

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
WYDZIAŁ GÓRNICTWA, INŻYNIERII BEZPIECZEŃSTWA
I AUTOMATYKI PRZEMYSŁOWEJ

Mateusz WÓJCICKI

PRACA DOKTORSKA

**IDENTYFIKACJA SYNERGIZMU ODDZIAŁYWANIA CZYNNIKÓW
ŚRODOWISKA KOPALNIANEGO W ASPEKCIE OGRANICZENIA ZUŻYCIA
OGNIW ŁAŃCUCHOWYCH PRZENOŚNIKÓW ZGRZEBŁOWYCH**

Promotor

dr hab. inż. Andrzej Norbert WIECZOREK prof. PŚ

Opiekun zakładowy

dr inż. Krzysztof Nieśpiałowski

Gliwice, wrzesień 2025

SPIS TREŚCI

	Spis oznaczeń	5
1	WPROWADZENIE	13
2	UZASADNIENIE CELOWOŚCI PODJĘCIA TEMATU PRACY	17
3	CEL ZAKRES I TEZA PRACY	35
4	CHARAKTERYSTYKA GÓRNICZYCH ŁAŃCUCHÓW OGNIWOWYCH ORAZ PROCESU ICH WYTWARZANIA I EKSPLOATACJI	39
4.1	Górnice łańcuchy ogniowe	39
4.2	Zastosowanie łańcuchów ogniowych – przenośniki zgrzeblowe	45
4.3	Procesy produkcji górniczych łańcuchów ogniowych	50
4.4	Procesy eksploatacji łańcuchów	55
5	CHARAKTERYSTYKA PROCESU BADAWCZEGO	57
5.1	Charakterystyka stanowiska badawczego	62
5.2	Charakterystyka badań ustalających obciążenie układu badawczego	77
5.3	Charakterystyka wykorzystanych metod pomiarowych	82
6	IDENTYFIKACJA CZYNNIKÓW CHARAKTERYZUJĄCYCH WARUNKI ŚRODOWISKA GÓRNICZEGO W ASPEKCIE ODWZOROWANIA ICH NA ETAPIE BADAŃ STANOWISKOWYCH	91
6.1	Określenie własności materiałowych węzła tarcowego	93
6.2	Określenie wymuszeń mechanicznych węzła tarcowego	94
6.3	Charakterystyka ścierniwa mineralnego	101
6.4	Charakterystyka wód kopalnianych	111
7	BADANIA LABORATORYJNE	115
7.1	Badania szybkości zużycia korozyjnego pod wpływem wód kopalnianych	115
7.2	Badania korozyjności mieszaniny woda ścierniwo	118
7.3	Badania tribologiczne ścierniw mineralnych	121
8	WYNIKI EKSPLOATACYJNIE ZORIENTOWANYCH BADAŃ ZUŻYCIA OGNIW ŁAŃCUCHÓW GÓRNICZYCH	125
8.1	Wyniki badań dla Grupy I wariantów czynników środowiskowych	127

8.2	Wyniki badań dla Grupy II wariantów czynników środowiskowych	138
8.3	Wyniki badań dla Grupy III wariantów czynników środowiskowych	147
8.4	Analiza produktów zużycia	155
9	IDENTYFIKACJA ODDZIAŁYWANIA INTERAKCYJNEGO PROCESÓW WIELOCZYNNIKOWEGO ZUŻYWANIA SIĘ PRZEGUBÓW OGNIW ŁAŃCUCHOWYCH	159
9.1	Dotychczasowe modele zużycia wieloczynnikowego	159
9.2	Podział zużycia łańcuchów z uwagi na rodzaj środowiska i warunki pracy	160
9.3	Modele zużycia w nieruchomym przegubie ogni w łańcuchowych	162
9.4	Modele interakcyjne wewnątrzsystemowe środowiska górniczego suchego w warunkach przemieszczających się ogni w	167
9.5	Modele interakcyjne wewnątrzsystemowe środowiska górniczego suchego z wodą z układów zraszania w warunkach przemieszczających się ogni w	172
9.6	Modele interakcyjne wewnątrzsystemowe środowiska górniczego mokrego w warunkach przemieszczających się ogni w	178
9.7	Modele interakcyjne międzysystemowe w warunkach przemieszczających się ogni w	183
10	PODSUMOWANIE	195
10.1	Wnioski	199
10.2	Efekty wdrożeniowe pracy	200
10.3	Kierunki dalszych badań	203
	SPIS LITERATURY	205

SPIS OZNACZEŃ

A	–	powierzchnia próbki
A_d	–	amplituda zmian sił dynamicznych
A_{pr}	–	pole powierzchni reagującej z wodą kopalnianą podczas badania
$\bar{A}_d$	–	średnia amplituda wychyleń
a	–	wypadkowa będąca wynikiem oddziaływania dwóch lub większej liczby czynników
a_1	–	wartość odpowiadająca działaniu czynnika „1”
CR	–	szybkość korozji
$c(Cl^-)$	–	stężenie jonów chlorkowych
$c(HCO_3^-)$	–	stężenie jonów wodorowęglanowych
$c(HSO_4^{2-})$	–	stężenie jonów siarczanowych
$c(NO_3^-)$	–	stężenie jonów azotanowych
D_{pr}	–	średnica podziałowa gwiazdy
d_w	–	działka elementarna wagi
E_{kor}	–	potencjał korozyjny
EW	–	ekwiwalent wagowy
F_{pr}	–	siła pociągowa przenośnika zgrzeblowego
f_{n_max}	–	częstotliwość pojedynczego lokalnego wychylenia liczona po wartości maksymalnej
f_{n_min}	–	częstotliwość pojedynczego lokalnego wychylenia liczona po wartości minimalnej
$\bar{f}$	–	średnia częstotliwość lokalnych wychyleń pojedynczego przejazdu przenośnika
H_A	–	twardość ścierniwa
H_M	–	twardość metalu zużywanego
I_D	–	zużycie wynikające z oddziaływania zmiennej siły dynamicznej
I_K	–	zużycie korozyjne
$I_K^{DRY+H_2O}$	–	składowa zużycia wynikająca z oddziaływania korozyjnego wody z układów zraszania w nieruchomym przegubie ogniów łańcuchowych

I_K^{WET}	–	składowa zużycia wynikająca z oddziaływania korozyjnego wody kopalnianej w nieruchomym przegubie ogniów łańcuchowych
$I_{K+\dot{S}}^{DRY+H_2O}$	–	składowa zużycia wynikająca z oddziaływania korozyjnego mieszaniny ścierniwa i wody z układów zraszania w nieruchomym przegubie ogniów łańcuchowych
$I_{K+\dot{S}}^{WET}$	–	składowa zużycia wynikająca z oddziaływania korozyjnego mieszaniny ścierniwa i wody kopalnianej w nieruchomym przegubie ogniów łańcuchowych
I_M^{DRY}	–	składowa zużycia mechanicznego występującego podczas kątownego ruchu ogniów w przegubie (środowisko górnicze suche)
$I_M^{DRY+H_2O}$	–	składowa zużycia mechanicznego występującego podczas kątownego ruchu ogniów w przegubie (środowisko górnicze suche z wodą z układów zraszania)
I_M^{WET}	–	składowa zużycia mechanicznego występującego podczas kątownego ruchu ogniów w przegubie (środowisko górnicze mokre)
I_{PN}	–	zużycie całkowite w przegubie nieruchomym
$I_{\dot{S}}$	–	zużycie wynikające z oddziaływania suchego ścierniwa w nieruchomym przegubie
I_{kor}	–	prąd korozyjny
I_{pr}	–	liczba nitek łańcucha
$I_{st\ max}$	–	obliczeniowa częstość pracy stanowiska w cyklach na minutę
I_w	–	liczba wychyleń w ramach pojedynczego cyklu
I_{W1}	–	składowa zużycia całkowitego Wariantu 1
I_{W2}	–	składowa zużycia całkowitego Wariantu 2
I_{W3}	–	składowa zużycia całkowitego Wariantu 3
I_{W4}	–	składowa zużycia całkowitego Wariantu 4
I_{W5}	–	składowa zużycia całkowitego Wariantu 5
I_{W6}	–	składowa zużycia całkowitego Wariantu 6
I_{W7}	–	składowa zużycia całkowitego Wariantu 7
I_{W8}	–	składowa zużycia całkowitego Wariantu 8
I_{W9}	–	składowa zużycia całkowitego Wariantu 9
I_{W10}	–	składowa zużycia całkowitego Wariantu 10

I_{W11}	–	składowa zużycia całkowitego Wariantu 11
I_{W12}	–	składowa zużycia całkowitego Wariantu 12
i_w	–	liczba działek elementarnych wagi przypadająca na pomiar
K	–	stała Faradaya
k_s	–	współczynnik synergizmu
L_{pr}	–	długość przenośnika
Max_F	–	wartość maksymalna
Min_F	–	wartość minimalna
MPE	–	błąd graniczny wagi
M_{pr}	–	moment obrotowy silnika hydraulicznego
m_{tpr}	–	masa 1mb łańcucha
m_{po}	–	masa tygla z pozostałością po usunięciu krzemionki
m_{przed}	–	masa tygla z wyprażonym osadem przed dodaniem kwasu fluorowodorowego
m_w	–	obciążenie wagi
m_{zpr}	–	masa zgrzebla
N_{pr}	–	moc jednostki napędowej przenośnika zgrzeblowego
N_{pmax}	–	maksymalna prędkość obrotowa napędu przenośnika
n	–	liczba pomiarów
n_d	–	liczba wychyleń na przejazd w ruchu ustalonym
n_{pr}	–	prędkość obrotowa silnika hydraulicznego
n_s	–	liczba pomiarów maksymalnej głębokości zużycia dla wariantu
n_w	–	liczba pomiarów ubytku masy dla wariantu
R_t	–	rozmiar łańcucha
S	–	napięcie wstępne łańcucha
S_1	–	współczynnik reprezentujący prawdopodobieństwo wystąpienia korozji wżerowej
S_2	–	współczynnik reprezentujący prawdopodobieństwo występowania korozji selektywnej
s	–	odchylenie standardowe ważenia
t_{bad}	–	czas badania
t_{pr}	–	podziałka zgrzebeł

t_{rok}	–	czas w przeliczeniu na jednostkę rok
tw_{og}	–	twardość ogólna wody
V_0	–	efekt bazowy zużycia
V_C	–	szybkość korozji
V_{C_2A}	–	szybkość korozji dla grupy 2A
V_{C_2B}	–	szybkość korozji dla grupy 2B
V_{C_2C}	–	szybkość korozji dla grupy 2C
V_k	–	zużycie korozyjne
V_m	–	zużycia mechanicznego w warunkach braku korozji
$V_{k \rightarrow m}$	–	oddziaływanie korozji na mechanizmy zużycia tribologicznego
$V_{m \rightarrow k}$	–	wpływ procesów tarcowych na intensyfikację zjawisk korozyjnych
V_s	–	efekt złożonego oddziaływania
v_{pr}	–	prędkość ciągną łańcuchowego
X	–	zawartość jonu chlorkowego
X_{Si}	–	masa krzemionki
x_{GOM}	–	błąd bazowania skanów w oprogramowaniu GOM
x_i	–	wartości poszczególnych pomiarów wagi
x_s	–	błąd pomiarowy skanera deklarowany przez producenta
$\bar{x}$	–	średnia pomiarów wagi
Z_C	–	zużycie korozyjne
Z_D	–	zużycie spowodowane oddziaływaniem siły dynamicznej
Z_S	–	zużycie spowodowane oddziaływaniem ścierniwa mineralnego
Z_{SD}	–	zużycie spowodowane oddziaływaniem ścierniwa i siły dynamicznej
Z_{SDC}	–	zużycie spowodowane oddziaływaniem ścierniwa, siły dynamicznej i korozji
z_{og}	–	zasadowość ogólna wody
z_{pr}	–	liczba zębów koła łańcuchowego
α_w	–	całkowity kąt pojedynczego wychylenia
Δ_{masa_i}	–	błąd całkowity pomiaru masy
$\Delta_{różnica_i}$	–	błąd całkowity różnicy masowej próbek przed i po badaniach
Δ_{skan_i}	–	błąd całkowity pomiaru głębokości zużycia
ΔCR	–	bezwzględny błąd wyznaczenia szybkości korozji

ΔI	–	suma synergistycznych efektów wynikających ze współdziałania procesów destrukcyjnych
ΔI_{K+D}	–	składowa interakcyjna wynikająca z wzajemnego oddziaływania czynników korozyjnych i wymuszeń dynamicznych przy braku wzajemnego przemieszczenia ogniw
$\Delta I_{K+\xi}$	–	składowa interakcyjna wpływu ścierniwa na zużycie korozyjne wody
ΔI_{KM}	–	synergistyczny efekt korozyjno-mechaniczny
$\Delta I_{D \rightarrow \xi}^{DRY}$	–	składowa interakcyjna wynikająca z wzajemnego oddziaływania wymuszeń dynamicznych na ścierniwo (środowisko górnicze suche)
$\Delta I_{MDK}^{DRY+H_2O}$	–	składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania wody z układów zraszania na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kątownego przemieszczania się ogniw łańcuchowych w obecności dodatkowych wymuszeń dynamicznych
$\Delta I_{MK}^{DRY+H_2O}$	–	składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania wody z układów zraszania na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kątownego przemieszczania się ogniw łańcuchowych
$\Delta I_{M\dot{S}DK}^{DRY+H_2O}$	–	składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania wody z układów zraszania na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kątownego przemieszczania się ogniw łańcuchowych w obecności ścierniwa mineralnego oraz dodatkowych wymuszeń dynamicznych
$\Delta I_{M\dot{S}K}^{DRY+H_2O}$	–	składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania wody z układów zraszania na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kątownego przemieszczania się ogniw łańcuchowych w obecności ścierniwa
ΔI_{M+D}^{DRY}	–	składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania wymuszeń dynamicznych na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kątownego przemieszczania się ogniw łańcuchowych (środowisko górnicze suche)
$\Delta I_{M+\xi}^{DRY}$	–	składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania ścierniwa na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kątownego przemieszczania się ogniw łańcuchowych (środowisko górnicze suche)

- $\Delta I_{M+D+\dot{S}}^{DRY}$ – składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania ścierniwa i wymuszeń dynamicznych na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kątownego przemieszczania się ogniw łańcuchowych (środowisko górnicze suche)
- $\Delta I_{D \rightarrow \dot{S}}^{DRY+H_2O}$ – składowa interakcyjna wynikająca z wzajemnego oddziaływania wymuszeń dynamicznych na ścierniwo (środowisko górnicze suche z wodą z układów zraszania)
- $\Delta I_{M+D}^{DRY+H_2O}$ – składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania wymuszeń dynamicznych na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kątownego przemieszczania się ogniw łańcuchowych (środowisko górnicze suche z wodą z układów zraszania)
- $\Delta I_{M+\dot{S}}^{DRY+H_2O}$ – składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania ścierniwa na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kątownego przemieszczania się ogniw łańcuchowych (środowisko górnicze suche z wodą z układów zraszania)
- $\Delta I_{M+D+\dot{S}}^{DRY+H_2O}$ – składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania ścierniwa i wymuszeń dynamicznych na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kątownego przemieszczania się ogniw łańcuchowych (środowisko górnicze suche z wodą z układów zraszania)
- $\Delta I_{D \rightarrow \dot{S}}^{WET}$ – składowa interakcyjna wynikająca z wzajemnego oddziaływania wymuszeń dynamicznych na ścierniwo (środowisko górnicze mokre)
- ΔI_{MDK}^{WET} – składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania wody kopalnianej na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kątownego przemieszczania się ogniw łańcuchowych w obecności dodatkowych wymuszeń dynamicznych
- ΔI_{MK}^{WET} – składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania wody kopalnianej na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas przemieszczania się ogniw łańcuchowych
- $\Delta I_{M\dot{S}DK}^{WET}$ – składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania wody kopalnianej na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kątownego przemieszczania się ogniw łańcuchowych w

	obecności ścierniwa mineralnego oraz dodatkowych wymuszeń dynamicznych
ΔI_{MSK}^{WET}	– składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania wody kopalnianej na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kąowego przemieszczania się ogniów łańcuchowych w obecności ścierniwa
ΔI_{M+D}^{WET}	– składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania wymuszeń dynamicznych na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kąowego przemieszczania się ogniów łańcuchowych (środowisko górnicze mokre)
$\Delta I_{M+\dot{S}}^{WET}$	– składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania ścierniwa na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kąowego przemieszczania się ogniów łańcuchowych (środowisko górnicze mokre)
$\Delta I_{M+D+\dot{S}}^{WET}$	– składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania ścierniwa i wymuszeń dynamicznych na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kąowego przemieszczania się ogniów łańcuchowych (środowisko górnicze mokre)
ΔI_{SK}	– synergistyczny efekt ścierno-korozyjny
ΔI_{SKM}	– synergistyczny efekt ścierno-korozyjno-mechaniczny
ΔI_{SM}	– synergistyczny efekt ścierno-mechaniczny
$\Delta I_{\dot{S}+D}$	– składowa interakcyjna wynikająca z wzajemnego oddziaływania ścierniwa mineralnego i wymuszeń dynamicznych przy braku wzajemnego przemieszczenia ogniów
$\Delta I_{\dot{S}+K}$	– składowa interakcyjna wynikająca z wzajemnego oddziaływania ścierniwa mineralnego i czynników korozyjnych przy braku wzajemnego przemieszczenia ogniów
$\Delta I_{\dot{S}+D+K}$	– składowa interakcyjna wynikająca z wzajemnego oddziaływania ścierniwa mineralnego, czynników korozyjnych i wymuszeń dynamicznych przy braku wzajemnego przemieszczenia ogniów
ΔV	– efekt synergistyczny (interakcja),
Δx	– średni błąd pomiarowy ważenia

ΔZ_{SD}	–	składowa synergistyczna wynikająca z łącznego oddziaływania siły dynamicznej i ścierniwa
ΔZ_{SDC}	–	składowa synergistyczna wynikająca z łącznego oddziaływania siły dynamicznej, czynnika korozyjnego i ścierniwa
δ_m	–	błąd całkowity średniego ubytku masy próbek
η_{pr}	–	sprawność napędu przenośnika zgrzeblowego
μ	–	współczynnik tarcia
ρ	–	gęstość metalu

1. WPROWADZENIE

Wydajność procesu produkcyjnego jest zasadniczym czynnikiem decydującym o ekonomicznej opłacalności działań operacyjnych wszystkich przedsiębiorstw. Wydajność produkcji jest wynikiem interakcji wielu czynników, zarówno wewnętrznych, jak i zewnętrznych. Do tych czynników można zaliczyć:

- kwalifikacje kadry zarządczej i pracowniczej,
- organizacja pracy,
- rodzaj i zaawansowanie techniczne stosowanych maszyn i urządzeń,
- technologia wykorzystywana w procesach produkcji,
- dyspozycyjność maszyn i urządzeń,
- uwarunkowania środowiska eksploatacyjnego.

Ostatni z wymienionych czynników determinuje stosowane rozwiązania techniczne, organizacyjne i technologiczne oraz wpływa istotnie na czas użytecznej pracy wyposażenia produkcyjnego poprzez przyspieszoną degradację elementów i podzespołów maszyn i urządzeń roboczych.

Jednym z przykładów branży, w której środowisko pracy odgrywa decydującą rolę, jest górnictwo surowców mineralnych. W tym sektorze, oprócz zasad organizacji produkcji, konieczny jest odpowiedni dobór materiałów i technologii, które muszą być optymalnie dostosowane do warunków eksploatacyjnych. Wybór ten ma na celu zapewnienie odpowiedniej trwałości systemów technicznych, co pozwala na realizację zakładanych wyników produkcyjnych w ustalonym czasie. Z tego względu, w górnictwie, szczególnie węgla kamiennego, konieczność eksploatacyjnie zoptymalizowanego doboru materiałów i technologii pozostaje niezmiennie aktualna i ważna.

Wydajność w górnictwie podziemnym, zarówno w przypadku eksploatacji ścianowej, jak też wyrobiskami korytarzowymi, jest w znacznym stopniu uzależniona od dyspozycyjności środków transportu bliskiego, w tym przenośników zgrzeblowych. Są one wykorzystywane do transportu surowców mineralnych i energetycznych, zarówno w górnictwie podziemnym, jak również w układach nawęglania elektrowni i elektrociepłowni. Mimo zmieniających się uwarunkowań ekonomicznych na rynku górnictwym, przenośniki te są i będą nadal istotne ze względu na zapotrzebowanie na surowiec strategiczny w postaci węgla koksującego, będącego podstawowym materiałem do produkcji koksu, a który z kolei jest wykorzystywany do produkcji stali stosowanej powszechnie do wytwarzania różnego rodzaju produktów finalnych.

Przenośniki zgrzeblowe są uznawane za urządzenia odporne na warunki środowiska górniczego i nadające się do stosowania w najtrudniejszych warunkach. Jednak ich

poszczególne elementy i zespoły są narażone na przedwczesną utratę zdolności do pełnienia swych funkcji transportowych. Takimi elementami są przede wszystkim górnicze łańcuchy ogniowe, stanowiące podstawowy element napędu ciągnowego przenośników zgrzeblowych. Awarie wynikające z zerwania łańcuchów mogą zatrzymać proces eksploatacji górniczej, co w działalności operacyjnej prowadzi do poważnych strat finansowych.

Łańcuchy ogniowe w przenośnikach zgrzeblowych podlegają degradacyjnemu oddziaływaniu środowiska górniczego. Najważniejsze czynniki skracające ich trwałość to:

- zmienne siły dynamiczne oddziałujące na poszczególne ogniwa łańcuchów, wynikające z rozruchów napędów, nierównomierności obciążenia silników oraz częstych przeciążeń spowodowanych np. upadkiem brył urobku na przenośnik.
- obecność pyłu kamiennego i węglowego, który prowadzi do przyspieszonego zużycia w miejscach kontaktu ogniw łańcuchowych.
- oddziaływanie wody kopalnianej nasyconej różnego rodzaju związkami chemicznymi, zazwyczaj prowadzącymi do intensyfikacji procesów korozji elektrochemicznej.

