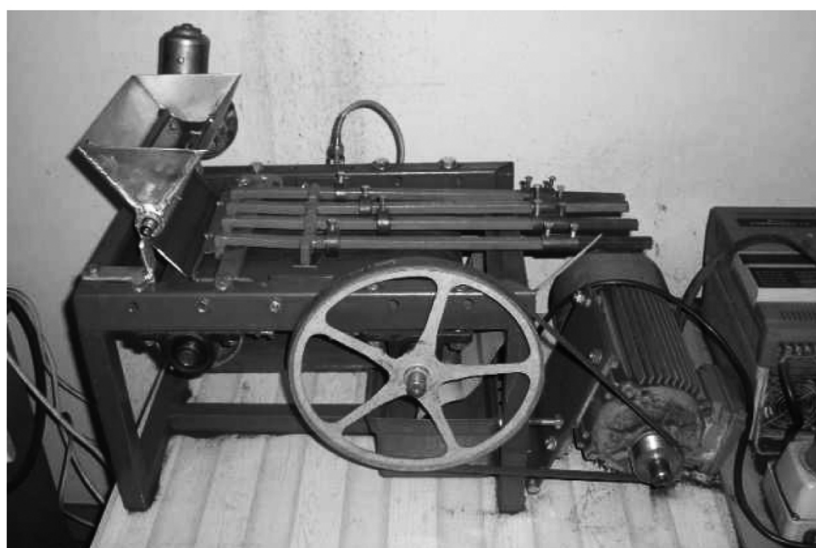
Rys. 2.54. Schemat maszyny Hawortha [49]; 1 – badana próbka, 2 – gumowa tarcza,
3 – masa ścierna

Test ciągły na ścieranie jest to test zgodny z normą ASTM, jednak materiał ścierny podczas badań nie zostaje zmagazynowany w pojemniku oraz ponownie wykorzystany. Materiał przesuwany jest przez próbkę oraz dociskany do niej z wykorzystaniem gumowej tarczy. Zdjęcie urządzenia zostało zaprezentowane na rysunku 2.55.



Rys. 2.55. Schemat maszyny do testów ciągłych na ścieranie [62]

Maszyny prototypowe – jako maszynę prototypową można wymienić stanowisko badawcze do mas bentonitowych zaprojektowane i wykonane w Politechnice Poznańskiej. Urządzenie symuluje przemieszczenie się ścierniwa po przenośniku taśmowym, w którym taśma jest wykonana z gumy. Stanowisko pracuje w skojarzeniu ciernym guma-kwarc-metal. Stanowisko to posiada statycznie umieszczone próbki oraz ruchomą taśmę, na którą podawane jest ścierniwo, przesuujące się po powierzchni badanych materiałów. Zdjęcie poglądowe stanowiska zaprezentowano na rysunku 2.56.



Rys. 2.56. Stanowisko do badania mas bentonitowych [88]

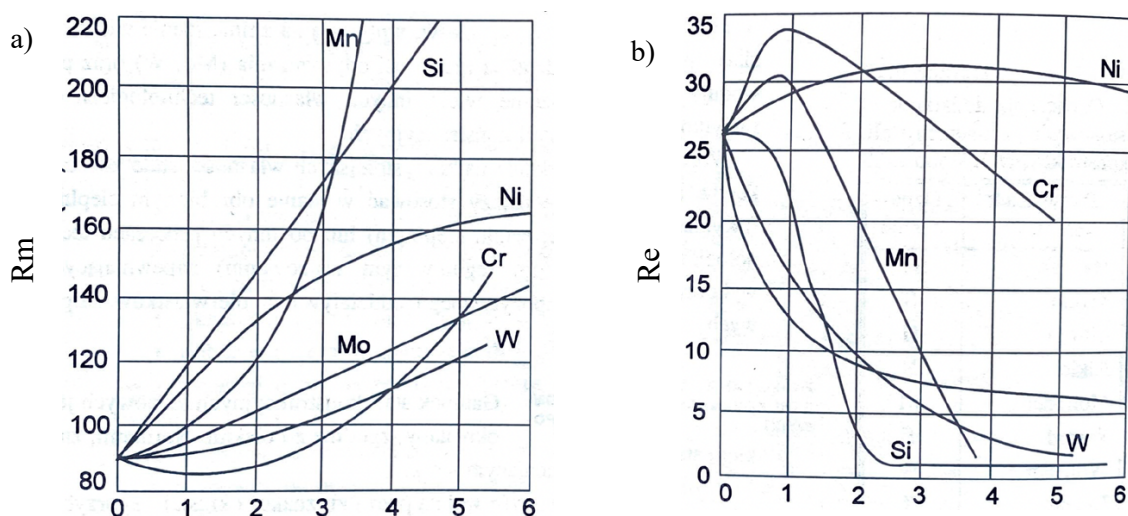
2.5. Materiały stosowane w budowie maszyn

W budowie maszyn roboczych głównym materiałem konstrukcyjnym jest stal oraz jej różne rodzaje. Kolejnym materiałem stosowanym coraz częściej w budowie obiektów technicznych są kompozyty oraz tworzywa sztuczne. Ta grupa materiałów zyskuje nowe miejsce stosowania ze względu na cenę, łatwość wykonania oraz parametry technologiczne i użytkowe [89]. Elementy zastosowane na narzędzia robocze, skojarzenia cierne oraz współpracujące ze sobą, są wykonane najczęściej ze stali stopowych [12]. Jako pierwiastki stopowe najczęściej wykorzystuje się te, które wpływają pozytywnie na zmianę własności mechanicznych takich jak np. twardość, udarność, wytrzymałość lub granica plastyczności. Za takie pierwiastki można uznać wanad, krzem, chrom, wolfram, molibdenem, glin, mangan, kobalt, nikiel, miedź oraz tytan i niob [54]. Tabela 2.3. przedstawia wpływ pierwiastków stopowych na właściwości stali wykorzystanych w budowie maszyn.

Tab. 2.3. Wpływ pierwiastków stopowych na właściwości mechaniczne stali [8]; 4 – bardzo duży wpływ, 3 – istotny wpływ, 2 – duży wpływ, 1 – zwiększenie, 0 – brak wpływu, -1 – zmniejszenie, -2 – duży wpływ, -3 – bardzo duży wpływ, x – wpływ nieznan

Własność		Pierwiastek stopowy													
		Si	Mn ¹	Mn ²	Cr	Ni ¹	Ni ²	Al.	W	V	Co	Mo	Cu	S	P
Własności mechaniczne	twardość	1	1	-3	2	1	-2	x	1	1	1	1	1	x	1
	wytrzymałość	1	1	1	2	1	1	x	1	1	1	1	1	x	1
	granica plastyczności	2	1	-1	2	1	-1	x	1	1	1	1	2	x	1
	wydłużenie	-1	0	3	-1	0	3	x	-1	0	-1	-1	0	-1	-1
	przewężenie	0	0	0	-1	0	2	-1	-1	0	-1	-1	0	-1	-1
	udarność	-1	0	x	-1	0	3	-1	0	1	-1	1	0	-1	3
	sprężystość	3	1	x	1	x	x	x	x	1	x	x	x	x	x
	żarowytrzymałość	1	0	x	1	1	3	x	3	2	2	2	1	x	x
krytyczna szybkość chłodzenia	-1	-1	-2	-3	-2	-2	x	-2	-2	2	-2	x	x	x	
węglotworczość	-1	0	x	2	x	x	x	2	4	x	3	x	x	x	
odporność na zużycie	-3	-2	x	1	-2	x	x	3	2	3	2	x	x	x	
podatność na obróbkę plastyczną	-1	1	-3	-1	-1	-3	-2	-2	1	-1	-1	-3	-3	-1	
skrawalność	-1	-1	-3	x	-1	-3	x	-2	x	0	-1	0	3	2	
podatność na tworzenie zgorzeli	-1	0	-2	-3	-1	-2	-2	-2	-1	-1	2	0	x	x	
podatność na azotowanie	-1	0	x	2	x	x	3	1	1	x	2	x	x	x	
odporność na korozję	x	x	x	3	x	2	x	x	1	x	x	1	-1	x	
Własności magnetyczne	histereza	-2		niemagnetyczny			niemagnetyczny								
	przenikalność magnetyczna	2						2							
	siła koercji	-2			1	2		2	3	3	1				
	pozostałość magnetyczna	x			2	2		2	3	3					
	stratność waowa	-2													

Parametry mechaniczne stali konstrukcyjnych zależą w dużej mierze od zawartości węgla oraz pierwiastków dodanych w celu polepszenia jakości wyrobu. Aby poprawić odporność na zużycie ścierne stosuje się takie pierwiastki jak: chrom, wanad, molibden, wolfram. Wpływają one na tworzenie się węglików oraz na zmniejszenie wielkości ziaren. Dodatkową funkcją pierwiastków stopowych w stali konstrukcyjnej, która jest wykorzystywana na elementy szczególnie narażone na zużycie ścierne jest przeciwdziałanie kruchości odpuszczania. Odpowiadają za to pierwiastki takie jak, Mo oraz W. Stale stosowane na narzędzia robocze oprócz wymienionych cech muszą posiadać odpowiednie parametry związane z wytrzymałością na rozciąganie (R_m) oraz granicą plastyczności (R_e). Wpływ szczegółowych pierwiastków na te własności został zaprezentowany na rysunku 2.57. [12].



Rys. 2.57. Wpływ pierwiastków stopowych na wartości R_m (a) oraz R_e (b) [12]

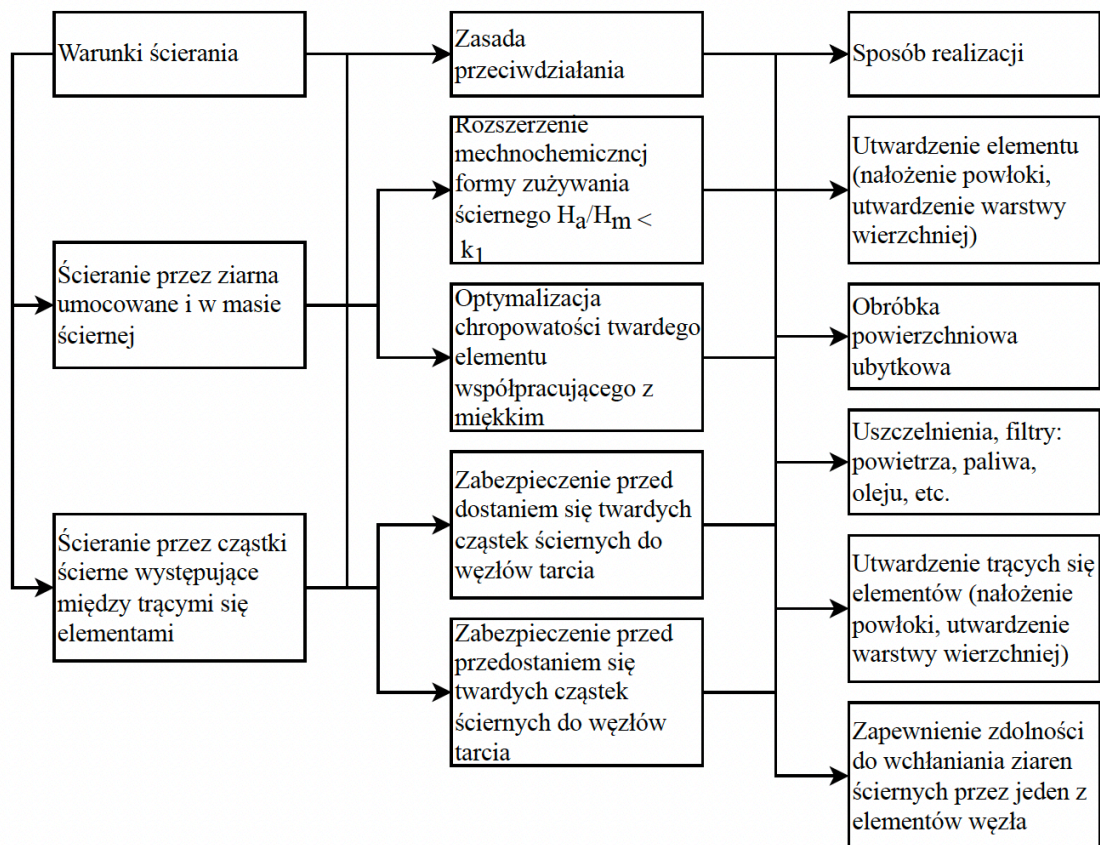
Przy doborze materiałów wykorzystywanych na elementy do pracy w masie ściernej należy kierować się w pierwszej kolejności miejscem użytkowania stali oraz składem pierwiastków, które zostały wprowadzone w celu:

- zmiany struktury materiału,
- zwiększenia oraz polepszenia parametrów fizycznych oraz chemicznych,
- zwiększenia hartowności,
- polepszenia i ułatwienia procesów obróbki cieplnej oraz chemicznej.

Stalą stopową, która stała się powszechnie stosowana w maszynach roboczych do obróbki gleby jest stal borowa. Stal borowa powinna zawierać do ok 0,0005% boru w swoim składzie chemicznym. Powyżej tej wartości występuje karb, który organiczna właściwość stali. Stal borowa została wykorzystana na szeroką skalę dopiero w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku [45].

2.6. Metody ograniczania zużycia ściernego w maszynach

Rozpatrując metody ograniczania zużycia ściernego w maszynach, należy w pierwszej kolejności określić oraz przeanalizować mechanizmy zużycia ściernego, które zostały opisane w rozdziale 2.3. W skojarzeniu ściernym należy określić, czy zużycie występuje poprzez ziarna umocowane lub w masie ścierniej lub przy udziale cząsteczek pomiędzy parami trącymi. W celu lepszego zrozumienia tego zagadnienia na rysunku 2.58., zostały przedstawione zasady przeciwdziałania oraz sposób realizacji tej operacji dla różnych rodzajów ścierania.



Rys. 2.58. Schemat przeciwdziałania zużyciu ściernemu [74]

Analizując podstawowy aspekt w obszarze powstawania zużycia ściernego, czyli twardość cząsteczek, odporność na zużycie ściernie można zwiększyć przez dodanie powłok technicznych lub zastosowanie zabiegów cieplnych, które zwiększą odporność na zużycie. Podział powłok oraz zabiegów chroniących przed zużyciem przedstawiono w tabeli 2.4. [93].

Tab. 2.4. Sposoby ochrony przed zużyciem tribologicznym [93]

Technologiczne sposoby ochrony powierzchni przed zużyciem tribologicznym	
Nakładanie warstw powierzchniowych	Wytwarzanie warstwy wierzchniej
Osadzanie elektrolityczne	Hartowanie powierzchniowe
Osadzanie chemiczne	Obróbka cieplno-chemiczna
Natryskiwanie cieplne	Przetapianie powierzchniowe
Napawanie	Implementacja jonów
CVD	Utlenianie anodowe
PVD	Mechaniczne umacnianie
Platerowanie	

Przedstawione w tabeli 2.4. podstawowe zabiegi wpływające na ograniczenie powstawania zużycia tribologicznego sprowadzają się zasadniczo do zwiększenia twardości materiału, na który oddziałuje masa ścierna.

Innym rodzajem zużycia jest zużycie z wstępującymi drobinami pomiędzy parami trącymi. Zabiegi mające na celu ochronę przed powstawaniem tego zjawiska można sklasyfikować w trzech grupach:

- zmiany konstrukcyjne,
- zmian w strukturze materiału,
- zmiana właściwości materiału.

Pierwsza grupa zabiegów z wymienionych powyżej ma na celu zapobieganie przedostawaniu się drobinek twardego materiału w miejsce skojarzenia. Taka sytuacja może występować w maszynach roboczych, gdzie zastosowane jest połączenie ślizgowe, które nie jest zabezpieczone osłoną. Zmiany konstrukcyjne skupiają się na zastosowaniu osłony uniemożliwiającej dostawanie się twardych cząsteczek w miejsce styku elementów.

Kolejna grupa obejmuje wszystkie zabiegi związane ze zmianą parametrów powierzchni trących, które pozwolą na rozkruszenie elementów podczas pracy na mniejsze cząsteczki. Cząsteczki o mniejszej powierzchni mogą ulec usunięciu podczas pracy, a zmiana twardości może wpłynąć pozytywnie na zwiększenie odporności na zużycie ściernie [107].

Ostatnia grupa przeciwdziałająca zużywaniu ściernemu w skojarzeniu ciernym ma na celu wytworzenie warstwy ochronnej na jednym z współpracujących elementów. Warstwa ochronna która ma możliwość „wchłaniania” cząsteczek trących oraz posiada zwiększoną odporność zmęczeniową, w celu zabezpieczenia jej przed cyklicznym oddziaływaniem odkształceń

plastycznych w miejscu styku. Sytuacja jest zasadna jedynie w przypadku przedostawania się małej ilości materiału trącego, mogącego uszkodzić powstałe elementy.

W przypadku, gdy element posiada odpowiednią osłonę oraz istnieje brak możliwości przedostania się ziaren nieumocowanych, należy również zadbać o możliwie jak najniższe wartości chropowatości powierzchni [42, 102]. W tym celu ważne jest ukształtowanie jak najniższej chropowatości równowagowej. Chropowatość równowagowa powstaje w wyniku docierania

w początkowych etapach pracy skojarzenia.

Kolejnymi metodami ograniczania zużycia ściernego są metody technologiczne, do których można zaliczyć:

- a) obróbka cieplna,
- b) obróbka cieplno-chemiczna,
- c) obróbka plastyczna,
- d) powłoki i pokrycia,
- e) specjalne zabiegi technologiczne.

Obróbka cieplna jest to dziedzina technologii, która ma na celu polepszenie własności mechanicznych oraz fizycznych lub fizyko-chemicznych stali lub metali [13]. Obróbką cieplną, która wpływa na przeciwdziałanie zużyciu ściernemu jest obróbka powierzchniowa. Podstawową obróbką cieplną jest hartowanie, które ma na celu podniesienie twardości elementu poprzez szybkiego nagrzania do określonej temperatury a następnie szybkim schłodzeniu w różnym medium chłodzącym. Po zastosowaniu procesu hartowania można uzyskać twardość w przedziale 55-70 HRC [31]. Podstawowymi rodzajami hartowania powierzchniowego są:

- a) indukcyjne,
- b) płomieniowe,
- c) kąpielowe,
- d) kontaktowe,
- e) elektrolityczne.

Wybór hartowania powierzchniowego ma na celu utwardzenie warstwy wierzchniej przy jednoczesnym zachowaniu ciągliwego środka w celu utrzymania udarności pozwalającej na przeciwdziałanie pękaniu elementu.

Obróbka cieplno-chemiczna jest to zabieg mający celu zmianę składu chemicznego i struktur warstwy wierzchniej wskutek działania środowiska chemicznego, oraz parametrów cieplnych. Efektem obróbki jest zmiana parametrów użytkowych oraz eksploatacyjnych.

Do najważniejszych obróbek cieplno – chemicznych zalicza się:

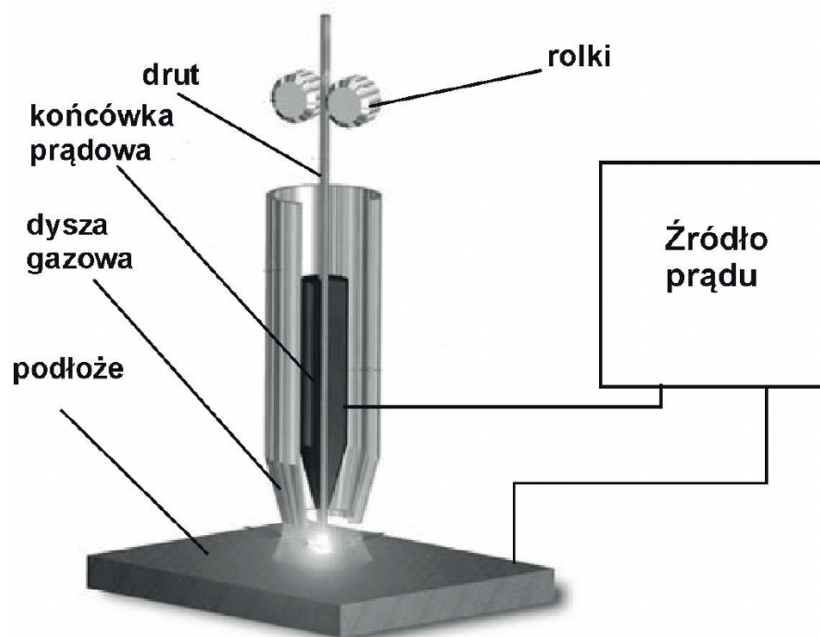
- a) nawęglanie,
- b) azotowanie utwardzające,
- c) węglazotowanie,
- d) cyjanosiarczenie kąpielowe,
- e) chromowanie dyfuzyjne.

Kolejnym rodzajem wzmocnienia odporności na zużycie ścierne jest obróbka plastyczna, która ma na celu wytworzenie w warstwie wierzchniej ściskających naprężeń własnych, przez co następuje zwiększenie odporności na zużycie ścierne. Jako zabiegi, które wpływają na zwiększenie odporności na proces degradacji warstwy wierzchniej wskutek oddziaływania cząstek ścierniwa można uznać np. młotkowanie, dogniatanie lub śrutowanie. Dzięki zastosowaniu obróbki plastycznej, warstwa wierzchnia zyskuje twardość w swoich górnych granicach, przez co pierwsza faza zużycia ściernego następuje wolniej [69].

Powłoki – są to warstwy powierzchniowe na metalach lub stopach oraz polimerach, które są szczególnie narażone na różne zewnętrzne czynniki destrukcyjne, a ich głównym zadaniem jest ochrona materiału rodzimego [97, 104]. Powłoki mogą być nanoszone za pomocą zabiegów chemicznych, cieplnych oraz z połączenia tych dwóch zabiegów, czyli podczas procesów cieplno-chemicznych [44]. Wytworzenie powłok można podzielić na 4 podstawowe grupy ze względu na ośrodek z jakiego powstają:

- ośrodek stały,
- ośrodek stało-ciekły,
- ośrodek ciekły,
- ośrodek gazowy lub para.

Podstawowym rodzajem powłok mającym na celu ochronę przed zużyciem ściernym jest napawanie. Jest to proces, który polega na podaniu drutu proszkowego lub elektrody otulonej oraz nadtopieniu podłoża wraz z drutem spawalniczym [41]. Poprzez wytworzenie odpowiedniej temperatury na powierzchni materiału następuje powstanie jeziora ciekłego metalu. Następnym etapem jest dodanie drutu (topika) w celu wytworzenia powłoki, która jest zespolona z materiałem bazowym. W jeziorce następuje zmieszanie metalu podłoża wraz z stopiwem [111]. Schemat powstawania napoiny zaprezentowano na rysunku 2.59.



Rys. 2.59. Schemat nanoszenia napoiny [21]

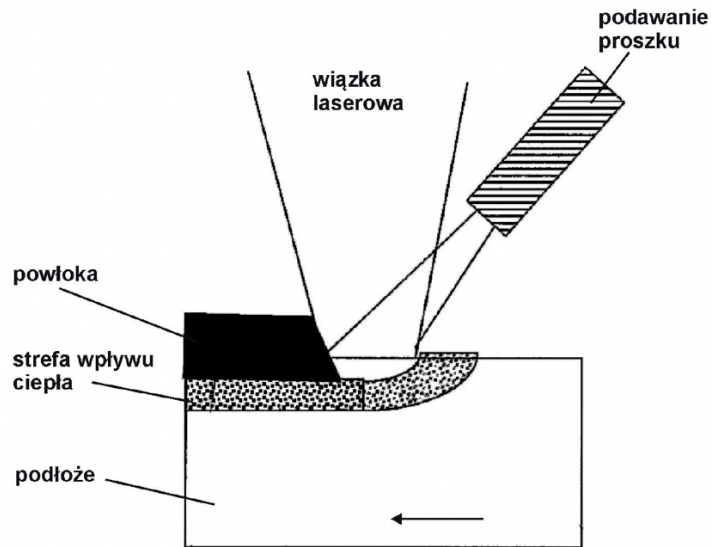
O właściwościach napawanych powierzchni decyduje:

- twardość, ścieralność, odporność korozyjna,
- poziom połączenia stopiwa z metalem rodzimym,
- zmiany powstałe w materiale, na który została naniesiona warstwa napawana.

Podczas procesu napawania istotne jest, aby pierwiastki stopowe, które zawarte są w elektrodzie, na tyle zmieniły własności materiału rodzimego, aby twardość materiału napawanego znacznie wzrosła. Zabieg napawania elektrodą można wykonywać zarówno w sposób automatyczny jak i ręczny. Udział powierzchni napawanej w podłożu to 60% [21].