Zmienność sił dynamicznych prowadzi najczęściej do powstania dekohezji ogniw łańcuchowych, wywołanej procesami zmęczeniowymi lub w wyniku przekroczenia ich wytrzymałości. Tego typu uszkodzeniom przeciwdziała się, stosując wysokowytrzymałościową stal stopową poddaną dedykowanym procesom obróbki cieplnej. Rozwiązanie to jest skuteczne, o ile nie dojdzie do znaczącego zmniejszenia przekroju ogniw w miejscach szczególnie narażonych na zerwanie (tymi miejscami są przede wszystkim przeguby ogniw) w wyniku procesów zużycia ściernego, korozyjnego lub ich synergistycznego oddziaływania.

Pojęcie synergizmu procesów zużycia jest rozumiane w niniejszej pracy jako wzmocnienie negatywnego efektu zużycia pod wpływem działania wielu czynników jednocześnie, w tym oddziaływania ścierniwa i cieczy korozyjnych. Problematyka związana z działaniem poszczególnych czynników środowiska górniczego i ich interakcji na zużycie całkowite łańcuchów ogniowych do tej pory nie stanowiła celu systematycznych badań doświadczalnych. Znane z literatury prace jedynie wskazywały na istnienie synergii czynników środowiskowych lub stanowiły ocenę rzeczywistej eksploatacji łańcuchów górniczych przenośników zgrzeblowych.

Przy analizie czynników wpływających na intensywność uszkodzeń łańcuchów górniczych do tej pory także nie uwzględniano roli sił dynamicznych w procesach zużycia i korozji powierzchni współpracujących. Prace naukowe dotyczące zagadnień dynamiki przenośników zgrzeblowych koncentrowały się przede wszystkim na zmienności sił w samych ciągnach, bez powiązania przyczynowo-skutkowego z procesami złożonego zużycia ściernego i korozyjnego.

Niniejsza praca dotyczy określenia znaczenia poszczególnych czynników środowiska górniczego, w tym roli zmiennych sił dynamicznych, w procesie zużycia całkowitego ogniw

łańcuchowych w strefie ich przegubów oraz ich łącznego, synergistycznego oddziaływania. Autor zakłada, że uzyskane wyniki pozwolą uzupełnić stan wiedzy technicznej i na ich bazie możliwe będzie opracowanie metody przeciwdziałającej degradacji łańcuchów górniczych. Badania przeprowadzone w ramach pracy doktorskiej ukierunkowano na ich praktyczne zastosowanie w górnictwie podziemnym i w branży maszyn górniczych.

2. UZASADNIENIE CELOWOŚCI PODJĘCIA TEMATU PRACY

Maszynom i urządzeniom produkcyjnym, w tym górniczym, jak już wspomniano we Wprowadzeniu, stawiane są wysokie wymagania w zakresie zapewniania wysokiej wydajności, którą można zapewnić poprzez wysoką dyspozycyjność i niezawodność. Kluczowy wpływ na wydajność systemów technicznych wykorzystywanych przy eksploatacji surowców lub drążeniu wyrobisk korytarzowych mają środki transportu bliskiego, w szczególności przenośniki zgrzeblowe. Przenośniki te, to maszyny transportowe stosowane do odstawy surowców mineralnych i energetycznych. Mogą występować zarówno jako samodzielne urządzenia transportowe, takie jak przenośniki ścianowe, podścianowe czy lekkie przenośniki do wyrobisk korytarzowych, jak i stanowić zintegrowany element urządzeń urabiających, jak ma to miejsce w przypadku kombajnu chodnikowego. Przenośniki zgrzeblowe ścianowe i podścianowe służą do odstawy urobku z przodków ścianowych, podczas gdy przenośniki chodnikowe wykorzystywane są głównie przy drążeniu kamiennych wyrobisk korytarzowych, służących do udostępniania złóż lub tworzenia połączeń technologicznych między różnymi obszarami górniczymi. Proces drążenia takich wyrobisk wiąże się z koniecznością odstawy urobionej skały płonnej, w tym materiałów trudnych do urabiania, takich jak piaskowiec.

Dla przenośników zgrzeblowych stosowanych w wyrobiskach ścianowych o wysokiej wydajności, zakładana jest dyspozycyjność na poziomie przekraczającym 95%. Oznacza to, że pożądana jest wysoka trwałość elementów wchodzących w skład układów napędowych tych maszyn [1], w tym górniczych łańcuchów ogniowych. Ich niezawodna praca w kopalni decyduje o dyspozycyjności całych kompleksów ścianowych. O skali problemu świadczy fakt, że w ścianie o długości 300 metrów [2], wyposażonej w przenośnik zgrzeblowy o dwóch ciągach napędowych, znajduje się około 1200 metrów łańcucha ogniowego, co oznacza, że dla powszechnie stosowanego łańcucha 34×126 wykonanego ze stali stopowej, jego masa całkowita sięga 15 ton.

Awaryjne przestoje przenośników w wyniku zerwania cięgna łańcuchowego są zazwyczaj powodem zatrzymania całego systemu eksploatacyjnego i przyczyną poważnych strat finansowych z powodu utraconych korzyści. Dodatkowo należy wspomnieć, że łańcuchy ogniowe znalazły szerokie zastosowanie również w energetyce, przemyśle cementowym, chemicznym, a nawet w przemyśle morskim. W tym aspekcie poznanie procesów synergistycznego (skojarzonego) niszczenia powierzchni łańcucha nabiera szczególnego znaczenia.

Najczęściej, jako podstawowe formy uszkodzeń łańcuchów ogniowych wymienia się:

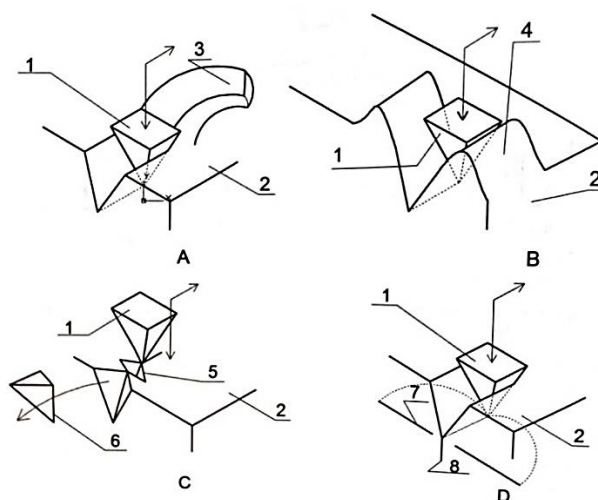
- zużycie tribologiczne,
- korozję elektrochemiczną,

- dekohezję materiału spowodowaną przyczynami przeciążeniowymi lub zmęczeniowymi.

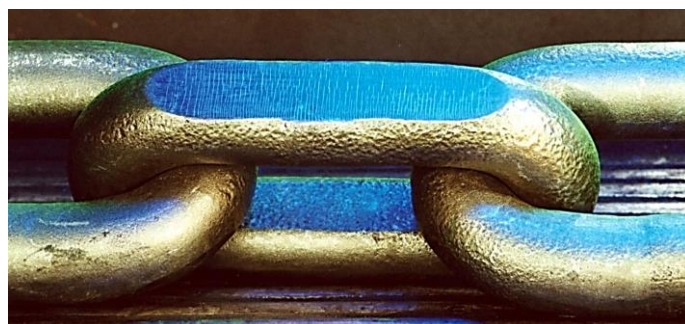
Zużycie tribologiczne w literaturze definiowane jest jako rodzaj zużycia spowodowany procesami tarcia. W procesach związanych ze zużyciem tribologicznym następuje zmiana struktury i właściwości fizycznych wierzchnich warstw styku, a co za tym idzie, również ich masy. Intensywność zużycia określić można jako funkcję wielu rodzajów oddziaływań, a także odporności obszarów, których dotyczy tarcie warstw wierzchnich. Zużycie tribologiczne można charakteryzować, za pomocą kilku wielkości, tj. ubytki objętości i masy, a także wymiarów charakterystycznych dla danego elementu (w przypadku łańcuchów ogniowych może być to podziałka). Zużycie tribologiczne ma w większości przypadkach złożony charakter, z uwagi na możliwe oddziaływania mechaniczne, fizyczne, a nawet chemiczne. W wielu przypadkach nie sposób wręcz określić wszystkich procesów niszczenia warstw wierzchnich, a jedynie wyznaczyć ich dominujący mechanizm.

Dla układu tribologicznego w postaci współpracujących ze sobą w przegubie dwóch ogniw łańcuchowych, podstawowym mechanizmem powstających uszkodzeń jest zużycie ściernie [3]. W uogólnieniu polega ono na oddzielaniu cząstek materiału powierzchni ściernych na skutek procesów mikrościerania, mikrobruzdowania i delaminacji, rzadziej pęknięcia (Rys. 2.1). W przypadku braku występowania dodatkowego ścierniwa między powierzchniami współpracującymi, uszkodzenia generowane są poprzez mikronierówności samych powierzchni współpracujących. Gdy między powierzchniami współpracującymi występuje dodatkowo ścierniwo, dochodzi do znaczącej intensyfikacji procesu degradacji.

Osobny problem zużyciowy stanowią uszkodzenia łańcucha występujące jedynie na ogniwach pionowych, związane z tarciem łańcucha o dno rynny przenośnikowej. Poza zjawiskami ściernymi w niniejszym rejonie może dojść również do zmian strukturalnych ogniw [4]. Powierzchnia trąca ogniw łańcuchowych w wyniku procesów ciernych nagrzewa się, a następnie intensywnie schładza wskutek oddawania energii cieplnej do pozostałych części maszyny oraz w wyniku chłodzenia zawodnionym urobkiem. Postępujące cyklicznie nagrzewanie i schładzanie w sprzyjających warunkach powoduje powstanie warstwy martenzytu (nazywanego w literaturze martenzytem tarcia), charakteryzującej się dużą twardością i kruchością, a co za tym idzie podatnością na pęknięcia przy przeciążeniu ogniwa. Uszkodzenia te cechują się występowaniem licznych pęknięć powierzchniowych w orientacji prostopadłej do powierzchni i kierunku poślizgu (Rys. 2.2). Pęknięcia te stanowią karby strukturalne [2] i bardzo często stanowią początek rozległych pęknięć o charakterze rozdzielczym.



Rys. 2.1 Zasadnicze mechanizmy zużycia ściernego, A - mikroskrawanie, B - mikrobruzdowanie, C - mikrozmęczenie, D - mikropęknięcie; oznaczenia: 1 - drobina ścierniwa, 2 - zużywana powierzchnia, 3 - odseparowany skraw, 4 - bruzda, 5 - wgłębienie zmęczeniowe, 6 - produkt zmęczenia, 7 - poprzeczne pęknięcie, 8 - wzdluzne pęknięcie [5]



Rys. 2.2 Siatka pęknięć powstała w wyniku tworzenia się tzw. martenzytu tarcia [6]

W trakcie eksploatacji łańcucha ogniwowego zachodzą również zjawiska korozyjne. Do najważniejszych przyczyn korozji łańcuchów górniczych [7] zalicza się kontakt z atmosferą kopalnianą i z wilgotnym urobkiem, obecność wody pochodzącej z górotworu i z układu zraszania. Intensywność destrukcji łańcuchów górniczych wywołana korozją zależy m.in. od: temperatury i wilgotności otoczenia, stopnia zmineralizowania wód kopalnianych, czasu i liczby przestojów w eksploatacji, rodzaju urobku, a w szczególności zawartości skały płonnej w urobku oraz właściwości konstrukcyjnych łańcuchów i zgrzebeł [8, 9].

Mechanizm korozji elektrochemicznej wynika z następujących cech kontaktujących się ośrodków:

- korodujący metal jest przewodnikiem,

- woda, w której metal koroduje jest roztworem różnych elektrolitów, tym samym wykazuje przewodnictwo jonowe, zależne od stężenia i ruchliwości zawartych w nim jonów.

W przypadku wystąpienia różnicy między potencjałami fragmentów powierzchni metalu powstają ogniwa galwaniczne, nazywane ogniwami korozyjnymi. W wyniku oddziaływania procesów elektrochemicznych powstają zróżnicowane, nierozpuszczalne związki tlenkowe (potocznie rdza).

Korozja w aspekcie ogniw łańcuchowych jest szczególnie niebezpieczna w przypadku wystąpienia pęknięć zmęczeniowych [8]. Są one intensyfikowane wżerami korozyjnymi ze względu na fakt występowania w tych rejonach zwiększonej aktywności chemicznej (Rys. 2.3a). Prowadzi to do zjawiska pęknięcia korozyjnego ogniw. Co więcej, w środowisku silnie korozyjnym następuje znaczący spadek wartości krytycznej naprężeń rozpoczynających gwałtowne przyspieszenie rozwoju pęknięć. W związku z tym, bardzo często strefa pęknięcia zmęczeniowego ogniw pracujących w warunkach środowiska korozyjnego ma mniejszy rozmiar niż jej ekwiwalent w środowisku niekorozyjnym. Literatura tematu zwraca tu szczególną uwagę na występowanie w wodach kopalnianych rozpuszczonych chlorków, co często ma miejsce w przypadku krajowych zakładów górniczych [10]. Przykłady oddziaływania korozyjnego na ogniwa łańcuchów górniczych zaprezentowano na Rys. 2.3b [11].



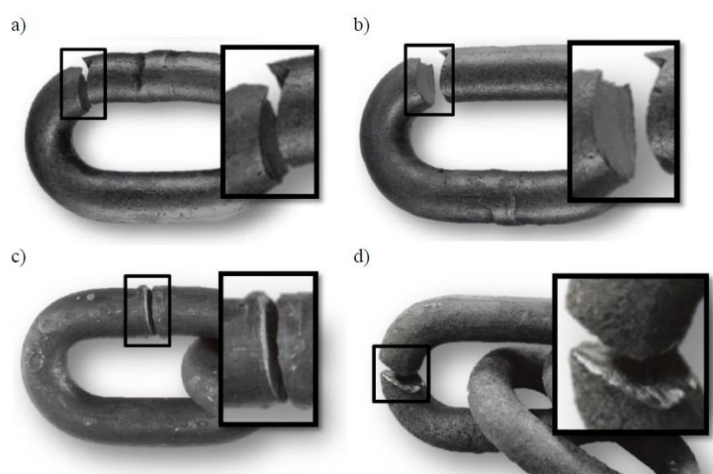
Rys. 2.3 Korozja ogniw łańcuchowych; a – wżery powierzchniowe ogniwa pracującego w środowisku silnie korozyjnym, b – przekrój przez strefę wżeru korozyjnego.

Wżery korozyjne, zużycie ściernie, mikropęknięcia i inne zjawiska zmniejszające krytyczny przekrój ogniwa są inicjatorem degradacji zmęczeniowej ogniw [12]. Proces ten wyróżnia kilka faz charakterystycznych następujących po sobie. Pierwszy jest okres inkubacji mikropęknięć powstających na skutek długotrwałego zużywania się elementów współpracujących maszyn. Następnie następuje okres rozwoju (pogłębiania) mikropęknięć do chwili osiągnięcia tzw. wartości krytycznej. Po osiągnięciu wartości krytycznej mikropęknięć następuje etap gwałtownego ich rozwoju prowadzący finalnie do przełomu (na wskroś) w krytycznym przekroju nośnym (Rys. 2.4). W aspekcie górniczych łańcuchów ogniowych, przełomy te

zazwyczaj występują w kilku charakterystycznych miejscach (Rys. 2.5), co wynika z koncentracji naprężeń pochodzących od sił obciążających [11,13].



Rys. 2.4 Przykład przełomu zmęczeniowego ogniwa łańcuchowego [2]

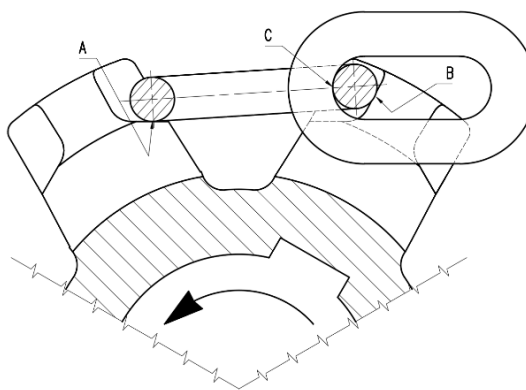


Rys. 2.5 Lokalizacja typowych miejsc powstawania przełomów; a) przełom w łuku po stronie zgrzeiny (ok. 50% przypadków), b) przełom w łuku po stronie przeciwnej do zgrzeiny (ok. 30% przypadków), c) przełom w zgrzeinie, w strefie wpływu ciepła oraz na prostych odcinkach ogniów (ok. 15% przypadków), d) inne formy przełomów (ok. 5% przypadków) [2]

Łańcuch, jako główny element ciągnowy, wchodzi w interakcję z wieloma innymi podzespołami przenośnika, w szczególności z bębniem łańcuchowym, a poprzez zgrzebło również z blachą ślizgową i profilem bocznym rynny.

W kontekście zużywania się samych ogniów łańcuchowych można wyróżnić zasadniczo trzy węzły tarciove (Rys. 2.6):

- obszar współpracy torusa przedniego ogniwa poziomego z dnem bębna (pkt. A),
- obszar współpracy torusa tylnego ogniwa z poziomym z flanką zęba (pkt. B),
- obszar przegubu– strefa kontaktu ogniwa poziomego i pionowego (pkt. C) [5].

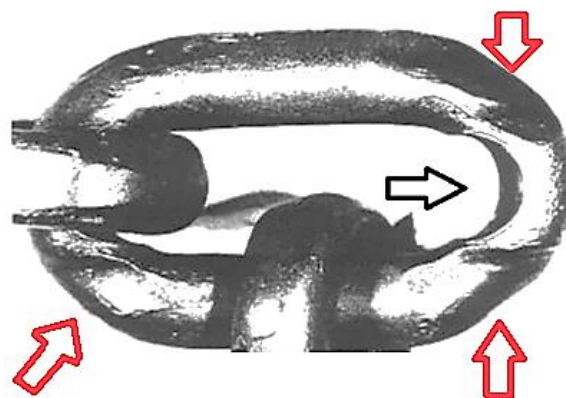


Rys. 2.6 Węzły tarciove w układzie kinematycznym łańcucha – bęben łańcuchowy (pkt. A – przedni torus w dnie bębna, pkt. B – tylny torus na flance zęba, pkt. C – współpraca ogniw w przegubie)

W przypadku kontaktu w punkcie A i C, zużycie spowodowane jest toczeniem się ogniw w przegubie oraz układaniem się przedniego torusa poziomego ogniw w dnie gniazda. W trakcie wzajemnej współpracy ogniw w przegubie łańcuchowym dochodzi do przemieszczania się punktu styku ogniw, co skutkuje obniżaniem się pionowego ogniw w rowku międzyzębnym. Powoduje to ruch toczy w ramach współpracy dwóch ogniw przy jednoczesnym poślizgu przedniego torusa w dnie gniazda. Ponadto, obniżaniu się ogniw pionowego towarzyszy toczenie się oraz częściowo poślizg w przegubie łańcuchowym. Długotrwałym efektem opisywanych zjawisk jest zużycie deformujące dna gniazda, flanki zęba i odpowiadających im stref na poziomym ogniwie (Rys. 2.7).

Przemieszczenia kątowe ogniw w rejonie przegubu i wycieranie się tych stref powoduje z kolei zwiększanie się podziałki łańcucha ogniwowego. Skutkuje to oparciem tylnego torusa (Rys. 2.7, pkt. B) na flance zęba zamiast w dnie, co prowadzi do poślizgu tylnego torusa po flance zęba w kierunku dna bębna. W następstwie tego dochodzi do zużywania się flanki zęba i odpowiadającej jej strefy kontaktu na ogniwie. Zwiększenie podziałki łańcucha i zmniejszenie podziałki koła łańcuchowego poprzez osiadanie ogniw w wytarciu dna gniazda bębna prowadzi do nieprawidłowej współpracy opisywanej pary kinematycznej.

Z punktu widzenia celu niniejszej pracy, najistotniejszy węzeł tribologiczny stanowią pary posobnych ogniw (przypadek C z Rys. 2.1), w przypadku których podczas pracy, w szczególności podczas przejścia przez bęben łańcuchowy, dochodzi do kontaktu tarciowego skutkującego zużyciem ściernym. Podczas współpracy obu powierzchni ogniw mogą być obecne czynniki degradacyjne w postaci ścierniw węglowo-mineralnych lub ich mieszanin z wodą kopalnianą.

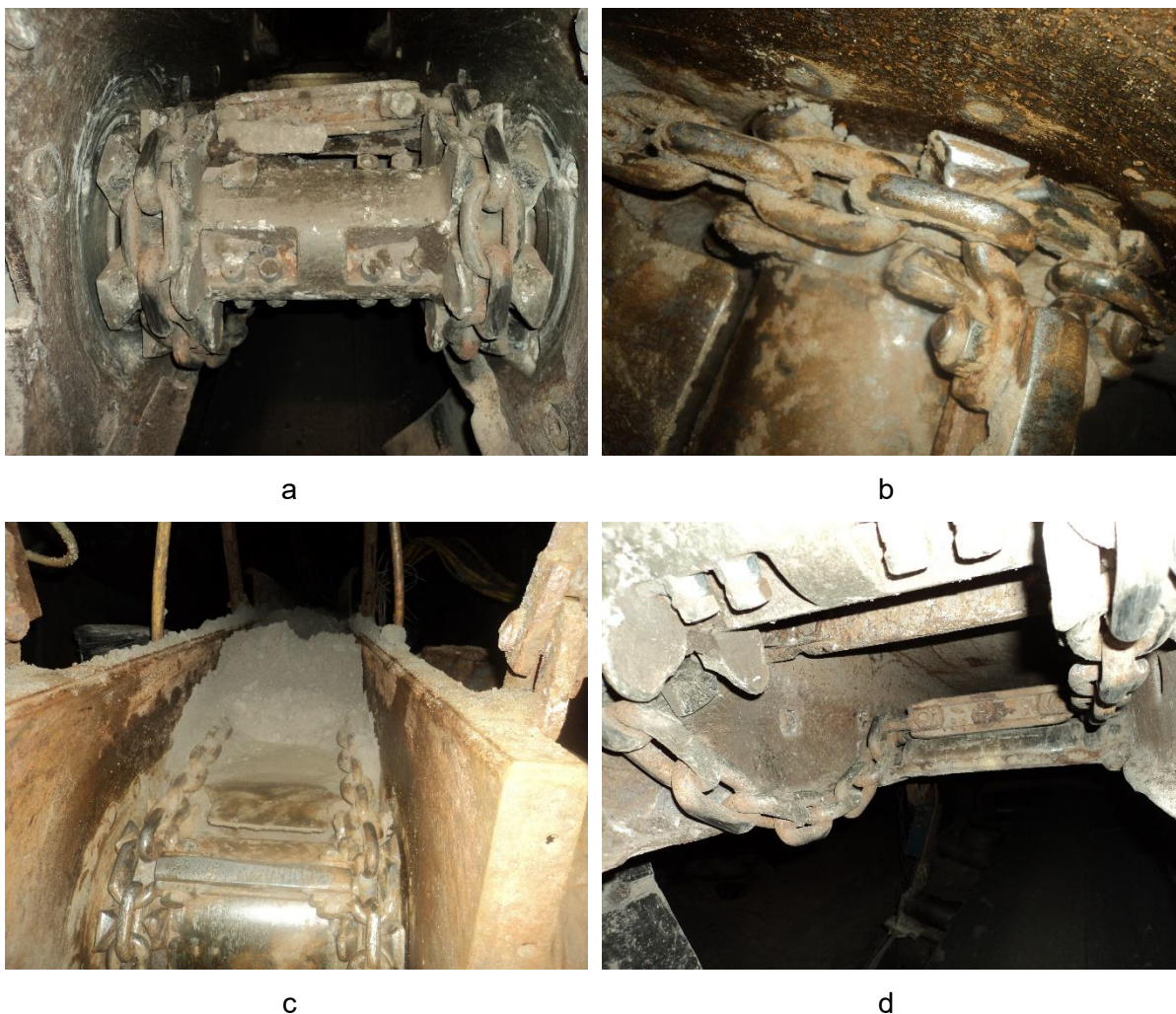


Rys. 2.7 Obszar zużywania się przegubów ogniwi łańcuchowych (czarna strzałka) i obszar zużywania się w strefie kontaktu ogniwa z bębniem (czerwone strzałki) [14]

Współpraca ogniwi łańcuchowych z bębniem, wzajemne oddziaływanie między poszczególnymi ogniwami w obszarze przegubu oraz oddziaływanie agresywnych czynników środowiskowych, stanowią o złożoności procesów zużywania się łańcuchów ogniowych. Najważniejszymi czynnikami zwiększającymi degradację łańcuchów oraz całych zespołów przenośników zgrzeblowych są:

- tarciowy (mechaniczny) kontakt między powierzchniami współpracy ogniwa łańcucha i gwiazdy napędowej (Rys. 2.8a),
- obecność suchych ścierniw w strefie współpracy (przegubów) ogniwi łańcuchowych (Rys. 2.8b,c),
- korozyjne oddziaływanie wody pochodzącej z zespołów zraszających i wody wypływającej ze zrobów zawierającej m.in. związki: wapnia Ca_2^+ , magnezu Mg_2^+ , żelaza i chlorków Cl_2^- , która może tworzyć z pokruszonym urobkiem skalnym mieszaniny wodno-mineralne,
- obecność produktów zużycia elementów współpracujących,
- oddziaływanie obciążenia dynamicznego (Rys. 2.8d).

Ostatni z wymienionych czynników wynika, jak już wspomniano we Wprowadzeniu, z licznych udanych i nieudanych rozruchów układów napędowych przenośników i przeciążeń spowodowanych zablokowaniem zgrzebeł i upadkiem brył urobku. Należy także wspomnieć, że wraz z postępującym zużyciem obszaru współpracy bębna rośnie oddziaływanie dynamiczne łańcucha, spowodowane powstaniem nadmiernych luzów wpływających na współpracę obu elementów. Wymienione czynniki wzajemnie na siebie oddziałują, co może skutkować intensyfikacją procesów degradacji powierzchni ogniwi łańcucha, przejawiającego się zwiększonym ich zużyciem.



Rys. 2.8 Łańcuchy ogniwowe podczas eksploatacji górniczej w warunkach suchych; a – widok współpracy łańcucha z bębniem bez obecności ścierniwa (przykład zużycia mechanicznego), b – widok współpracy łańcucha z bębniem w obecności suchego ścierniwa (przykład zużycia ściernego), c – widok fragmentu przenośnika z łańcuchem zasypanym suchym ścierniwem, d – przykład niewłaściwej współpracy łańcucha z bębniem skutkującej brakiem napięcia i zwisem łańcucha

Jiang w swojej pracy [15] badał właściwości dynamiczne systemu napędu łańcuchowego pod wpływem uderzenia opadającego węgla, przeprowadzając odpowiednie testy. Wyniki wykazały, że drgania podłużne przenośnika łańcuchowego są najsilniejsze podczas uderzenia przez opadający węgiel, a prędkość łańcucha, wysokość upadku oraz masa ładunku, wyzwalają drgania systemu napędu łańcuchowego. Najintensywniejsze drgania stwierdzono w ogniwach łańcucha, jednakże węgiel transportowany przenośnikiem łańcuchowym wpływał tłumiąco na te drgania.

Suchoń i inni w pracy [16] wykazali istotny wpływ długości ogniwa łańcuchowego na szybkość redukcji siły podczas procesu zazębiania się łańcucha z bębniem. Określili również,

że amplituda wahań mocy w napędach wysypowych przenośników osiąga nawet około 50% wartości średniej generowanej mocy przez dany napęd. Skutkiem zużycia układu bęben – łańcuch może być brak sprzężenia ciernego między gniazdem bębna i ogniwem łańcucha prowadzący do obwisu i jego luzowania (Rys. 2.8d), a to z kolei może prowadzić do powstania zmian sił dynamicznych w ciągu łańcuchowym w wyniku uderzeń poszczególnych ogniw.

Wody kopalniane mogą oddziaływać na łańcuch w postaci samoistnej i z agregowanej ze ścierniwem mineralnym. Przykłady obecności ww. czynników podczas eksploatacji przenośników korytarzowych przedstawiono na Rys 2.9. Jak wynika z tego rysunku, woda może pokrywać tylko cienką warstwę powierzchnię łańcucha, może tworzyć mieszaninę mniej lub bardziej plastyczną, która może oblepiać cały łańcuch, jego fragment lub tylko być obecna w przegubie. Ma to swoje implikacje w postaci intensywności zużycia skojarzonego ogniw łańcucha.

Zróźnicowanie form obecności ścierniwa i jego mieszanin z wodą było podstawowym powodem podzielenia oceny synergizmu czynników środowiskowych dla sytuacji:

- braku obecności wody kopalnianej i z układu zraszania,
- obecności wody z układu zraszania,
- obecności wody kopalnianej.

W obszarze zagadnień dotyczących korozji i zużycia łańcuchów górniczych (bez uwzględnienia synergii), znanych jest relatywnie niewiele pozycji literaturowych.

Philipp i Forch w [8] stwierdzili, że korozja jest istotnym czynnikiem zmniejszającym trwałość zmęczeniową łańcuchów górniczych. W swej pracy dokonali także oceny wpływu czynników korozyjnych na kruche pękania stali stosowanych na łańcuchy. Przegląd metod zabezpieczeń korozyjnych łańcuchów górniczych przedstawił Kandzia [9]. Tenże stwierdza również, że przyczyną obniżenia siły zrywania i wydłużenia przy zrywaniu łańcuchów jest redukcja współczynnika tarcia międzyogniowego spowodowana naniesieniem pokryw ochronnych, przy czym kontakt z wilgotnym urobkiem w przenośniku zgrzeblowym powoduje ten sam efekt. Ponadto, w pracy tej zauważono, że wrażliwość na oddziaływanie korozji jest tym wyższa, im wyższa jest klasa jakości łańcucha.



a



b



c



d



e



f

Rys. 2.9 Łańcuchy ogniwowe podczas eksploatacji górniczej w obecności wody i mieszanin wodno-mineralnych; a – widok zawilgoconego łańcucha we współpracy z bębniem (przykład zużycia mechanicznego w obecności wody), b – widok współpracy łańcucha z bębniem w obecności mieszaniny wody z okruchami ścierniwa (przykład zużycia ścierno-korozyjnego), c – widok łańcucha oblepionego mieszaniną wody z drobnymi ziarnami ścierniwa (przykład zużycia ścierno-korozyjnego), d – widok fragmentu przenośnika z łańcuchem zasypanym wilgotnym ścierniwem, e – widok łańcucha z mieszaniną wodno-ścierną wypełniającą tylko jego przegub, f – widok łańcucha z ogniwem wypełnionym bardzo plastyczną mieszaniną wodno-ścierną

Kandzia i inni [12] w zakresie zużycia ściernego stwierdzili, że proces ten zachodzi w trzech obszarach: w przegubach (gdzie stykają się dwa ogniwa), na powierzchniach zewnętrznych luków oraz na zewnętrznych powierzchniach odcinków prostych ogniw. Zużycie w przegubach oraz związane z nim wydłużenie podziałki łańcucha decyduje o jego żywotności, o ile inne czynniki nie prowadzą do przedwczesnego jego zużycia.

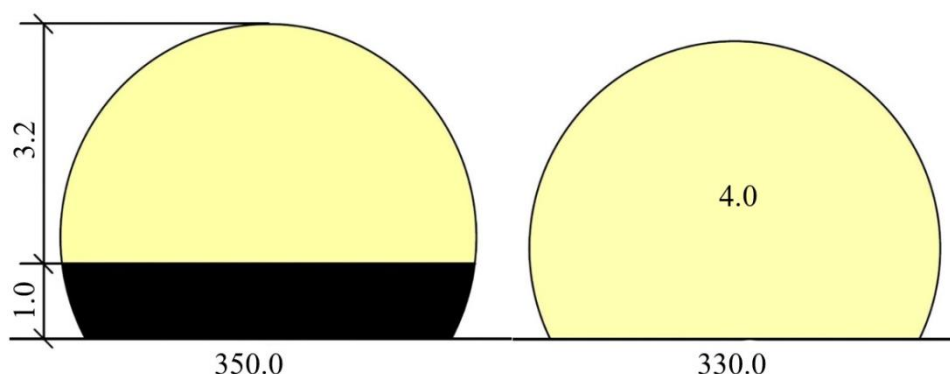
Zużycie przegubów spowodowane ścieraniem wynika ze względnego ruchu ogniw względem siebie podczas wchodzenia i schodzenia z gwiazd napędowych. Stopień zużycia powierzchni przegubu zależy z jednej strony od wzajemnego oddziaływania ogniw łańcucha oraz materiału pośredniego (transportowanego urobku), a z drugiej strony od parametrów charakteryzujących ich obciążenie, takich jak: liczba cykli, wielkość kąta przeginania i siły przenoszone przez łańcuch. Różne znaczenie przypisuje się materiałowi pośredniemu: węgiel traktuje się zazwyczaj jako materiał mało abrazyjny, a skała płonna pełni rolę typowego materiału ściernego. W zakresie korozji rozróżnia się intensywność oddziaływania wody kopalnianej w zależności od tego, czy pochodzi z układu zraszania, czy ze zrobów (ten drugi przypadek traktują jako bardziej niekorzystny z uwagi na obecność m. in. chlorków).

Remiorz i Mikuła stwierdzają w pracy [17], że stan warstwy wierzchniej ogniw podczas eksploatacji łańcuchów ulega najsilniej degradacji z powodu wpływu środowiska pracy, która intensyfikuje takie procesy jak: korozja powierzchniowa, korozja wżerowa, zużycie ściernie przy dużych lokalnych naciskach stykowych oraz powoduje występowanie w pewnych sytuacjach dyfuzji atomowego wodoru do warstwy wierzchniej ogniw wywołując kruchość wodorową. Remiorz [2] z kolei podaje, że w czasie eksploatacji maszyn górniczych, łańcuchy pracują w bardzo trudnych warunkach, związanych z dużym zanieczyszczeniem oraz wilgocią panującą w wyrobiskach podziemnych, co powoduje bardzo intensywne oddziaływania ściernie i korozyjne oraz narażone są na obciążenie dynamiczne o wartościach przekraczających wartości nominalne i wywołujące w poszczególnych ogniwach łańcucha zmiany zmęczeniowe. Podkreśla on także, że intensywność degradacji własności użytkowych łańcuchów górniczych, jest bardzo zróżnicowana w zależności od warunków górniczo-geologicznych i charakterystyki środowiska górniczego. Podobną konkluzję zawarli Kotwica i inni w pracy [10] na podstawie badań ciągów łańcuchowych, przeprowadzonych w wytypowanych ścianach węglowych, znajdujących się w siedmiu kopalniach należących do polskich spółek górniczych.

Generalnie należy stwierdzić, że niekorzystny wpływ twardych ścierniwi mineralnych na powierzchnię elementów maszyn jest powszechnie znany i dobrze opisany w dostępnej literaturze [18, 19, 20, 21]. Jednakże, często materiały okrucowe nie są jednorodne i mogą stanowić mieszaniny mineralne i mineralno-wodne o znacząco różnych właściwościach ściernych [22, 23, 24]. Lawrowski [25] mechanizm zużywania ściernego uzależnia od stosunku twardości metalu zużywanego H_M do twardości ścierniwa H_A . Gdy $H_M/H_A > 0,6$ zachodzi mniej

agresywna, chemiczno-mechaniczna forma ścierania, jednakże, gdy $H_M/H_A < 0,6$, to dochodzi do mikroskrawania powierzchni krawędziami ziaren ścierniwa.

Skład mineralny skał, w których drąży się wyrobiska korytarzowe, jest zróżnicowany i zmienny na całym odcinku drążenia. Sytuację taką przedstawił Mucha [26] na przykładzie wyrobiska kamiennie-węglowego drążonego na potrzeby wykonania pochylni wentylacyjnej w jednej z polskich kopalń węgla kamiennego. Jak wynika z Rys 2.10, przedstawione przekroje geologiczne utworzyły warstwy węgla i piaskowca (rysunek lewy) oraz samego piaskowca (rysunek prawy).



Rys. 2.10. Przykładowe przekroje geologiczne podziemnego wyrobiska korytarzowego;
oznaczenia: kolor żółty – piaskowiec, kolor czarny – węgiel, na podstawie [16].

Przy opisie zużywania łańcuchów ogniowych nie można pominąć kwestii wspólnego oddziaływania czynników środowiskowych. Wzajemne oddziaływanie tych czynników zazwyczaj prowadzi do wystąpienia efektu synergii procesów zużycia. Pojęcie synergii, rozumianej jako wzmocnienie efektu w wyniku dodania dodatkowego czynnika, w którym łączny rezultat oddziaływania jest większy niż suma pojedynczych oddziaływań, jest powszechnie używane w różnych dziedzinach techniki i inżynierii. Encyklopedia PWN definiuje synergję jako wzajemne wzmacnianie działania związków chemicznych lub jonów, które występują razem w danym środowisku, powodując, że efekt łączny jest większy niż suma ich oddziaływań oddzielnych. Generalnie, synergję można opisać jako wzmocnienie lub uwypuklenie jakiegoś efektu, który następuje dzięki dodaniu dodatkowego czynnika, gdzie efekt ich wzajemnego oddziaływania jest silniejszy niż wpływ pojedynczych czynników.

Badania zjawiska synergii są coraz częściej prowadzone w różnych obszarach techniki i inżynierii, w tym eksploatacji maszyn. W zakresie wymienionego obszaru, badaniom synergii podlegają procesy zużywania elementów maszyn wraz z powiązanymi z nimi systemami tribologicznymi.

Najczęściej w celu określenia efektu synergii między analizowanymi czynnikami należy dokonać porównania efektu złożonego (wynikowego) V_s z efektem bazowym V_0 . Efekt bazowy definiowany jest jako taki, który nastąpiłby, gdyby analizowane obiekty nie współdziałały.

Zgodnie z takim założeniem można więc uznać, że efekt synergii zachodzi w momencie, gdy $V_s > V_0$. Parametr charakteryzujący synergizm można więc wyznaczyć jako różnicę powyższych parametrów (por. zależność 2.1).

$$\Delta V = V_s - V_0 \quad (2.1)$$

gdzie:

ΔV - efekt synergistyczny (interakcja),

V_s - wielkość efektu złożonego oddziaływania,

V_0 - wielkość efektu bazowego. [5]

Burakowski [27] klasyfikuje różne rodzaje synergizmu na podstawie współczynnika k_s opisanego zależnością 2.2.

$$k_s = \frac{a}{a_1} \quad (2.2)$$

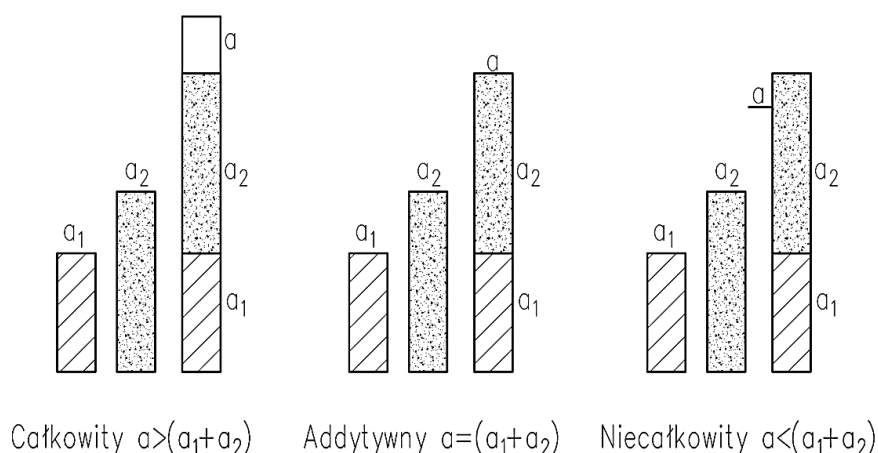
gdzie:

k_s – współczynnik synergizmu,

a – wypadkowa będąca wynikiem oddziaływania dwóch lub większej liczby czynników,

a_1 – wartość odpowiadająca działaniu czynnika „1”.

Burakowski w pracy [27] rozróżnił trzy rodzaje synergizmu (Rys. 2.11). Synergizm całkowity występuje, gdy wartość wypadkowej właściwości, która jest wynikiem współdziałania co najmniej dwóch czynników, jest większa od sumy wartości ich oddziaływań rozpatrywanych osobno. Synergizm addytywny zachodzący w sytuacji gdy wartość wypadkowej właściwości, która jest wynikiem współdziałania co najmniej dwóch czynników, jest równa sumie wartości ich oddziaływań rozpatrywanych osobno. Synergizm niecałkowity, gdy wartość wypadkowej właściwości, która jest wynikiem współdziałania co najmniej dwóch czynników, jest mniejsza sumie wartości ich oddziaływań rozpatrywanych osobno, ale nadal większa od każdego z nich, rozpatrywanych oddzielnie.



Rys. 2.11 Graficzna interpretacja synergizmu całkowitego, addytywnego i niecałkowitego.

Rozpoznanie zagadnienia synergizmu zużywania się łańcuchów ogniowych daje duży potencjał w możliwości zwiększenia ich trwałości zwłaszcza tam, gdzie występują trudne warunki eksploatacyjne i gdzie dotychczasowe rozwiązania materiałowo-technologiczne nie sprawdzają się lub sprawdzają się w ograniczonym stopniu.

Problematykę stanu wiedzy dotyczącego tematyki pracy można przedstawić odnośnie szczegółowości wybranego obszaru opisywanego zagadnienia. W zakresie bardzo wąskim, odnoszącym się wprost do tematu pracy, czyli identyfikacji synergizmu oddziaływania wieloczynnikowego na zużycie łańcuchów ogniowych, w światowej literaturze przedmiotu nie występują, jak dotąd, informacje o prowadzeniu badań zużyciowych łańcuchów w aspekcie wzajemnego wpływu (synergii) czynników pogłębiających procesy ścierne i korozyjne. Remiorz i Miś w pracy [17] stwierdzili, że „W eksploatacji łańcuchów ogniw górniczych wyróżnia się trzy główne procesy destrukcyjne, które zazwyczaj występują jednocześnie, prowadząc do degradacji właściwości użytkowych i przedwczesnego wycofania łańcuchów z użytkowania: zniszczenie zmęczeniowe, zużycie ścierne oraz procesy korozji. Wspomniane mechanizmy podatności operacyjnej łączą się w specyficzną synergię charakteryzującą się dużą złożonością wzajemnych wpływów”. Ponadto, we wspomnianej pracy zaproponowali koncepcję stanowiska do badania zużycia łańcuchów w warunkach mieszaniny wodno-ściernej (odmienną niż opracowana w niniejszej pracy), która nie uwzględnia jednak oddziaływania zmiennej siły.

Tematyka synergistycznego, dwuczynnikowego zużywania łańcuchów w środowisku morskim była poruszana w pracy [28]. W tej pracy wskazano przede wszystkim na istnienie problemu braku informacji o procesie tribokorozji materiałów aktywnych, szczególnie stali niskostopowych stosowanych w elementach offshore. Z kolei w pracy [29] wykazano, że w systemach łańcuchowych stosowanych na statkach dochodzi do przedwczesnego uszkodzenia ich elementów na skutek tribokorozji, będącej efektem względnego ruchu między ogniwami łańcucha wywołanego przez fale, wiatr oraz prądy oceaniczne oraz oddziaływania korozyjnego wody morskiej. Wynikiem badań opisanych w tej pracy było wykazanie, że procesy tribokorozyjne przebiegają około 6 razy szybciej w wyższej temperaturze (23 °C) w porównaniu z typową temperaturą wody morskiej w rejonach pracy konstrukcji offshore (2 °C).