Laserowa obróbka cieplna jest to zabieg polegający na modyfikacji warstwy wierzchniej wskutek przetopienia proszku, pasty lub drutu. Napawanie laserowe (laserowanie) posiada inną temperaturę przetopu oraz wytwarza strefy wpływu ciepła o kontrolowanej głębokości w porównaniu do napawania konwencjonalnego. Napawanie laserowe może odbywać się za pomocą laserów diodowych lub tarczowych, które są odmianą laserów diodowych [3]. Istotą tego rozwiązania jest precyzyjne ustalenie ilości nadtapianego materiału oraz mocy potrzebnej do wytworzenia przetopienia. Wiązka światła służąca do przetopienia drutu lasera prowadzona jest za pomocą światłowodu lub lusterek w kierunku wyjścia oraz przetopienia. Laserowanie, ze względu na swoje uwarunkowania techniczne tworzy powłokę wolną od porów oraz pęknięć, przez co powstała struktura posiada wyższe wartości twardości, które są wynikiem powstania małych ziaren [21]. Napawanie laserowe podobnie jak w przypadku napawania

konwencjonalnego może być jedno lub dwuetapowe [50]. Schemat napawania laserowego został pokazany na rysunku 2.60.



Rys. 2.60. Schemat laserowania [21]

2.7. Podsumowanie analizy stanu wiedzy

Zużycie elementów w masie ścierniej oraz sposoby ograniczania tego procesu są jednym z podstawowych zagadnień tribologicznych. Podstawą przeciwdziałania zjawiskom zużywania maszyn jest zrozumienie procesów występujących w skojarzeniu ciernym. Wielu badaczy w ostatnim czasie zajmuje się procesami związanymi z poprawą jakości materiałów stosowanych w rolnictwie oraz w maszynach do obrabiania gruntu. Badania laboratoryjne, ze względu na ograniczenia nie zawsze są w stanie odpowiedzieć na realne zapotrzebowanie rynku poprzez stosowanie materiałów i obróbkę, których jakość oraz odporność na zużycie ściernie nie jest adekwatna do ceny.

Analizując dostępne metody badawcze oraz stanowiska, można stwierdzić, że stanowiska badawcze są przeznaczone do prowadzenia badań na obiektach testowych, które często nie odnoszą wyników do realnych potrzeb przemysłu takich jak łatwość wytworzenia, niska cena oraz odpowiednia wytrzymałość na zużycie ściernie.

Analizując dane zebrane podczas badań literaturowych można stwierdzić, że zużycie występujące w narzędziach maszyn roboczych jest nadal istotnym problemem badawczym. Podczas analizy literaturowej nie odnaleziono bezpośrednich badań pozwalających na sprawdzenie odporności na zużycie ściernie napoiny laserowanej i wykonanej w konwencjonalny sposób, nakładanych na stale trudności realne.

Mechanizmy zużycia, które występują podczas zużycia ściernego zależą od wielu czynników zewnętrznych. Obecnie prowadzone badania skupiają się w większości na badaniu mechanizmów w przypadku określonego medium ściernego o niezmiennych parametrach podczas badania. Nie znaleziono w literaturze badań określających przydatność powłok w różnych warunkach masy ścierniej, zwłaszcza zmian jej wilgotności i pH.

Stale wykorzystywane na elementy szczególnie narażone na zużycie ściernie w praktyce przemysłowej są najczęściej oferowane w stanie surowym. Niewielu badaczy zajmuje się również badaniami stali trudnościeralnych, których warstwy wierzchnie są dodatkowo modyfikowane w celu uzyskania pożądanych właściwości.

3. SFORMUŁOWANIE PROBLEMATYKI BADAWCZEJ

3.1. Problem badawczy

Analizując literaturę z obszaru badań stwierdzono brak dostatecznego wyjaśnienia zjawisk zużywania elementów w masie ścierniej utożsamianej z glebą. Wpływ masy ścierniej na proces zużywania ze względu na złożoność biologicznych składników jest trudny do jednoznacznego zdefiniowania. Składowe masy ścierniej w zależności od ich liczby, rodzaju oraz czynników zewnętrznych takich jak wilgotność lub związki chemiczne dodane w celu poprawy jakości upraw wpływają na znaczny wzrost zużycia ściernego elementów pracujących w takim środowisku. Ze względu na trudność określenia wpływu wszystkich czynników zewnętrznych szereg badaczy [81, 91] wykonało badania mające określić wpływ pojedynczych czynników na wzrost lub zmniejszenie zużycia ściernego elementów. Odpowiednie zdefiniowanie parametrów istotnych dla procesu zużywania ściernego jest kluczowe w celu doboru powłok wpływających na wzrost odporności na zużycie ściernie.

Powłoki nakładane cieplnie ze względu na zaawansowaną technologię wymagają dokładnego przygotowania powierzchni, na którą zostają nałożone w celu zapewnienia poprawności procesu. Kształtowanie odporności na zużycie ściernie, poprzez nakładanie powłok, ma na celu otrzymanie polepszonych paramentów wytrzymałościowych w stosunku do powszechnie stosowanych stali, nie powodując skomplikowania procesów wytwarzania. Podczas kształtowania odporności na zużycie ściernie należy również wziąć pod uwagę intensywność procesu w zmiennych warunkach glebowych. Jako zmienne warunki glebowe można rozumieć wilgotność, która może w różnych miejscach wykonywanej pracy znacząco różnić się od siebie. Również poziom zakwaszenia gleby w zależności od miejsca może się zmieniać. Projektując elementy przeznaczone do tego rodzaju pracy, należy w taki sposób ukształtować powierzchnię, aby posiadała możliwie najbardziej uniwersalną powłokę. Powinna ona cechować się możliwie najmniejszym ubytkiem masy elementu przy różnych parametrach ścierniwa - gleby. Do prac polowych w masie glebowej wykorzystuje się głównie stal. Obecnie najczęściej wykorzystywane są stale trudnościeralne, które cechują się podwyższoną twardością. Stale trudnościeralne w zależności od rodzaju, posiadają różny skład chemiczny. Obecnie niewielu badaczy przeanalizowało możliwości kształtowania odporności na zużycie ściernie stali trudnościeralnych z dodatkowymi powłokami. Problem występujący wciąż w przypadku maszyn do robót w masie ścierniej jest nadmierne zużywanie się elementów podczas wzmożonej pracy, która staje się coraz intensywniejsza ze względu na szybkość

wykonywanych zadań, jak i czynników zewnętrznych takich jak nadmierne opady, suchość lub różne parametry chemiczne, zmieniające wskaźnik pH, stosowane dla lepszego wzrostu roślin.

Biorąc powyższe pod uwagę postawiono problem badawczy, który sprowadza się do następującego stwierdzenia:

Określenie wpływu modyfikacji warstwy wierzchniej stali trudnościeralnej poprzez powłoki nakładane cieplnie na zużycie ścierne w różnych warunkach gleby.

3.2. Cele i zadania badawcze

Na podstawie przeprowadzonej analizy stanu wiedzy w zakresie materiałów konstrukcyjnych stosowanych w maszynach rolniczych oraz roboczych i kształtowania ich właściwości, szczególnie za pomocą powłok nakładanych cieplnie nasuwają się następujące przesłanki:

- Istnieje szereg rodzajów stali konstrukcyjnych, wykorzystywanych w budowie maszyn roboczych oraz rolniczych, a najczęściej stosowane materiały, szczególnie te, które wykorzystywane są na elementy pracujące w glebie to:
 - stal trudnościeralna,
 - stal borowa,
 - stale hartowane.
- Stosowane powłoki, nakładane cieplnie, na elementy maszyn i urządzeń mogą poprawiać ich właściwości (np. zwiększając odporność na zużycie ścierne), co w zależności od stawianych wymagań i warunków ich pracy wpływa na polepszenie trwałość tych obiektów technicznych.
- W przypadku maszyn roboczych i rolniczych, na elementy wykonawcze pracujące w gruncie, często stosuje się powłoki nakładane cieplnie takimi metodami jak napawanie konwencjonalne lub laserowa obróbka warstwy wierzchniej.
- Nie do końca zostały poznane relacje określające związek między parametrami masy ściernej a elementem roboczym pracującym w gruncie, w zależności od rodzaju nałożonej powłoki oraz parametrów fizyko-chemicznych glebowej masy ściernej.
- Pożądane jest opracowanie koncepcji, zaprojektowanie i wykonanie specjalnego stanowiska, pozwalającego na kontrolowanie parametrów masy ściernej, takie jak np.: wilgotność, pH, uziarnienie, które mają istotny wpływ na całkowite zużycie elementów pracujących w gruncie.

- Nieliczne badania dostępne w literaturze wskazują, iż powłoki nakładane cieplnie mogą zwiększać trwałość elementów pracujących w gruncie poprzez mniejsze zużycie, co inspiruje do zbadania zużycia tych elementów na specjalnie skonstruowanym stanowisku badawczym.

Przeprowadzona analiza literatury w zakresie rozpatrywanej problematyki, a także własne badania rozpoznawcze umożliwiają przyjęcie następującego problemu naukowego:

Obróbka powierzchni, poprzez nałożenie metodami cieplnymi powłok pozwala na ograniczenie zużycia ściernego, które zależy od parametrów masy ściernej i właściwości warstwy wierzchniej.

Na podstawie analizy aktualnego stanu wiedzy z zakresu tematyki rozprawy należy stwierdzić, iż istnieje problem badawczy, związany z wyznaczeniem ubytku masy ściernej – określeniem zużycia materiału – dla elementów poddanych obróbce powierzchni przez nakładanie powłok metodami cieplnymi, które pracują w glebie. Określono również problem metodologiczny, związany z opracowaniem metody oceny zużycia elementów maszyn pracujących w gruncie podczas badań laboratoryjnych.

Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzenia, jak również przesłanki, wynikające z wyników badań przedstawionych w rozdziale poświęconym analizie aktualnego stanu wiedzy, sformułowano cel ogólny oraz cele cząstkowe pracy. Cel ogólny rozprawy doktorskiej:

Celem pracy jest wyznaczenie wpływu parametrów glebowej masy ściernej oraz właściwości powłok technicznych na mechanizm procesu zużywania, jego intensywność oraz transformację kształtowo-wymiarową badanych elementów.

W ramach pracy zbudowane zostało stanowisko umożliwiające kontrolowanie wybranych parametrów masy ściernej. Zaprojektowana konstrukcja pozwoliła na realizację badań w kontrolowanych warunkach, umożliwiając m.in. zbadanie wpływu wilgotności, uziarnienia, pH na zużycie ściernie.

Cele cząstkowe pracy doktorskiej:

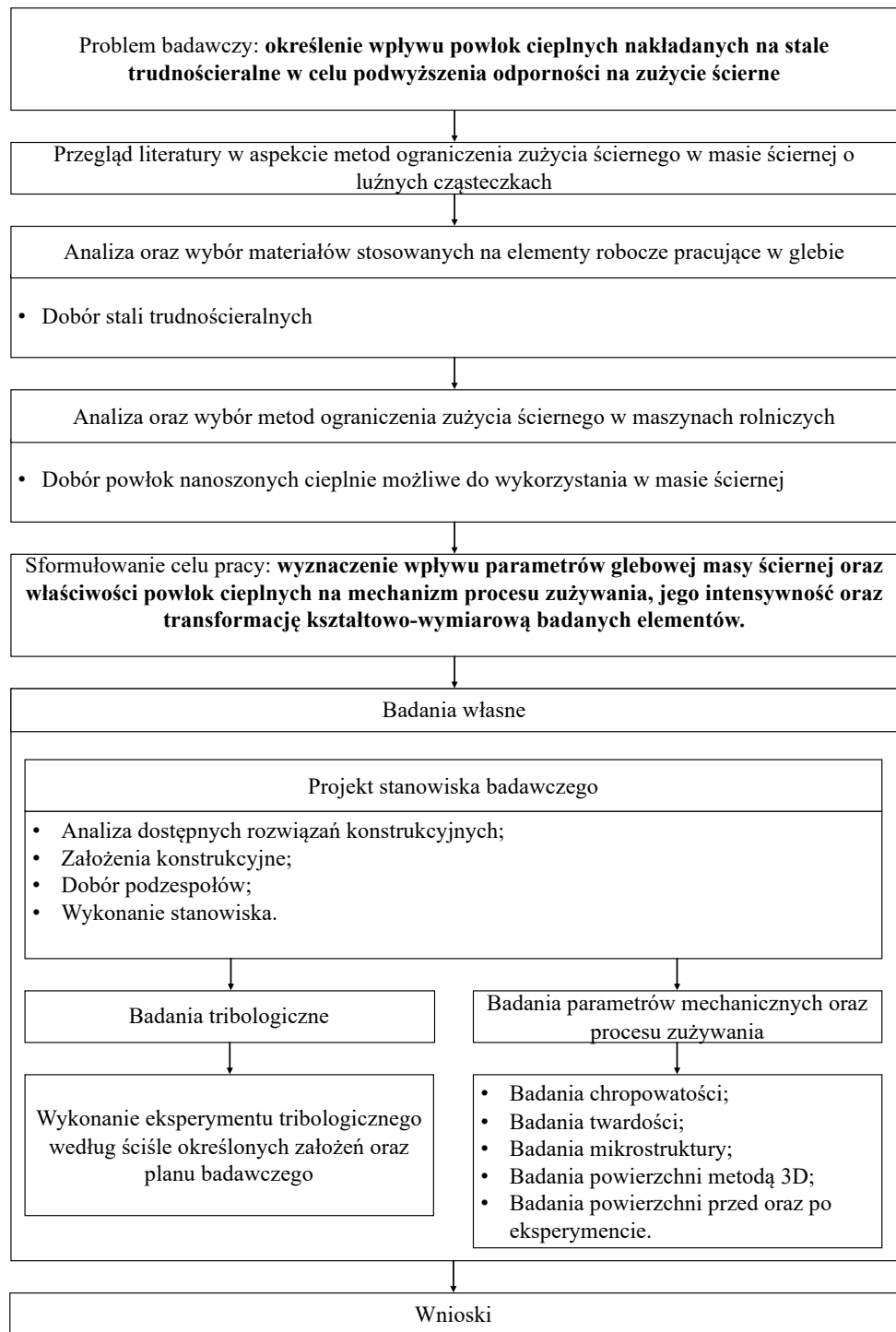
- Opracowanie koncepcji, zaprojektowanie i wykonanie stanowiska badawczego umożliwiającego określenie wpływu warunków pracy na zużycie całkowite dla części pokrytych powłokami cieplnymi.
- Poznanie zużycia oraz wpływu czynników środowiska pracy na zużycie całkowite w warunkach laboratoryjnych, elementów maszyn pracujących w glebie, poddanych obróbce powierzchni przez nałożenie powłok metodami cieplnymi.

- Określenie, optymalnego w aspekcie ograniczenia zużycia, kształtu powłoki naniesionej metodami cieplnymi na element pracujący w glebie.

Osiągnięcie celu głównego oraz celów cząstkowych wymagało wykonania szeregu zadań, do których zalicza się przede wszystkim:

- Analizę literatury naukowo-technicznej w zakresie materiałów konstrukcyjnych oraz metod polepszania ich właściwości, ze szczególnym uwzględnieniem zastosowania w maszynach rolniczych.
- Dobór materiałów konstrukcyjnych oraz metod ich obróbki, w aspekcie ograniczenia zużycia ściernego oraz możliwości zastosowania w maszynach roboczych.
- Wykonanie badań metalograficznych, twardości oraz profilu chropowatości powierzchni próbek.
- Określenie i dobór kształtu powłoki nakładanej metodami cieplnymi na wybrane elementy maszyn pracujące w glebie.
- Zaprojektowanie i wykonanie prototypowego stanowiska, w którym kontrolowane są poszczególne parametry masy ściernej wpływające na całkowite zużycie oraz określenie wpływu poszczególnych, wybranych czynników na ilościowe zużycie ściernie badanych elementów.
- Analizę ubytku masy oraz grubości materiału po badaniach próbek w różnych warunkach glebowej masy ścierniej.

Wyznaczone zadania badawcze, które posłużyły do zrealizowania celu niniejszej rozprawy i weryfikacji przyjętych założeń pracy były realizowane chronologicznie i mogą w przyszłości pomóc w prognozowaniu zużycia elementów maszyn rolniczych. Następne zadania zostały w sposób szczegółowy opisane w kolejnych rozdziałach pracy. Zawierają one opis przyjętej metodologii badawczej, zastosowane techniki pomiarowe oraz otrzymane wyniki i wynikające z nich wnioski. Praca została wykonana według następującego schematu zawartego na rysunku 3.1.

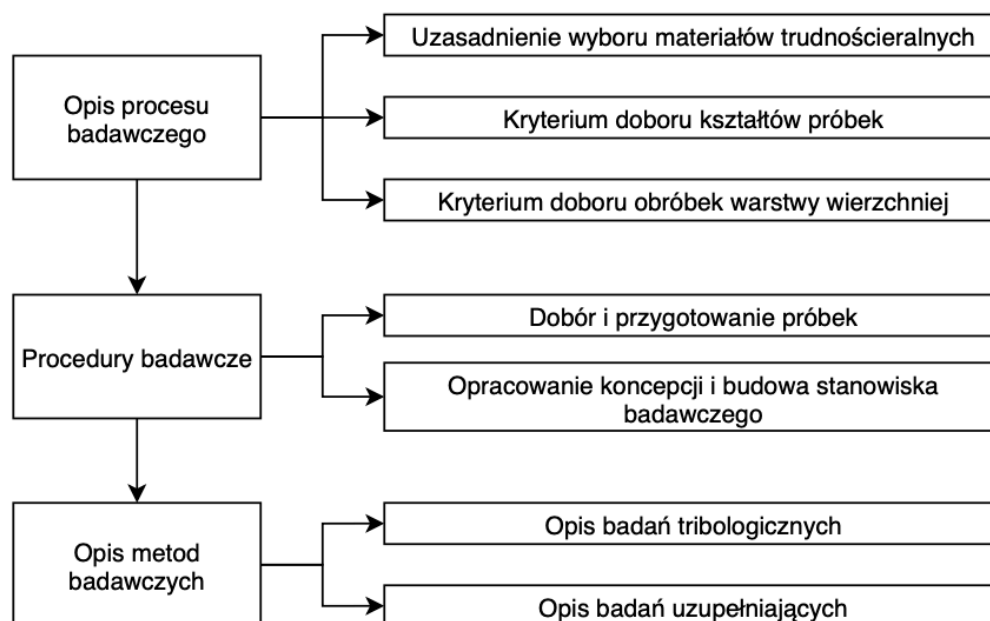


Rys. 3.1. Schemat realizacji rozprawy doktorskiej

4. METODYKA BADAŃ

4.1. Plan metodyki badawczej

Analizując problematykę naukową podjętą w niniejszej rozprawie należało zdefiniować kroki postępowania podczas opisu metodyki badawczej. Dokładne jej określenie pozwoliło usystematyzować zaplanowane działania w celu spełnienia przyjętych założeń. Schemat metodyki badawczej przedstawiono na rysunku 4.1.



Rys. 4.1. Schemat metodyki badawczej

W ramach ustalonej metodyki zdefiniowano podstawowe etapy potrzebne do przeprowadzenia badań. Pierwszy etap to opis procesu badawczego, w skład którego wchodzi trzy kroki. Pierwszym z nich było uzasadnienie wyboru materiałów trudnościeralnych przeznaczonych do badań na podstawie analizy literaturowej oraz posiadanych przez te materiały parametrów technicznych.

Kolejnym krokiem było zdefiniowanie kryteriów, na podstawie których dobrano kształt próbek przeznaczonych do badań. W tym przypadku była to zarówno literatura naukowa, jak i wiedza fachowa pozyskana od producentów, dostawców i użytkowników maszyn rolniczych. Ostatnim krokiem procesu badawczego było zdefiniowanie rodzajów obróbek warstwy wierzchniej, znacząco zwiększających odporność na zużycie ściernie. Doboru dokonano na podstawie przeprowadzonego przeglądu literaturowego oraz wiedzy specjalistycznej z zakresu napawania.

Następnym etapem było opisanie procedury badawczej, która składała się z dwóch kroków, doboru i przygotowania próbek w celu naniesienia na nie warstw wierzchnich oraz opracowanie koncepcji i budowę stanowiska badawczego na potrzeby przeprowadzenia eksperymentu tribologicznego.

Ostatni fragment metodyki badawczej szczegółowo prezentuje sposób przeprowadzenia zasadniczych badań tribologicznych, składających się ze testów zużycia ściernego oraz fizykochemicznych badań uzupełniających, których założeniem było szczegółowe poznanie wpływu wybranych parametrów zmodyfikowanej warstwy wierzchniej oraz medium ściernego na procesy zachodzące na powierzchniach ich styku.

4.2. Opis procesu badawczego

4.2.1. Uzasadnienie wyboru materiałów

Do realizacji eksperymentu badawczego wybrano 5 rodzajów stali. Wyboru dokonano na podstawie dostępnych wytycznych stosowanych dla materiałów do produkcji elementów szczególnie narażonych na zużycie ściernie podczas pracy w glebie. Ponadto, materiał do badań wybrano, na podstawie przeprowadzonej analizy trendów rozwoju narzędzi używanych do robót ziemnych, oferowanych przez największych ich producentów. W celu poprawy jakości oferowanych maszyn, zwłaszcza zwiększania ich niezawodności i trwałości, decydują się oni na wybór stali trudnościeralnych. Dlatego stal wybrana do badań cechuje się parametrami technicznymi wskazującymi na wysoką odporność na zużycie ściernie oraz udernością zapewniającą wytrzymałość na uderzenia dużych cząstek znajdujących się w glebie. Przeznaczona jest do pracy w warunkach polowych i używana do produkcji elementów rolniczych, zwłaszcza mocno narażonych na zużywanie ściernie takich jak; lemieszce, zęby bron, kultywatorów czy glebogryzarek. Do testów wytypowano cztery gatunki stali trudnościeralnych oraz jeden gatunek stali borowej o podwyższonej odporności na ścieranie, są to:

- Raex 400,
- Raex 500,
- Hardox 400,
- Hardox 500,
- 28MnB5.

Wytypowanie do badań gatunków stali trudnościeralnych, miało na celu ocenę możliwości kształtowania odporności na zużycie ściernie, w przypadku elementów wykonanych z materiałów o podwyższonej odporności na ubytek masy. Wszystkie rozpatrywane gatunki

stali wytworzone zostały w podobnych warunkach, ale charakteryzują się różną twardością oraz składem chemicznym. Miało to na celu wyeliminowanie ewentualnych różnic wynikających z procesu produkcyjnego, mogących wpływać na parametry fizyczne końcowego wyrobu. Są to przede wszystkim temperatura, czas i sposób hartowania, które istotnie mogą wpłynąć na końcowe parametry stali.

Skład chemiczny analizowanych stali przedstawiono w tabeli 4.1. Był on umieszczony zarówno na stronie producenta jak w otrzymanych certyfikatach dostarczanych przy zakupie materiałów.

Tab. 4.1. Skład chemiczny badanych stali

Nazwa stali	Zawartość pierwiastków [%]											
	C	Si	Mn	P	S	B	Cr	Mo	Ni	N	Al	Cu
28MnB5	0,29	0,3	1,2	0,14	0,03	0,28	0,03	0,01	0,02	0,58	0,27	0,04
Hardox 500	0,24	0,26	0,7	0,01	0,002	0,001	0,61	0,034	0,1	-	-	-
Hardox 400	0,13	0,29	0,96	0,009	0,001	0,001	0,2	0,038	0,07	-	-	-
Raex 500	0,26	0,59	0,53	0,01	0,001	0,0014	1,09	0,188	0,91	0,003	0,043	0,016
Raex 400	0,16	0,5	1,6	0,025	0,01	0,005	1,2	1	0,25	-	-	-

4.2.2. Kryteria doboru kształtów próbek

Kształt próbek został dobrany na podstawie istniejących narzędzi roboczych, spotykanych w urządzeniach rolniczych jakimi są brony aktywne oraz palce lemiesza elewatora rolniczego. Podobne formy kształtowe używane są w wirnikowych bronach aktywnych. Na rysunku 4.2 przedstawiono ząb wirnikowej brony aktywnej, natomiast na rysunku 4.3. palec lemiesza elewatora rolniczego.

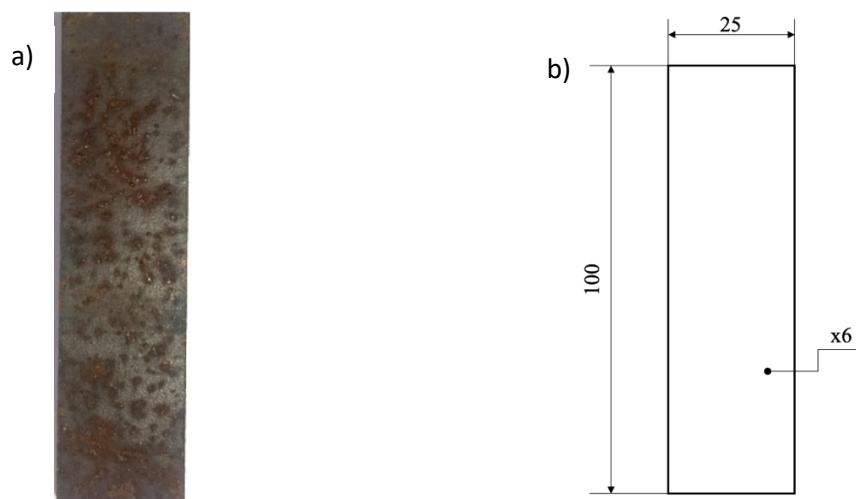


Rys. 4.2. Ząb brony aktywnej [26]



Rys. 4.3. Palec elewatora do kopania ziemniaków [23]

Na podstawie powyższych rysunków i zebranych wcześniej informacji zdecydowano, iż w badaniach wykorzystane zostaną prostopadłościennne próbki o wymiarach 100 x 25 x 6 mm. Kształt i widok próbki przedstawiono na rysunku 4.4.



Rys. 4.4. Wizualizacja próbki wykorzystanej w badaniach; a) zdjęcie próbki, b) wymiary próbki

4.2.3. Kryterium doboru obróbek warstwy wierzchniej

Pierwszym procesem wybranym do modyfikacji warstwy wierzchniej było napawanie powierzchniowe elektrodą. Można wyróżnić dwa podstawowe sposoby wykonywania napoiny konwencjonalnej. Pierwszy to nanoszenie napoiny ręcznie, jest to sposób tańszy w wykonaniu, ale też obarczony błędami wynikający z mniejszej precyzji prowadzenia elektrody. Stąd też kształty napoin mogą się różnić między sobą. Drugi sposób to prace z wykorzystaniem robota, które są zautomatyzowane i cechują się wysoką powtarzalnością wykonania napoiny.

Proces napawania konwencjonalnego jest możliwy również do wykonania w warunkach domowych przez wykwalifikowanych spawaczy, posiadających doświadczenie i dużą precyzję w prowadzeniu elektrody. Niemniej kształt jej będzie znacząco różnił się od wykonanego na stanowisku zrobotyzowanym. Napawanie konwencjonalne jest powszechnie stosowane w przypadku elementów wykorzystywanych w maszynach do prac polowych.

W niniejszych badaniach, napoiny wykonano przy użyciu robota, co miało na celu zachowanie stałości procesu napawania, zapewniając jednakową warstwę wierzchnią o powtarzalnych parametrach i kształtach na każdej z próbek.

Drugim procesem wybranym do zmiany parametrów warstwy wierzchniej było napawanie laserowe. Proces ten odbywa się na zrobotyzowanym stanowisku w warunkach

przemysłowych. Napawanie laserowe zostało wybrane do badań ze względu na trendy w produkcji elementów maszyn roboczych. Analizując dane producentów, zauważono wzrost podzespołów pracujących w glebie, które posiadają napoinę laserową. Powłoka ta wpływa pozytywnie na zwiększenie odporności elementów na zużycie ściernie. Wybór tego procesu uzasadniony był trendami rozwojowymi wśród wiodących producentów elementów rolniczych.

4.3. Opis procedur badawczych

4.3.1. Przygotowanie próbek

Ze względu na konieczność wysokiego reżimu technologicznego przy wykonywaniu próbek, materiał badawczy został dostarczony w formie arkuszy o wymiarach 1,5 x 2 m. Stal w formie wyjściowej jest stalą walcowaną na zimno. Arkusze stali zostały pozyskane od dostawcy zajmującego się sprzedażą wyrobów hutniczych. Arkusze zostały sprowadzone bezpośrednio z huty stali. Firma zajmująca się sprzedażą dostarczyła również certyfikaty producenta dotyczące parametrów technicznych i chemicznych stali. Wykonanie próbek wymagało zastosowanie technologii niewpływającej na jej właściwości. Istotnym atutem wykorzystania tych stali w badaniach była jej twardość w stanie wyjściowym.

Proces przygotowywania próbek do eksperymentu badawczego obejmował ograniczenie wpływu ciepła podczas ich wycinania. Analizując metody minimalizujące wpływ temperatury procesu na strukturę stali, została podjęta decyzja o cięciu arkuszy wysokoenergetycznym strumieniem wody, w celu uniknięcia powstania temperatury przekraczającej 250°C. Po wycięciu próbek powstała powierzchnia boczna charakterystyczna dla elementów ciętych strumieniem wody (rys. 4.5).



Rys. 4.5. Zdjęcie powierzchni bocznej próbki po procesie cięcia

Ze względu na proces technologiczny, powierzchnia boczna została spolerowana w celu lepszego przylegania napoiny. Próbki posiadały odchylenia wymiarów na poziomie $\pm 0,01$ mm.

Powierzchnia została oczyszczona za pomocą tarczy do usuwania korozji. Dokładne przygotowanie powierzchni miało zapewnić powtarzalność parametrów przetopienia nanoszonych materiałów.

Po przygotowaniu próbek należało nanieść powłoki. Pierwszym procesem nanoszenia powłoki było napawanie konwencjonalne za pomocą zrobotyzowanego stanowiska. Napawanie

konwencjonalne wykonano na urządzeniu FANUC R-2000iC/125L, wraz z pozycjonerem jednoosiowym z poziomą osią obrotu oraz sprzężonym układem sterowania robota. Zdjęcia robota wraz z obrotnicą, na której wytwarzano powłokę cieplną pokazano na rysunku 4.6. Widoczny jest na nim robot umieszczony na suwnicy, który wykonuje proces napawania, na próbkach, które zostały umieszczone na obrotnicy. Uzyskana dokładność pozycjonowania to ± 15 sekund kątowych, natomiast powtarzalność wymiarowa procesu to $\pm 0,05$ mm. Wysoka dokładność procesu nakładania napoiny konwencjonalnej pozwoliła na zachowanie zbliżonych parametrów kształtu dla każdej z wykonanych próbek oraz na zachowanie zbliżonych własności mechanicznych.

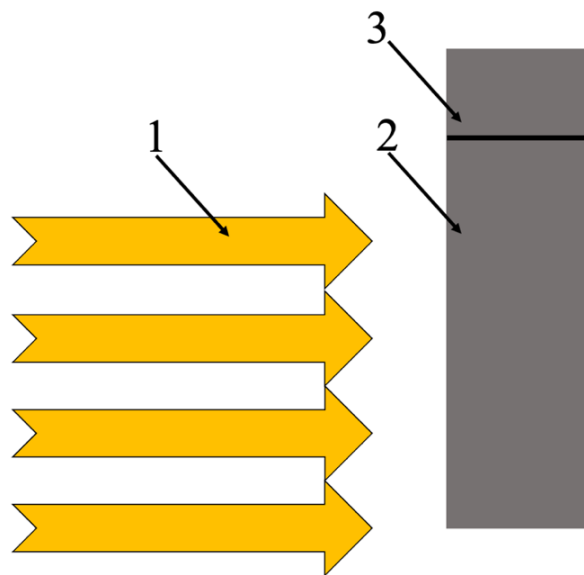


Rys. 4.6. Robot wykorzystany do napawania próbek

Próbki zostały umieszczone w dedykowanym uchwycie, który zapewniał stabilność mocowania podczas podawania drutu. Istotną podczas procesu napawania była prędkość procesu nakładania napoiny. Miała ona szczególne znaczenie w przypadku przetopienia materiału nakładanego wraz z materiałem rodzimym. Prędkość procesu wyznaczono na poziomie 4,5-5,5 m/s na podstawie obserwacji oraz wcześniej przeprowadzonych prób kontrolnych. Grubość napoiny wynosiła ok. 2,5 mm dla każdej z próbek. Kolejnym istotnym czynnikiem podczas powstawania napoiny było podawanie drutu, którego prędkość wyznaczono na poziomie 2,8 – 3,4 metra na minutę. Drutem spawalniczym wykorzystanym do badań był topik o średnicy 1,2 mm. Był to drut proszkowy, a prąd podawany do przetopienia drutu znajdował się w przedziale 115 – 130 A. Napięcie pracy całego układu wynosiło 16 – 18 V.

Do napawania próbek metodą konwencjonalną, został wybrany drut spawalniczy o zawartości węgla poniżej 3,5% oraz chromu około 29%. Zawartość drugiego pierwiastka wpływa znacząco na podwyższenie twardości do wartości 58-63 HRC. Drut do napawania metodą MIG/MAG posiadał również dodatki węglotwórcze takie jak V, W, B. Jakość napoiny została zdefiniowana według normy PN-EN 10228-2 na poziome czwartym, w którym dopuszczalne są pęknięcia ograniczone do grubości warstwy napawanej.

Do wykonania napoiny wybrano powierzchnię czołową próbki na wysokość 75 mm oraz powierzchnię dolną przygotowanej próbki. Wykonanie procesu na tych powierzchniach było uzasadnione próbami napawania wykonywanymi przez producentów narzędzi rolniczych. Powierzchnie czołowe oraz powierzchnia dolna, są to powierzchnie najbardziej narażone na napór masy ścierniej podczas pracy. Warstwa wierzchnia napoiny znajdująca się na powierzchni czołowej, przeciwdziała procesowi naporu masy ścierniej na dany element. Łączny zakres powierzchni, na którą została naniesiona powłoka wynosił 75 x 6 mm oraz 25 x 6 mm, grubość warstwy napawanej wynosiła ok. 2,5 mm. Powłoki naniesione na powierzchnię czołową przeciwdziałają procesowi naporu masy ścierniej na dany element co zostało zaprezentowane na rysunku 4.7.



Rys. 4.7. Schemat naporu masy ścierniej na próbkę; 1 – kierunek naporu masy ścierniej, 2 – obszar próbki zanurzonej w masie ścierniej, 3 – miejsce uchwyty próbki

W przypadku kolejnego procesu modyfikacji właściwości warstwy wierzchniej, którą było napawanie laserowe wybrano laser diodowy LINE LW 5000 posiadający maksymalną moc na poziomie 5000 W. Proces utwardzania powierzchni z wykorzystaniem lasera, podobnie jak

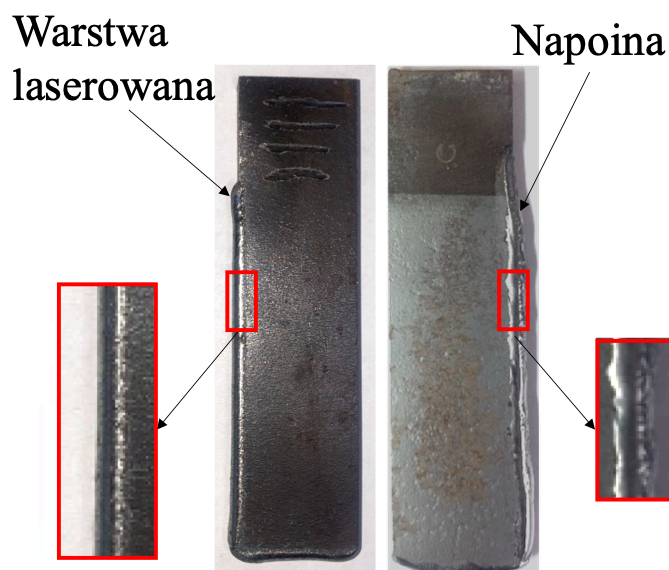
w przypadku napawania konwencjonalnego, odbywał się na powierzchni o wymiarach 75 x 6 mm oraz 25 x 6 mm. Grubość warstwy poddanej przetopieniu laserowemu wynosiła 0,75 mm.

W celu osiągnięcia warstwy o podanej grubości, należało wykonać trzy przejścia lasera. Na rysunku 4.8. zaprezentowany został obraz procesu obróbki laserowej. Próbkę były umieszczone w uchwycie ze względu na zachowanie jednakowych parametrów geometrycznych napoiny.



Rys. 4.8. Wizualizacja procesu modyfikacji warstwy wierzchniej z wykorzystaniem lasera

W procesie napawania laserowego zdefiniowano kilka istotnych czynników, m.in. jako gaz osłonowy wybrano argon, który wpływa na stabilność procesu, obroty podajnika zostały ustalone na podstawie badań literaturowych na poziomie 1,2– 1,5 rpm oraz moc lasera ustalona w przedziale od 1500W do 2000W. Moc ta zapewniała przetopienie powierzchni naniesionego materiału oraz na powstanie zmian strukturalnych niewpływających negatywnie na strukturę całego badanego obiektu. Prędkość procesu wynosiła 450 – 550 mm/min. Ustalona prędkość wpłynęła na płynność procesu oraz wytworzenie wymaganej warstwy wierzchniej. Gęstość mocy lasera była na poziomie 120 – 160W na mm². Kształt próbek został przedstawiony na rysunku 4.9.



Rys. 4.9. Kształt próbek po modyfikacji warstwy wierzchniej

W przypadku obróbki laserowej na powierzchnię próbek został naniesiony dwuskładnikowy materiał Stellite-6 oraz WC w proporcjach 70% do 30%. Stop Stellite-6 jest to stop kobaltu, chromu oraz węgliku wolframu wykorzystywany najczęściej do produkcji elementów trących lub tych szczególnie narażonych na tarcie. WC jest to natomiast węgiel wolframu przeznaczony do podwyższenia odporności na zużycie ściernie elementów.

Rodzaj oraz materiał powłok został przedstawiony w tabeli 4.2.

Tab. 4.2. Materiał wykorzystany do badań

Powłoki	Zawartość pierwiastków [%]								
	C	Si	Mn	P	S	B	Cr	Mo	Ni
Napoina konwencjonalna	1,21	1,09	0,1	0,1	<0,01	<0,01	29,97	0,69	2
Napoina laserowa	Stellite-6 + WC (70/30%)								

4.3.2. Koncepcja stanowiska badawczego

Analizując opisane w literaturze stanowiska do badań tribologicznych, zawarte w rozdziale 2.4., nie napotkano stanowiska spełniającego wymagania niezbędne do realizacji zaplanowanego eksperymentu tribologicznego z uwzględnieniem zmian parametrów masy

ścierniej. Dlatego zdecydowano o opracowaniu koncepcji i zbudowaniu własnego stanowiska, które będzie spełniało następujące założenia:

- płynna zmiana prędkości pracy badanych próbek w masie ścierniej,
- mała ilość wykorzystanej masy ścierniej,
- pomiar kluczowych parametrów pracy (prędkość, dystans, pobór mocy),
- łatwe sterowanie parametrami procesu (prędkość, głębokość zagłębienia elementów w medium ściernym, wilgotność, pH),
- możliwość prostej wymiany elementu badawczego,
- prostota obsługi stanowiska.

Biorąc pod uwagę przedstawione założenia zaprojektowano stanowisko, które bazuje na urządzeniu *grounding tunneling*, niemniej jednak posiada kilka istotnych różnic konstrukcyjnych. Uwzględniając założenia projektowe oraz analizując niedoskonałości obecnie dostępnych urządzeń badawczych, zdefiniowano kryteria, jakie opracowane stanowisko będzie spełniać. Jednym z nich jest płynna możliwość zmiany prędkości pracy elementów badanych. W związku z powyższym zastosowano dwa rodzaje regulacji prędkości obrotowej. Pierwszym rodzajem regulacji prędkości jest przemiennik częstotliwości, steruje on obrotami silnika elektrycznego. Ze względu na potrzebny duży moment obrotowy w celu przeciwdziałania oporowi masy ścierniej, zastosowano także przekładnię bezstopniową (wariator). Zmiana obrotów wału pozwala na dostosowanie prędkości obrotowej oraz wytworzonego momentu do przeciwdziałaniu oporom masy ścierniej.

Kolejnym parametrem, który założono w trakcie realizacji badań jest mała ilość wykorzystanej masy ścierniej. Dlatego stanowisko zostało wyposażone w okrągły zbiornik. W celu dodatkowego zmniejszenia ilości masy ścierniej w centralnej części zbiornika została zamontowana wyspa, która wytworzyła pierścień. Próbki pracują w pierścieniu wypełnionego masą ścierną o mniejszej ilości medium ściernego niż w przypadku pełnego zbiornika. Wytworzona część, w której znajduje się masa ścierna przeciwdziała również powstaniu martwej strefy z gromadzącym się materiałem ściernym. Ścierniwo w środkowej części zbiornika roboczego w przypadku braku wyspy tworzy złogi oraz martwe pola niepracującej masy ścierniej. Ponadto masa ścierna może być szybko wymieniona na nową, gdy nie spełnia oczekiwanych wymagań.

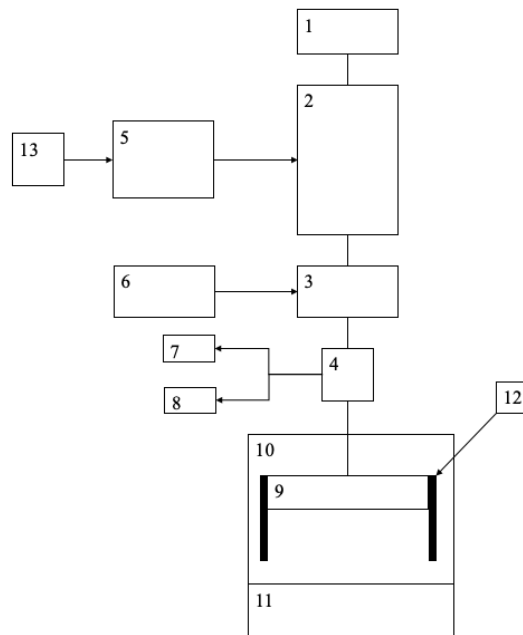
Kolejnym kryterium była możliwość zastosowania maksymalnie dużej liczby próbek w jak najmniejszym obszarze roboczym. Aby spełnić to założenie konstrukcyjne postanowiono wykorzystać dwunastokąt foremny, na którym zamontować można maksymalnie 12 próbek,

które zachowują odpowiedni dystans pomiędzy sobą, nie zaburzając przepływu masy ścierniej oraz pozwalając na swobodny napór ścierniwa na badany element. Dzięki zastosowaniu dwunastokąta foremego jako uchwytu do montażu próbek możliwe jest prowadzenie testów ściennych, na innej parzystej liczby próbek.

Następnym kluczowym kryterium była możliwość modyfikacji parametrów pracy maszyny w trakcie prowadzenia badań tj.:

- prędkości obrotowej,
- momentu obrotowego wału, na którym zamontowane są próbki,
- wysokości montażowej próbek (zagłębienie próbek w masie ścierniej).

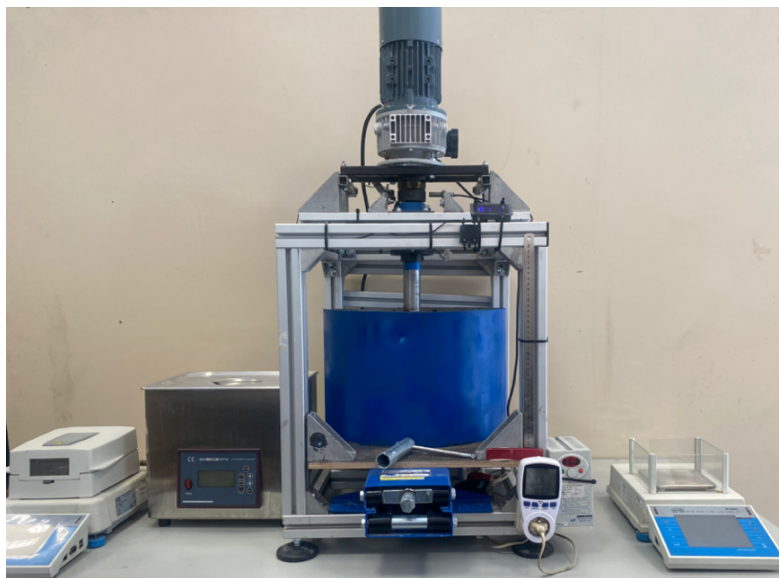
Pozwoliło to na korygowanie ustawień w przypadku nieoczekiwanych zmian pracy maszyny. W celu dokładnego zrozumienia budowy i zasady działania stanowiska badawczego przedstawiono schemat blokowy, pokazujący jego kluczowe elementy (rys. 4.10.).



Rys. 4.10. Schemat stanowiska badawczego; 1 – chłodzenie zewnętrzne silnika, 2 – silnik elektryczny, 3 – wariator, 4 – sprzęgło kłowe, 5 – przebiegnik częstotliwości, 6 – układ sterowania wariatorem, 7 – czujnik prędkości, 8 – czujnik przebytej drogi/czasu pracy, 9 – uchwyt montażowy próbek, 10 – miska z masą ścierną, 11 – układ podnoszenia misy z masą ścierną, 12 – badana próbka, 13 – miernik poboru mocy

Zasada działania stanowiska jest następująca: próbki obracają się w misie o pojemności 20 litrów piasku kwarcowego, która posiada możliwość podnoszona za pomocą podnośnika nożycowego na zadaną wysokość, tym samym regulując głębokość zanurzenia próbek w medium ściernym. Aby uniknąć niekontrolowanego ruchu misy z materiałem ściernym

zostały zaprojektowane oraz wykonane prowadnice boczne, zapewniające sztywność stanowiska poprzez odebranie stopni swobody. Prototypowe stanowisko badawcze jest wykonane z profili aluminiowych o przekroju 60 x 60 mm z rowkami teowymi do montażu dodatkowych podzespołów. Silnik elektryczny jest na stałe spięty z wariatorem za pomocą połączenia klinowego oraz jest zamontowany na ramie za pomocą połączenia rozłącznego. Sterowanie silnikiem odbywa się z wykorzystaniem przemiennika częstotliwości natomiast sterowanie wariatorem za pomocą pokrętki wpływającej na dylatację pomiędzy poszczególnymi talerzami zawartymi w mechanizmie. Ze względu na niską prędkość obrotową silnika oraz duży moment przenoszony na próbki został on połączony z układem dodatkowego chłodzenia powietrzem. Układ ten ma za zadanie odprowadzenie wygenerowanego ciepła z silnika elektrycznego. Wariator, który pracuje w pozycji poziomej posiada dodatkową ilość czynnika smarującego zapewniającego właściwe warunki pracy (zgodne z wytycznymi producenta). Dodatkowo zamontowany został czujnik magnetyczny umożliwiający kontrolę obrotów na wale urządzenia. Kontrola obrotów urządzenia jest szczególnie istotna w przypadku wyznaczenia prędkości pracy oraz dystansu, który jest wskazywany przez czujnik dystansu. Czujnik oraz wskaźnik elektryczny wskazujący przebyty dystans służą również do pomiaru prędkości obrotowej próbek. Cały układ dodatkowo podłączony jest pod elektroniczny wskaźnik poboru mocy. Na podstawie danych z czujnika poboru mocy można policzyć koszt jednostkowego poboru mocy podczas badania. Zdjęcie wykonanego stanowiska wraz z dodatkowymi przyrządami pomiarowymi zaprezentowano na rysunku 4.11.



Rys. 4.11. Stanowisko do badań tribologicznych

Na podstawie przyjętych założeń badawczych zdefiniowano parametry techniczne, które powinny spełniać urządzenie, zostały one przedstawione w tabeli 4.3.

Tab. 4.3. Parametry stanowiska badawczego

Parametr	Wymagania	Rozwiązanie
Moc	Przeciwdziałanie oporom tarcia	Zastosowanie silnika o większej mocy
Zakres obrotów	Zmienność zakresu pracy	Zastosowanie przemiennika częstotliwości wraz z układem mechaniczny wzmacniającym moment (wariator)
Rodzaj chłodzenia silnika	Przeciwdziałanie przegrzaniom podczas pracy	Zastosowanie chłodzenia zewnętrznego
Medium ściernie	Dowolność wykorzystania różnych mediów	Otwarta komora ścierna wraz z łatwością obsługi
Ilość medium ściernego	Brak nadmiernej degradacji medium podczas pracy	
liczba próbek	Liczba badanych elementów pozwalających przeprowadzić badania statystyczne, podczas niezmiennych parametrów pracy	Zastosowanie uchwytu pozwalającego zamontować do 12 elementów badawczych
Sposób mocowania próbek	Symulacja pracy rzeczywistego obiektu technicznego	Możliwość zastosowania różnych uchwytów do eksperymentów badawczych

4.4. Opis metod badawczych

4.4.1. Opis badań tribologicznych

W celu przeprowadzenia badań tribologicznych kluczowe było określenie parametrów oraz założeń eksperymentu, który został przeprowadzony na prototypowym stanowisku tribologicznym. Jednym z kluczowych założeń było określone właściwości fizykochemicznych masy ścierniej. Do przeprowadzenia badań użyto piasku kwarcowego zgodnego z normą ASTM G65. Na podstawie analizy literaturowej postanowiono sprawdzić wpływ różnych wartości pH oraz wilgotności masy ścierniej na zużycie ściernie. W tabeli 4.4. przedstawiono parametry medium ściernego użytego w trakcie realizacji badań.

Tab. 4.4. Parametry medium ściernego wyznaczone do badań tribologicznych

Parametry medium ściernego		
Wilgotności [%]	0	10
Odczyn [pH]	7	10
Norma	ASTM G65	

Na podstawie parametrów medium określono warunki eksperymentu. W tabeli 4.5. przedstawiono zastosowane oznaczenie wariantów medium ściernego w zależności od wilgotności i pH.