W konstrukcjach offshore powszechnie stosuje się stale niskostopowe zamiast stali pasywnych, które nie tworzą ochronnej warstwy tlenkowej na powierzchni. Spowodowane jest to niską zawartością pierwiastków stopowych (Cr, Ni, Mo itd.), będącymi prekursorami tworzenia pasywnej powłoki. Na powierzchni tych stali powstaje porowata warstwa tlenku żelaza [30], co umożliwia penetrację elektrolitu przez nią i dotarcie do niechronionej stali. Prowadzi to do nieprzerwanej korozji i dużych strat materiału. W związku z tym, w odróżnieniu od stopów pasywnych, stale niskostopowe ulegają korozji nie tylko w miejscach, gdzie warstwa

rdzy została usunięta wskutek zużycia, ale również na pozostałych powierzchniach, gdzie warstwa tlenkowa nie stanowi skutecznej bariery [31]. W rezultacie, degradacja powierzchni tych stali jest sumą utraty materiału spowodowanej tribokorozją w obszarze kontaktu oraz przyspieszoną korozją w miejscach niezużytych. Należy w tym miejscu podkreślić, że istnieje znaczne podobieństwo między środowiskiem morskim i górnictwem z uwagi na istnienie czynnika korozyjnego i zużycia mechanicznego powierzchni stali. Ponadto, wspomniane wyżej stale niskostopowe są również powszechnie stosowane w górnictwie podziemnym i wykazują charakter korozyjny podczas eksploatacji.

Wspomniany wyżej proces tribokorozji wywołany jest łącznym działaniem czynników zwiększających zużycie ściernie i korozyjne [32, 33, 34, 35]. W tych warunkach, proces zużycia wywołany tarciami i korozją elektrochemiczną wzajemnie na siebie oddziałują, a skutkiem współdziałania obu procesów jest wystąpienie synergii czynników degradacyjnych. Efekt synergistyczny zachodzący w trakcie procesu tribokorozji wynika z usuwania w wyniku tarcia warstwy tlenków, co przyspiesza korozję powierzchni w miejscach odsłoniętych przez oddziaływanie ścierniwa lub wierzchołków nierówności, z drugiej strony twarde cząstki usuniętych warstw tlenkowych mogą intensyfikować niszczenie warstwy wierzchniej [36, 37, 38]. Schemat rozwoju zużycia tribokorozyjnego przedstawiono na Rys. 2.12. Skutki tribokorozji poruszano w wielu pracach, m.in. w [39, 40, 41, 42, 43, 44, 45]. Tribokorozja jest często rozumiana jako współdziałanie korozji z różnymi formami zużycia mechanicznego.



Rys. 2.12. Mechanizm zużycia tribokorozyjnego (v -wektor prędkości, K -korozja; R -repasywacja) [46]

Rozszerzając zakres analizy literaturowej na zagadnienie synergii elementów górniczych przenośników zgrzeblowych (innych niż łańcuchy), należy wymienić pracę Wieczorka [5], analizującą problematykę wieloczynnikowego zużycia bębnow łańcuchowych. W wymienionej wyżej pracy określono dziewięć zestawień czynników środowiskowych, występujących podczas eksploatacji przenośników zgrzeblowych, dla których opracowano modele zużycia

całkowitego w skojarzonych warunkach wymuszeń. Na ich podstawie wyznaczono składowe interakcyjne zużycia ścierno-dynamicznego, tribokorozyjnego oraz dynamiczno-tribokorozyjnego. Uzyskane wartości składowych jednoznacznie wykazały istnienie synergii między determinantami środowiska pracy, która ma istotny wpływ na całkowite zużycie badanych kół łańcuchowych. Dodatkowo udowodniono, że obecność wymuszeń dynamicznych powoduje synergistyczny efekt, gdy jednocześnie zachodzą procesy zużycia ściernego i korozji.

Bazując na wspomnianej pracy Wieczorka dotyczącej bębnow łańcuchowych można, dla elementów współpracujących, czyli górniczych łańcuchów ogniowych, określić układy wieloczynnikowego zużycia, dla których skojarzone działanie różnych czynników środowiskowych skutkuje procesem niszczącym, specyficznym dla danej kombinacji tych czynników. W układach dwuczynnikowych i trójczynnikowych można wyróżnić procesy:

- tribokorozji (proces ten opisano wyżej),
- zużycia udarowo-ściernego (stosuje się także określenie dynamiczno-ściernie), będącego wynikiem oddziaływania sił dynamicznych i ścierniwa.
- zużycia udarowo-ścierno-dynamicznego będącego wynikiem oddziaływania sił dynamicznych, czynników korozyjnych i ścierniwa [47, 48, 49].

Zużycie udarowo-ściernie (ang. impact-abrasion wear), występuje w trakcie eksploatacji maszyn górniczych (np. kruszarek, skipów i zsypni) i związane jest z występowaniem dwóch mechanizmów:

- uderzeń okruchów ścierniw mineralnych w zużywaną powierzchnię oraz ich oddziaływaniem ściernym na zużywaną powierzchnię,
- wzajemnym poślizgiem dwóch zużywanych powierzchni w obecności drobinek ścierniwa przy współdziałaniu zewnętrznych sił generujących zjawiska udarowe.

Wypadkowy efekt oddziaływania obu czynników środowiskowych powinien wywołać wzrost zużycia, który będzie większy niż suma pojedynczych oddziaływań tych czynników. Założenie to zostało potwierdzone m.in. w pracy Kennedy i inni [50], w której przeprowadzono badania zużycia udarowo-ściernego na powlekanych i niepowlekanych próbkach aluminium, stali miękkiej i stali narzędziowych przy użyciu specjalnie zbudowanego stanowiska badawczego. Przeprowadzone badania eksperymentalne wykazały, że szybkości zużycia były większe w warunkach ścierania udarowego w porównaniu z czystym ścieraniem kontaktowym. Podobne wnioski sformułowano na podstawie badań zróżnicowanych materiałów w pracach [22, 32, 51, 52, 53, 54].

Zużycie udarowo-ścierno-korozyjne można określić jako łączne oddziaływanie ścierniwa, czynnika korozyjnego (wody zawierającej związki chemiczne, korozyjnie czynne) i zmiennego obciążenia dynamicznego. Wymieniona forma zużycia wieloczynnikowego, w przeciwieństwie do zużycia udarowo-ściernego i tribokorozji, jest procesem relatywnie mało poznany, stąd

wynika potrzeba prowadzenia badań w tym zakresie. Aktualnie, w literaturze dotyczącej tematyki pracy, nie ma wyników badań zużycia wieloczynnikowego, zwłaszcza dla połączenia czynników degradacyjnych: ścierniwo, woda i wzbudzenia impulsowe, dotyczących stali stosowanych na górnicze łańcuchy ogniwo. Dla tej formy, oprócz pracy Wieczorka [5], nie wykazano istnienia synergii procesów niszczenia.

Jak już wspomniano, uzyskanie wysokiej wydajności maszyn roboczych wiąże się z zapewnieniem ich odpowiedniej trwałości eksploatacyjnej. W tym kontekście problematyka badania procesów degradacji łańcuchów stosowanych w górniczych przenośnikach zgrzeblowych jest wciąż aktualna. Zmniejszenie awaryjności przenośników zgrzeblowych poprzez wyeliminowanie przestojów wynikających z uszkodzeń łańcucha przełoży się na poprawę wyników ekonomicznych procesu wydobywania kopalin. Ponadto, jak wykazano w niniejszym rozdziale, kwestia określenia synergii czynników degradacyjnych wielu rzeczywistych węzłów tarcowych maszyn roboczych, w tym przenośników zgrzeblowych, jest nierozpoznana. Uwaga ta dotyczy zwłaszcza górniczych łańcuchów ogniowych.

Badania realizowane w ramach niniejszej pracy doktorskiej, identyfikujące interakcję (synergię lub antagonizm) oddziaływania czynników środowiska kopalnianego na zużywanie ogni łańcuchowych, pozwolą na poznanie zależności opisywanych procesów degradacyjnych oraz ich wzajemnego, niekorzystnego wpływu. Wyniki badań i identyfikacja synergii wieloczynnikowego zużycia przeprowadzone w niniejszej pracy pozwolą, w przeświadczeniu Autora, na uzyskanie nowej wiedzy z zakresu zużywania się elementów ciągnowych. Wiedza ta będzie przydatna kadrze projektowo-inżynierskiej w opracowywaniu innowacyjnych rozwiązań maszyn wykorzystujących łańcuchy o zwiększonej trwałości eksploatacyjnej. Za nową wiedzę należy uznać teoretyczną koncepcję wyznaczania składowych interakcyjnych oddziaływania trzech rodzajów wymuszeń środowiska górniczego: ściernego, korozyjnego i dynamicznego, na podstawie której zostaną opracowane zależności odnoszące się do trzech rodzajów środowiska kopalnianego, w których są eksploatowane łańcuchy ogniwo.

Uzupełnienie stanu wiedzy w tym zakresie jest potrzebne w celu określenia możliwości implementacji rozwiązań technologicznych stosowanych przy wytwarzaniu łańcuchów górniczych przeciwdziałających skutkom występowania degradujących form synergizmu w zakresie zużywania się ogni. Użytecznym rezultatem pracy będzie m.in. opracowanie założeń dla projektowania zoptymalizowanych pod panujące warunki środowiskowe rozwiązań napędów łańcuchowych, także dla innych niż górnictwo branż przemysłu.

3. CEL ZAKRES I TEZA PRACY

Zasadniczy wpływ, jak wykazano w poprzednim rozdziale, na zużywanie ogniw łańcuchowych, w szczególności w strefie przegubu, mają czynniki środowiskowe występujące w miejscu ich eksploatacji. Poza zużyciem wynikającym z wpływu poszczególnych czynników degradacyjnych, może dochodzić do zjawisk synergistycznych, których cechą charakterystyczną jest stopień zużycia większy niż przy zestawieniu sumy zużycia wynikającej z działania pojedynczych czynników środowiskowych. Rozpoznanie tych zjawisk pomaga w zrozumieniu procesów degradacyjnych i umożliwia wyizolowanie procesów wiodących, generujących największe zużycie, co z kolei umożliwia kadrze inżynierskiej konstruowanie trwalszych rozwiązań technicznych dostosowanych do konkretnych warunków środowiskowych.

Przeprowadzona analiza stanu wiedzy na temat procesów degradacji wieloczynnikowej łańcuchów ogniowych wykazała znaczący brak wyników dedykowanych badań w zakresie synergii czynników środowiskowych. Do tej pory, w dostępnej literaturze, nie uwzględniano wpływu sił dynamicznych, na zużycie całkowite procesu eksploatacji łańcuchów górniczych pracujących w trudnych warunkach środowiskowych. W dostępnej literaturze brak również opisu teoretycznego, uwzględniającego możliwe przypadki interakcji skojarzeń wieloczynnikowego układu wymuszeń węzła tarcowego w postaci ogniw łańcuchów dostosowane do specyfiki eksploatacji górniczej

Na bazie powyższej konkluzji sformułowano następujący problem badawczy:

W celu opracowania łańcuchów górniczych cechujących się wysoką odpornością na działanie czynników eksploatacyjnych konieczne jest określenie synergii wieloczynnikowego procesu ich degradacji.

Problem badawczy przedstawiony w pracy jest ściśle związany z tematyką eksploatacji górniczej, jednak jego pełne zrozumienie wymaga podejścia interdyscyplinarnego, obejmującego wiedzę z zakresu budowy i eksploatacji maszyn, tribologii, inżynierii materiałowej oraz inżynierii powierzchni. Przyjęta metodologia badawcza wymusiła przeprowadzenie szerokich badań eksperymentalnych dotyczących zużycia, które odwzorowują rzeczywiste warunki eksploatacyjne łańcuchów w górnictwie.

Zdefiniowany problem badawczy wskazuje na luki w wiedzy dotyczącej eksploatacji maszyn górniczych, w tym łańcuchów ogniowych stosowanych w przenośnikach zgrzeblowych. Jednocześnie wyznacza on jasno określony cel poznawczy pracy:

Identyfikacja synergizmu oddziaływania czynników środowiska kopalnianego w procesie zużywania ogniw łańcuchowych przenośników zgrzeblowych.

Wyniki badań pozwolą na wyodrębnienie poszczególnych składowych zużycia, które wynikają z oddziaływania czynników środowiskowych zestawionych w eksperymentach, a także składowych synergistycznych powstających w wyniku łączenia tych czynników.

Aktualna wiedza na temat eksploatacji wymienionego elementu pozwala na postawienie następującej hipotezy badawczej:

Łączne oddziaływanie ścierniwa i zmiennych sił dynamicznych w otoczeniu czynników korozyjnych, jak i też bez nich, skutkuje dodatkowym efektem interakcyjnym w trakcie procesu zużycia wieloczynnikowego ogniw łańcuchowych.

W ramach założonych badań i rozważań teoretycznych określono dodatkowe szczegółowe problemy badawcze, które zostały rozwiązane w pracy:

- określenie ilościowego wpływu wymuszeń dynamicznych na proces zużycia ściernego i korozyjnego łańcuchów górniczych,
- określenie szybkości korozji materiału stosowanego na łańcuchy górnicze w obecności mieszanin wód kopalnianych i ścierniw mineralnych.

Zakres pracy doktorskiej obejmował następujące działania:

- analiza stanu wiedzy, z zakresu procesów związanych z zużywaniem łańcuchów w procesie ich eksploatacji,
- pozyskanie i identyfikacja własności ścierniw i wód kopalnianych wykorzystywanych w trakcie badań skojarzonego zużycia łańcuchów ogniowych,
- realizacja badań sił dynamicznych występujących w łańcuchu z wykorzystaniem dedykowanego przenośnika zgrzeblowego,
- zaprojektowanie, wytworzenie i weryfikacja unikalnego stanowiska do badań synergizmu procesu zużywania ogniw łańcuchowych,
- przeprowadzenie laboratoryjnych badań zużycia korozyjnego,
- przeprowadzenie stanowiskowych badań zużycia wieloczynnikowego,
- opracowanie modelu synergii wieloczynnikowego procesu zużycia w obszarze przegubów ogniw łańcuchowych dla trzech wariantów środowiska górniczego,
- sformułowanie wniosków ogólnych i szczegółowych i udowodnienie przyjętej hipotezy badawczej.

Powyższe zadania cząstkowe pracy stanowiły etapy niezbędne dla realizacji głównego celu badawczego i zredagowania dysertacji skradającej się z dziesięciu rozdziałów, streszczenia i spisu wykorzystanej literatury.

W pierwszym rozdziale pracy przedstawiono wprowadzenie do tematyki wpływu czynników środowiskowych, takich jak: woda, ścierniwo, wymuszenia dynamiczne i inne, na zużycie ogniw łańcuchowych stosowanych w przenośnikach zgrzeblowych.

Drugi rozdział poświęcony jest uzasadnieniu potrzeby realizacji tematu pracy. Zwrócono uwagę na wciąż aktualną problematykę eksploatacji napędów łańcuchowych, zarówno w przenośnikach zgrzeblowych wykorzystywanych w górnictwie węglowym, jak i w energetyce, przemyśle cementowym, czy morskim. W tym rozdziale podkreślono możliwość występowania zjawiska synergii w kontekście degradacji elementów maszyn, które polega na wzmocnieniu efektu wynikającego z dodania dodatkowego czynnika – w wyniku czego całkowite oddziaływanie tych czynników jest większe niż suma ich pojedynczych efektów. Zauważono, że zjawiska synergistyczne mogą mieć istotny wpływ na skrócenie żywotności węzłów roboczych, a ich właściwe rozpoznanie może wspierać projektowanie bardziej trwałych technicznie rozwiązań przenośników, dostosowanych do specyficznych warunków środowiskowych. Stwierdzono także, że mimo istotności zjawiska synergii w eksploatacji przenośników zgrzeblowych, literatura naukowa w tej dziedzinie nie zawiera wyników badań dotyczących identyfikacji tego procesu w kontekście łańcuchów stosowanych w górnictwie.

Bieżący rozdział przedstawia cel, problem oraz hipotezę badawczą, a także określa zakres pracy. Czwarty rozdział natomiast omawia budowę łańcuchów ogniowych stosowanych w górnictwie, techniki ich produkcji i eksploatacji, a także obszary ich zastosowania.

W piątym rozdziale przedstawiona została przyjęta metoda badawcza oraz wykorzystane metody pomiarowe zastosowane w badaniach laboratoryjnych i stanowiskowych. Zaprezentowano także opracowane i zbudowane stanowisko badawcze dedykowane badaniom synergizmu procesu zużycia łańcuchów ogniowych.

Szósty rozdział zawiera opis przeprowadzonych prac badawczych, w tym określenie warunków badawczych, uwzględniających dobór parametrów współpracy ogniów oraz materiałów środowiskowych, które przyspieszają procesy degradacyjne przegubów.

W rozdziale siódmym przedstawione zostały wyniki badań laboratoryjnych, obejmujące badania szybkości korozji wód kopalnianych oraz ich mieszanin ze ścierniwem oraz badania tribologiczne ścierniw zmieszanych z wodą demineralizowaną. Celem badań było ostateczne wyłonienie materiałów stanowiących czynniki zużyciowe w badaniach stanowiskowych.

Rozdział ósmy stanowiły wspomniane badania stanowiskowe, dotyczące zużycia ogniów w przegubach pod wpływem skojarzenia czynników degradacyjnych. Rozdział swoim zakresem obejmuje zarówno opis badań jak i ich wyników a także szczegółową analizę stanowiącą identyfikację form zużycia ogniów łańcuchowych (m.in. mikroskopię SEM, spektroskopię EDS, badania metalograficzne, rozkłady twardości, pomiary zużycia na ogniach) oraz analizę produktów zużycia.

Kolejny, dziewiąty rozdział, przedstawia opracowane modele wieloczynnikowego zużywania się łańcuchów przenośnikowych w środowisku górnictwym dostosowane do sytuacji:

- braku obecności wody kopalnianej i z układu zraszania w strefie współpracy ogniów łańcucha,
- obecności wody z układu zraszania w strefie współpracy ogniów łańcucha,
- obecności wody kopalnianej w strefie współpracy ogniów łańcucha.

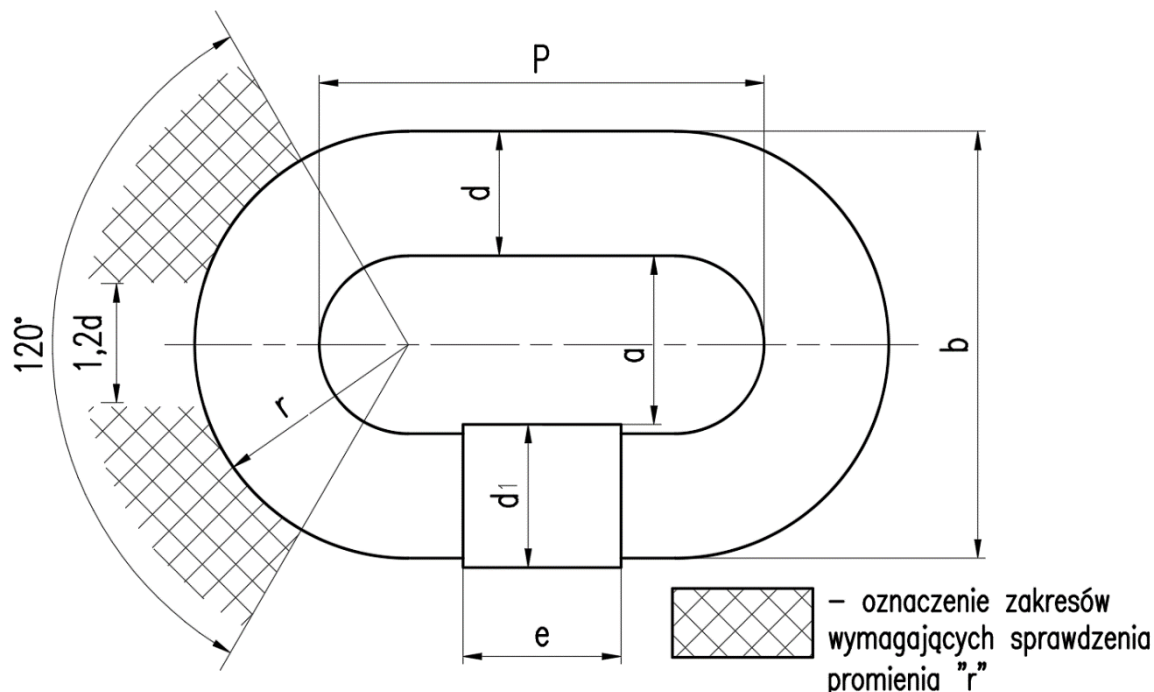
Rozdział uzupełniono o porównanie synergistycznego oddziaływania czynników środowiska kopalnianego na zużycie ogniów łańcuchowych przenośników zgrzeblowych.

Dziesiąty, ostatni rozdział pracy, stanowi podsumowanie oraz przedstawienie wniosków wynikających z przeprowadzonych badań. Zawiera także wskazanie dalszych kierunków badawczych, które wynikają z rezultatów przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy eksperymentów.

4. CHARAKTERYSTYKA GÓRNICZYCH ŁAŃCUCHÓW OGNIWOWYCH ORAZ PROCESU ICH WYTWARZANIA I EKSPLOATACJI

4.1. Górnicze łańcuchy ogniwowe

Górnice łańcuchy ogniwowe wykonane są jako tzw. łańcuchy średnioogniwe. Oznacza to, że stosunek podziałki łańcucha do średnicy pręta, z którego go wykonano, zawiera się między wartościami 3 i 4. Wymiary łańcuchów przenośnikowych zostały znormalizowane i obecnie obowiązującym dokumentem charakteryzującym łańcuchy ogniwowe stosowane w przenośnikach zgrzeblowych jest Polska Norma PN-G-46701:1997 – „Łańcuchy ogniwowe górnicze” [58]. Parametry charakteryzujące łańcuch górniczy pokazano na Rysunku 4.1.



Rys. 4.1. Wymiary charakteryzujące ogniwo łańcucha górniczego (P -podziałka łańcucha; d -średnica pręta łańcuchowego; d_1 -średnica pręta w miejscu zgrzewania; e -maksymalna szerokość zgrzeiny; a -minimalna szerokość prześwitu; b -maksymalna szerokość ogniwa; r -promień zaokrąglenia ogniwa zewnętrzny) [58]

Wymieniona wyżej norma PN-G-46701:1997, wzorując się na ISO 610:1990 [59] oraz DIN 22252 [60], opisuje rozmiar ogniwa poprzez podanie w mm wielkości $d \times P$ (d -średnica pręta ogniwowego; P -podziałka ogniwa). Na tej podstawie stworzono typoszereg łańcuchów ogniwowych dla różnych wielkości obciążenia. Typoszereg łańcuchów górniczych pokazano w Tabeli 4.1.

Tab. 4.1. Typoszereg łańcuchów wg PN-G-46701:1997 (wielkości gabarytowe w mm) [58]

Wielkość łańcucha d x p	Średnica pręta d		Podziałka ogniwa p		Minimalny prześwit a ¹⁾	Szerokość ogniwa b ²⁾	Długość zgrzewu e ²⁾	Promień zewnętrzny r	Masa, kg/m
14x50	14	±0,4	50	±0,5	17	48	10	22	4,0
18x64	18	±0,5	64	±0,6	21	60	13	28	6,6
19x64,5	19		64,5		22	63	13	28,5	7,6
22x86	22	±0,7	86	±0,9	26	73	16	34	9,5
24x86	24	±0,8	86		28	79	17	37	11,6
24x87,5	24		87,5		28	79	17	37	11,5
26x93	26		93		30	86	18	40	13,7
30x108	30	±0,9	108	±1,1	34	98	21	46	18,0
34x126	34	±1,0	126	±1,3	38	110	24	52	22,7
38x137	38	±1,1	137	±1,4	42	121	26	58	29,0
42x152	42	±1,3	152	±1,5	46	133	30	64	35,3

1) nie mniej niż

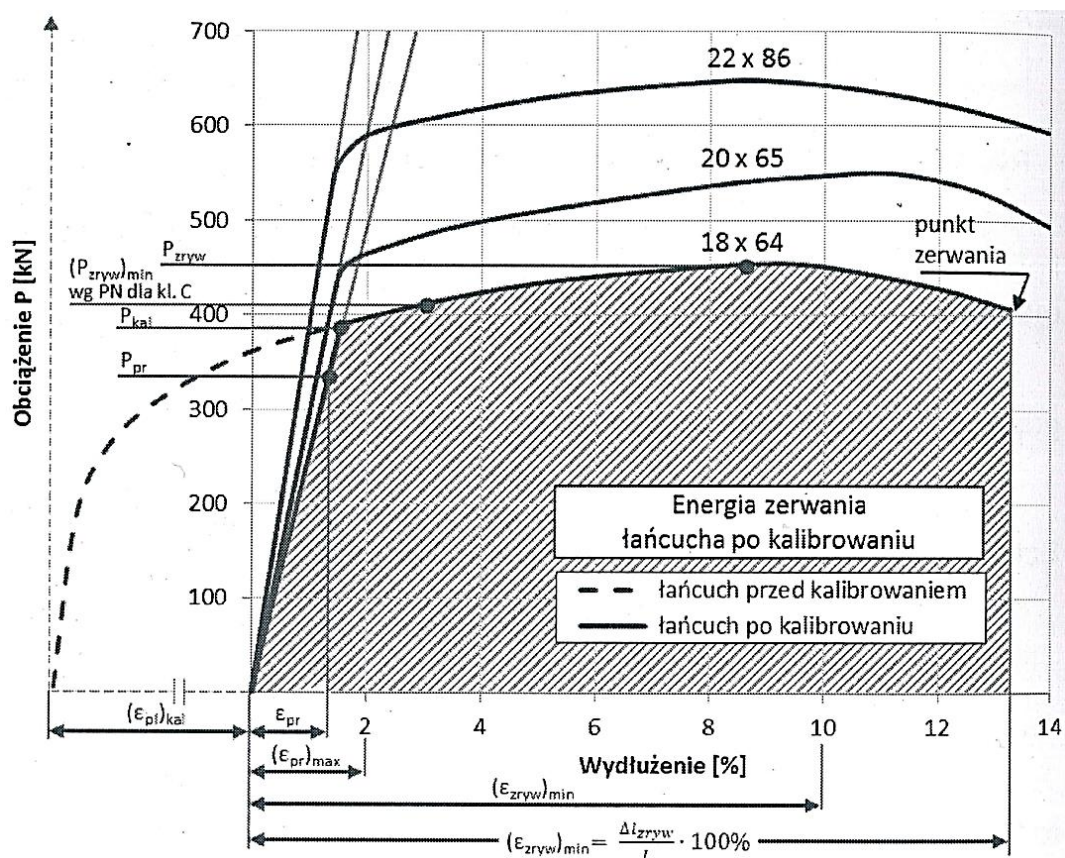
2) nie więcej niż

Poza wielkościami geometrycznymi zawartymi w normie, łańcuchy górnicze określają również różne wielkości mechaniczne. Do najważniejszych zaliczyć można [61]:

- obciążenie zrywające,
- obciążenie kalibrujące,
- obciążenie próbne,
- wydłużenie przy obciążeniu zrywającym,
- wydłużenie przy obciążeniu próbnym.

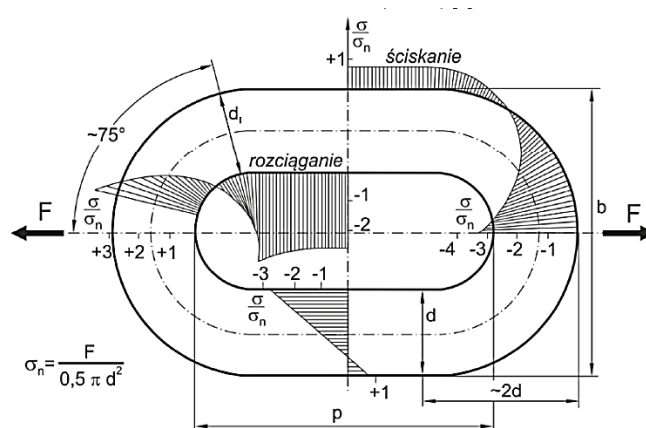
Obciążenie zrywające definiujemy jako maksymalną siłę jaką jest w stanie przenieść próbka łańcucha w czasie próby zrywania na maszynie wytrzymałościowej. Przykładowe wykresy zrywania ogniw łańcuchowych różnych rozmiarów pokazano na Rysunku 4.2.

Cechą łańcuchów górniczych, którą można uznać za korzystną jest relatywnie duża wartość wydłużeń. Wraz z obciążeniem zrywającym wydłużenia są czynnikami determinującymi energię zrywania łańcucha (odpowiada jej zakreskowane pole pod wykresem na Rys. 4.2). Proces wydłużania łańcucha podczas próby na maszynie wytrzymałościowej wykazuje dwie fazy – odkształceń sprężystych występujących w zakresie obowiązywania prawa Hook'a (naprężenie proporcjonalne do odkształceń) oraz fazę odkształceń plastycznych, których przekroczenie powoduje trwałe odkształcenie ogniwa [61].



Rys. 4.2. Wykresy rozciągania łańcuchów górniczych (P_{zryw} -obciążenie zrywające; P_{kal} -obciążenie kalibrujące; P_{pr} -obciążenia próbne; ε_{zryw} ; $(\varepsilon_{pl})_{kal}$, ε_{pr} , $(\varepsilon_{pr})_{max}$ – odpowiednio wydłużenie względne zrywające, plastyczne przy kalibrowaniu, próbne i próbne maksymalne [61])

Osobnym zagadnieniem związanym z eksploatacją układów łańcuchowych jest rozkład naprężeń występujących w łańcuchach ogniowych, szczególnie tych stosowanych w górnictwie. Poza naprężeniami generowanymi przez siły rozciągające łańcuch w czasie transportu urobku, w ogniach występują naprężenia własne. Naprężenia te wynikają z charakterystycznego dla metody wytwarzania łańcuchów procesu ich kalibrowania. Poprzez kalibrację łańcuchów rozumie się przyłożenie siły rozciągającej (tzw. siły kalibrującej), której celem jest odkształcenie ogni, skutkujące wydłużeniem podziałki i ustaleniem jej na wymaganym poziomie. Wartość obciążenia kalibrującego nie została ujęta w normie i stanowi „know how” producentów łańcuchów górniczych. Po zdjęciu siły kalibrującej dochodzi do częściowego skurczu materiału, wskutek czego powstają wewnętrzne naprężenia ściskające (Rys. 4.3), korzystnie wpływające na trwałość zmęczeniową łańcuchów. Poza ustaleniem podziałki dochodzi również do innych zmian geometrycznych [2], w szczególności w rejonie przegubu, co pozytywnie wpływa na współpracę między poszczególnymi ogniwami.



Rys. 4.3. Rozkład naprężeń w ogniwie łańcucha górniczego [11]

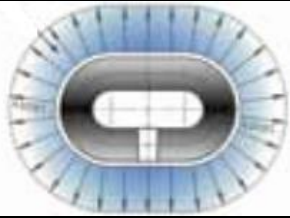
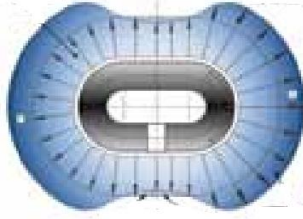
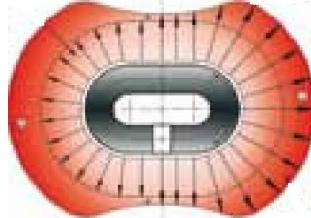
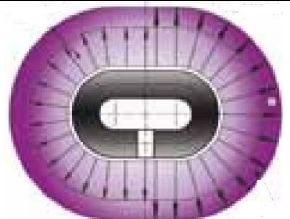
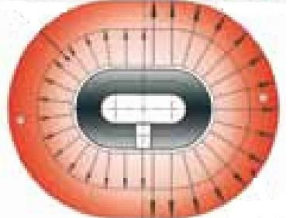
Polska norma [58] przewiduje podział łańcuchów górniczych na trzy klasy – B, C i D. Parametry klasyfikujące łańcuchy ogniwowe zaprezentowano na wycinku normy przedstawionym w Tabeli 4.2.

Tab. 4.2. Klasyfikacja wg PN-G-46701:1997 [58]

Własność łańcucha		Klasa jakości łańcucha		
		B	C	D
Najmniejsze naprężenie przy obciążeniu rozrywającym [MPa]		630	800	1000
Naprężenie przy obciążeniu próbnym [MPa]		500	640	800
Stosunek obciążenia próbnego do najmniejszego obciążenia rozrywającego w procentach dla grubości łańcuchów	14-22	80		
	26-42	80	75	
Względne wydłużenie całkowite przy obciążeniu próbnym w procentach (nie więcej niż)		1,4	1,6	1,9
Względne wydłużenie całkowite przy obciążeniu rozrywającym w procentach (nie mniej niż)		14		

Przedstawiony podział nie jest jedynym obowiązującym wśród producentów łańcuchów. Producenci często celem rozszerzenia podstawowej oferty, a także w celach marketingowych, wprowadzają dodatkowe klasy i podklasy. Poniższa, przykładowa klasyfikacja ogniw łańcuchowych (Tab. 4.3) jednego z producentów łańcuchów została dokonana na podstawie twardości ogniw.

Tab. 4.3. Klasyfikacja łańcuchów firmy Thiele [6]

Oznaczenie łańcucha	Przeznaczenie	Twardość na łukach (HB)	Twardość odcinków prostych (HB)	Graficzne przedstawienie rozkładu twardości
THD	Przenośniki ścianowe	345-375	345-375	
TSC	Urządzenia strugowe	385-414	345-375	
TSD	Przenośniki chodnikowe	424-453	345-375	
TIP	Ogniwa o podwyższonych parametrach	355-383	355-383	
TRQ	Zalecane przy dużym udziale kamienia w urobku	424-453	424-453	

Poza zaprezentowanymi powyżej klasyfikacjami łańcuchów w kontekście ich przeznaczenia i wytrzymałości, interesującym kryterium podziału jest konstrukcja samych ogniw. W tej grupie należy wyróżnić następujące odmiany łańcuchów:

- o przekroju okrągłym,
- o przekroju płaskim (niskie lub podwójnie niskie),
- o przekroju super płaskim, (potrójnie niskie),
- z poprzeczką w ogniwach pionowych,
- specjalne. [61]

Ogniwa podstawowe, opisane w normie PN-G-46701:1997 [58], to te o przekroju okrągłym (Rys. 4.4). To podstawowe ogniwa wykonane w całości z pręta o przekroju okrągłym,

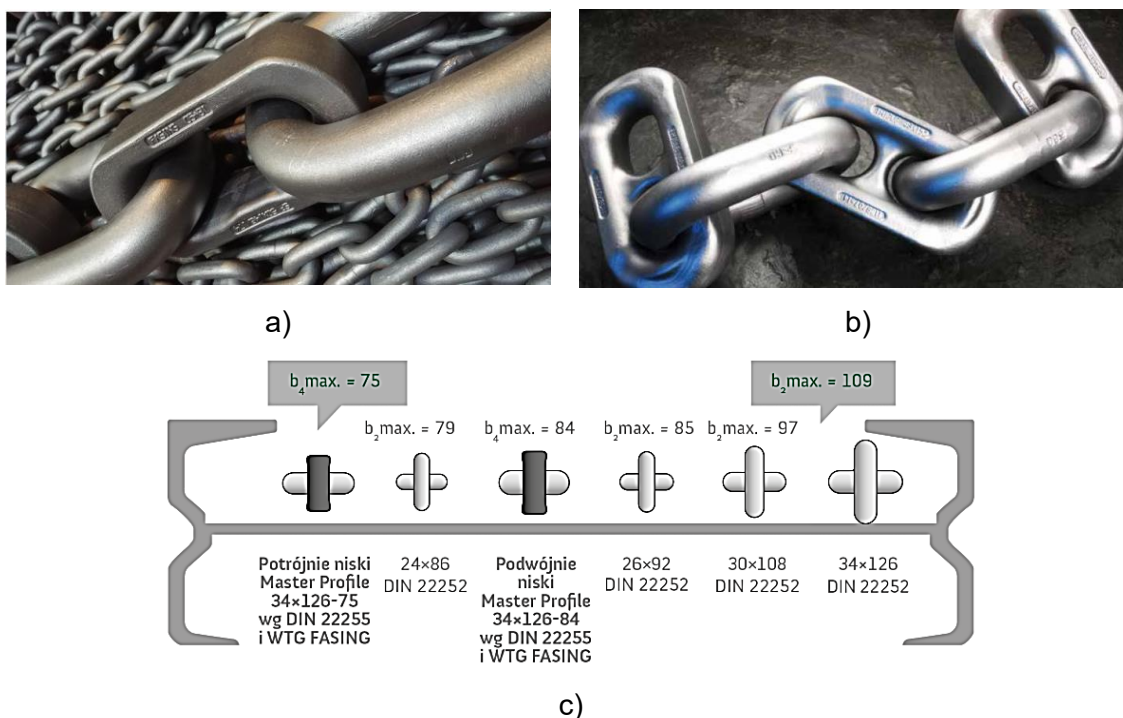
uksztalowanego i zgrzanego w punkcie styku. Dzielą się na ogniwa pionowe i poziome przystające do siebie. W konstrukcji przenośników zgrzeblowych ogniwa poziome współpracują z bębniem łańcuchowym, a pionowe trą swoją zewnętrzną powierzchnią w rynnościagu. Punkt kontaktu, a zarazem wzajemnego przegięcia ogniwa, nazywany jest przegubem łańcuchowym.



Rys. 4.4. Ogniwa łańcucha górniczego o przekroju okrągłym [62]

W odróżnieniu od konwencjonalnych łańcuchów górniczych o przekroju okrągłym, łańcuchy płaskie (Rys. 4.5a) charakteryzują się spłaszczeniem po zewnętrznej stronie odcinków prostych ogniwa (dotyczy jedynie ogniwa pionowych). Ogniwa niskie otrzymuje się w procesie spłaszczania lub wykonuje się je w technologii kucia matrycowego. Zgodnie z powszechnie przyjętą normalizacją, wysokość ogniwa płaskiego jest równa rozmiarowi ogniwa okrągłego w rozmiarze o jeden stopień lub dwa stopnie mniejszym (przykładowo, płaski łańcuch w rozmiarze 34x126 odpowiada w przybliżeniu wysokością konwencjonalnemu łańcuchowi w rozmiarze 30x108). Dzięki temu łańcuchy ogniwowe górnicze płaskie mogą zastępować łańcuchy o przekroju okrągłym o tym samym nominale średnicy bez przezbrajania przenośnika zgrzeblowego lub umożliwiają stosowanie niższych typoszeręgów profili rynny przenośnika. Pomimo zmiany geometrii, ogniwa płaskie mają zbliżone parametry wytrzymałościowe do swoich odpowiedników o przekroju okrągłym. Co więcej, charakteryzują się zwiększoną powierzchnią styku ogniwa pionowego z blachą przenośnika zgrzeblowego, co w dużym stopniu ogranicza ich zużycie ściernie [61, 63].

Z kolei łańcuchy superpłaskie (Rys. 4.5b) to takie, w których jeszcze bardziej pomniejszono wysokość ogniwa pionowego w stosunku do konwencjonalnych łańcuchów o przekroju okrągłym. Wysokość ogniwa superpłaskiego (pionowego) jest równa rozmiarowi ogniwa okrągłego w rozmiarze o trzy stopnie mniejszym. Przykładowo, łańcuch superpłaski 34x126 odpowiada w przybliżeniu wysokościowo łańcuchowi o przekroju okrągłym 24x86. Uogólniając, obniżanie wysokości pionowego ogniwa ma na celu maksymalizację wytrzymałości cięgien łańcucha zgrzeblowego, a przez to i wydajności przenośników przy zachowaniu możliwie niskiego prześwitu rynnościagu (Rys. 4.5c) w przekroju [63].



Rys. 4.5. Łańcuchy spłaszczone, a – płaskie, b – superpłaski z poprzeczką, c – porównanie w przekroju rynnościagu [5, 63, 64]

Poza opisanymi rodzajami łańcuchów producenci oferują wiele wersji specjalnych (Rys. 4.6). Powszechnie stosowane jest wzmocnienie ogniwa środkową poprzeczką, co poza aspektem wytrzymałościowym uniemożliwia zapętlenie się łańcucha. Najczęściej modyfikacje dotyczą ogniw pionowych, których brak kontaktu z bębnem napędowym umożliwia znacznie elastyczniejsze formowanie.



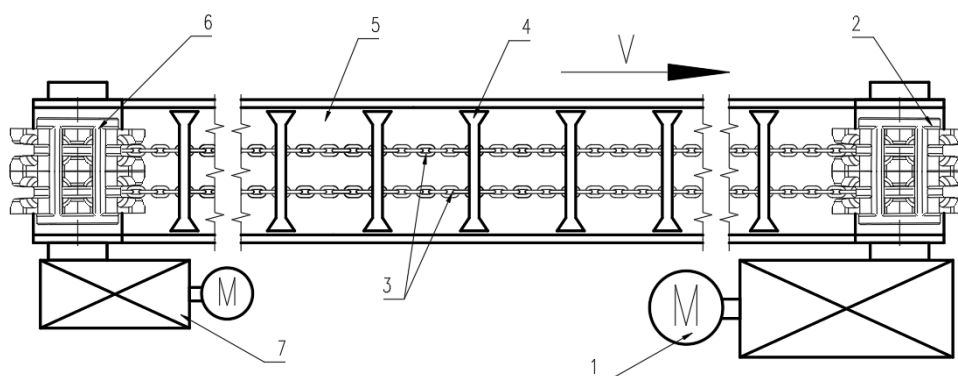
Rys. 4.6. Przykłady rozwiązań specjalnych (a – Caterpillar Power Chain, b – Thiele Big-T) [5, 65]

4.2. Zastosowanie łańcuchów ogniowych w przenośnikach zgrzeblowych

Łańcuchy ogniowe są jednym z kluczowych elementów układów napędowych maszyn i urządzeń, szeroko stosowanym w różnych gałęziach przemysłu. Szczególną popularność zyskały w przenośnikach zgrzeblowych, gdzie niezawodność i trwałość mechanizmów

napędowych są kluczowe dla efektywności procesu transportu materiałów. Przenośniki te szczególne zastosowanie znajdują w przemyśle ciężkim m.in. w górnictwie i transporcie materiałów sypkich.

Górnictwe przenośniki zgrzeblowe klasyfikowane są jako przenośniki ciągowe, gdzie elementem ciągowym są łańcuchy napędzane bębniem łańcuchowym i poruszające się wzdłuż rynny przenośnikowej. Elementem transportującym są zgrzebła zamontowane poprzecznie do kierunku przemieszczania się łańcucha (zamontowane w jednakowych odstępach – o stałym skoku). Łańcuchy wraz z zamontowanymi zgrzeblami tworzą zamknięty ciąg (łańcuch bez końca) składający się z dwóch gałęzi. Ciąg zamknięty może być zarówno w płaszczyźnie poziomej jak i pionowej. W przypadku ciągu zamkniętego w płaszczyźnie poziomej, jedna z gałęzi jest gałęzią transportową, a druga zwrotną, natomiast w przypadku ciągu w płaszczyźnie pionowej, niemal zawsze transportową jest gałąź górna [61].



Rys. 4.7. Schemat budowy przenośnika zgrzeblowego – widok na górny bieg łańcucha, oznaczenia: 1 - napęd główny, 2 – bęben napędowy, 3 – łańcuch, 4 – zgrzebło, 5 - rynna przenośnikowa, 6 – zwrotnia, 7 - napęd zwrotny, V – kierunek transportu urobku

Przenośniki zgrzeblowe, bez względu na ich przeznaczenie zbudowane są z następujących głównych zespołów lub elementów (por. Rys. 4.7):

- napęd główny,
- bęben napędowy,
- łańcuch,
- zgrzebła transportowe,
- rynna przenośnikowa,
- bęben zwrotny,
- napęd zwrotny.

Zasada działania przenośnika zgrzeblowego polega na przekazaniu momentu obrotowego z silnika i przekładni na bęben łańcuchowy, który napędza ciągła łańcuchowa z zamontowanymi zgrzeblami. Zarówno łańcuch zgrzeblowy, jak i zgrzebła znajdują się wewnątrz rynny przenośnikowej, tworzącej zamknięty z trzech stron kanał transportowy. Ruch

łańcucha i przesuwanie się zgrzebeł wzdłuż rynien przenośnika powoduje nagarnianie urobku i jego transport zgodnie z ruchem łańcucha, aż do punktu końcowego transportu, bądź kolejnego środka odstawy.