Tab. 4.5. Oznaczenia medium ściernego

Oznaczenie medium	Wilgotność [%]	pH
W0pH7	0	7
W10pH7	10	7
W0pH10	0	10
W10pH10	10	10

Posiadając zdefiniowane chemiczne parametry masy ścierniej, kolejnym etapem było określenie kluczowych parametrów pracy urządzenia, które będą kontrolowane podczas eksperymentu. Kluczowe w badaniach, było uzyskanie maksymalnie zbliżonych parametrów pracy do rzeczywistych warunków eksploatacji urządzeń polowych. W związku z tym należało określić takie parametry jak:

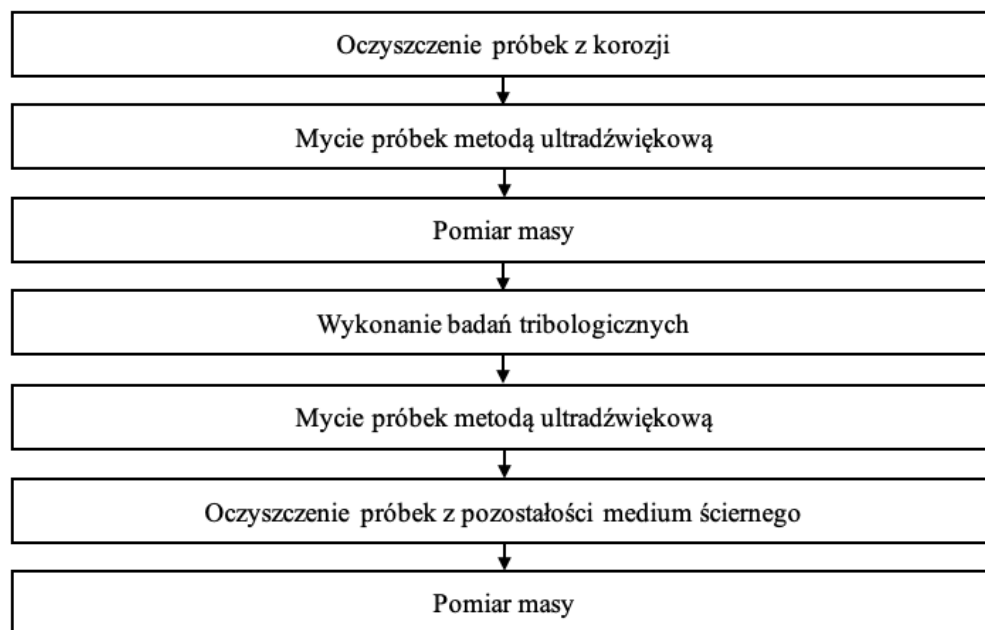
- prędkość obrotowa uchwytu z próbkami,
- prędkość liniowa,
- czas pracy,
- przebyty dystans,
- zanurzenie próbki w masie ścierniej (głębokość),
- interwały wymiany masy ścierniej.

Na podstawie przedstawionych założeń wyznaczono kluczowe wartości warunków realizacji eksperymentu, które zaprezentowano w tabeli 4.6.

Tab. 4.6. Warunki badawcze

Warunki badawcze	Wartość
Prędkość obrotowa [obr/min]	100
Prędkość liniowa [km/h]	13
Czas pracy [h]	50
Przebyty dystans [km]	650
Zanurzenie próbki [mm]	75
Interwały wymiany masy ścierniej [h]	50

Po określeniu kluczowych warunków przeprowadzenia eksperymentu, należało wyznaczyć jego przebieg oraz jego poszczególne etapy, co zostało zaprezentowane na rysunku 4.11.



Rys. 4.11. Schemat wykonywania badań tribologicznych

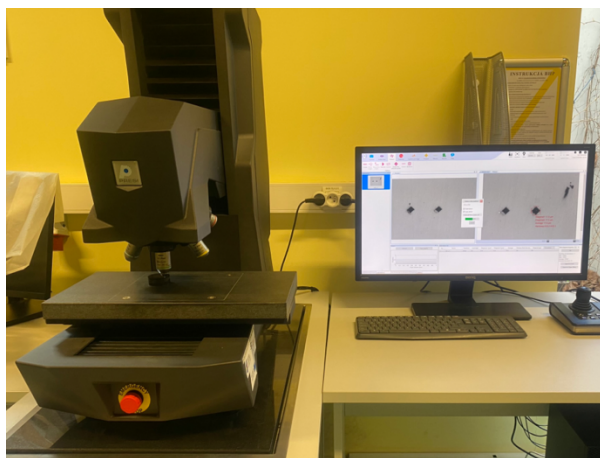
W pierwszym etapie oczyszczenia próbek z korozji należało umieścić je w imadle w celu zabezpieczenia przed niekontrolowanym ruchem. Ten etap odbywał się z wykorzystaniem miękkiej tarczy nakładanej na szlifierkę kątową do polerowania powierzchni. Kolejnym etapem było dokładne umycie próbek metodą ultradźwiękową. Po umyciu próbek należało przystąpić do oczyszczenia pozostałości cząstek organicznych oraz wilgoci za pomocą delikatnego oraz chłonnego ręcznika. Następnie dokonywano pomiaru masy z wykorzystaniem wagi laboratoryjnej RADWAG PS 1000/Y o dokładności do 0,001 grama, przy czym każda próbka była ważona pięciokrotnie. Próbka podczas pomiaru masy była umieszczana na styropianie w celu ograniczenia wpływu jej naelektryzowania na tensometry. Po przygotowaniu próbek przeprowadzono testy ściernego według wcześniej określonych parametrów. Po eksperymencie tribologicznym następowało ponowne umycie próbek metodą ultradźwiękową. Oczyszczenie próbek realizowane było w myjce ultradźwiękowej. W tym etapie szczególnie istotne było zastosowanie miękkiego materiału do oczyszczenia próbek ze względu na zachowanie chropowatości powstałej po eksperymencie tribologicznym. Następnie wykonywano pomiar masy. Procedura wykonywania badania tribologicznego była jednakowa dla każdego badanego wariantu medium ściernego przedstawionych w tabeli 4.5.

4.4.2. Opis badań uzupełniających

W celu wyznaczenia dodatkowych parametrów pozwalających na szczegółową analizę ich wpływu na charakterystykę mechanizmu zużywania oraz wyznaczenia odporności na zużycie ścierne, wymagane było przeprowadzenie szeregu badań. Jako badania uzupełniające zostały zdefiniowane następujące czynności:

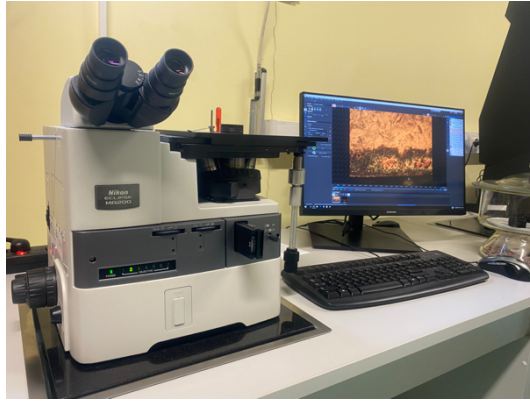
- badania twardości,
- badania mikrostruktury,
- badania ubytku objętościowego,
- badania chropowatości powierzchni.

Badania mikrotwardości odbywały się za pomocą urządzenia Presi w celu dokładnego scharakteryzowania wszystkich widocznych faz powstałych podczas procesów nakładania powłok oraz w materiale bazowym. Badanie mikrotwardości odbywało się zgodnie z normą PN – EN ISO 6507-1. Badanie wykonywano dla zautomatyzowanej ścieżki składającej się z 12 miejsc pomiarowych. Obciążenie z jakim odbywało się badanie wynosiło 0,1 N. Poniżej na rysunku 4.12. przedstawiono zdjęcie urządzenia pomiarowego.



Rys. 4.12. Stanowisko do badań mikrotwardości

Następnym badaniem, które zostało wykonane w ramach pracy doktorskiej była analiza mikrostruktury powstałej po procesie nakładania powłoki. Analiza ta, odbywała się na stanowisku NIKON ECLIPSE MA200 wraz z monitorem oraz różnymi obiektywami, badania wykonano dla przybliżeń 500x, 250x, 100x oraz 50x krotnego w celu dokładnego zweryfikowania powstałych struktur wewnętrznych. Poniżej, na rysunku 4.13. przedstawiono urządzenie pomiarowe.



Rys. 4.13. Stanowisko pomiarowe do badania mikrostruktury

Kolejnym badaniem wykonanym podczas realizacji pracy doktorskiej było badanie powierzchni przed oraz po badaniach tribologicznych za pomocą skanera 3D firmy GOM. Pomiar odbywał się za pomocą metody najlepszego dopasowania powierzchni. Dzięki wykonaniu pomiarów przed i po badaniach w masie ścierniej, możliwa była ocena ubytku objętości dla kluczowych miejsc próbek. Ostatnim etapem procedury było przeprowadzanie obróbki graficznej przy pomocy oprogramowania ATOS Professional V8.

Ostatnim badaniem, które zostało wykonane, wymaganym dla osiągnięcia celu pracy, było badanie powierzchni oraz parametrów chropowatości przed oraz po eksperymencie tribologicznym. Badanie odbywało się za pomocą urządzenia Alicona InfiniteFocus G5. Za pomocą urządzenia możliwe było wykonanie zarówno pomiarów chropowatości oraz topografii powierzchni. Pozwoliło to na wyznaczenie oraz poprawne zdefiniowanie mechanizmu wpływającego na kształtowanie odporności na zużycie ścienne. Poniżej, na rysunku 4.15. zaprezentowano urządzenie pomiarowe.



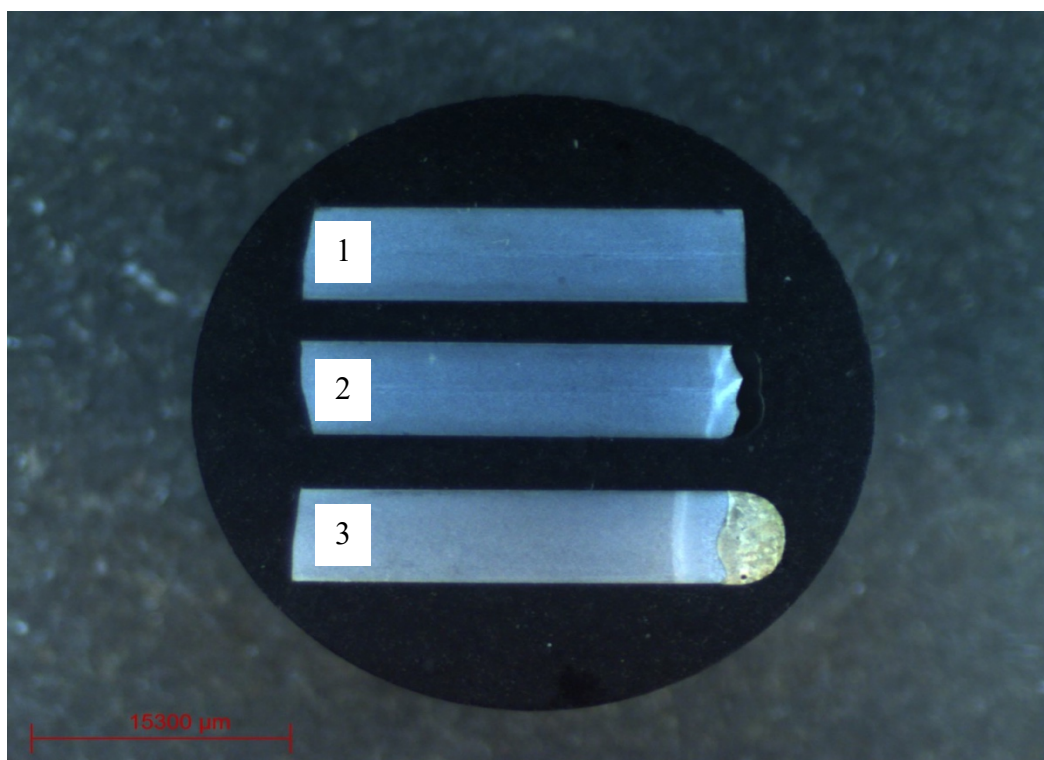
Rys. 4.15. Urządzenie Alicona do pomiaru chropowatości oraz topografii powierzchni [30]

5. WYNIKI BADAŃ

5.1. Wyniki badań wybranych właściwości próbek

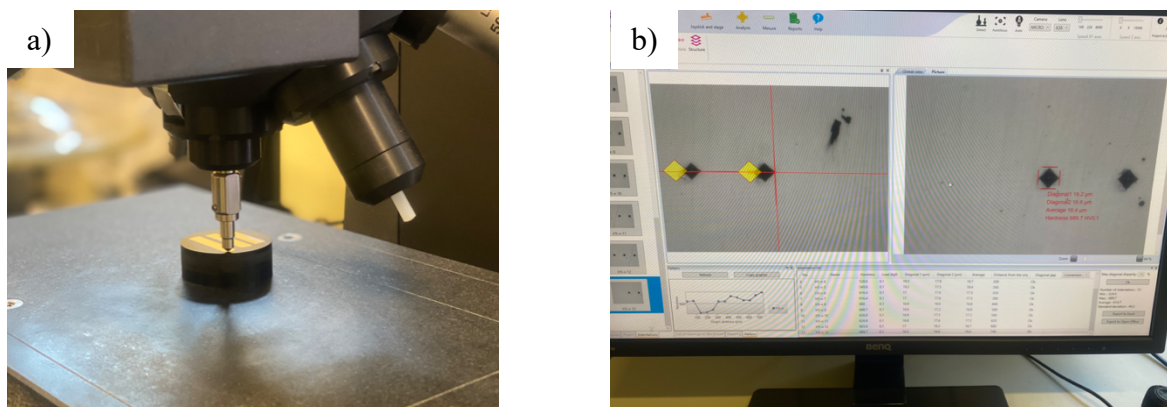
5.1.1. Wyniki badań twardości

Przed przeprowadzeniem eksperymentu tribologicznego należało wykonać szereg badań oraz pomiarów pozwalających na osiągnięcie celu pracy. Pierwszym etapem była analiza mikrotwardości próbek. W tym celu przygotowano zgłady próbek. Próbki pogrupowano według materiałów oraz obróbek powierzchniowych. Na rysunku 5.1. przedstawiono widok próbek przygotowanych do pomiarów mikrotwardości.



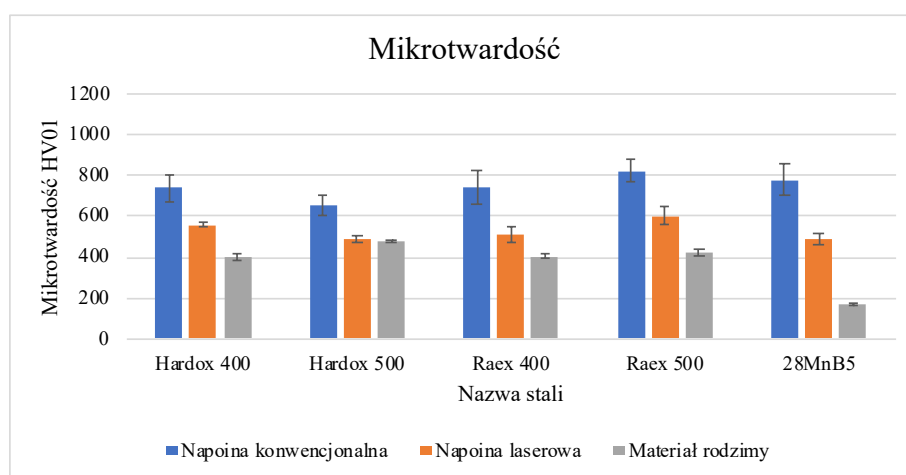
Rys. 5.1. Widok próbek przygotowanych do pomiarów mikrotwardości; 1 – próbka bez naniesionej powłoki, 2 – próbka z powłoką wykonaną wiązką lasera, 3 – próbka z napoiną konwencjonalną

Na podstawie obserwacji za pomocą mikroskopu stwierdzono występowanie 4 istotnych stref o innych wartościach mikrotwardości. Pomiar odbywał się w sposób automatyzowany. Automatyzacja procesu zapewniła powtarzalność otrzymanych wyników. Poniżej, na rysunku 5.2., zaprezentowano proces pomiarowy oraz interface pozwalający na analizę pomiarów.



Rys. 5.2. Proces badania mikrotwardości elementów; a) widok w trakcie realizacji pomiarów, b) interface do analizy wyników

Po wykonaniu procesu badania otrzymano wyniki dla napoiny konwencjonalnej, laserowej oraz dla rdzenia materiału (materiał bazowy/rodzimy). Na rysunku 5.3. zostały przedstawione wartości twardości dla stali, napoiny konwencjonalnej oraz napoiny laserowanej oraz dla materiału rodzimego.



Rys. 5.3. Średnie wyniki badań mikrotwardości dla wszystkich próbek

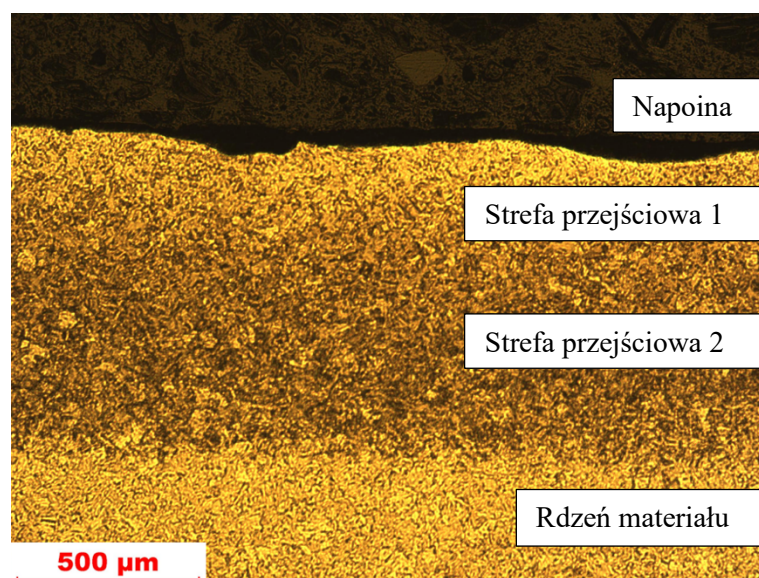
Analiza otrzymanych wyników mikrotwardości wskazała, że mikrotwardość powłok różni się od miejsca, gdzie zostały one naniesione. Najwyższą, średnią wartość mikrotwardości posiadała napoina konwencjonalna naniesiona na stali Raex 500 i wynosiła ona około 822 HV₀₁. Natomiast najniższą wartość mikrotwardości równą 656 HV₀₁ uzyskano dla napoiny konwencjonalnej dla stali Hardox 500. W przypadku wartości mikrotwardości dla materiału rodzimego najwyższą wartość posiadała stal Hardox 500 (479 HV₀₁), natomiast najniższą wartość posiadała stal 28MnB5 która wynosiła 168 HV₀₁. Podczas analizy mikrotwardości dla napoiny laserowej wykazano, że wartości mikrotwardości warstw wierzchnich po modyfikacji

są na zbliżonym poziomie, a nieznacznie wyższą mikrotwardość posiadała jednak napoina laserowa naniesiona na stal Raex 500 i wynosiła ona 599 HV₀₁. Badanie mikrotwardości wykazało znaczne różnice pomiędzy powłokami nanoszonymi cieplnie a materiałem rodzimym dla stali 28MnB5, jednakże w przypadku stali Hardox 500 różnice w wartościach mikrotwardości nie są znacząco odbiegające od siebie. Wskazuje to, na nieznaczne podwyższenie mikrotwardości powłok w stosunku do materiału rodzimego.

W ramach pracy w celu ułatwienia interpretacji mikrostruktury próbek i zmodyfikowanych warstw wierzchnich, a także identyfikacji miejsc pomiaru mikrotwardości przyjęto następujące nazewnictwo:

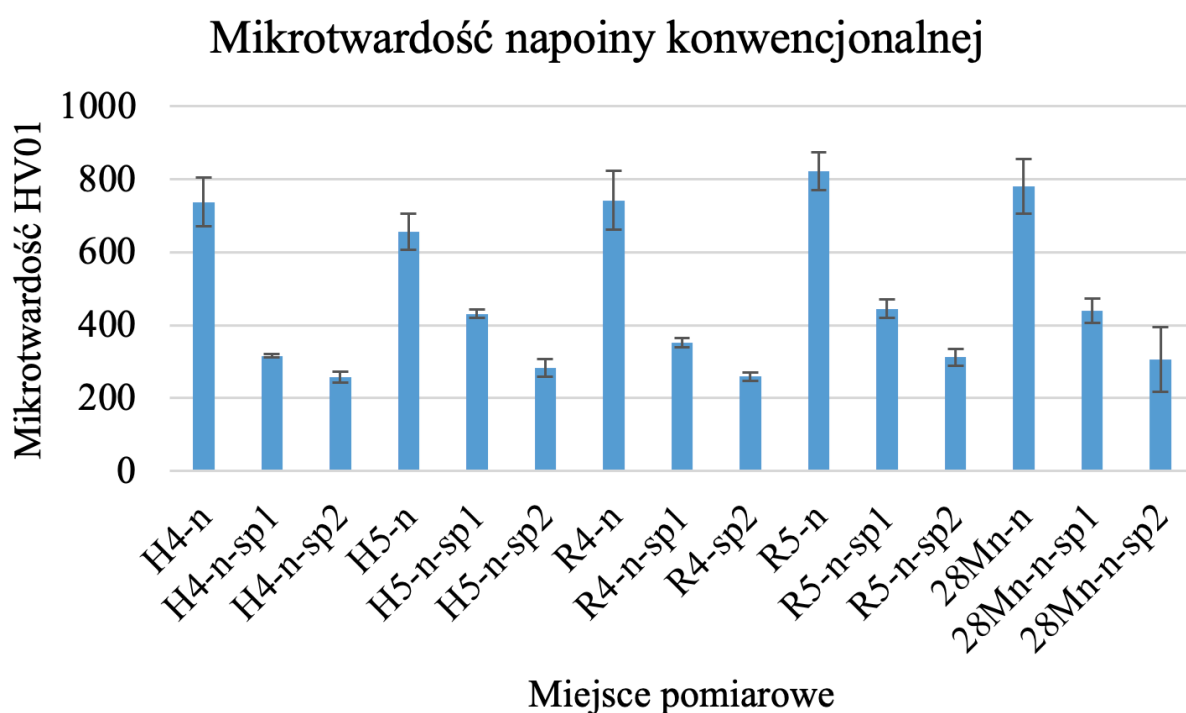
- R4 – Raex 400,
- R5 – Raex 500,
- H4 – Hardox 400,
- H5 – Hardox 500,
- 28Mn – 28MnB5,
- “n” lub “l” – napoina konwencjonalna lub napoina laserowa,
- sp1 – strefa przejściowa pierwsza (pomiędzy powłoką a materiałem rodzimym),
- sp2 – strefa przejściowa druga (strefa wpływu ciepła pomiędzy strefą przejściową pierwszą a materiałem rodzimym).

Strefy przyjęte do badań mikrotwardości zostały pokazane na rysunku 5.4.

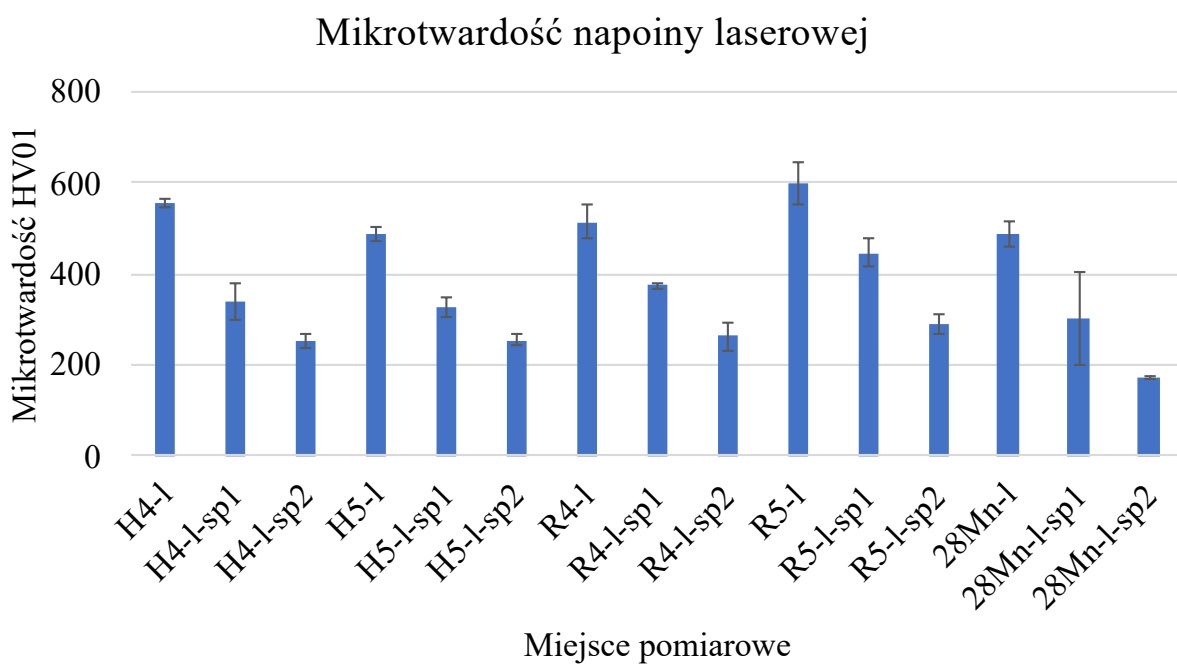


Rys. 5.4. Wyznaczone strefy do badań mikrotwardości (Stal Raex 500 wraz z napoiną konwencjonalną)

Dodatkowym elementem badań, w których zrealizowano pomiary mikrotwardości były strefy przejściowe. Analizując wyniki mikrotwardość uzyskanych badań dla napoiny konwencjonalnej można stwierdzić, że wraz z oddalaniem się od materiału powłoki wartość mikrotwardość maleje. W strefie przejściowej 1 jest ona o około 50% niższa niż wartość mikrotwardości powłoki. Różnice występujące między strefą przejściową 1 a strefą przejściową 2 to około 15%. Analizując pomiary dla napoiny laserowej różnice w wartościach dla różnych stref nie są, aż tak duże i w zależności od stali wynoszą ok 30-40%. W przypadku napoiny laserowej również wraz z oddalaniem się od materiału powłoki wartość mikrotwardości maleje. W przypadku stali 28MnB5 wartość dla strefy przejściowej 2 jest najniższa spośród wszystkich wyników, co daje również odzwierciedlenie w pomiarach wykonanych dla materiału rodzimego, który również posiadał najniższą wartość badanego parametru. Dla każdego z pomiarów zostały również określone odchylenia standardowe które zostały naniesione na wykresy. Wyniki badań zostały przedstawione na rysunku 5.5. oraz 5.6.