W trakcie nominalnej pracy przenośnika, zarówno łańcuch, jak i zgrzebła, przesuwają się trąc o koryto rynny. Taki sposób pracy generuje znaczące opory tarcia oraz w dużym stopniu wpływa na wzrost intensywności zużywania się elementów roboczych maszyny. Ma to szczególne znaczenie w przypadku transportu materiałów twardych lub materiałów silnie lepjących się. Bez względu na powyższe, przenośniki zgrzeblowe znalazły szerokie zastosowanie w górnictwie węglowym, głównie ze względu na swoją odporność na warunki środowiskowe oraz brak alternatywnych ciągłych środków odstawy mogących stanowić dla nich zamiennik. Wśród zalet przenośników zgrzeblowych wymienić można następujące cechy: [61]

- możliwość wykorzystywania w trudnych warunkach środowiskowych,
- możliwość pracy przenośnika w dużym zakresie jego nachylenia poprzecznego i podłużnego,
- relatywnie duża wydajność przy niewielkich rozmiarach poprzecznych rynny i stosunkowo niskiej prędkości ciągną zgrzeblowego,
- możliwość współpracy z maszynami urabiającymi (przenośniki zgrzeblowe stanowią trasę jezdnią dla kombajnów ścianowych oraz stanowią podstawowe narzędzie odstawcze kombajnów chodnikowych),
- możliwość stosowania na nieprostoliniowych trasach (w pewnym zakresie – Rys. 4.9),
- stosunkowo prosta konstrukcja,
- duża niewrażliwość na wahania temperatury pracy, stopnia zapylenia i wilgotności.

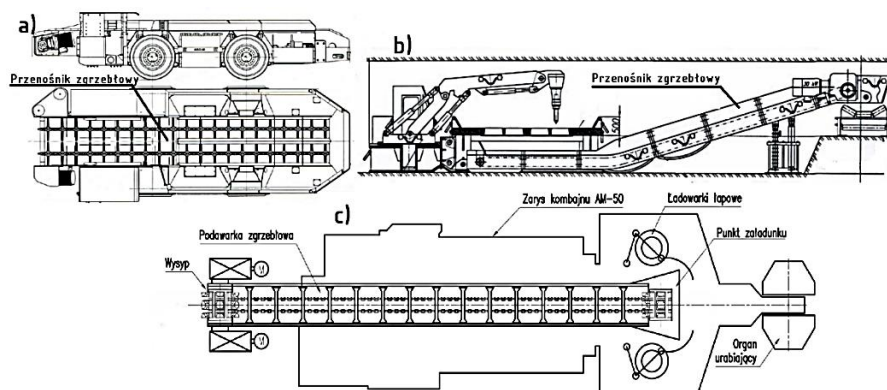
Przenośniki zgrzeblowe posiadają również szereg wad, które wykluczają ich stosowanie w szczególności w łżejszych warunkach transportowych. Zalicza się do nich [61]:

- niska sprawność energetyczna procesu transportu urobku,
- niska trwałość elementów roboczych wynikająca z intensywnego zużywania się podzespołów (w szczególności łańcucha, zgrzebła, rynny i bębnow łańcuchowych),
- możliwość rozdrobnienia urobku podczas transportu,
- wymagany wysoki moment rozruchowy silnika napędowego (konieczny przy rozruchu załadowanego przenośnika),
- możliwość gromadzenia się metanu w dolnej przestrzeni rynien stanowiące potencjalne zagrożenie wybuchem w chwili rozruchu po dłuższym okresie postoju.

Miejsce stosowania przenośników zgrzeblowych są przede wszystkim głębiny kopalnie węgla kamiennego, gdzie wykorzystywane są głównie do odstawy urobku w wyrobiskach ścianowych, chodnikach podścianowych, pochylniach, dowerzchniach,

wyrobiskach udostępniających itp. Jednocześnie wykorzystywane są w zadaniach roboczych maszyn urabiających.

Jedną z odmian przenośników zgrzeblowych stosowanych w górnictwie stanowią przenośniki chodnikowe. Przenośniki zgrzeblowe chodnikowe wykorzystywane są przy prowadzeniu prac przygotowawczych i udostępniających w kopalniach węgla kamiennego. Z uwagi na swoje rozmiary i stosunkowo niewielką zainstalowaną moc, klasyfikowane są jako przenośniki odmiany lekkiej. Cechą charakterystyczną przenośników chodnikowych jest ich prosta i lekka konstrukcja umożliwiająca szybki montaż i demontaż segmentów przenośnika, pozwalająca na stosunkowo sprawne przesuwanie przenośnika wraz z postępem robót górniczych w wyrobisku korytarzowym. Stosowane są również do odstawy urobku z ubierek, zabierek i w uogólnieniu wszędzie tam, gdzie wymagana jest duża odporność przenośnika przy stosunkowo niedużym zapotrzebowaniu na wydajność niniejszej instalacji. Ponadto, przenośniki lekkie stosowane mogą być również w rozwiązaniach specjalnych, takich jak: przenośniki ratownicze, krzywoliniowe, czy jako integralna część innej maszyny górniczej jak kombajn chodnikowy (Rys. 4.8c), samojezdny wóz odstawczy (Rys. 4.8a), czy mobilne zespoły krusząco transportowe dla górnictwa miedzi (Rys. 4.8b) [61]. Przenośniki chodnikowe przeważnie konstruowane są w sposób umożliwiający znaczne przeginanie trasy – w szczególności w płaszczyźnie pionowej. Maksymalny kąt nachylenia [61] wyrobisk, w których mogą pracować przenośniki chodnikowe wynosi 25° , jednak przy 12° należy kotwić przenośnik celem zabezpieczenia go przed pełzaniem. Elastyczność w przeginaniu trasy umożliwia podniesienie napędu nad następny środek odstawy lub niwelację nierówności samej trasy posadowienia/montażu. Umożliwia to mieszany montaż przenośnika, zarówno bezpośrednio na spągu, jak podwieszany do stropu. Z powyższego wynika więc, że przenośniki chodnikowe pod względem sposobu zabudowy sklasyfikować można jako naspągowe, podwieszane lub o instalacji mieszanej.



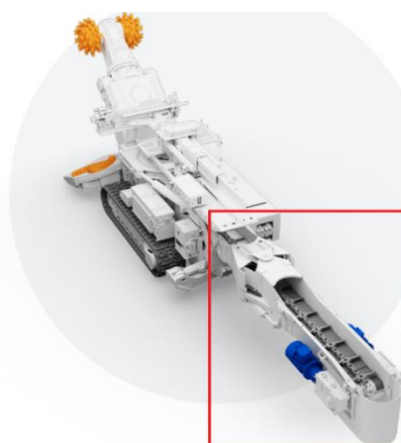
Rys. 4.8. Zastosowanie lekkich przenośników zgrzeblowych na maszynach górniczych
(a – samojezdny wóz odstawczy, b – zespół krusząco transportowy, c – kombajn chodnikowy AM-50) [66. 67; 68]

Przenośniki w odmianie klasycznej trasę mają ułożoną na spągu. Jednocześnie napędy, z uwagi na konieczność umieszczenia ponad kolejnym środkiem odstawy, montowane są na podbudowie. Przenośniki całkowicie podwieszane to najczęściej te pracujące jako pierwszy środek odstawy za kombajnem chodnikowym. Połączone są one z podawarką kombajnu za pomocą przegubu kulowego, a podwieszenie rynny ułatwia przesuwanie przenośnika wraz z postępem frontu wydobywczego. Przenośniki chodnikowe o konstrukcji mieszanej to najczęściej te, gdzie trasa prowadzona jest klasycznie po spągu, a podbudowę napędu przenośnika zastępuje się poprzez podwieszenie segmentu. [5, 61]

Lekkie przenośniki zgrzeblowe wykorzystywane są również w kombajnach chodnikowych. Stanowią one pierwszy ciąg transportowy, którego rolą jest przetransportowanie urobku z czoła przodka wydobywczego (umieszczonego na przenośniku za pośrednictwem ładowarki) na dalsze środki odstawy. W takim układzie krótkie przenośniki zgrzeblowe stanowią integralną część kombajnu chodnikowego (Rys. 4.8b). Poza opisanymi powyżej, w górnictwie podziemnym występują inne zastosowania przenośników zgrzeblowych. Zagadnienie to szerzej opisano w [61].



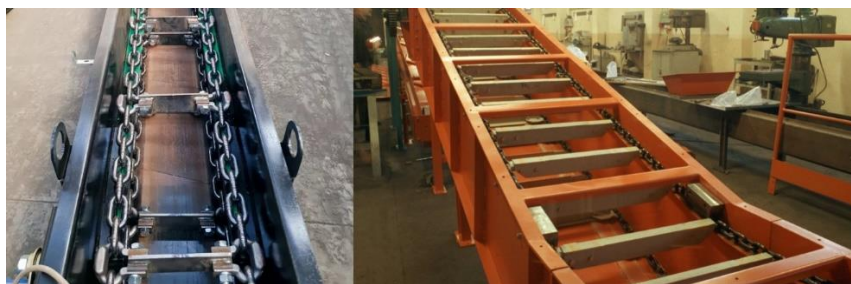
a)



b)

Rys. 4.9. Rodzaje przenośników zgrzeblowych a) ścianowy przenośnik zgrzeblowy, b) przenośnik zgrzeblowy zintegrowany z kombajnem chodnikowym [69]

Mimo, że przenośniki zgrzeblowe kojarzone są głównie z podziemnym górnictwem węglowym, ich odpowiedniki (o nieco innej budowie) spotkać można także w innych branżach przemysłu, takich jak energetyka. W konwencjonalnych instalacjach elektrowni węglowych przenośniki zgrzeblowe wykorzystywane są do odzужlania kotłów, tzw. odzужlacze zgrzeblowe przeznaczone do wygaszenia gorącego żużla z kotłów i przetransportowania go np. na taśmociąg lub do zasobnika (por. Rys. 4.10a) lub jako jeden z elementów ciągu transportowego w instalacjach do nawęglania pieców (Rys. 4.10b) [70].



a)

b)

Rys. 4.10. Przenośniki stosowane w energetyce, a) odźwiżacz zgrzeblowy, b) przenośnik w układzie nawęglania elektrowni [70]

Jak wynika z powyższego opisu, przenośniki zgrzeblowe posiadają ograniczony zakres stosowania. Pomimo to nie mają praktycznie odpowiedników w przypadku warunków wymagających dużej odporności na występujące czynniki technologiczne (np. przeciążenia i rozruchy), czy środowiskowe (tj. wysoka lub niska temperatura, obecność ścierniwa, czynniki korozyjne). Poza aspektem transportowym, przenośniki zgrzeblowe pełnią również funkcje pomocnicze względem innych maszyn górniczych, przede wszystkim urabiających. Powszechnie wykorzystywane są jako tor jezdny dla kombajnów ścianowych (Rys. 4.9a). W korpusie przenośnika zainstalowane są drabinki toru jezdnej trasy kombajnu, które stanowią element pary napędowej kombajnu. Z drugiej strony kombajn podparty jest ostrogą na klinie załadowniczym, również stanowiącym element konstrukcji przenośnika. Co więcej, w zastawkach przenośnika zgrzeblowego prowadzone są przewody elektryczne, wodne i olejowe, stanowiące elementy zasilające kombajn ścianowy. Równie istotną rolę przenośnik zgrzeblowy pełni w odniesieniu do obudowy zmechanizowanej. Masa własna trasy przenośnikowej umożliwia podciąganie się sekcji w stronę urabianej calizny węglowej wraz z postępem wydobywania [61].

4.3. Procesy produkcji górniczych łańcuchów ogniowych

Produkcja łańcuchów ogniowych stosowanych w przenośnikach zgrzeblowych jest procesem stosunkowo skomplikowanym i energochłonnym. Zasadniczo produkcję ogniów łańcuchowych można podzielić na dwie metody (często wykorzystywane łącznie w ramach wytwarzania jednego odcinka łańcucha):

- 1) Formowanie ogniów łańcuchowych z prefabrykatu w postaci pręta, który kolejno podlega cięciu, formowaniu do postaci ogniwa, zgrzaniu stykających się powierzchni i usunięciu zgorzeliny. Kolejne etapy, takie jak kalibracja, ewentualne spłaszczenie i dodanie poprzeczki, można określić jako procesy wykańczające i dodatkowe.
- 2) Wykonanie ogniwa z rozgrzanego prefabrykatu w procesie kucia matrycowego – zasadniczo dotyczy wykonawstwa ogniów pionowych w łańcuchach płaskich, superpłaskich i specjalnych.

Proces wytwarzania łańcuchów ogniowych z uwzględnieniem poszczególnych jego etapów został przedstawiony na Rysunku 4.11.

Podstawowy surowiec do produkcji łańcuchów ogniowych stanowią stalowe pręty o przekroju kołowym. Ich średnica i materiał zależne są od klasy i rozmiaru produkowanego łańcucha. W pierwszej kolejności pręt przycinany jest na odcinki o wymaganej długości. W przypadku większości uznanych producentów łańcuchów proces ten jest zautomatyzowany i realizowany przy pomocy systemów posuwu pręta i gilotyny hydraulicznej.

Kolejnym etapem jest przygotowanie przyciętych prętów do procesu dalszego kształtowania. W tym celu są one podgrzewane do temperatury ich uplastycznienia. Równomierność procesu podgrzewania uzyskiwana jest dzięki ciągłemu obracaniu poszczególnych prętów. Opcjonalnie, na wstępnym etapie produkcji, pręty mogą być oczyszczane z warstwy tlenkowej, np. z wykorzystaniem natrysku wody pod wysokim ciśnieniem.

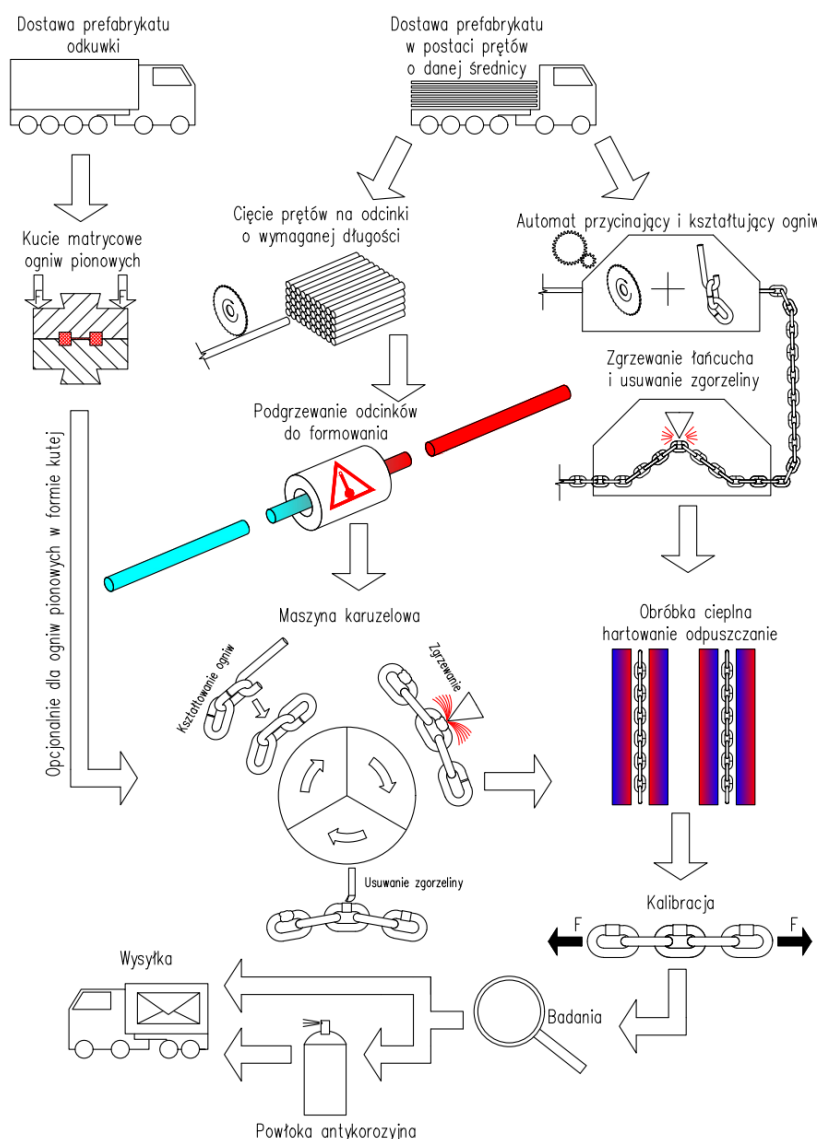
Kolejnym etapem procesu produkcyjnego jest formowanie z prętów samych ogniw. W przypadku długich łańcuchów górniczych o relatywnie dużych średnicach pręta, operacja ta odbywa się na maszynach karuzelowych. Kilka równocześnie powstających fragmentów łańcucha zaczepionych jest do ramion maszyny karuzelowej i przemieszczanych pomiędzy stanowiskami obróbczymi.

Na pierwszym stanowisku operator przekłada pręt przez poprzedzające je ogniwo i na giętarcie matrycowej formuje pręt w kształt ogniwa. Odbywa się to dwuetapowo – najpierw ogniwo formowane jest w kształt litery „J” a dopiero w drugim gięciu na kształt litery „C”. Następnie odcinek łańcucha transportowany jest na stanowiska zgrzewania, gdzie przy pomocy zgrzewarki indukcyjnej łączone są obydwa końce wygiętego ogniwa. W procesie zgrzewania na jednym z odcinków prostych łańcucha powstaje zgorzelina, którą usuwa się na następnym stanowisku obróbczym maszyny karuzelowej. Tak przygotowane ogniwo trafia ponownie na pierwsze stanowisko obróbcze celem przełożenia i przygotowania kolejnego pręta ogniowego. Ogniwa pionowe przekładane są między ogniwa poziome (o przekroju okrągłym), które w procesie, jak opisano powyżej, łączą całość w odcinki łańcucha o określonej długości. Tak powstające łańcuchy produkowane są w kilku bądź kilkunastometrowych odcinkach, a następnie łączone do osiągnięcia docelowej długości.

W przypadku łańcuchów o mniejszych średnicach pręta proces produkcyjny cechuje się znacznie większą automatyzacją. Znane są rozwiązania [71], w których podstawowa część procesu produkcyjnego realizowana może być tylko na dwóch stanowiskach. Na pierwsze z nich (rys. 4.12), jako prefabrykat, podawany jest surowy pręt o docelowej średnicy. Maszyna w swoim polu roboczym jednocześnie przycina pręt na określonej długości odcinki, z których kolejno wygina i przekłada kolejne ogniwa. Następnie uformowany łańcuch (również w cyklu

automatycznym) trafia do zgrzewarki (rys. 4.13a), gdzie jednocześnie łączone są krawędzie ogni i usuwana jest powstała zgorzelina.

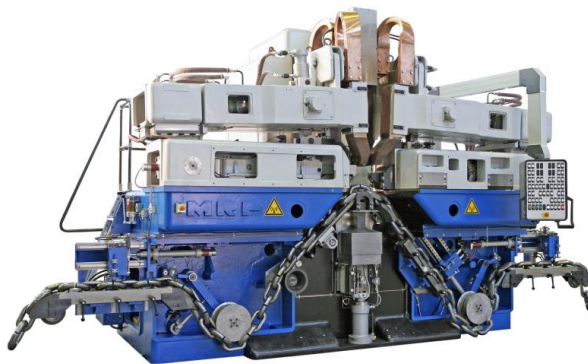
Bez względu na stopień automatyzacji produkcji łańcuchów, zgrzane odcinki łańcucha poddawane są dalszej obróbce. Po wstępnej kontroli ewentualnych wad procesu produkcyjnego, łańcuch trafia na stanowisko obróbki cieplnej. W specjalnych piecach i kadziach o kontrolowanej temperaturze dochodzi do hartowania i odpuszczania łańcucha (rys. 4.13b). Często proces prowadzony jest w pionowych, stosunkowo długich piecach, dzięki czemu może odbywać się on w trybie ciągłym. Dzięki temu łańcuch na całej swojej długości cechuje się jednolitymi parametrami wytrzymałościowymi. W tym miejscu należy również nadmienić, że proces ten może cechować się znacznie większym skomplikowaniem. Dotyczy to łańcuchów o niejednakowych parametrach wytrzymałościowych w obrębie pojedynczego ogniwa, gdzie wytrzymałość odcinków prostych i wytrzymałość łuków cechują się różną wartością.



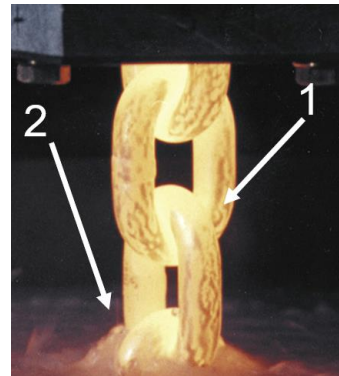
Rys. 4.11. Schemat procesu produkcji łańcuchów ogniowych



Rys. 4.12. Przycinarka prętów do produkcji łańcuchów [71]



a)



b)

Rys. 4.13. Proces produkcji łańcuchów a) zgrzewanie z wykorzystaniem zautomatyzowanej zgrzewarki ogniów łańcuchowych [71] b) hartowanie łańcucha, oznaczenia: 1 - rozgrzane ogniwo, 2 – chłodziwo [72]

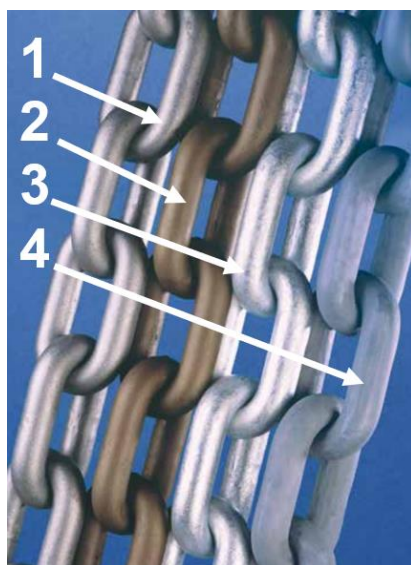
Ostatnim etapem produkcyjnym łańcuchów ogniowych jest kalibracja. Jest to proces niezbędny w przypadku stosowania ich w napędach łańcuchowych (zachowanie stałej podziałki). Kalibrowanie polega na poddaniu danego odcinka łańcucha obciążeniu kalibrującemu. Jest to siła rozciągająca łańcuch celem osiągnięcia założonych wymiarów ogniów oraz w celu usunięcia ogniów wadliwych.

Po zakończeniu etapu produkcyjnego prowadzona jest kontrola stanu technicznego wytworzonego wyrobu. Sposób i ilość pobieranych próbek oraz metody badawcze są znormalizowane. W przypadku łańcuchów produkcji krajowej mogą być one kontrolowane wg zaleceń normy PN-G 46701:1997 [58]. Norma zaleca przeprowadzenie następujących etapów badawczych:

- sprawdzenie materiału,
- sprawdzenie wykonania i cechowania,
- sprawdzenie wymiarów ogniwa,
- sprawdzenie długości rzeczywistej łańcucha,

- sprawdzenie prawidłowości doboru łańcucha,
- przeprowadzenie próby rozrywania,
- przeprowadzenie próby zginania ogniwa,
- przeprowadzenie próby udarowości,
- sprawdzenie trwałości zmęczeniowej.

W tym miejscu należy wspomnieć również o zabezpieczeniu antykorozyjnym łańcuchów, traktowanym jako obróbka opcjonalna. Ma ona szczególne znaczenie w przypadku składowania łańcuchów w niekorzystnych warunkach. W zależności od przeznaczenia producenci oferują kilka możliwości pokrycia antykorozyjnego łańcuchów (Rys. 4.14).



Rys. 4.14. Porównanie pokrycia powierzchni łańcuchów (1-stal czarna, 2-tectyl, 3-ocynk ogniowy, 4- Corostar Plus – nazwa handlowa) [6]

Często powłokę stosowaną do ochrony łańcuchów stanowi Tectyl. Jest to najsłabsza forma zabezpieczenia antykorozyjnego. Stosowany jest on jedynie do ochrony łańcuchów przeznaczonych do krótkiego składowania. Wykazuje również cechy smarne, co ułatwia docieranie się ogniów w początkowej fazie eksploatacji. Inny przykład pokrycia środkiem antykorozyjnym stanowi Corostar Plus. Jest to rodzaj farby cynkowo-proszkowej, która dzięki dodatkom smarującym ogranicza tarcie w rejonie przegubów. Środek ten zalecany jest do stosowania w łańcucha strugowych, gdzie ułatwia docieranie na łukach ogniów i wydłuża żywotność elementów układu cięgnowego. Powyższe rozwiązania antykorozyjne nie chronią łańcuchów w kontakcie z agresywnymi wodami kopalnianymi. Rozwiązaniem mogącym zabezpieczyć korozyjnie łańcuchy górnicze jest cynkowanie ogniowe łańcuchów górniczych. W procesie tym na powierzchni ogniwa powstaje powłoka złożona z dwóch warstw: fazy międzymetalicznej stal - cynk oraz zewnętrznej warstwy cynku. Powłoka ta cechuje się stałą

grubością, brakiem porowatości, wysokim stopniem przyczepności, dzięki czemu wykazuje stosunkowo dużą odporność na ścieranie [6].

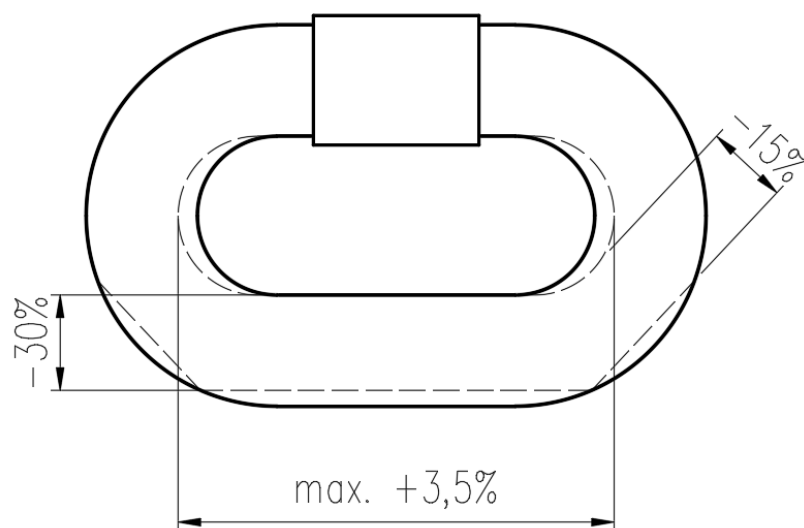
4.4. Procesy eksploatacji łańcuchów

Prawidłowa eksploatacja i regularne przeglądy techniczne są zabiegami niezbędnymi z punktu widzenia minimalizacji awaryjności układów łańcuchowych oraz poprawy bezpieczeństwa pracy załogi obsługującej maszynę w nie wyposażoną. Nie istnieją znormalizowane wytyczne określające częstotliwość oraz zabiegi, które należy wykonać w ramach okresowych przeglądów technicznych. W tym aspekcie należy polegać na kryteriach konserwacyjnych przygotowanych przez producentów łańcuchów ogniowych oraz własnych doświadczeniach. Przede wszystkim zaleca się, aby wizualną ocenę stanu węzłów łańcuchowych przeprowadzać codziennie. Odcinki łańcuchów z widocznymi uszkodzeniami i wydłużeniami zauważalnymi gołym okiem należy niezwłocznie wymienić.

W przypadku łańcuchów przenośnikowych należy również zwracać uwagę na zgrzebła. Ich uszkodzenia, bądź niepoprawny montaż mogą niekorzystnie wpływać na płynność pracy w rynn timer przenośnikowej, co z kolei generować może dodatkowe naprężenia dynamiczne w łańcuchu. W związku z tym uszkodzone zgrzebła należy bezwzględnie wymienić, a luźne bądź brakujące elementy montażowe dokręcić lub uzupełnić. Kolejnym krokiem powinna być weryfikacja poprawnego osadzenia i stanu zużycia kół łańcuchowych, których degradacja również niekorzystnie wpływa na zużywanie się łańcuchów. Zaleca się, aby przynajmniej raz na kwartał skontrolować stopień wydłużenia łańcuchów przy pomocy specjalnego przyrządu mierniczego. Ważne jest by ewidencjonować zebrane dane i spostrzeżenia. Ich analiza może sugerować tempo zużywania się łańcuchów i pozwala na planowanie remontów i wymiany elementów przenośnika. Łańcuchy zapasowe nieprzekazane jeszcze do eksploatacji powinny być zabezpieczone antykorozyjnie zgodnie z wytycznymi producenta dla danego rodzaju łańcucha. W okresach zmiany lokalizacji pracy łańcuchów (np. przewóz łańcuchów z przodka na inny przodek) należy je oczyścić z pozostałości transportowanego urobku, wysuszyć i zabezpieczyć olejem lub substancją konserwującą np. Tectyl. [5, 6]

W kontekście przeglądów i ponownego wykorzystywania używanych łańcuchów, niezwykle istotne są kryteria kwalifikujące łańcuchy do wymiany. W tym przypadku również brak krajowych, jednoznacznych wytycznych (norm) kwalifikujących łańcuchy do wycofania z eksploatacji. Często producenci łańcuchów sporządzają własne kryteria. Zgodnie z instrukcją eksploatacyjną jednego z producentów łańcuchów, wyróżnić można trzy kryteria, których przekroczenie kwalifikuje łańcuch ogniowy do wymiany (Rys. 4.15). Należą do nich [6]:

- wydłużenie podziałki o co najmniej 3,5% (nominalnej),
- zmniejszenie średnicy pręta na odcinku prostym ponad 30%,
- zmniejszenie średnicy pręta na łuku ponad 15%.



Rys. 4.15. Wielkości geometryczne kwalifikujące łańcuch do wymiany [6]

5. CHARAKTERYSTYKA PROCESU BADAWCZEGO

Proces zużywania się ogniw łańcuchowych w przegubie jak i badania związane z identyfikacją synergizmów związanych z tym procesem są złożone i wymagają wieloaspektowego podejścia w celu rozwiązania przedstawionego we wcześniejszym rozdziale pracy problemu naukowego. Z uwagi na zmienność warunków eksploatacyjnych, zarówno w aspekcie dynamicznym, jak i w aspekcie zróżnicowania czynników degradujących, przyjęto w pracy, że pozyskanie niezbędnej wiedzy koniecznej dla poznania zależności synergistycznych między czynnikami ściernymi, korozyjnymi i dynamicznymi, nastąpi na podstawie badań eksperymentalnych wyizolowanej pary ogniw łańcuchowych.

Autor ma świadomość, że z punktu widzenia właściwego odwzorowania panujących warunków najlepsze byłyby badania „in situ” na rzeczywistych układach przenośnikowych, jednakże sposób ten nie zagwarantowałby właściwej powtarzalności próby. W związku z tym, na potrzeby pracy badawczej, opracowano metodę badawczą z jednej strony umożliwiającą w dużym stopniu odwzorowanie warunków pracy łańcucha przenośnikowego, a z drugiej strony zachowanie możliwości generowania współpracy pary ogniw łańcuchowych w izolowanych warunkach. Takie założenie implikuje konieczność przeprowadzenia licznych badań wstępnych oraz szerokiej analizy uzyskanych wyników pomiarów zużycia.

Cały plan badań zrealizowany w ramach pracy doktorskiej cechował się dużą złożonością i został podzielony na szereg etapów cząstkowych. Wszystkie wspomniane w niniejszym rozdziale etapy badań w sposób szczegółowy opisano w dalszej części pracy, natomiast schemat procesu badawczego zaprezentowano na Rysunku 5.1.

Jak wynika z Rysunku 5.1, kluczowym elementem planu badawczego było opracowanie i budowa stanowiska do badań łańcuchów w środowisku odtwarzającym warunki górnicze (Etap 1). Etap ten wymagał przeprowadzenia prac koncepcyjnych, obliczeniowych i projektowych dotyczących konstrukcji mechanicznej stanowiska, jak również jego instalacji elektrycznej, pneumatycznej i zasilająco-sterującej, a także zbudowania i przetestowania stanowiska badawczego. Stanowisko umożliwia uzyskanie cyklicznych wahań ogniwa łańcuchowego względem osi przegubu oraz zapewnia stałą obecność wybranych dla danego wariantu testu zestawu czynników środowiskowych.

Kolejnym etapem procesu badawczego była identyfikacja własności typowych czynników środowiskowych i ich wybór do dalszych badań oraz ustalenia wartości parametrów charakteryzujących obciążenie układu badawczego (Etap 2). W pracy przyjęto założenie, że dobór parametrów badań zostanie oparty na parametrach rzeczywistego obiektu – ratowniczego przenośnika zgrzeblowego – oraz na wynikach badań czynników charakteryzujących eksploatację górniczych łańcuchów ogniowych.

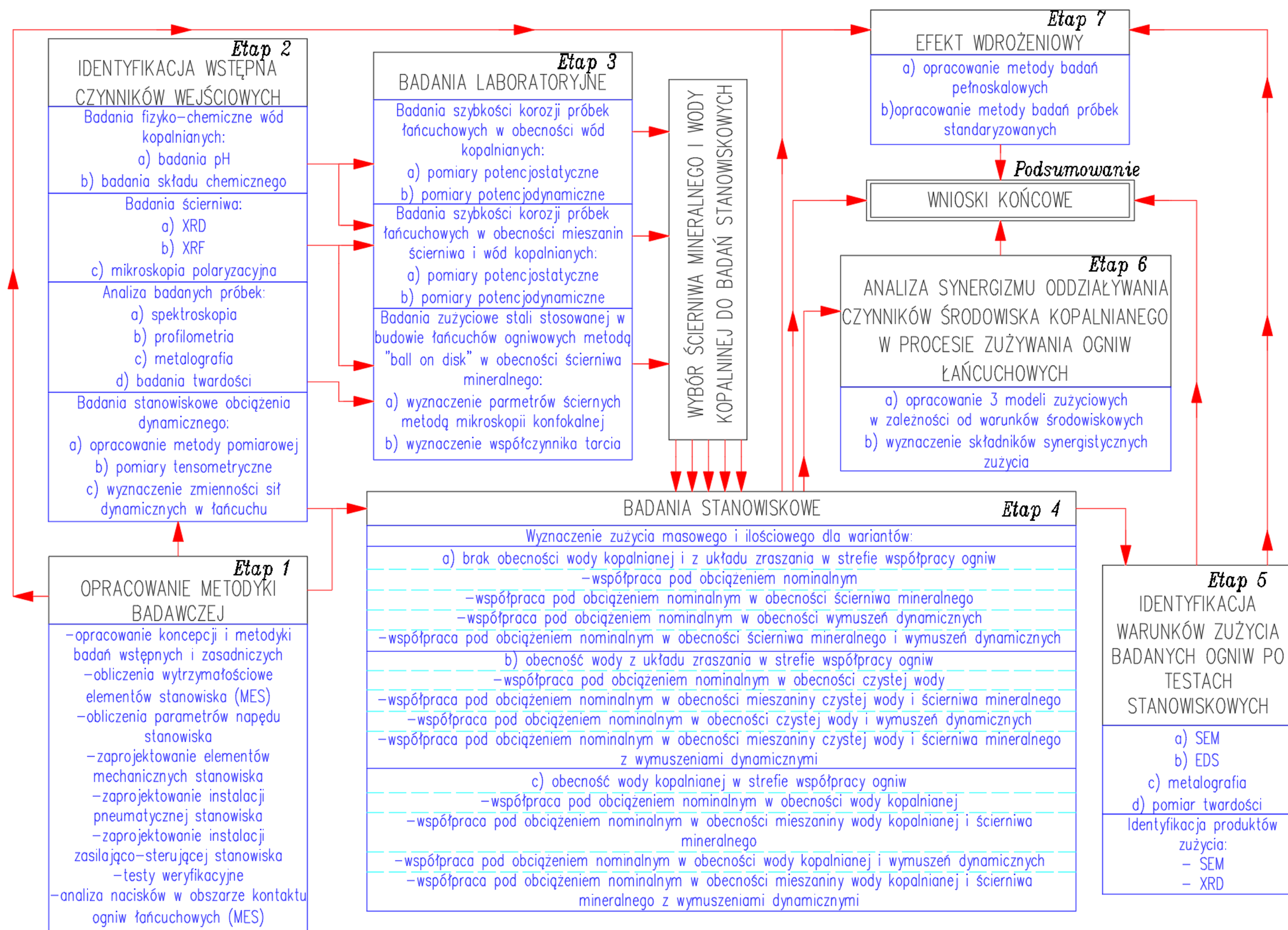
Identyfikacja ta (Etap 2) wiązała się z badaniami pozyskanych z kopalń węgla kamiennego ścierniw mineralnych i wód dołowych występujących w środowisku eksploatacji korytarzowych przenośników zgrzeblowych. Ponadto, w ramach etapu przeprowadzono badania sił dynamicznych występujących w łańcuchu ogniowym 14x50 w czasie eksploatacji modelowego przenośnika ratowniczego celem wyznaczenia charakterystyki zmian obciążenia w łańcuchu podczas jego pracy.

Kolejny etap dotyczył działań badawczych ukierunkowanych na wybór ścierniwa i wody dołowej do dalszych badań stanowiskowych. Jako kryterium doboru ustalono maksymalizację degradacji powierzchni ogniw łańcuchowych, co pozwala (w zakresie pozyskanych materiałów środowiskowych) określić maksymalne wartości zużycia dla danego zestawienia czynników niszczących. Etap 3 stanowiły przede wszystkim badania korozyjne w warunkach typowo laboratoryjnych. W ramach tych badań przeprowadzono badania szybkości korozji próbek wykonanych z rzeczywistego łańcucha w środowisku wody kopalnianej oraz jej mieszaniny ze ścierniwem. Wyniki tych badań zostały także wykorzystane do określenia synergii oddziaływania czynników środowiskowych. Ponadto przeprowadzono badania zużycia modelowych próbek w obecności mieszaniny wodno-mineralnej, ukierunkowane na dobór materiału mineralnego wykazującego się największym oddziaływaniem ściernym na stale stosowane na ogniwa łańcuchowe.

Podsumowując, działania zaplanowane w Etapach 2 i 3 miały na celu zdefiniowanie warunków symulujących warunki środowiskowe dla zasadniczych badań na stanowisku badawczym, czyli dobór reprezentatywnego ścierniwa, wody kopalnianej i ustalenie parametrów wymuszeń dynamicznych.

Właściwe badania stanowiskowe (Etap 4) zrealizowano dla 12 wariantów skojarzeń czynników eksploatacyjnych (Tab. 5.1) podzielonych na 3 grupy. Grupa I czynników środowiskowych odpowiadała warunkom kopalni bez dopływu wód dołowych i bez stosowania wody z układu zraszania. Z kolei Grupa II czynników środowiskowych odpowiadała również warunkom kopalni bez dopływu wód dołowych, ale w której stosowane jest zraszanie wodą transportowanego urobku. Natomiast Grupa III odpowiadała warunkom kopalni z dopływem wód kopalnianych. Przedstawiony podział na grupy czynników środowiskowych został wykorzystany przy analizie synergii zużycia wieloczynnikowego.

Dodatkowo przeprowadzono badania dla tzw. wariantu specjalnego. W ramach niego przeprowadzona została próba zużycia w warunkach spodziewanych jako skrajnie niekorzystne: obecność ścierniwa mineralnego, wody kopalnianej i wymuszeń dynamicznych pod obciążeniem nominalnym, przy jednoczesnym braku współpracy mechanicznej ogniw w przegubie. Wariant ten miał na celu potwierdzenie spodziewanego założenia, że wpływ wyizolowanego ścierniwa, korozji elektrochemicznej czy wymuszeń dynamicznych



Rys. 5.1. Schemat procesu badawczego

przy braku współpracy ogniów ma pomijalnie niski wpływ na ogół procesów zużyciowych zachodzących w ramach ich nominalnej współpracy.

Tab. 5.1. Zestawienie wariantów badań stanowiskowych

Wariant	Obciążenie nominalne (grawitacyjne)	Ruch stacjonarny w przegubie	Obecność ścierniwa mineralnego	Obecność wody technologicznej	Obecność wody dołowej	Obecność wymuszeń dynamicznych
Grupa I						
1	X	X	–	–	–	–
2	X	X	X	–	–	–
3	X	X	–	–	–	X
4	X	X	X	–	–	X
Grupa II						
5	X	X	–	X	–	–
6	X	X	X	X	–	–
7	X	X	–	X	–	X
8	X	X	X	X	–	X
Grupa III						
9	X	X	–	–	X	–
10	X	X	X	–	X	–
11	X	X	–	–	X	X
12	X	X	X	–	X	X
Wariant specjalny – brak wymuszeń mechanicznych w przegubie						
0	X	–	X	–	X	X

W ramach badań stanowiskowych, każdy wariant badawczy był powtarzany 4 razy, co skutkowało koniecznością przeprowadzenia ponad 780 godzin testów stanowiskowych. Pomiar zużycia odbywał się poprzez określenie ubytku masowego pary ogniów łańcuchowych oraz poprzez określenie maksymalnego ubytku liniowego z wykorzystaniem przestrzennego skanowania powierzchni.

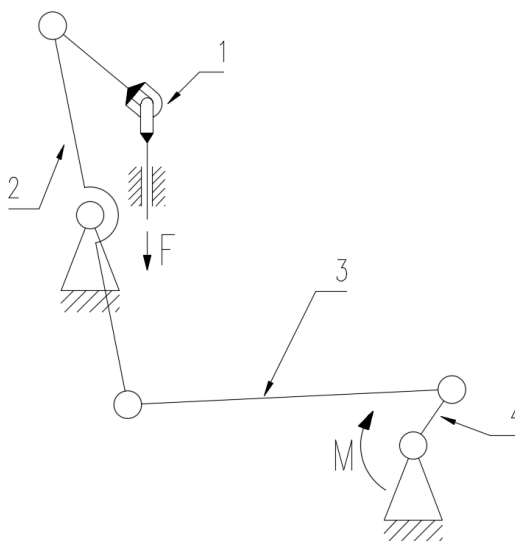
Po zakończeniu badań stanowiskowych została dokonana identyfikacja strefy uszkodzeń (Etap 5), obejmująca swoim zakresem badania mikroskopii skaningowej (SEM) i świetlnej, analizę EDS (metoda spektroskopii dyspersji energii), badania mikrostrukturalne, analizy rozkładu twardości oraz ocenę produktów zużycia poprzez analizy rentgenowskie (XRD) i rozkłady zawartości pierwiastków na powierzchni ziaren.

Na bazie uzyskanych w Etapie 4 miar zużycia, dokonano analizy synergii oddziaływania czynników środowiska kopalnianego na proces zużywania ogniów łańcuchowych (Etap 6). W ramach tej analizy opracowano 3 modele zużycia synergistycznego, dostosowane do warunków środowiskowych danej kopalni (odpowiadały one poszczególnym grupom czynników eksploatacyjnych) oraz wyznaczenia składowych synergistycznych.

5.1. Charakterystyka stanowiska badawczego

Podstawowym założeniem prac projektowych było skonstruowanie stanowiska badawczego, przeznaczonego do badań zużywania łańcuchów (w obszarze przegubu ogniwa) w aspekcie oddziaływania wieloczynnikowego, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu czynników środowiskowych występujących w górniczych zakładach podziemnych. W toku prac koncepcyjnych ustalono następujące założenia dodatkowe dla stanowiska badawczego:

- W oparciu o przyjęte założenia wstępne opracowano schemat kinematyczny stanowiska badawczego (Rys. 5.2).



1 – współpracujące ogniwa, 2 – wahacz, 3 – łącznik, 4 – korba, F – siła obciążająca,
 M – moment obrotowy)

Zgodnie z powyższym schematem ustalono, że moment obrotowy przekazywany będzie bezpośrednio na układ korbowy. Korba połączona zostanie przy pomocy łącznika z przegubowo zamontowanym wahaczem. Ruch korby umożliwia ruch obrotowy wahacza wokół przegubu w ograniczonym zakresie, odpowiadającym wymaganemu zakresowi obrotu w przegubie łańcuchowym. Wahacz drugą stroną połączony jest przegubowo z ramieniem, na którym zamontowana została połowa ogniwa wykonująca ruch w przegubie. Na ruchomym ogniwie zawieszony został uchwyt przekazujący obciążenie, siłę F o kierunku zgodnym z osią podłużną ogniwa nieruchomego.