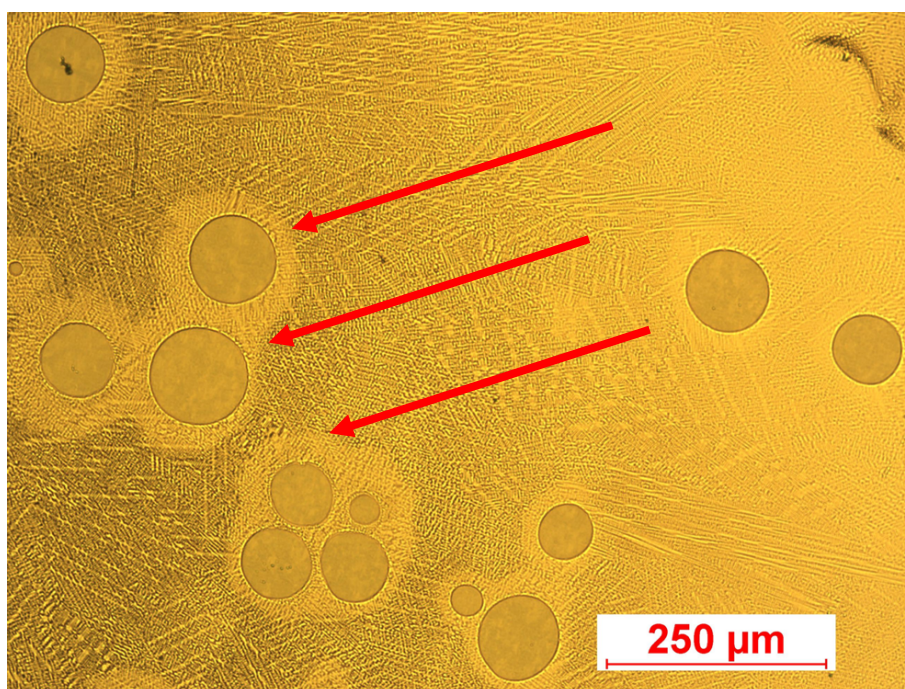


Rys. 5.5. Wyniki mikrotwardości dla napoiny konwencjonalnej



Rys. 5.6. Wyniki mikrotwardości dla napoiny laserowej

Dodatkowymi przeprowadzonymi pomiarami była analiza mikrotwardości wydzielen w napoinie laserowej, a same wydzielenia zostały przedstawione na rysunku 5.7. W tym przypadku ze względu na wysoką twardość przyjęto do badania obciążenie na poziomie 1N. Uśrednione wyniki badań zostały przedstawione w tabeli 5.1.



Rys. 5.7. Wydzielenia węglików w napoinie laserowej

Tab. 5.1. Wartości twardości wydzieleni powstałych po naniesieniu powłoki laserowej

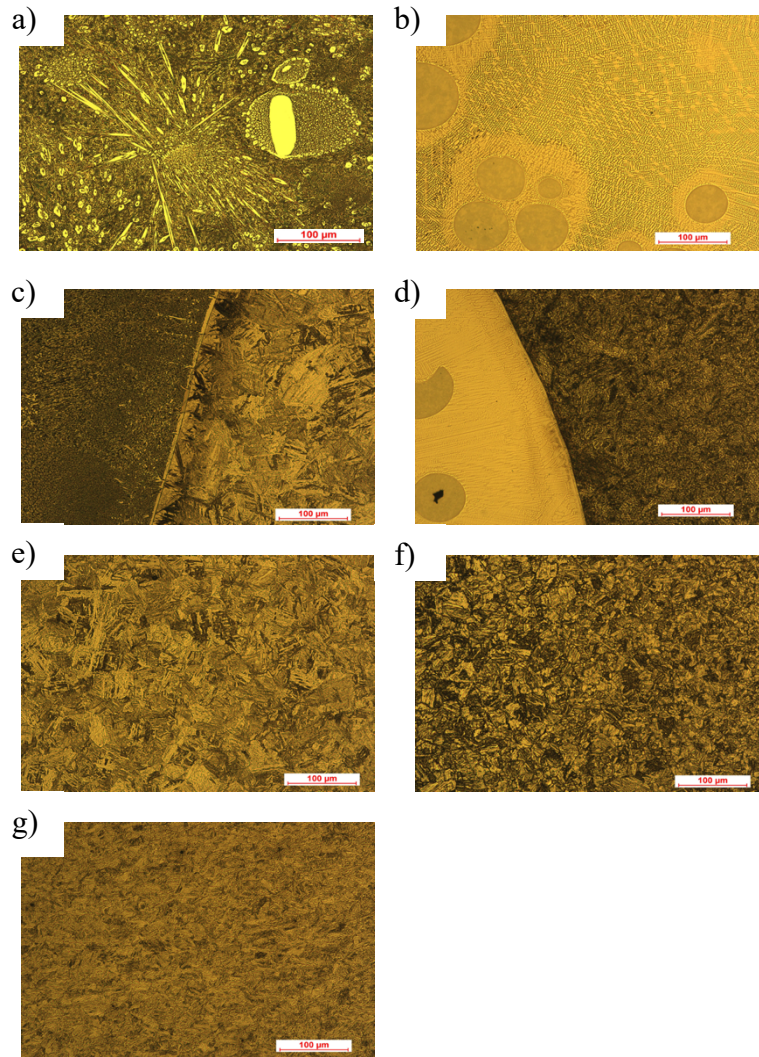
Stal	Wartość [HV1]
Hardox 400	2496,8
Raex 400	2685,4
Raex 500	1863,9
28MnB5	1588,9
Hardox 500	1981,2

Analiza otrzymanych wyników wskazuje na wyższe twardości wydzieleni dla stali, które posiadają niższą wartość twardości materiału rodzimego (Hardox 400 i Raex 400). Jedynie w przypadku stali 28MnB5 ta zależność jest inna, ponieważ zanotowano wartości twardości wydzieleni na najniższym poziomie, podobnie jak wartość materiału. Dla stali Hardox 400 oraz Raex 400 wartości twardości materiału bazowego są niższe niż w przypadku stali Hardox 500 oraz Raex 500.

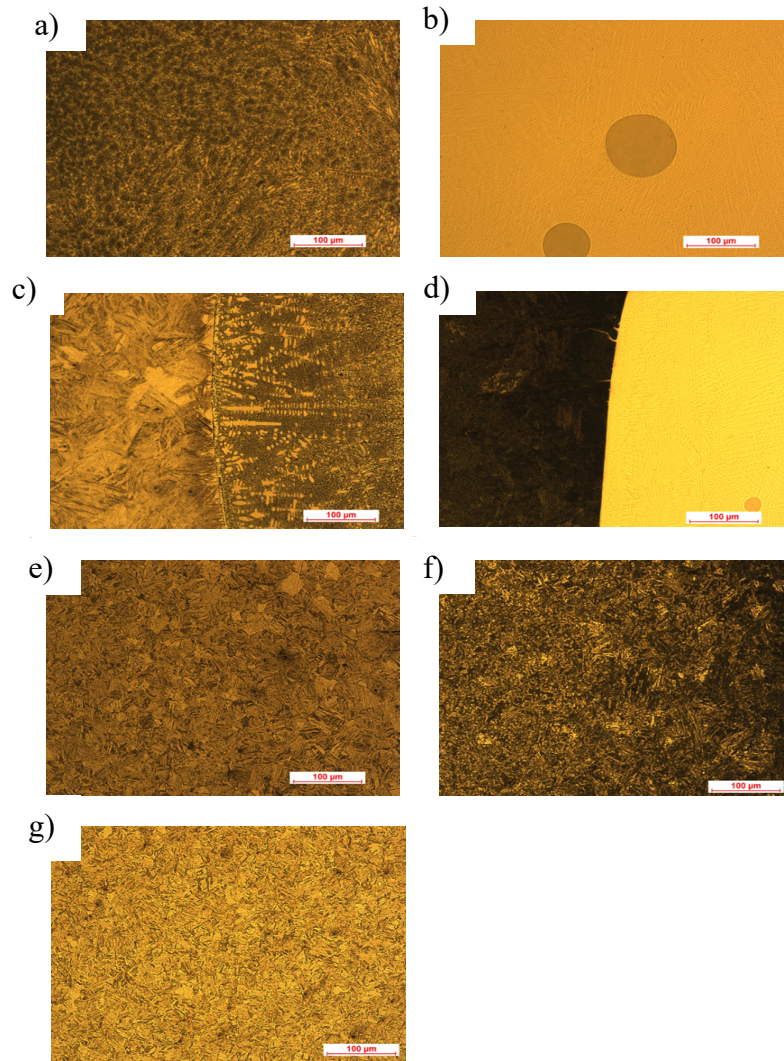
5.1.2. Wyniki metalograficznych badań mikroskopowych próbek

Analizę badań metalograficznych podzielono podobnie jak w przypadku badań twardości na 4 zasadnicze strefy. W każdej ze stref w zależności od wpływu ciepła stwierdzono różnice w strukturze. Struktura dla stali badanych stali wraz z powłokami przedstawiono na rysunkach 5.8. – 5.12.

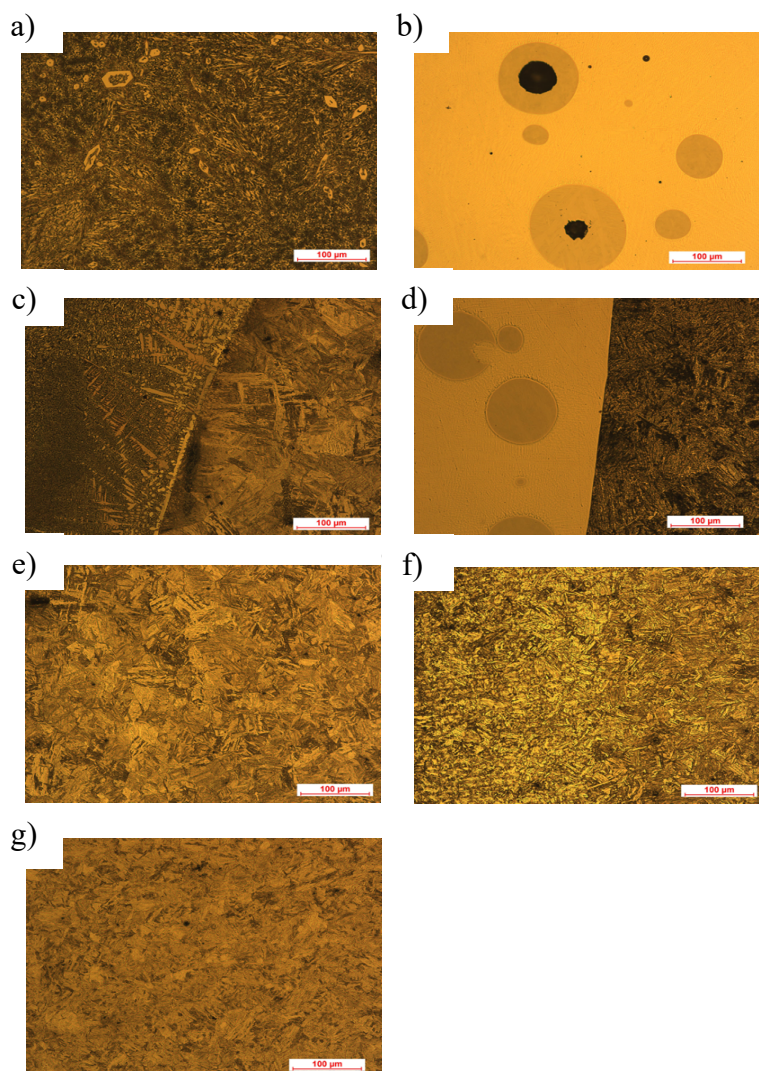
Analizując zaprezentowane mikrostruktury można stwierdzić, że w przypadku napoiny laserowej widoczne są wydzielenia węglików WC oraz mikrostruktura wskazuje na duże ilości chromu. Dla napoiny konwencjonalnej zauważalne są również wydzielenia węglików chromu raz ze zmianą strefy wpływu ciepła materiał zmienia swoją strukturę w martenzyt. Próbki były trawione odczynnikiem Kallingsa.



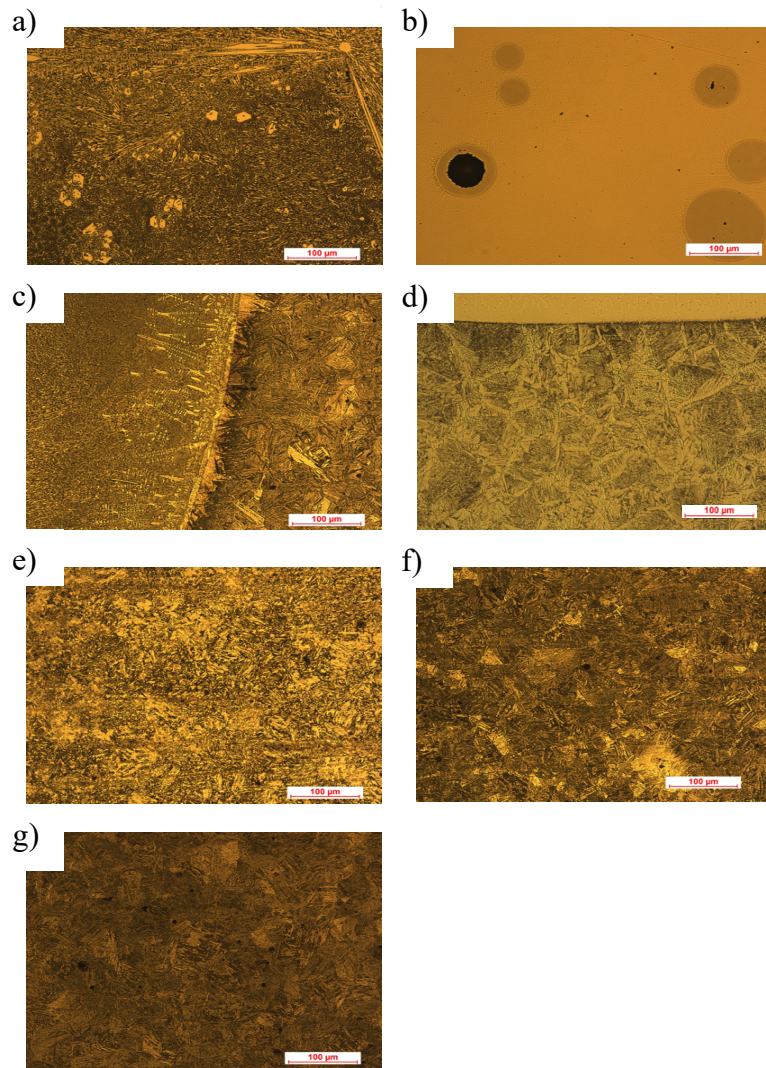
Rys. 5.8. Mikrostruktura stali Hardox 400; a) napoina konwencjonalna, b) napoina laserowa, c) strefa przejściowa 1 napoiny konwencjonalnej, d) strefa przejściowa 1 napoiny laserowej, e) strefa przejściowa 2 napoiny konwencjonalnej, f) strefa przejściowa 2 napoiny laserowej, g) rdzeń materiału



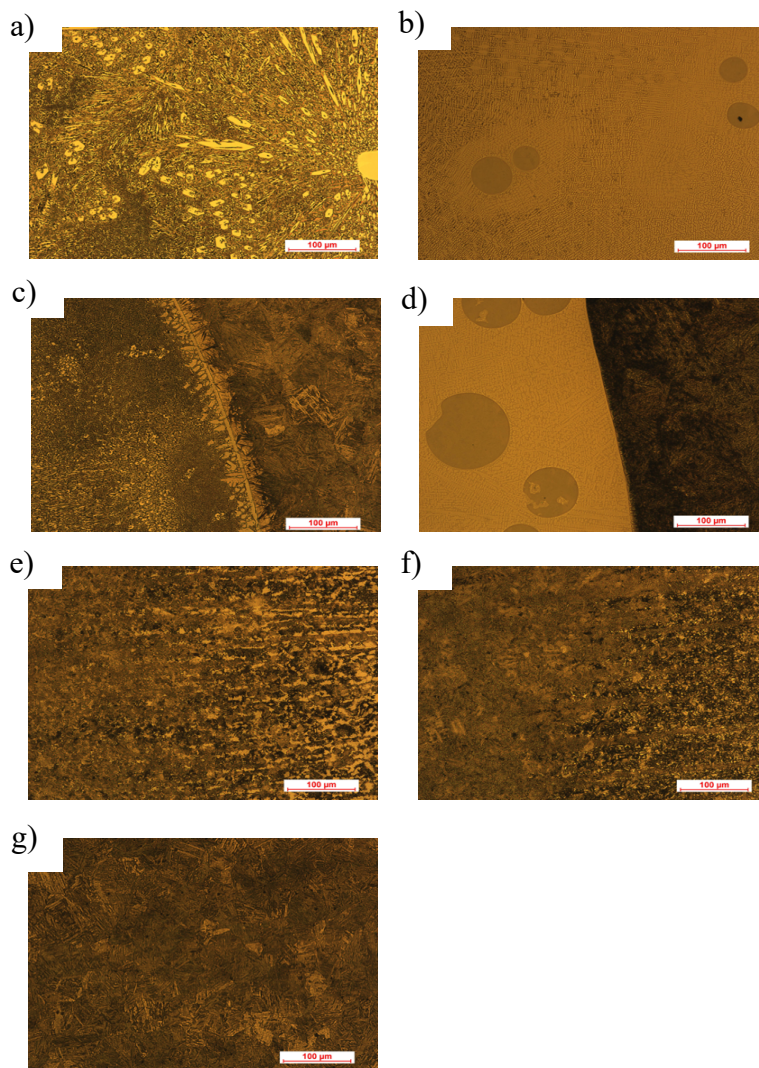
Rys. 5.9. Mikrostruktura stali Hardox 500; a) napoina konwencjonalna, b) napoina laserowa, c) strefa przejściowa 1 napoiny konwencjonalnej, d) strefa przejściowa 1 napoiny laserowe, e) strefa przejściowa 2 napoiny konwencjonalnej, f) strefa przejściowa 2 napoiny laserowej, g) rdzeń materiału



Rys. 5.10. Mikrostruktura stali Raex 400; a) napoina konwencjonalna, b) napoina laserowa, c) strefa przejściowa 1 napoiny konwencjonalnej, d) strefa przejściowa 1 napoiny laserowej, e) strefa przejściowa 2 napoiny konwencjonalnej, f) strefa przejściowa 2 napoiny laserowej, g) rdzeń materiału



Rys. 5.11. Mikrostruktura stali Raex 500; a) napoina konwencjonalna, b) napoina laserowa, c) strefa przejściowa 1 napoiny konwencjonalnej, d) strefa przejściowa 1 napoiny laserowej, e) strefa przejściowa 2 napoiny konwencjonalnej, f) strefa przejściowa 2 napoiny laserowej, g) rdzeń materiału



Rys. 5.12. Mikrostruktura stali 28MnB5; a) napoina konwencjonalna, b) napoina laserowa, c) strefa przejściowa 1 napoiny konwencjonalnej, d) strefa przejściowa 1 napoiny laserowej, e) strefa przejściowa 2 napoiny konwencjonalnej, f) strefa przejściowa 2 napoiny laserowej, g) rdzeń materiału

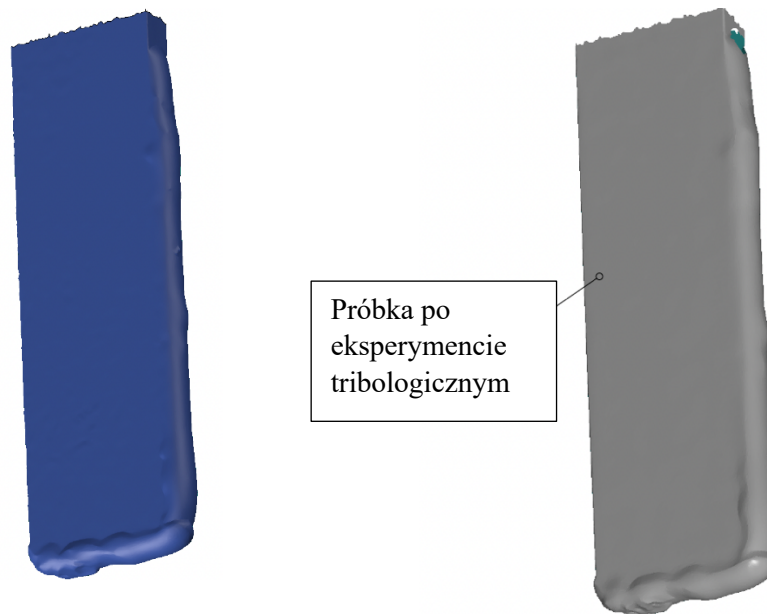
5.1.3. Analiza wyników badań wybranych właściwości próbek

Analizując wyniki przeprowadzonych badań właściwości próbek można stwierdzić, istotne różnice w parametrach nałożonych powłok oraz materiału rodzimego. Pomiary mikrotwardości wskazują, na istotne różnice w zależności od miejsca pomiarowego. Ma to związek ze strefą wpływu ciepła oraz ze zmianami strukturalnymi występującymi w materiale. Mikrotwardość dla powłok różni się w znaczący sposób od siebie. Podczas pomiarów mikrotwardości wykazano różnice dla powłoki napawanej konwencjonalnie oraz powłoki nakładanej laserowo, która wynosi ok. 25%. Badanie stref przejściowych wykazało zależność polegającą na zmniejszeniu mikrotwardości z zależności od odległości od powłoki. Zależność była zauważalna zarówno dla napoiny konwencjonalnej jak i dla napoiny laserowej. Różnica między najwyższą uzyskaną wartością dla mikrotwardości powłok wynosiła niezależnie od rodzaju materiału ok. 100HV₀₁. Analizując strefy przejściowe zauważono, że w przypadku napoiny laserowej różnice w wartościach mikrotwardości nie były tak duże jak w przypadku napoiny konwencjonalnej.

5.2. Wyniki eksperymentu tribologicznego

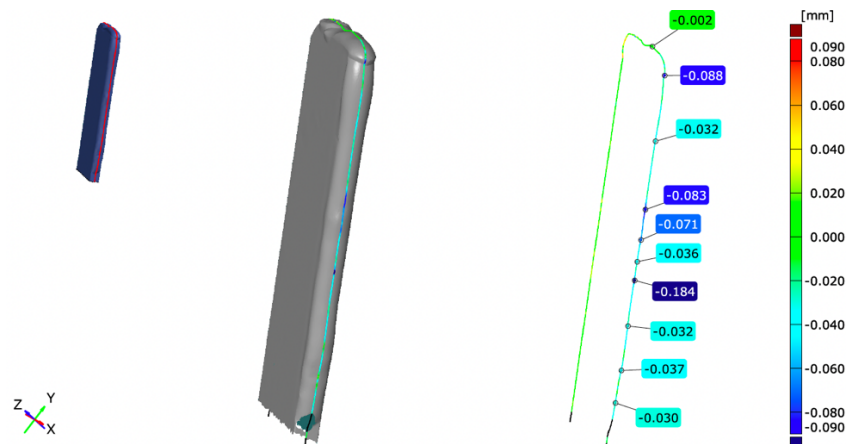
5.2.1. Wyniki objętościowego zużycia próbek

W ramach przeprowadzonych badań określono ubytek objętościowy próbek za pomocą skanera 3D. Badania te pozwoliły na dokładne zobrazowanie ubytków objętościowych w różnych badanych miejscach, zwłaszcza tych które są najbardziej narażone na działanie naporu masy ścierniej. Ubytek objętościowy jest ściśle zależy od kierunku przepływu masy ścierniej. Poniżej na rysunku 5.13. został zaprezentowany kształt elementu po badaniu skanerem 3D.



Rys. 5.13. Kształt elementu przed eksperymentem tribologicznym oraz po eksperymencie

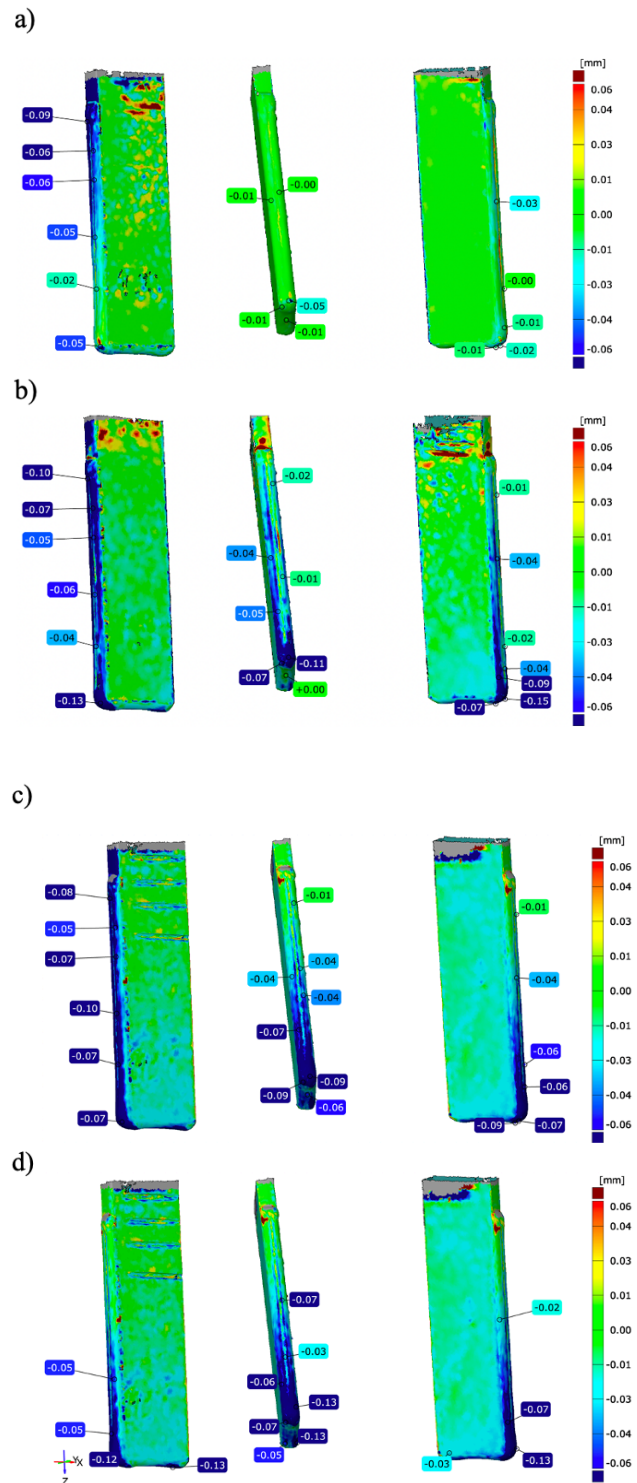
Zeskanowane profile próbek badawczych za pomocą oprogramowania zostały naniesione na siebie. Wyniki pozwalają na wyznaczenie ubytku objętości na powierzchni elementów. Przykładowe wyniki badań dla osi symetrii próbek zostały zaprezentowane na rysunku 5.14.



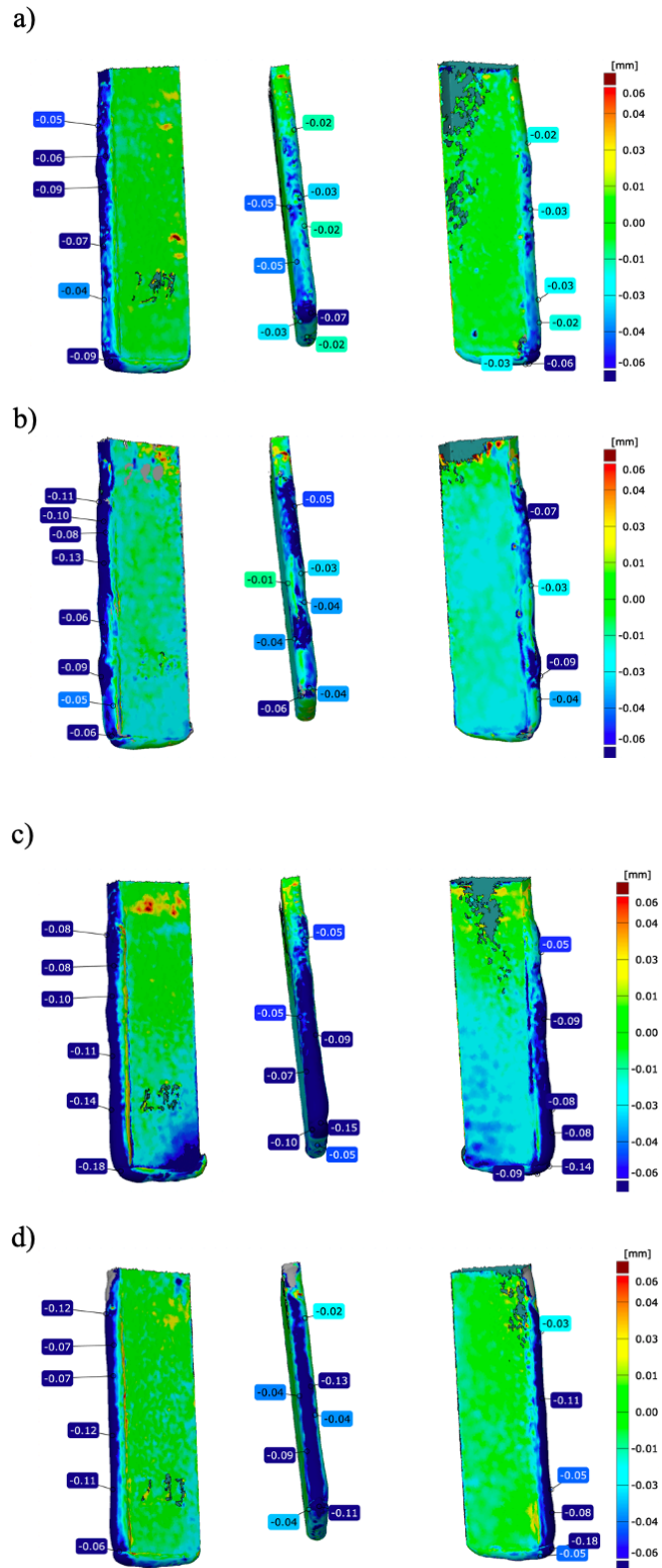
Rys. 5.14. Ubytek materiału w płaszczyźnie symetrii dla stali 28MnB5 po procesie napawania konwencjonalnego oraz zużyciu w H10%, pH10

Dodatkowo istotnymi badaniami, które zostały wykonane są badania ubytku materiału na całej powierzchni badanego elementu. Ubytek objętości dla napoiny laserowej wskazują na najmniejsze zmiany parametrów geometrycznych dla wariantu W0%, pH7. Największy ubytek występował w miejscu rozpoczynania procesu napawania laserowego i wynosił on 0.09 mm. Największe zmiany geometrii występowały dla wariantu W10%, pH7, w którym maksymalna wartość ubytku wynosiła 0,1 mm. Jednak wartości zużycia rozkładały się na całej badanej

geometrii a nie jedynie punktowo. Na podstawie badań dla napoiny laserowej można zauważyć, że medium ściernie w zależności od parametrów w inny sposób oddziaływało na materiał oraz na miejsce, w którym występuje ubytek geometrii badanych próbek. Badania ubytku objętościowego wykonane dla napoiny konwencjonalnej naniesionej na stal Hardox 400 cechowały się podobnymi wartościami. Najmniejszym ubytkiem objętościowym cechowała się próbka badana w W0%, pH7. Wyniki wskazują na najwyższy dla badanej próbki ubytek na poziomie 0,09 mm, a przepływ masy również wskazuje na duże wartości zużycia dla miejsca początku nakładania napoiny konwencjonalnej. Największym ubytkiem objętości cechowała się próbka o wilgotności W10% oraz pH7, gdzie zmiana parametrów geometrycznych wskazuje na równomierne zużycie ściernie na powierzchni całej napoiny. Największy ubytek materiału wynosi 0,15 mm i występuje w dolnej części próbki. Ubytek objętości dla wariantu W10% oraz pH7 niezależnie od napoiny pozwala stwierdzić, że masa ścierna w przypadku wyższej wilgotności napiera na cały element oplatając go równomiernie. Wybrane wyniki zostały zaprezentowane na rysunku 5.15. oraz 5.16.

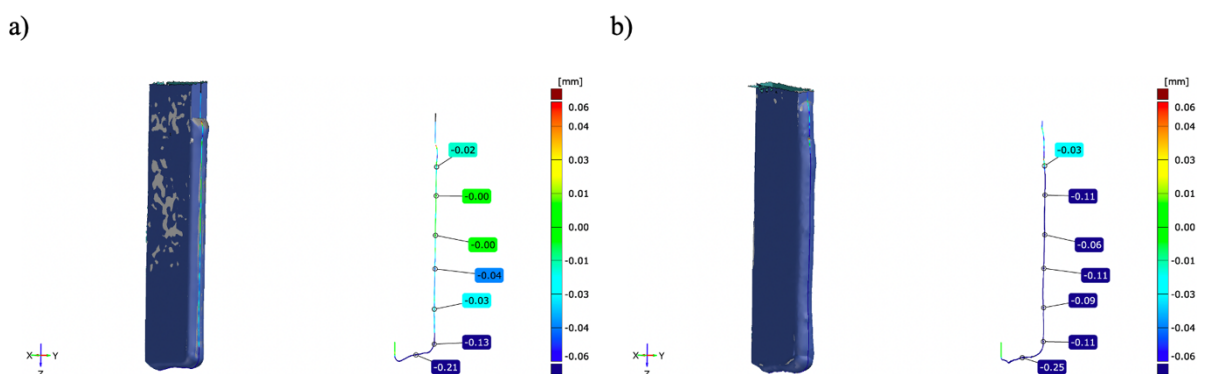


Rys. 5.15. Ubytek objętości dla próbki Hardox 400 z napojem laserową; a) W0%, pH7, b) W10%, pH7, c) W0%, pH10, d) W10%, pH10



Rys. 5.16. Ubytek objętości dla próbki Hardox 400 z napoiną konwencjonalną; a) W0%, pH7, b) W10%, pH7, c) W0%, pH10, d) W10%, pH10

Podczas badań z wykorzystaniem skanera 3D wykazano również wpływ kształtu naniesionej powłoki na przepływ masy ścierniej. Reprezentatywne wyniki dla próbki Raex 500 po napawaniu konwencjonalnym oraz napawaniu laserowym wskazują, na inny rozkład ubytku objętości dla W10%, pH7. Dla próbki z napoiną laserową zauważalna jest mniejsza zmiana parametrów geometrii niż w przypadku napoiny konwencjonalnej. Dla pierwszej z próbek ubytek występuje w dolnej części, natomiast w przypadku napoiny konwencjonalnej jest on równomierny na całej powierzchni czołowej próbki. Wskazuje to na istotny kształt naniesionej powłoki oraz jej wpływ na występowanie ubytków materiału na powierzchni. Wyniki zostały zaprezentowane na rysunku 5.17.



Rys. 5.17. Ubytek objętości dla próbki Raex 500 w przekroju inspekcyjnym dla W10%, pH7; a) napoina laserowa, b) napoina konwencjonalna

5.2.2. Porównawcza analiza struktury powierzchni próbek

W celu poznania mechanizmów zużycia należało wykonać analizę porównawczą powierzchni próbek przed oraz po badaniu tribologicznym. W ramach badania wykonano pomiary podstawowych parametrów związanych z profilem chropowatości powierzchni. Do pomiarów zostały wybrane następujące parametry:

1. R_a – średnie odchylenie arytmetyczną oznaczająca wartość różnic między wysokością szczytów a dolin na powierzchni.
2. R_z – wysokość profilu oznaczana jako różnica między najwyższym szczytem a najgłębszym punktem na powierzchni.
3. R_t – wysokość najwyższego szczytu na badanej powierzchni.
4. S_a – średnie odchylenie bezwzględne dla modułu różnicy między wysokością szczytów a dolin na powierzchni.
5. S_z – maksymalna wysokość powierzchni, w której nie uwzględniono dolin.

Analizując parametry chropowatości dla napoiny konwencjonalnej można stwierdzić, że po wykonanym teście tribologicznym chropowatość próbek wzrosła. Wskazuje to na wpływ ostrych krawędzi na ukształtowanie profilu chropowatości powierzchni oraz na istotny wpływ mikroskrawania podczas testu tribologicznego. Na podstawie badań zauważono również różnice w wartościach przed testem tribologicznym, wskazuje to na drobne, aczkolwiek istotne różnice w procesie powstawania napoiny. Wartości chropowatości w przypadku maszyn roboczych nie wpływają na zadanie robocze wykonywane przez nie. Wyniki chropowatości dla W10% pH10 wskazują na mniej ostry przebieg zużycia tribologicznego. Szczegółowe wyniki badań zaprezentowano w tabeli 5.2.

Tab. 5.2. Wartości parametrów chropowatości dla napoiny laserowej przed oraz po teście tribologicznym

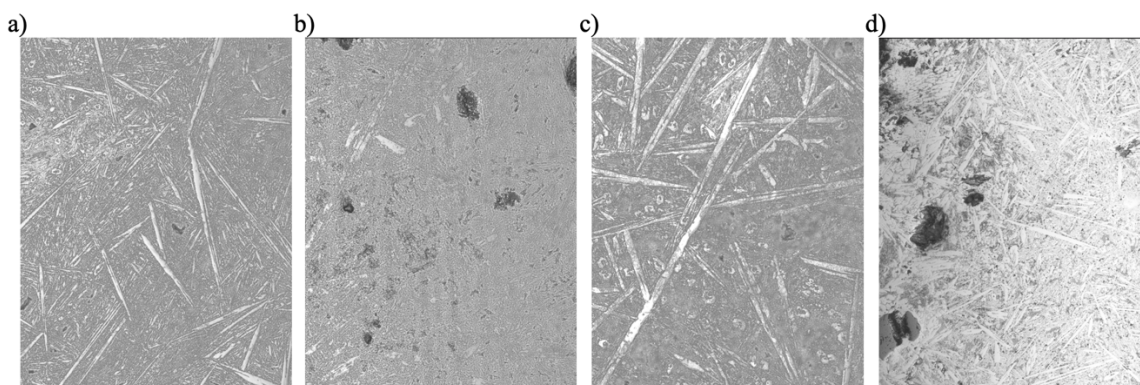
Napoina laserowa											
	Stal	Przed testem tribologicznym					Po teście tribologicznym				
		Rz	Rt	Ra	Sz	Sa	Rz	Rt	Ra	Sz	Sa
W0% pH7	28MnB5	14,26	76,94	2,64	217,93	11,92	20,40	18,30	3,78	72,76	2,12
	Raex 400	12,31	103,53	2,59	292,55	14,14	18,96	24,81	4,48	56,82	2,80
	Hardox 500	18,26	104,77	3,60	223,00	15,38	20,90	29,23	4,45	84,02	3,88
	Raex 500	16,27	120,68	2,91	189,06	7,18	35,00	30,04	4,97	133,54	3,47
	Hardox 400	19,00	113,51	3,77	185,49	7,02	38,04	18,05	8,54	119,15	4,53
W10% pH7	28MnB5	11,21	63,82	1,75	198,48	8,00	15,84	8,44	1,70	67,68	1,61
	Raex 400	12,36	68,58	2,25	135,91	8,87	15,48	5,70	1,95	67,53	1,30
	Hardox 500	28,88	158,21	6,71	252,67	16,47	81,58	32,98	6,92	452,47	5,64
	Raex 500	8,20	66,52	1,33	160,62	8,67	22,06	13,16	2,27	138,43	1,74
	Hardox 400	10,94	105,48	2,30	208,43	8,22	13,37	8,30	2,82	62,97	1,81
W0% pH10	28MnB5	11,45	78,15	1,83	148,55	7,03	44,83	46,81	9,67	99,85	8,47
	Raex 400	14,22	61,10	2,30	164,27	13,61	16,81	16,92	3,22	88,41	4,79
	Hardox 500	17,75	98,23	3,44	300,06	15,63	37,17	33,07	8,53	138,06	6,16
	Raex 500	10,39	88,69	2,09	143,26	8,88	18,21	26,24	3,05	99,83	4,04
	Hardox 400	19,00	100,37	3,34	167,82	7,05	23,85	34,76	4,80	102,59	3,92
W10% pH10	28MnB5	31,60	145,10	7,24	302,59	8,57	32,39	49,03	5,67	43,80	0,78
	Raex 400	21,71	107,84	4,56	215,14	14,34	15,37	13,33	2,29	63,77	2,20
	Hardox 500	19,29	114,89	4,18	230,68	15,50	32,65	29,04	7,04	78,82	5,38
	Raex 500	12,65	63,58	2,35	206,08	10,54	11,98	6,93	2,41	31,56	1,57
	Hardox 400	11,05	77,45	2,35	150,43	6,36	23,48	34,49	4,67	33,39	0,35

Pomiary chropowatości zostały również wykonane dla napoiny konwencjonalnej, a na ich podstawie można wykazać podobne zależności jak w przypadku napoiny laserowej. Stwierdzono również, że próbki o niższej wartości chropowatości przed testem tribologicznym mogą wykazywać większe wzrosty podstawowych parametrów profilu chropowatości po wykonanym teście. Może to być związane z mikrotwardością powstałej warstwy oraz jej odpornością na zużycie ściernie. Wyniki profilu chropowatości wskazują na różne właściwości w zależności od materiału, na który zostały naniesione. Szczegółowe wyniki badań zaprezentowano w tabeli 5.3.

Tab. 5.3. Wartości chropowatości dla napoiny konwencjonalnej przed oraz po teście tribologicznym

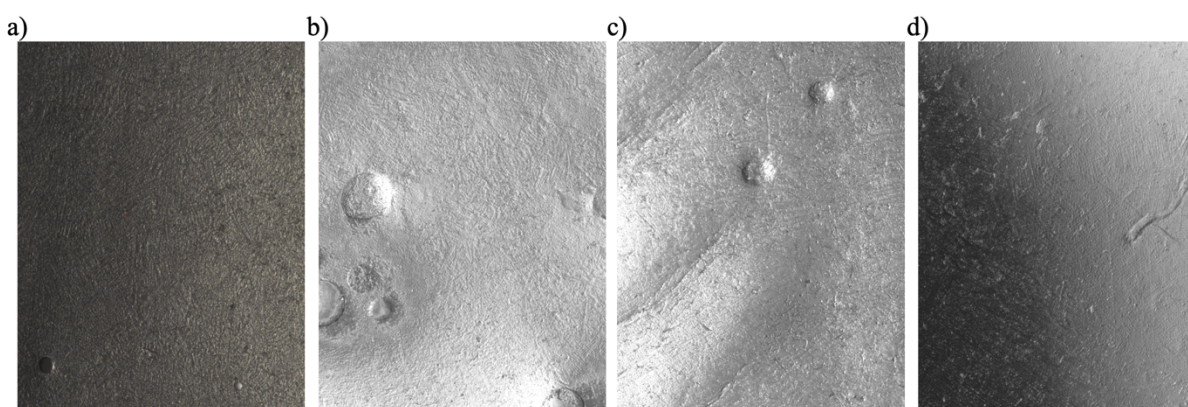
Napoina konwencjonalna											
	Stal	Przed testem tribologicznym					Po teście tribologicznym				
		Rz	Rt	Ra	Sz	Sa	Rz	Rt	Ra	Sz	Sa
W0% pH7	28MnB5	2,39	1,55	0,32	8,36	0,23	61,42	123,89	9,37	152,83	4,13
	Raex 400	21,44	20,96	4,12	135,53	4,27	37,84	81,90	4,95	105,73	4,23
	Hardox 500	12,29	3,49	1,34	56,06	0,57	31,17	86,67	4,80	123,30	2,98
	Raex 500	4,60	4,52	0,61	11,25	0,58	27,15	40,13	3,03	48,19	2,37
	Hardox 400	58,78	125,19	12,26	261,24	8,84	21,01	36,82	2,88	50,99	2,52
W10% pH7	28MnB5	14,41	5,38	1,39	75,79	0,54	23,01	40,84	3,28	70,83	2,73
	Raex 400	16,87	5,70	2,74	57,80	1,08	33,54	72,65	3,51	94,17	3,34
	Hardox 500	11,75	4,78	1,39	56,62	0,64	31,70	77,23	5,27	132,64	2,81
	Raex 500	15,56	19,71	3,42	74,48	2,24	60,27	100,47	6,65	164,06	4,33
	Hardox 400	22,71	14,52	3,71	85,58	1,48	62,40	108,36	12,53	138,19	6,72
W0% pH10	28MnB5	16,59	23,92	3,15	91,04	2,04	77,17	161,98	15,97	183,83	11,64
	Raex 400	21,38	11,47	4,85	60,81	3,05	88,42	187,57	18,81	204,85	9,45
	Hardox 500	3,49	3,46	0,71	9,85	0,60	26,78	43,07	4,51	70,72	2,92
	Raex 500	34,19	12,94	6,70	134,85	2,26	34,10	52,10	6,87	80,50	4,69
	Hardox 400	5,25	2,77	0,38	21,83	0,36	33,10	130,34	4,90	141,48	5,07
W10% pH10	28MnB5	6,09	5,33	1,29	21,94	1,10	70,03	108,90	14,56	128,40	10,06
	Raex 400	3,90	3,52	0,55	10,67	0,50	103,83	215,25	17,52	242,70	5,75
	Hardox 500	2,97	2,89	0,78	13,08	0,62	54,32	102,81	7,51	128,38	5,16
	Raex 500	5,02	5,15	1,02	13,71	1,04	37,87	53,22	5,58	77,25	4,08
	Hardox 400	6,55	3,97	0,58	21,09	0,47	64,08	214,41	6,67	288,12	4,12

Dla badanych elementów określono również mechanizmy występujące po teście tribologicznym elementów warstwie wierzchniej. Przybliżenia powierzchni próbek wskazują na różne mechanizmy wpływające na zużycie ściernie. Zdjęcia zostały wykonane z 1000 – krotnym powiększeniem. Dla reprezentatywnego przykładu stali Hardox 500 z napoiną konwencjonalną oraz laserową można stwierdzić, że zagłębienia powstałe podczas testu w medium ściernym o parametrach W0%, pH7 powstały na skutek mikrorysowania na powierzchni o umiarkowanej długości. Na rysunku 5.15. można zauważyć różnice w zagłębieniu cząstki ścierniwa w materiale wraz przesuwaniem ścierniwa po powierzchni. Zauważalne są również małe wybicia w powierzchni wskutek punktowego działania sił kontaktowo-ściernych. Dla badań wykonanych z użyciem medium W0%, pH10 zauważane jest w większości jedynie punktowe działanie siły. Występujące rysy nie są głębokie oraz posiadają niewielką długość w porównaniu do uzyskanych wyników dla innych rodzajów medium ściernego. Kształt powstałych mikrorys jest nieuporządkowany. Dla wariantu z wykorzystaniem W10% oraz pH7 występują duże oraz głębokie rysy na powierzchni materiału, wskazujące na dużą wartość zagłębienia cząstek ścierniwa w napoinie. Powierzchnia po teście z W10% oraz pH10 wskazuje na połączenie procesu mikroskrawania i uderzeń cząstek ściernych. Powstałe rysy są grube, jednak krótkie i płytkie, w porównaniu dla wariantu W10% oraz pH7. Widoki otrzymanych powierzchni po badaniach zużycia zostały zaprezentowane na rysunku 5.18.



Rys. 5.18. Zdjęcia powierzchni próbek po wykonanym teście tribologicznym dla stali Hardox 500 wraz z napoiną konwencjonalną; a) W0%, pH7, b) W0%, pH10, c) W10%, pH7, d) W10%, pH10

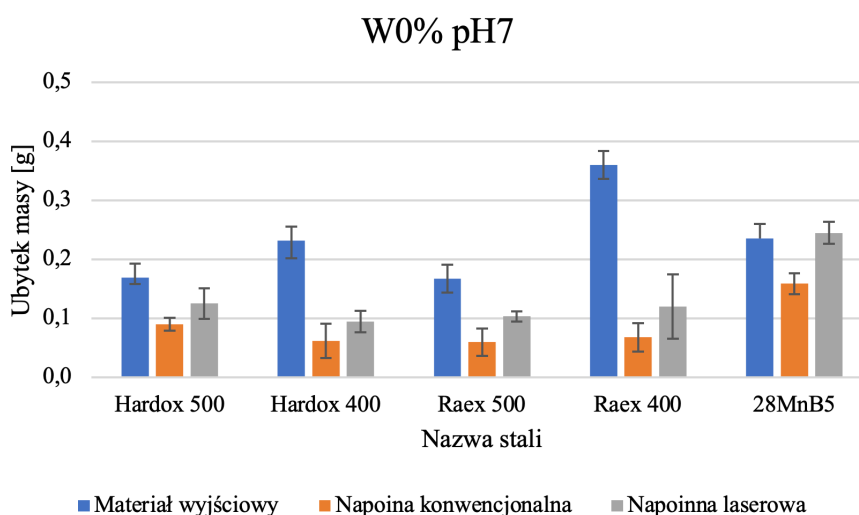
Kolejnym reprezentatywnym przykładem wyznaczonym do opisu mechanizmów zużycia na powierzchni elementów była stal Hardox 500 wraz z napoiną laserową. Na powierzchni powłoki zauważalne są mniejsze rysy powstałe wskutek oddziaływania zużycia ściernego niż w przypadku napoiny konwencjonalnej dla analogicznych warunków glebowej masy ścierniej. W przypadku wariantu medium ściernego W10% oraz pH10 zauważono wgłębienia ścierniwa wskazujące na powstawanie mikrobruzdowania. Powierzchnie badanych próbek posiadają wiele mikrorys o kierunku zgodnym z naporem masy ścierniej na element. Analiza zdjęć wykazuje wygładzenie krawędzi przy powstających wydzieleniach WC. W przypadku wariantu W10%, pH7 zauważono głębsze mikrorysy niż w przypadku W0%, pH7, co wskazuje na istotny wpływ wilgotności na mechanizm zużywania. Wyniki badań zostały zaprezentowane na rysunku 5.19.



Rys. 5.19. Zdjęcia powierzchni próbek po wykonanym teście tribologicznym dla stali Hardox 500 wraz z napoiną laserową; a) W0%, pH7, b) W0%, pH10, c) W10%, pH7, d) W10%, pH10

5.2.3. Analiza wyników badań tribologicznych

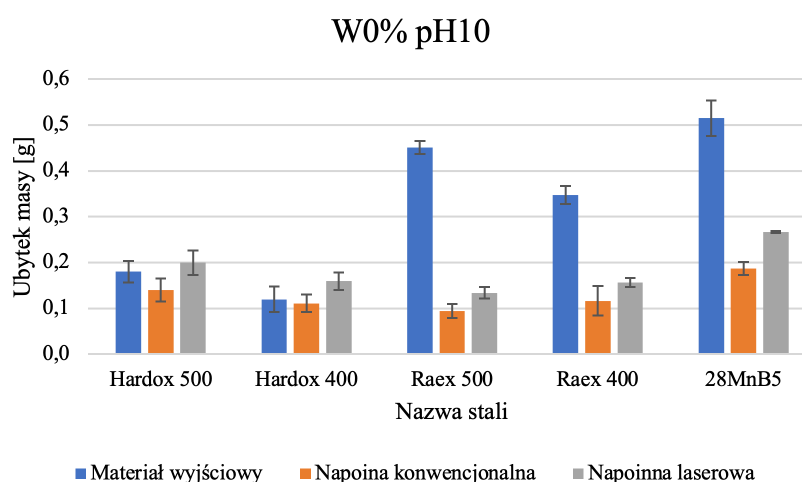
W celu wykonania pełnej analizy kształtowania odporności na zużycie ściernie powłok nakładanych cieplnie należało wykonać test tribologiczny. Test tribologiczny został wykonany zgodnie z opracowaną metodyką badań. Badania obejmowały 4 różne parametry masy ścierniej oraz 5 różnych materiałów wraz z dwiema powłokami nakładanymi cieplnie. Na rysunku 5.20. zostały zaprezentowane wyniki ubytku masowego dla wilgotności 0% oraz pH7. Analiza otrzymanych wyników wskazuje na największy ubytek masy dla stali Raex 400 w stanie wyjściowym (bez powłok), który wynosił 0,360 grama. Największym ubytkiem masy dla powłok cechuje się napoina laserowa naniesiona na stali 28MnB5 (0,245 grama), natomiast najmniejsza wartość ubytku posiada napoina konwencjonalna naniesiona na stal Raex 500, która wynosiła 0,06 grama. Wartości ubytku masy dla napoiny konwencjonalnej w przypadku stali Hardox 400, Raex 500 oraz Raex 400 kształtują się na podobnym poziomie. Napoina konwencjonalna naniesiona na stal 28MnB5 posiada 2 – krotnie większe zużycie niż dwiema w przypadku innych stali. Napoina laserowa cechowała się podobnymi zależnościami, w tym przypadku również powłoka naniesiona na stal 28MnB5 posiada 2 – krotnie wyższy ubytek masy niż w przypadku innych stali. Napina laserowa naniesiona na stal Hardox 400 posiadała najwyższą odporność na zużycie ściernie. Napawanie konwencjonalne cechowało się ok. 1,8 – krotnie mniejszym zużyciem w porównaniu do napawania laserowego oraz ok. 3,1 – krotnie mniejszym ubytkiem masy w porównaniu do materiałów bez naniesionych powłok.



Rys. 5.20. Ubytek masowy próbek dla wariantu masy ścierniej W0% oraz pH7

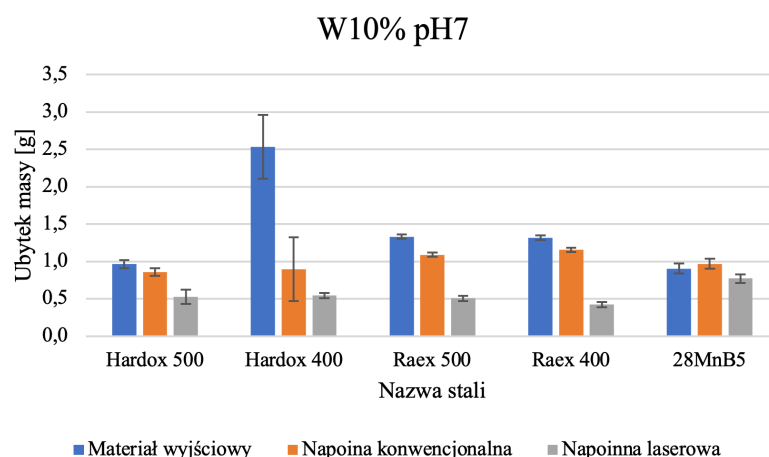
Na rysunku 5.21. zostały zaprezentowane wyniki ubytku masowego dla wilgotności 0% oraz pH10. Analiza otrzymanych wyników wskazuje na największy ubytek masy dla stali 28MnB5 w stanie wyjściowym (bez naniesionych powłok), który wynosił 0,515 grama.

Najwyższą odporność na ubytek masy posiadała stal Raex 500 wraz z naniesioną napoiną konwencjonalną. Napoina laserowa naniesiona na stal 28MnB5 posiadała najwyższą wartość zużycia dla wszystkich powłok badanych w danym medium ściernym, wynoszącą 0,267 grama. Badania wskazują na najmniejsze zużycie powłok w przypadku stali Raex 500 (0,094 grama). Napoina laserowa oraz konwencjonalna naniesiona na stal 28MnB5 wartościami ubytku masy przewyższa wartości ubytku dla stali Hardox 500 oraz 400 bez naniesionych powłok. Średnia odporność na zużycie napoin konwencjonalnych była wyższa o ok. 30% w stosunku do napoin laserowych niezależnie od stali oraz o 250% niższa niż stali bez naniesionych powłok. Wyniki badań zostały zaprezentowane na rysunku 5.22.



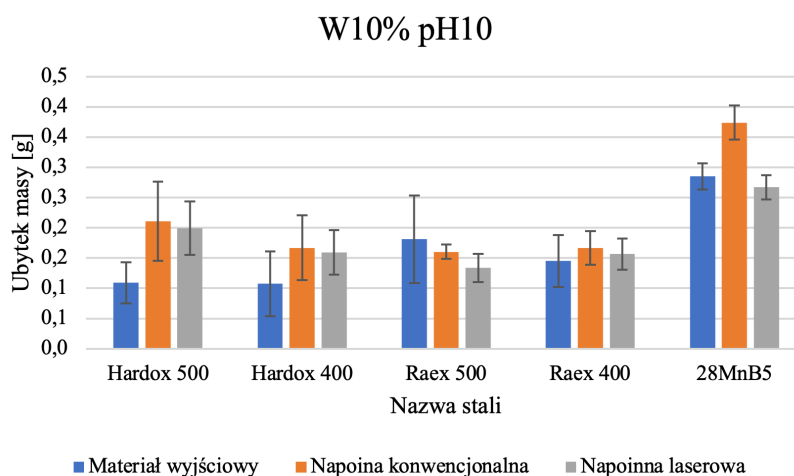
Rys. 5.22. Ubytek masowy próbek dla wariantu masy ścierniej W0% oraz pH10

Analiza odporności na zużycie ściernie dla wariantu wilgotności W10% oraz pH7 wskazuje na najwyższy ubytek masy dla stali Hardox 400 bez naniesionej powłoki cieplnej, wynoszący 2,533 grama. Wyniki badań dla tego eksperymentu pokazują na wyższą odporność na zużycie ściernie napoiny laserowej. Ubytek masy dla napoiny konwencjonalnej jest nieznacznie niższy niż w przypadku materiału bez naniesionych powłok. W przypadku stali 28MnB5 wartość ubytku masy dla stali bez napoin była niższa niż w przypadku z naniesioną napoiną konwencjonalną. Największą dysproporcją cechuje się stal Hardox 400, gdzie różnica między napoina laserową a materiałem bez napoin jest 5 – krotna na korzyść obrabianej warstwy wierzchniej. Uśredniona wartość zużycia napoiny laserowej w badanych warunkach masy wynosi 0,55 grama. Wartość ubytku masy dla napoiny konwencjonalnej jest o 80% wyższa od wartości dla napoiny konwencjonalnej, natomiast dla stali w stanie wyjściowym jest wyższa o 280%. Na rysunku 5.23. zaprezentowano wyniki badań ubytku masowego dla wariantu W10%, pH7.



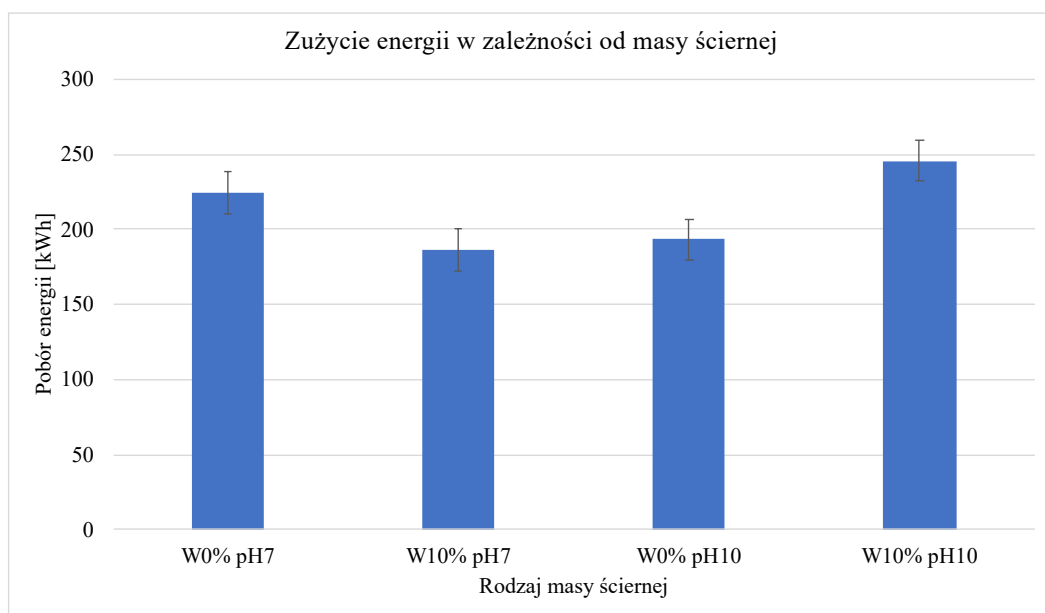
Rys. 5.23. Ubytek masowy próbek dla wariantu masy ścierniej W10% oraz pH7

Zużycie ściernie dla medium o parametrach W10% oraz pH10 wskazują na wyrównany ubytek masy różnych wariantów stali. Jedynie w przypadku stali Raex 500 powłoki nakładane cieplnie wpłynęły na zmniejszenie zużycia ściernego, a w pozostałych przypadkach materiał bazowy cechował się wyższą odpornością na zużycie ściernie niż stale z naniesionymi powłokami. Najwyższym ubytkiem masy cechowała się stal 28MnB5 i wynosił on 0,285 grama. Jej wartości były 2 – krotnie wyższe niż w przypadku pozostałych stali. Najwyższa różnica w ubytku masy występowała dla stali Hardox 500, gdzie wartość zużycia dla stali w stanie wyjściowym była 2 – krotnie niższa niż dla stali z wykonaną napoiną konwencjonalną, wynosiła ona 0,107 grama. Średnie wartości ubytku masy dla stali w stanie wyjściowym były o 3% niższe niż dla napoiny laserowej oraz o 13% niższe niż w przypadku napoiny konwencjonalnej. Wyniki masowego zużycia próbek dla wariantu W10%, pH10 zostały zaprezentowane na rysunku 5.24.



Rys. 5.24. Ubytek masowy próbek dla wariantu masy ścierniej W10% oraz pH10

Dodatkowo podczas testu tribologicznego w zależności od rodzaju masy ścierniej wyznaczony został pobór energii. Wyniki wskazują, że najniższy pobór energii elektrycznej jest dla wariantu W10%, pH7 i wynosi on 186 kWh, jest to o 3% mniej niż w wariacie W0%, pH10. Najwyższym poborem mocy cechowały się badania w medium W10%, pH10. Przykładowe wyniki zostały zaprezentowane na rysunku 5.25.



Rys. 5.25. Zależności poboru mocy od masy ścierniej w przypadku laserowania

Podczas badań tribologicznych weryfikowany został dodatkowo materiał ścierny oraz jego zmiany kształtu w zależności od parametrów masy ścierniej. Pierwszym badaniem, które zostało wykonane to ocena zmiany kształtu cząstek w zależności od parametrów masy ścierniej. Do analizy stopnia obtoczenia ziaren kwarcu w analizowanych próbkach zaimplementowano metodę stosowaną w sedimentologii na potrzeby interpretacji genetycznych osadów czwartorzędowych.

Badanie stopnia obtoczenia ziaren kwarcu przeprowadzono na reprezentatywnej liczbie 450-600 ziaren w poszczególnych próbkach. Badanie ziaren kwarcu frakcji 1,4-2,0 mm pod lupą binokularną polegało na przyporządkowaniu każdego analizowanego ziarna do trzech klas obtoczenia: kanciaste (K), częściowo obtoczone (CO) i obtoczone (O). Dla analizowanych próbek wyliczono współczynniki obtoczenia:

$$W_o = (K+2CO+3O)/N \quad (5.1)$$

gdzie:

K – ziarna kanciaste,

CO – ziarna częściowo obtoczone,

O – ziarna obtoczone,

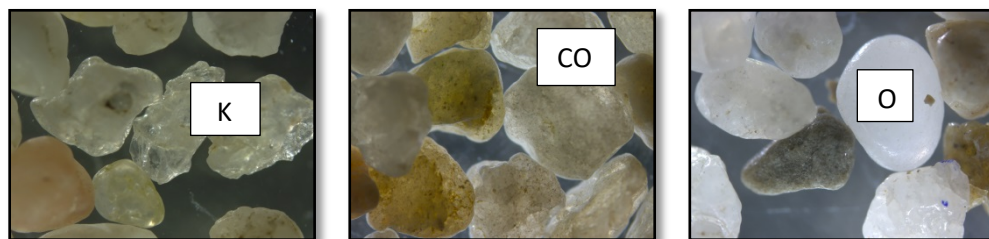
N – całkowita liczba przeanalizowanych ziaren.

W_o dla analizowanych próbek przedstawia się następująco:

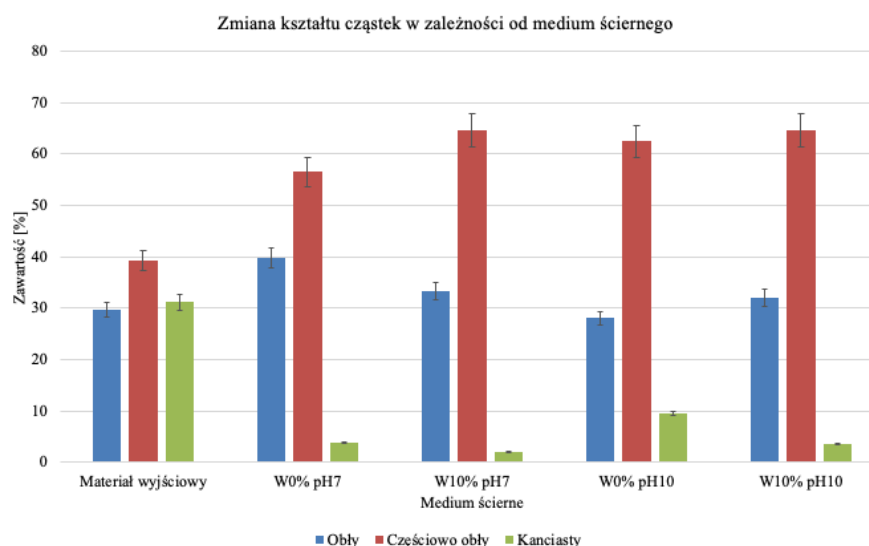
- Próbką przed obróbką – $W_o = 1,98$
- Próbką 2 – W10%, pH7 – $W_o = 2,32$
- Próbką 3 – W0%, pH7 – $W_o = 2,31$
- Próbką 4 – W0%, pH10 – $W_o = 2,19$
- Próbką 5 – W10% ,pH10 – $W_o = 2,29$

Stopień obtoczenia rośnie wraz z wyższymi wartościami współczynnika W_o . Uzyskane wyniki wskazują na podobne wartości współczynnika obtoczenia ziaren kwarcu uzyskane w procesie obróbki piasku na mokro i sucho. Różnią się natomiast proporcje zawartości ziaren obtoczonych do częściowo obtoczonych. Ziaren obtoczonych jest więcej w próbce poddawanej obróbce na mokro. W przypadku próbek z podwyższonym pH, poddawanych obróbce zarówno na sucho, jak i na mokro, współczynnik W_o jest nieco niższy w porównaniu do współczynnika obtoczenia próbek obrabianych na sucho i mokro – z pH7.

Uzyskane wyniki posłużyły do obliczenia zawartości procentowej poszczególnych klas oraz współczynnika obtoczenia W_o ziaren kwarcu. Kształt ziaren został zaprezentowany na rysunku 5.26. Wyniki stopnia obtoczenia zostały przedstawione na rysunku 5.27.



Rys. 5.26. Przykładowe ziarna kanciaste (K), częściowo obtoczone (CO), obtoczone (O)



Rys. 5.27. Wyniki stopnia obtoczenia ziaren

5.2.4. Podsumowanie wyników badań tribologicznych

Analizując wyniki badań tribologicznych można stwierdzić, że rodzaj medium ściernego wpływa na ubytek masy elementów w nim pracujących. Wartości zużycia występującego w różnych wariantach masy ściernego jest związany zarówno z wilgotnością jak i z wartością pH. Można zauważyć również w zależności od powłoki na różne ilości masowe zachodzącego procesu degradacji powierzchni. Badania pozwoliły na wyznaczenie szczegółowych wniosków oraz ilościowych danych potrzebnych do dalszej analizy w celu ochrony materiałów przez zużyciem ściernym.

6. ZAKOŃCZENIE

6.1. Wnioski i podsumowanie celów pracy

W rozprawie przedstawiono zagadnienia związane z kształtowaniem odporności na zużycie ściernie powłok nakładanych cieplnie. Zagadnienie jest szczególnie istotne ze względu na wymagania stawiane współczesnym elementom maszyn roboczych wykonujących prace w glebie. Podwyższenie odporności wpływa znacząco na realizację prac zarówno agrotechnicznych jak i budowlanych oraz kopalnianych. W ramach priorytetu ustalonego jako wyznaczenie powłoki najlepszej w aspekcie ograniczenia zużycia ściernego sformułowano cel naukowy pracy, którym było określenie wpływu powłok nakładanych cieplnie na stale trudnościeralne w celu zwiększenia odporności na zużycie ściernie. Aby zrealizować cel naukowy należało wyznaczyć cele cząstkowe:

1. Opracowanie koncepcji oraz zaprojektowanie i wykonanie stanowiska badawczego określenie wpływu warunków pracy na zużycie całkowite dla próbek z naniesionymi powłokami cieplnymi.
2. Poznanie przebiegów oraz wpływu czynników środowiska pracy na całkowite zużycie tych elementów
3. Określenie optymalnego w aspekcie ograniczenia zużycia ściernego rodzaju powłoki nanoszonej cieplnie

Podczas realizowania badań spełniono postawione cele cząstkowe. Na podstawie badań literaturowych opracowano stanowisko spełniające postawione kryteria w celu wykonania badań laboratoryjnych. Wyznaczono oraz poznano mechanizmy występujące w różnych środowiska ściernych oraz dla różnych powłok nakładanych cieplnie. Określono optymalny w aspekcie ograniczenia zużycia rodzaj powłoki. Wyniki przeprowadzonych prac badawczych pozwoliły na ukształtowanie odporności na zużycie ściernie powłok nakładanych cieplnie. Postawione rozważanie nt. aspektów tribologicznych można podzielić na te o charakterze poznawczym, utylitarnym oraz wnioski do zastosowań komercyjnych.

Wnioski poznawcze

1. Określono optymalną powłokę dla różnych wariantów medium ściernego. Dla warunków medium ściernego W0% oraz pH7 najwyższą odpornością cechuje się stal Raex 500 wraz z naniesioną napoiną konwencjonalną. W przypadku stali 28MnB5 naniesiona powłoka nie wpłynęła na podwyższenie odporności na zużycie ściernie.
2. Dla warunku W0% pH10 najlepszą powłoką, która wpłynęła na podwyższenie odporności na zużycie ściernie była ponownie stal Raex 500 z napoiną

konwencjonalną. W przypadku tego medium ściernego naniesienie powłoki dla stali Raex 400, Raex 500 oraz 28MnB5 w istotny sposób zmniejszyło zużycie ściernie o ok 50% w porównaniu do stali bez naniesionej powłoki cieplnej.

3. W warunkach podniesionej wilgotności (W10%) oraz obojętnego pH (7) występowały najwyższe ubytki masy badanych elementów. Warunki te pozwoliły zaobserwować znaczącą poprawę w odporności dla stali Hardox 400. Najlepszą powłoką nakładaną cieplnie w przypadku takich warunków jest stal Raex 400 wraz z naniesioną napoiną laserową, dla której wartość zużycia jest ok. 13% niższa niż w przypadku innych napoin laserowych.
4. Dla ostatniego wariantu masy ścierniej (W10%, pH7) wykazano, że powłoki nie wpływają w znaczący sposób na obniżenie odporności na zużycie ściernie i ich nanoszenie nie wpływa pozytywnie na wartość ubytku masy.
5. Analiza pomiarów mikrotwardości w przypadku napoin oraz materiału rodzimego wykazała, że wraz z oddalaniem się od nałożonej powłoki mikrotwardość maleje. Najwyższą mikrotwardością cechowała się napoina konwencjonalna naniesiona na stal Raex 500, ma to odniesienie do zużycia w W0%, pH7 oraz W0%, pH10. Oznacza to, że naniesiona powłoka sprawdza się w przypadku pracy w środowisku o niskiej wilgotności. Mikrotwardość napoiny laserowej w przypadku stali Hardox 500 nie miała wpływu na wartości zużycia. Materiał rodzimy, który posiadał najniższą wartość mikrotwardości jedynie w przypadku W10% oraz pH10 cechował się najniższym ubytkiem masy.
6. Analiza chropowatości pozwoliła zaobserwować wzrost nierówności powierzchni po teście tribologicznym, oraz pozwoliła na wykazanie zależności pomiędzy niskim poziomem chropowatości przed testem do zwiększonych wyników chropowatości po teście tribologicznym.

Wnioski uytylitarne

1. Zaprezentowany sposób przeprowadzonych badań umożliwi zastosowanie stanowiska do wykonania praktycznych badań powłok z wykorzystaniem masy ścierniej o różnych właściwościach.
2. Wyniki badań pozwalają na określenie wpływu zwiększonego poziomu pH na zużycie ściernie.

3. Uzyskane wyniki zużycia tribologicznego pozwalają na wskazanie przydatnych informacji związanych z nanoszeniem powłok cieplnych oraz z kształtowaniem odporności na zużycie ściernie.

Wnioski komercyjne

1. Zaprezentowane badania pozwalają na przygotowanie odpowiednich materiałów oraz modyfikacji ich warstwy wierzchniej w zależności od rodzaju pracy jaki wykonuje element roboczy.
2. Otrzymane wyniki pozwolą na zastosowanie wybranej/dedykowanej powłoki w celu ograniczenia zużycia ściernego w maszynach roboczych.
3. Producenci narzędzi maszyn roboczych na podstawie wykonanych badań i uzyskanych wyników są w stanie dostosować materiały trudnościeralne do gleb i miejsca wykorzystania elementów.
4. Stanowisko badawcze może zostać wykorzystane w praktyce przemysłowej do wykonywania testów w firmach zajmujących się nanoszeniem powłok cieplnych.

6.2. Dalsze kierunki badań

Na podstawie przeprowadzonych prac badawczych można wyznaczyć kierunki dalszych badań związanych z tematem rozprawy:

1. Badania powłok nanoszonych cieplnie w zmiennych warunkach glebowych podczas jednego testu tribologicznego.
2. Poznanie dokładniejszych procesów panujących na powierzchni powłok z wykorzystaniem dokładnej analizy SEM w trakcie całego procesu zużycia.
3. Wyznaczenie przebiegów zużycia w czasie dla różnych wariantów medium ściernego i procesów modyfikacji warstwy wierzchniej próbek.
4. Analiza większej liczby zmiennych związanej z procesem nanoszenia powłok cieplnych oraz ich wpływu na ukształtowanie powierzchniowe napoiny.
5. Poznanie wpływu innych czynników zewnętrznych na zużycie tribologiczne powłok nakładanych cieplnie.

LITERATURA

- [1] Adamiec P., Dziubiński J.: Regeneracja i wytwarzanie warstw wierzchnich elementów maszyn transportowych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.
- [2] Affatato S., Brando D.: 1 - Introduction to wear phenomena of orthopaedic implants, *Wear of Orthopaedic Implants and Artificial Joints*, Woodhead Publishing Series in Biomaterials, 2013, s. 3-26.
- [3] Bartkowski D.: Kompozytowe warstwy powierzchniowe w układzie osnowa metaliczna – faza międzywęzłowa napawane laserowo na niskowęglowych stalach konstrukcyjnych. Rozprawa Doktorska. Poznań 2015.
- [4] Bhatti N. A., Pereira K., Wahub M. A.: Effect of stress gradient and quadrant averaging on fretting fatigue crack initiation angle and life, *Tribology International*, March 2019, vol. 131, s. 212-221.
- [5] Białczyk W., Cudzik A., Czarnecki J., Pieczarka K.: Analiza właściwości trakcyjnych w odmiennych technologiach uprawy, *Zeszyty naukowe Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu nr 552*, Wrocław 2007, s. 9 – 15.
- [6] Bosio F., Bassini E., Salazar C. G. O., Ugues D., Peila D.: The influence of microstructure on abrasive wear resistance of selected cemented carbide grades operating as cutting tools in dry and foam conditioned soil, *Wear*, 2018, vol. 394-395, s. 203-216.
- [7] Burakowski T., Wierzchoń T.: *Inżynieria powierzchni metali*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa 1995.
- [8] Burakowski T.: *Areologia. Podstawy teoretyczne*, Wydawnictwo Naukowego Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom, 2013.
- [9] Chern S. Y., Ta W. N., Horng J. H., Wu Y. S.: Wear and vibration behavior of ZDDP-Containing oil considering scuffing failure, *Wear*, 2018, vol. 478–479, 203923.
- [10] Ciszewski A.: *Ocena zużycia technicznego maszyn i urządzeń technicznych*, SliTMP, Warszawa 2008.
- [11] Dalcin R. L., De Menezes W. M., Oliveira F. L., da Silva C. H., das Eves J. C. K., Diehl C. A.T. S., Rocha A.: Improvement on pitting wear resistance of gears by controlled forging and plasma nitriding, *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 18, s. 4698-4713.

- [12] Dobrzański L. A., Dobrzańska-Dankiewicz A.D.: Obróbka powierzchni materiałów inżynierskich, Gliwice: International OCSCO World Press (Open Access Library, vol. 5), 2011.
- [13] Dobrzański L. A.: Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe: podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2006.
- [14] Dzięgielewski W.; Kowalczyk J.; Kulczycki A.; Madej M.; Ozimina D.: Tribochemical Interactions between Carbon Nanotubes and ZDDP Antiwear Additive during Tribofilm Formation on Uncoated and DLC-Coated Steel, *Materials*, 2020, vol. 13, 2409. <https://doi.org/10.3390/ma13102409> .
- [15] Franek F., Badish E., Kirchgasser M.: Advanced Methods for Characterisation of Abrasion/Erosion Resistance of Wear Protection Materials, *FME Transactions*, 2009, vol. 37(2) s. 61-70.
- [16] Garkunov D. N.: Tribotechnika, Moskwa 1989.
- [17] Gawdzińska K., Bryll K., Nagolska D.: Influence of heat treatment on abrasive wear resistance of silumin matrix composite castings, *Arch. Metall. Mater*, 2016, vol. 61 (1), s. 177–182. DOI: 10.1515/amm-2016-0031.
- [18] Gharahbagh Alavi E., Rostami J., Palomino A.M.: New soil abrasion testing method for soft ground tunneling applications, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2011, vol. 26, Issue 5, s. 604-613.
- [19] Hebda M., Wachal A.: Trybologia, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1980.
- [20] Hebda M.: Procesy tarcia, Smarowania i zużywania Maszyn, Wydawnictwo ITE, Warszawa 2007.
- [21] Hejwowski T.: Nowoczesne powłoki nakładane cieplnie odporne na zużycie ściernie i erozyjne, Politechnika Lubelska, Lublin 2013.
- [22] http://anitaptak.edu.pl/wp-content/uploads/2018/04/Biotribologia_w3_streszczenie.pdf(data dostępu 10.12.2022r).
- [23] https://agrel.pl/maszyny-rolnicze/palec-lemiesza-kopaczka-elewarowa?utm_source=shoper&utm_medium=shoper-cpc&utm_campaign=shoper-kampanie-google&shop_campaign=4612253705&gclid=CjwKCAjw36GjBhAkEiwAKwIWysVUzbOLgL5wm40dAUDV8_JeDtfNtnaXEEgfHQ6Ou-FSWAC3q_fm_BoCNgUQAvD_BwE (data dostępu 15.08.2022r).

- [24] <https://kh-kipper.pl/aktualnosci/nowa-zabudowa-kopalniana-kh-kipper/> (data dostępu 11.12.2022r).
- [25] <https://news.engineering.iastate.edu/2019/04/11/testing-performance-soil-equipment-an-opportunity-for-students-at-iowa-state/> (data dostępu 20.12.2021r).
- [26] <https://rokicki.pl/Pelna-oferta/Sprzet-uprawowy/Zeby-brony-wirnikowej/Zab-brony-aktywnej-prawy-L372-mm-pasujacy-do-Krone-KE0805.html> (data dostępu 13.04.2023r).
- [27] <https://roslerblog.com/2016/02/03/air-blasting-venturi/> (data dostępu 12.02.2023r)
- [28] <https://thermalprocessing.com/how-gears-fail/> (data dostępu 20.12.2022r.)
- [29] <https://wimio.pg.edu.pl/imikm/zaklad-kmimed/dzialalnosc-zakladu-kmiim/badania-naukowe-zkmiim> (data dostępu 15.11.2022r).
- [30] <https://www.ita-polska.com.pl/produccenci/bruker-alicon> (data dostępu 05.05.2022r).
- [31] <https://www.lincolnelectric.com/pl-PL/Products/Filler-Metals/Hardfacing> (data dostępu 15.05.2021r).
- [32] <https://www.machinerylubrication.com/Read/31928/adhesive-wear> (data dostępu 12.01.2023r) .
- [33] <https://www.tribonet.org/wiki/spalling-damage/> (data dostępu 25.08.2022r.).
- [34] https://www.ukw.edu.pl/download/33050/07_01_2017_ukw_grant_przedwdrozeniowy_poster_informacyjny_w_urbaniak.pdf (data dostępu 20.02.2023r).
- [35] Jacques K., Myrtht N., Dixit S., Berman D., Berkebile S.: Method for tribological experiment to study scuffing initiation on AISI 52100 steel and hard ceramic coatings, *Tribology International*, 2021, vol. 160, 107001.
- [36] Jakubowicz A., Orłoś Z.: *Wytrzymałość materiałów*, Wydawnictwo Naukowo-techniczne, Warszawa 1978.
- [37] Kacalak W., Rypina Ł., Królikowski T.: Analiza wpływu cech stereometrycznych ziaren ściernych na naprężenia, odkształcenia i przemieszczenia materiału w strefie mikroskrawania, *Mechanik*, nr 8-9, 2015 s. 139-145.
- [38] Kalandyk B., Głownia J.: Ocena aparatu millera do określania odporności na ścieranie staliwa konstrukcyjnego, *Archives of Foundry*, 2001, vol. 66/2.
- [39] Kałużny J., Merkisz J., Kempa K., Gapiński B., Wróblewski E., Stepanenko A., Al-Karawi M.: Friction reducing performance of carbon nanotubes covered pistons in internal combustion engines – engine test results, *Combustion Engines*, 2018, 172(1), 14-24, <https://doi.org/10.19206/CE-2018-102>.

- [40] Kałużny J., Waligórski M., Szymański G. M., Merkisz J., Różański J., Nowiski M., Al-Karwi M., Kempa K.: Reducing friction and engine vibrations with trace amounts of carbon nanotubes in the lubricating oil, *Tribology International*, 2020, vol. 151, 106484.
- [41] Kimpel A.: Napawanie i natryskiwanie cieplne, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
- [42] Kinal G., Paczkowska M.: Wpływ eksploatacji na wybrane właściwości warstwy wierzchniej szyn oraz obręczy kół tramwajowych, *Tribologia*, 2015, vol. 5, s. 41 – 51.
- [43] Kleszczynski A., Lawrowski Z.: Badania odporności na zużywanie ściernie niektórych materiałów. In: *Materiały XXII Jesiennej Szkoły tribologicznej*, Gliwice – Ustroń, Wrzesień 1998, s. 109-114.
- [44] Kolman R.: Mechaniczne wzmacnianie powierzchni maszyn, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1965.
- [45] Kołakowski K. J.: Badania intensywności zużycia stali stosowanych na elementy robocze obrabiające glebową masę ścierną, *Rozprawa Doktorska*, UWM, Olsztyn 2015.
- [46] Korczewski Z.: Identyfikacja uszkodzeń tłoków silników okrętowych metodami endoskopowymi w eksploatacji, *Postępy nauki i techniki* 2011, vol. 11, s. 49-62.
- [47] Kostencki P., Stawicki T., Królicka A., Sędlak.: Wear of cultivator coulters reinforced with cemented-carbide plates and hardfacing, *Wear*, 2019, vol. 438–439, 203063.
- [48] Kostencki P.: Wskaźnik liniowy alternatywą dla masowego wskaźnika przy ocenie zużycia lemieszki płużnych, *Journal of Research and Application in Agricultural Engineering* 53, 2008, s. 35-39.
- [49] Kruk M. S., Synowiec A.: *Wiedza i Technologia Motorem Gospodarki* 2017, Omnibuss, Częstochowa 2017.
- [50] Kulka, M.; Mikołajczak, D.; Makuch, N.; Dziarski, P.; Przystacki, D.; Panfil-Pryka, D.; Piasecki, A.; Mikłaszewski, A. Laser Surface Alloying of Austenitic 316L Steel with Boron and Some Metallic Elements: Microstructure. *Materials*, 2020, vol.13, 4852. <https://doi.org/10.3390/ma13214852>
- [51] Kumar A., Sharma A., Goel S.K.: Effect of heat treatment on microstructure, mechanical properties and erosion resistant of cast 23-8-n nitronic steel, *Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 637 (18) s. 56-62.
- [52] Legutko S., Nosal S.: *Kształowanie technologicznej i eksploatacyjnej warstwy wierzchniej części maszyn*, Ośrodek Wydawnictw Naukowych, Poznań 2004.

- [53] Lemecha M., Napiórkowski J., Ligier K.: Analiza zużywania elementów roboczych z napawaną warstwą wierzchnią, *Problemy w inżynierii mechanicznej*, Olsztyn 2021, s. 105 -123.
- [54] Lemecha M.: Wpływ właściwości napawanych warstw wierzchnich na zużycie w glebowej masie ścierniej, *Rozprawa doktorska*, 2021, Olsztyn.
- [55] Lewartowski Z.: *Tribologia. tarcie, zużywanie i smarowanie*, Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN. 1993.
- [56] Li W., Huang Y., Fu B., Cui Y., Dong S.: Fretting damage modeling of liner-bearing interaction by combined finite element – discrete element method, *Tribology International*, 2013, vol. 61, s. 19-31.
- [57] Liu X., Zhao W., Cong T., Wang S., Wang X., Wang W.: The effects of hardness on the spalling property of railway wheel steel, *Wear*, 2022, vol. 504–505, 204429.
- [58] Łuczak A., Mazur T.: *Fizyczne starzenie elementów maszyn*, WNT, Warszawa 1981.
- [59] Mikołajczyk J.: *Tribotestery. Budowa i Przeznaczenie*, Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej im. Stanisława Staszica w Pile, Piła 2009.
- [60] Molenda J.: Rola procesów tribochemicznych w kształtowaniu właściwości przeciwzużyciowych środków smarowych, *Napędy i Sterowanie*, 2018, vol. 1, s. 80-86.
- [61] Moreno M., Andersson J. M., M'Saoubi R., Kryzhanivskyy V., Johansson-Joesaar M., Johnson L.J.S., Oden M., Rogstrom L.: Adhesive wear of TiAlN coatings during low speed turning of stainless steel 316L, *Wear*, 2023, vol. 524–525, 204838.
- [62] Muhandes H., Kalácska Á., Székely L., Keresztes R., Kalácska G.: Abrasive Sensitivity of Engineering Polymers and a Bio-Composite under Different Abrasive Conditions. *Materials*, 2020, vol. 13, 5239. <https://doi.org/10.3390/ma13225239>.
- [63] Mychajło P., Kindrachuk M.: *Tribologia*, Politechnika Lubelska, Lublin 2017.
- [64] Nalbant M., Palali T.: Effects of different material coatings on the wearing of plowshares in soil tillage, *Turk Tarim ve Ormancilik Dergisi/Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, vol. 35(3), s. 215-223, DOI: 10.3906/tar-0904-30.
- [65] Napiórkowski J., Analiza właściwości glebowej masy ścierniej w aspekcie oddziaływania zużyciowego, *Tribologia*, 2010, nr 5, s. 53-61.
- [66] Napiórkowski J., Lemecha M., Rosiak M.: An Analysis of impact of soil mass pH on the wear process of steel, *MATEC Web of Conferences* 94, 2017, DOI: 10.1051/matecconf/20179405004.
- [67] Napiórkowski J., Szczyglak P., Kołakowski K.: Analiza geometrii ziaren glebowej masy ścierniej, *Inżynieria Rolnicza*, 2013, Z4. (147), s. 237 -247.

- [68] Napiórkowski J.: Badania i modelowanie procesów zużywania ściernego i zmęczeniowego. Wydawnictwo UWM, Olsztyn 2014.
- [69] Napiórkowski J.: Wpływ struktury tworzywa na intensywność zużywania w glebie gliniastej, Zeszyty Problemów Postępów Nauk Rolniczych, 1998, vol. 454, s. 127 -134.
- [70] Napiórkowski J.: Zużyciowe oddziaływanie gleby na elementy robocze narzędzi rolniczych, Inżynieria Rolnicza, 2005, nr 12 (rozprawa habilitacyjna).
- [71] Nazewnictwo Warstwy Wierzchniej. Instytut Obróbki Skrawaniem. „Materiały instruktażowe”, nr 78, 1968.
- [72] Nosal S.: Zużywanie a zacieranie adhezyjne skojarzeń ślizgowych, Tribologia, 2007, nr 3, s. 29-38.
- [73] Nosal S.: Analiza pojęć związanych z zacieraniem adhezyjnym. Nowa definicja zacierania, Motrol, t. 11C, Lublin 2009, s. 141-150.
- [74] Nosal S.: Tribologia. Wprowadzenie do zagadnień tarcia, zużywania i smarowania. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2012.
- [75] Nowicki B., Stefko A., Szulc S.: Obróbka Powierzchniowa. Nadawaniem częściom maszyn własności eksploatacyjnych, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1970.
- [76] Oczóś K.E., Lubimov V.: Struktura geometryczna powierzchni, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2003.
- [77] Odabas D.: Effects of load and speed on wear rate of abrasive wear for 2014 Al alloy, Materials Science and Engineering, 2018, vol. 295, 012008.
- [78] Ordon M., Bonek M.: Charakterystyka zmian mikrostruktury i własności napoin wykonywanych wiązką elektronów i materiałem dodatkowym w postaci drutu LNM307, Zeszyty studenckich kół naukowych, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Zeszyt nr 4, Gliwice 2017.
- [79] Paczkowska M., Selech J., Piasecki A.: Effect of surface treatment on abrasive wear resistance of seeder couler flap, Surface review and Letters, 2016, vol. 23(3).
- [80] Pan. J., Zhuo Z., Zhang Q., Zheng Q., Yan Q.: Friction and wear mechanisms for single crystal GaN based on an electro-Fenton enhanced chemical reaction, Wear, 2022, vol. 498–499.
- [81] Pellegrin D., Carbin N.D., Baldoni G., Trrance A.A., Diamond particle shape: Its measurement and influence in abrasive wear, Tribology International, 2009, vol. 42(1), 2009, s. 160-168.

- [82] Płaza S., Margielewski L., Celichowski G.: Wstęp do tribologii i tribochemia. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 2005.
- [83] Płaza S.: Fizykochemia procesów tribologicznych, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 1997.
- [84] PN-EN ISO 14688-2:2018-05P.
- [85] Punckt C., Bolscher M., Rotermund H. H., Mikhailov A.S., Organ L., Budiansky J.R., Hudson J.L.: Sudden Onset of Pitting Corrosion on Stainless Steel as a Critical Phenomenon, *Science*, 2004, vol. 305, s. 1133-1136 doi:10.1126/science.1101358.
- [86] Rani A., Singh .P., Singh J., Patel V., Choudhary M.K.: Abrasive wear behavior of EN42 steel used in agricultural discs in field conditions. *Engineering Failure Analysis*, 2022, vol. 142, 106789.
- [87] Renz A., Khader I, Kailer A.: Tribochemical wear of cutting-tool ceramics in sliding contact against a nickel-base alloy. *Jurnal of the European Ceramic Society*, 2016, vol. 36, Issue 3, s. 705-717.
- [88] Romek D., Selech J., Berdychowski M., Kęska W.: Laboratory test of the use of belt conveyor elements for moulding sands, *Tribologia nr 5*, 2018, s. 95-100.
- [89] Romek D., Ulbrich D., Selech ., Garsecki J., Włodarczyk K., Kowalczyk J., Staszak Ż., Marcinkiewicz J.: Assessment of quality and cost of manufacturing agricultural machinery made by FDM method, *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 2018, vol. 63(1), s. 75-78.
- [90] Sagraloff N., Winkler K. J., Tobie T., Stahl K., Folland Ch., Asam T.: Investigations on the Scuffing and Wear Characteristic Performance of an Oil Free Water-Based Lubricant for Gear Applications, *Lubricants*, 2021, 9(3), 24; <https://doi.org/10.3390/lubricants9030024>.
- [91] Sanchez-Huerta D., Loperz-Perrusquia N., Garcia E., Hielerio-Cruz I., Flores-Martinez M., Donu-Ruiz M.A., Muhl S.: Micro-abrasive wear behavior by the ball cratering technique on AISI L6 steel for agricultural application, *Materials Letters*, 2021, vol. 283, 128904.
- [92] Selech J.: Mechanical and abrasive wear process in the ring to ring tribological system in the modelling condition, *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 2007, vol. 52(1).
- [93] Selech J.: Ocena wpływu stanu warstwy wierzchniej materiału na składowe procesu zużycia ścierno-korozyjnego, *Rozprawa doktorska*, 2005, Poznań.

- [94] Senatorski J., Sierpecka B.: Zapobieganie tribokorozji przez obróbki cieplnochemiczna. *Tribologia*, 2003, vol. 5, s 273-282.
- [95] Shackelford, J. F.: *Introduction to materials science for engineers (8)*, Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2014 – 148.
- [96] Shipway P. H., Nahvi S. M., McCartney D.G.: Effects of particle crushing in abrasion testing of steels with ash from biomass-fired powerplants, *Wear*, 2009, vol. 267, s. 34-42.
- [97] Singh J., Thakur L., Angra S.: An investigation on the parameter optimization and abrasive wear behaviour of nanostructured WC-10Co-4Cr TIG weld cladding, *Surface and Coatings Technology*, 2020, vol. 386, 125474.
- [98] Singla S., Shibe V., Grewal J. S.: Performance Evaluation of Hard Faced Excavator Bucket Teeth against Abrasive Wear Using MMAW Process, *International Journal of Mechanical Engineering Applications Research*, 2011, vol. 02 (2).
- [99] Skrzypczak A., Rutkowski S., Kasińska J.: Napawanie warstw trudnościeralnych na stali Hardox metodami OA i MMA, *Zeszyty naukowe politechniki Rzeszowskiej 298, Mechanika*, 2018, vol. 90, s. 213-222.
- [100] Spadło S., Gajewski T., Krajcarz D., Brabik Z.: Studies upon the effect of abrasive grain size on technological quality during the AWJ cutting of S235JR steel, *Mechanik*, 2018, vol. 90(11), s. 994-996.
- [101] Stachowiak A., Wieczorek A. N., Nuckowski P., Staszuk M., Kowalski M.: Effect of spheroidal ausferritic cast iron structure on tribocorrosion resistance, *Tribology International*, 2022, vol. 173, 107688.
- [102] Stawicki T., Kostencki P., Białoobrzaska B.: Roughness of Ploughshare Working Surface and Mechanisms of Wear during Operation in Various Soils. *Metals*, 2018, vol. 8, 1042, s. 1-18.
- [103] Sun. W., Song Q., Liu K., Liu X., Ye J.: The limit of adhesive debris retention: A case study using ultra-low wear Alumina-PTFE, *Wear*, 2022, vol. 496-497, 204274.
- [104] Szulc S., Stefko A.: *Obróbka Powierzchniowa Części Maszyn. Podstawy fizyczne i wpływ na własności użytkowe*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1976.
- [105] Tarasiuk W., Krupicz B.: Analiza właściwości materiałów stosowanych na płyty form cegły silikatowej, *Acta Mechanica et Automatica*, 2009, vol. 3 no. 1. s. 107.
- [106] Tenenbaum M. M., O widach, processach i mechanizmach abraziwnowo iznaszowania. w: *Długowieczności trzuszczia detale maszyn (5)*, Rosja 1990 , s. 202-215.

- [107] Ulbrich. D., Selech J., Romek D., Sieńkowski M., Włodarczyk K., Kowalczyk J., Staszak Ż., Marcinkiewicz J.: Analysis of the cost of regeneration of excavator buckets used for brown coal excavation, *Journal of research and applications in agricultural Engineering*, 2018, vol. 63.
- [108] Waligóra W., *Odporność na zmęczenie powierzchniowe stali łożyskowej poddanej obróbce laserowej*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1994.
- [109] Walker J.C., Jones H.G., Kamps T.J.: Dynamic pressure scuffing initiation of a grade 250 flake graphite cast iron, *Wear*, 2023, vol. 523, 204864.
- [110] Weresa E., Seweryn A., Szusta J., Rak Z.: Fatigue testing of transmission gear. *Eksplatacja i niezawodność – Maintenance and Reliability*, 2015; vol 17 (2), s 207–214, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2015.2.6>.
- [111] Wojciechowski W.: *Ocena napawalności stali stopowych*, Seria Mechanika, Monografia 219, Kraków 1997.
- [112] Zaborski S., Stechnij T., Poroś D.: Wpływ obróbki strumieniowo-ściernej na strukturę geometryczną powierzchni wybranych metali niezależnych, *Mechanik*, 2016, nr 8-9 DOI: 10.17814/mechanik.2016.8-9.257.
- [113] Zaleski K., Matuszak J., Zaleski R.: *Metrologia warstwy wierzchniej*, Politechnika Lubelska, Lublin 2018.
- [114] Zhai J., Guan Y., Zhao T., Liu Y., Chen F.: Modification of the surface layer model and establishment of the surface layer thickness model of pure copper, *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, vol. 89(3), s. 182-193.
- [115] Zhang G., Cui W., Peng., Pu J., Li J., Jin Z.: Effect of angular mismatch on tribocorrosion at taper-trunnion junction using a finite element model considering mechanical and chemical wear, *Tribology International*, 2023, vol. 184, 108477.
- [116] Zwierzycki W.: *Płyny eksploatacyjne do środków transportu drogowego: charakterystyka funkcjonalna i ekologiczna*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2006.