5.1.2. Projektowanie i wytworzenie stanowiska badawczego

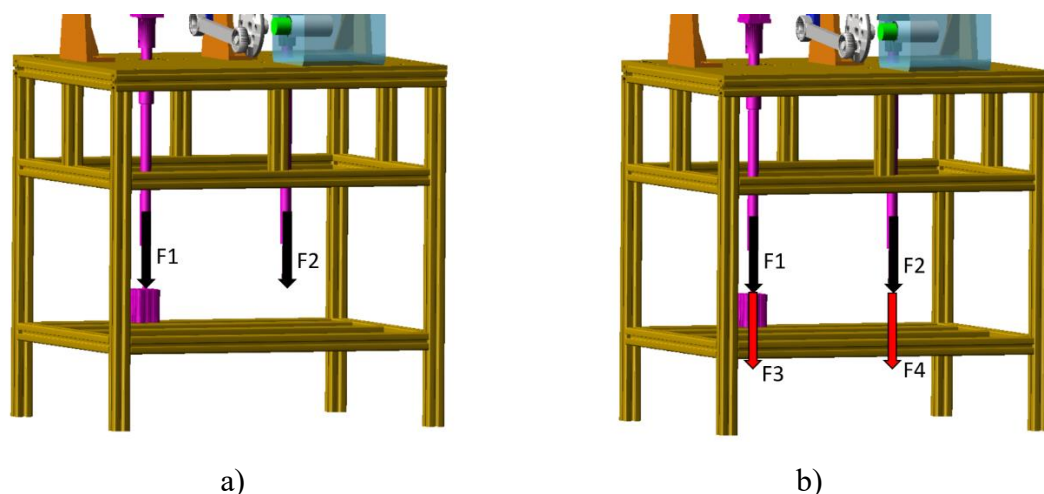
W ramach prac projektowych przeprowadzono obliczenia wymaganej mocy zespołu napędowego stanowiska badawczego oraz obliczenia wytrzymałościowe elementów nośnych mechanizmu wahacza.

Model obliczeniowy służący do obliczenia wymaganej mocy zespołu napędowego stanowiska badawczego zbudowano przy wykorzystaniu oprogramowania Adams i w oparciu o model geometryczny stanowiska. Model obliczeniowy stanowiska badawczego o 8 stopniach swobody składał się z 18 brył sztywnych połączonych ze sobą więzami geometrycznymi. W modelu znalazły się 3 więzy cylindryczne, 4 więzy obrotowe, 5 więzów sferycznych, 2 więzy przesuwne oraz 7 więzów utwierdzających. Ponadto w modelu zdefiniowano również 3 wektory sił i momentów dla wariantu ze stałą wartością obciążenia oraz 5 wektorów sił i momentów w odniesieniu dla wariantu z obciążeniem dynamicznym.

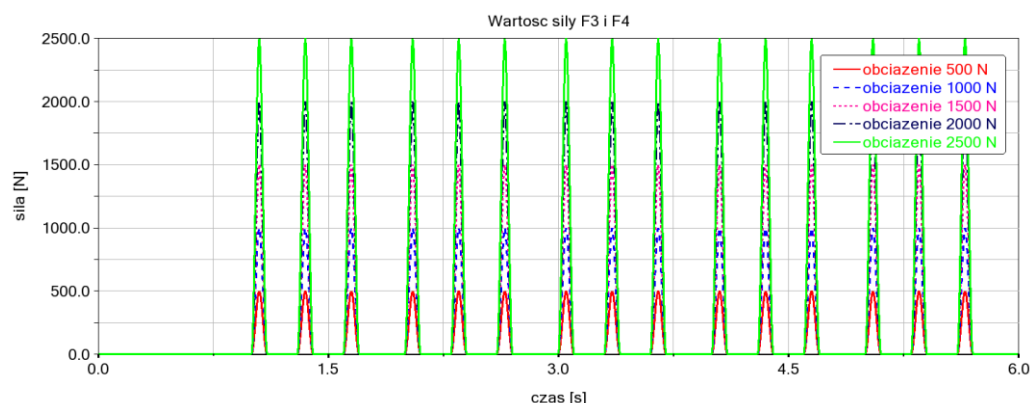
W modelu obliczeniowym zasymulowano silnik elektryczny, dla którego przyjęto następujące parametry: napięcie zasilania o wartości 230 V, prąd znamionowy o wartości 5.7 A, częstotliwość zasilania o wartości 50 Hz, współczynnik mocy równy 0.78, rezystancja uzwojeń 0.35Ω oraz 4 pary biegunów silnika. Pomiędzy wałem silnika a mimośrodem połączonym z korbą napędzającą układ kinematyczny stanowiska dobrano wartość przełożenia wynoszącą ok. 12. Pomiędzy ogniwami będącymi w kontakcie oraz pomiędzy ogniwem i elementem ślizgowym w uchwycie zdefiniowane zostały parametry kontaktu, w tym współczynnik tarcia, który wynosił 0.3 w odniesieniu do tarcia statycznego oraz 0.1 w odniesieniu do tarcia dynamicznego.

W ramach obliczeń numerycznych wymaganej mocy zespołu napędowego przewidziano dwa warianty obciążenia ogniwa łańcuchowych. W wariantcie 1 ogniwa łańcuchowe obciążane były siłą o stałej wartości. Na etapie obliczeniowym dokładne wartości obciążeń nominalnych i dynamicznych nie były jeszcze znane, dlatego do analizy przyjęto ich szerszy zakres (wartości sił F_1 i F_2 z Rys. 5.3 były równe: 500, 1000, 1500,

2000 oraz 2500 N). W drugim wariancie modelu obliczeniowego uwzględniono siły F_3 i F_4 , których wartość była zmienna i powodowała obciążenia impulsowe o wartości równej wartości sił F_1 i F_2 z częstotliwością 3 razy na sekundę. Schemat obciążenia stanowiska w wariancie 2 przedstawiono na Rysunku 5.3, natomiast przebiegi wartości sił F_3 i F_4 w czasie symulacji przedstawiono na Rysunku 5.4.



Rys. 5.3. Sposób obciążenia ogniów łańcuchowych – a – wariant 1; b – wariant 2



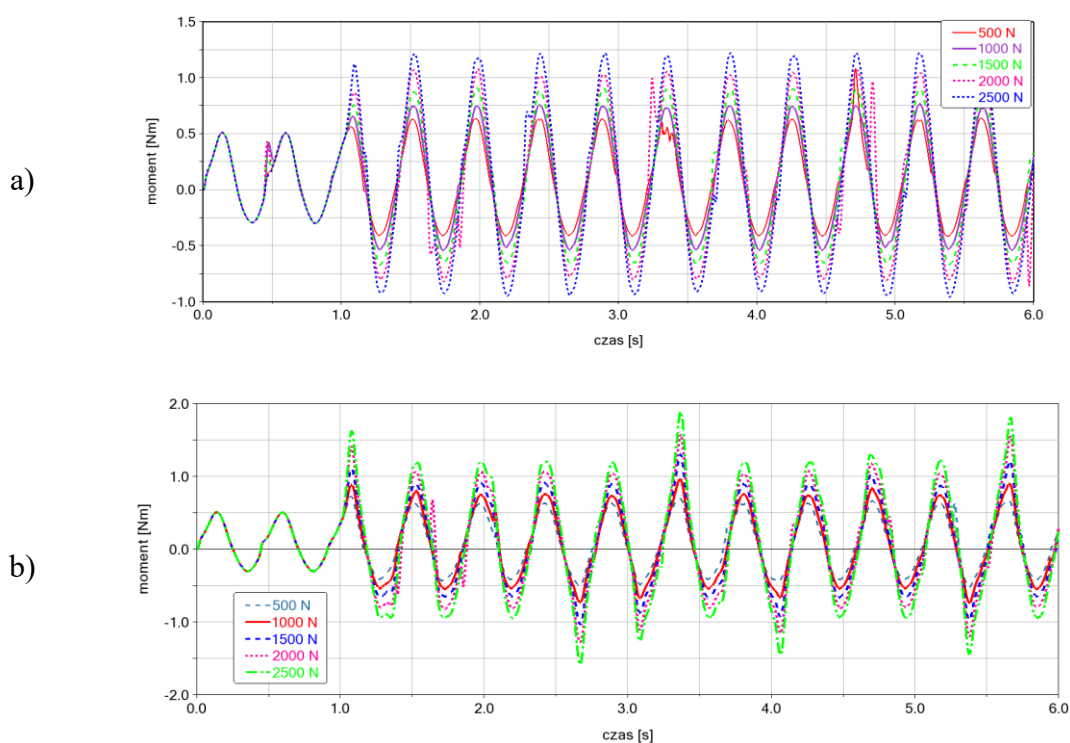
Rys. 5.4. Przebieg wartości sił F_3 i F_4 podczas symulacji w wariancie 2 obciążenia modelu obliczeniowego

Łącznie przeprowadzono 10 symulacji numerycznych pracy stanowiska badawczego, które różniły się schematem obciążenia oraz wartością wektorów sił obciążenia. Każda z przeprowadzonych symulacji zakładała rozruch silnika i wprowadzenie w ruch układu kinematycznego w czasie do pierwszej sekundy, aktywację sił F_1 i F_2 oraz F_3 i F_4 po pierwszej sekundzie (czas trwania impulsu siły wynosił 0,1 s – Rys. 5.4) oraz zakończenie symulacji w szóstej sekundzie.

Podczas symulacji wyliczano następujące wielkości: moment generowany przez silnik, prędkość obrotową silnika, moc generowaną przez silnik oraz wartości sił wypadkowych pomiędzy ogniwami łańcuchowymi podlegającymi badaniom oraz pomiędzy ogniwem, a

elementem ślizgowym na uchwycie. Uzyskane wyniki z symulacji obciążenia dla obydwu wariantów przedstawiono na Rysunku 5.5.

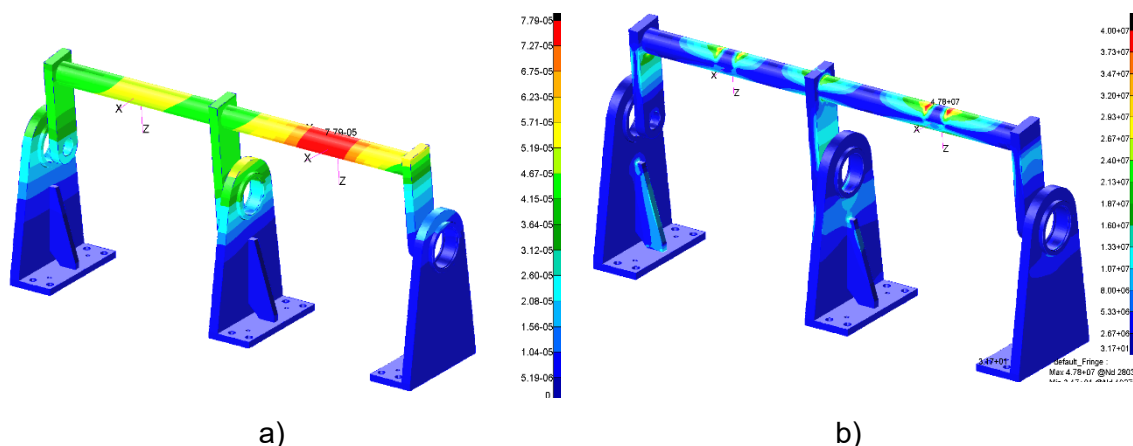
Na podstawie przeprowadzonych obliczeń numerycznych dokonano doboru parametrów zespołu napędowego. Wybrano silnik elektryczny, trójfazowy montowany na łapach (B3) wraz z możliwością montażu kołnierзовego (B14) o mocy 1,5 kW i prędkości obrotowej wału wynoszącej około 1450 min^{-1} . Oprócz silnika dobrano przekładnię ślimakową o przełożeniu $i=11,42$.



Rys. 5.5. Zestawienie wartości momentu generowanego przez silnik przy różnych wariantach obciążenia ogni; a – wariant 1, b – wariant 2.

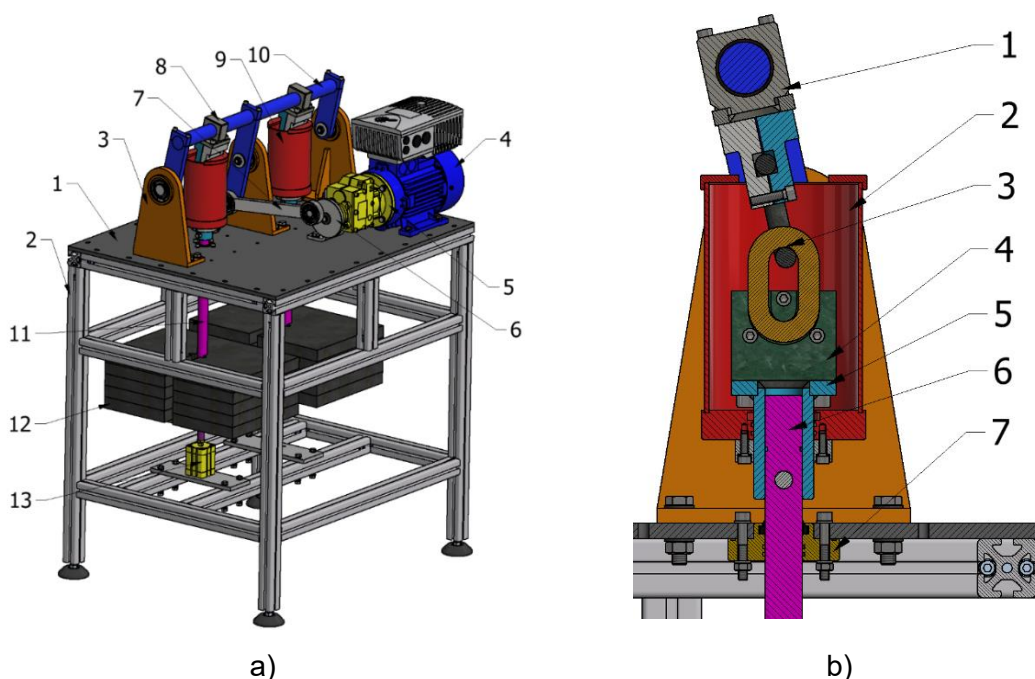
Dla skrajnego wychylenia wahacza przeprowadzono obliczenia wytrzymałościowe (metodą MES) wahacza oraz wsporników, na którym jest on zamontowany. Mechanizm roboczy stanowiska obciążono siłą 2500 N. W wyniku przeprowadzonych obliczeń numerycznych wyznaczono mapy przemieszczeń, odkształceń oraz naprężeń powstałe w analizowanym elemencie stanowiska wywołanych obciążeniem założonymi siłami. Uzyskane wyniki w postaci mapy odkształceń i naprężeń przedstawiono na Rysunku 5.6.

Maksymalna wartość wyznaczonych naprężeń wynosiła ok. 48 MPa. Największe wartości naprężeń występowały w miejscu przyłożenia obciążenia, czyli w miejscu mocowania uchwytu ogni łańcuchowych. W wyniku obliczeń wytrzymałościowych stwierdzono, że na żadnym obszarze wahacza, ani w obrębie jego wsporników nie występuje niebezpieczne spiętrzenie naprężeń mogące skutkować nadmiernym odkształceniem lub uplastycznieniem dobranych elementów stanowiska.



Rys. 5.6. Wyniki analizy wytrzymałościowej, a – mapa odkształceń; b – mapa naprężeń zredukowanych

Zasadnicze prace projektowe zostały wykonane z wykorzystaniem oprogramowania Autodesk Inventor. W ich wyniku powstał kompleksowy model trójwymiarowy (Rys. 5.7a) stanowiący podstawę do opracowania dokumentacji technicznej.



Rys. 5.7. Model stanowiska badawczego a) widok perspektywiczny stanowiska badawczego – widok ogólny; oznaczenia: 1 – blat stołu, 2 – rama stołu, 3 – stojaki, 4 – silnik elektryczny z falownikiem, 5 – reduktor, 6 – mimośród (korba), 7 – łącznik, 8 – uchwyt górnego ogniwa, 9 – zbiornik ścierniwa, 10 – wahacz, 11 – pręt obciążeniowy, 12 – obciążniki, 13 – siłownik pneumatyczny b) przekrój przez zbiornik ścierniwa; oznaczenia: 1 – uchwyt górnego ogniwa, 2 – zbiornik ścierniwa, 3 – punkt współpracy ogniw, 4 – uchwyt dolnego ogniwa, 5 – tuleja uszczelniająca, 6 – pręt obciążeniowy, 7 – tuleja prowadząca.

Napęd zespołu stanowi trójfazowy silnik elektryczny o mocy 1,5 kW. Silnik dobrano w korpusie zawierającym jednocześnie łąpy, jak i kołnierz przyłączeniowy. Umożliwiło to przykręcenie silnika do stołu poprzez łąpy i zamontowanie na nim kołnierzowo przekładni redukcyjnej. Przekładnia od strony wejściowej wyposażona jest w piastę z wpustem (do połączenia z silnikiem), a od strony zdawczej w wał, również wpustowy. Bezpośrednio na wale zamontowany został mimośród (korba) wykonany w postaci rury (z wydrążonym rowkiem wpustowym) z tarczą z otworami mimośrodowymi do regulacji kąta wychyłu. Tuleja mimośrodowa pełni rolę mechanizmu korby zamieniając ruch obrotowy na ruch posuwisto-zwrotny.

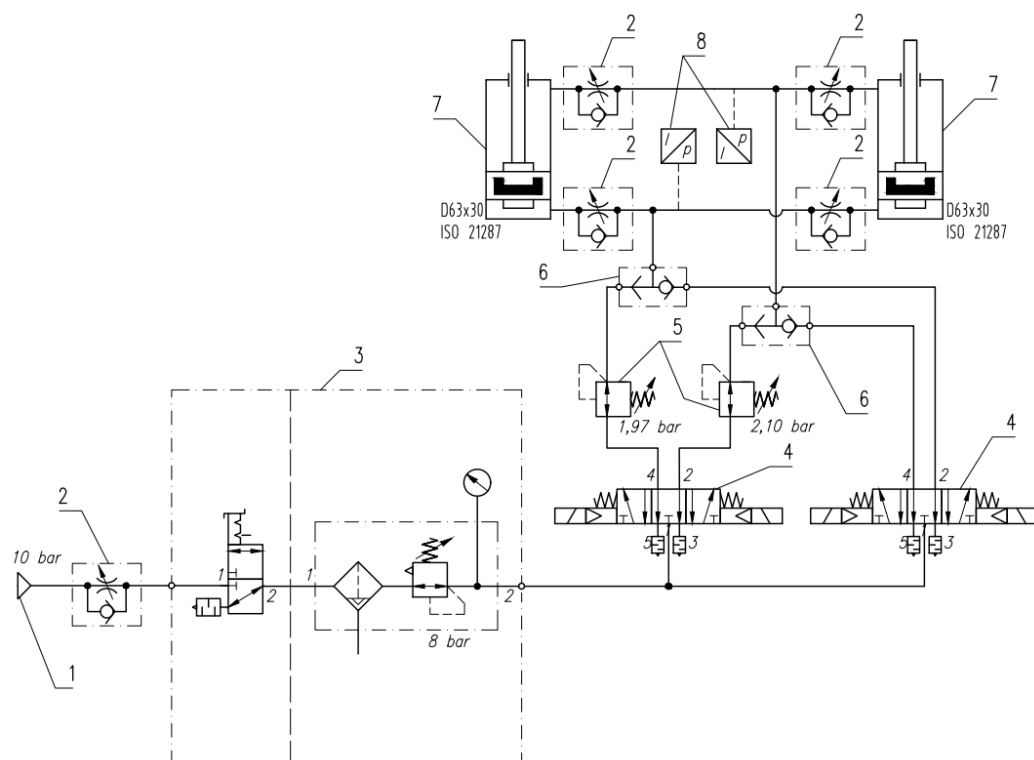
W otworze mimośrodowym zainstalowany został sworzeń zmontowany z łącznikiem. Łącznik jest elementem przekazującym ruch posuwisto zwrotny na wahacz, który z kolei zamienia go ponownie na ruch obrotowy wokół przegubu, jednak w zakresie ograniczonym do kąta wynoszącego 30° (możliwość regulacji kąta). Łącznik zaprojektowano w postaci stalowego cięgła, dwustronnie zakończonego piastami łożyskowymi, z jednej strony do połączenia z napędem, a z drugiej ze środkowym ramieniem trójramiennego wahacza zabudowanego w wahliwie na trzech stojakach. Do wahacza montowane są tak zwane ogniwa ruchome, współpracujące z ogniwami umownie nieruchomymi, które są obciążone ciężarem. Ogniwa zarówno ruchome jak i nieruchome znajdują się w zbiornikach, do których dodawane jest ścierniwo.

Objętość zbiorników została celowo ograniczona z uwagi na konieczność minimalizacji ilości ścierniwa potrzebnego do badań, a także na konieczność zmniejszenia zapylenia otoczenia, szczególnie niebezpiecznego z punktu widzenia zachowania bezpieczeństwa operatora stanowiska. Przekrój przez zbiornik ścierniwa zaprezentowano na Rysunku 5.7b.

Punkt przyłożenia siły wzdłużnej występującej w łańcuchu, przyjęto umieszczać na pręcie przymocowanym do dolnego ogniwa. Pręt wymagał ograniczenia możliwości przemieszczenia się w kierunkach prostopadłych do jego osi. W tym celu wprowadzona została tuleja prowadząca przykręcana od spodu stołu, umożliwiającą jedynie osiowe przemieszczenie pręta. Na końcu pręta przewidziano montaż zestawu obciążników (Rys. 5.7a, poz.12), symulujących siłę rozciągającą występującą w łańcuchu. Obciążniki zaprojektowano jako wykonane z prostokątnych kawałków blachy o ustandaryzowanej masie, a ich liczba zależna jest od założonego obciążenia. W dolnej części stołu przewidziano możliwość instalacji zespołu odpowiedzialnego za generowanie obciążeń dynamicznych. Założono, że rolę tę pełnić będzie siłownik pneumatyczny osiowo połączony z prętem obciążającym. Jednocześnie siłownik pneumatyczny montowany od spodu pełni funkcje operacyjne, takie jak odciążenie ogniwa, niezbędne podczas ich montażu i demontażu. Zastosowanie siłowników pneumatycznych wymusiło konieczność

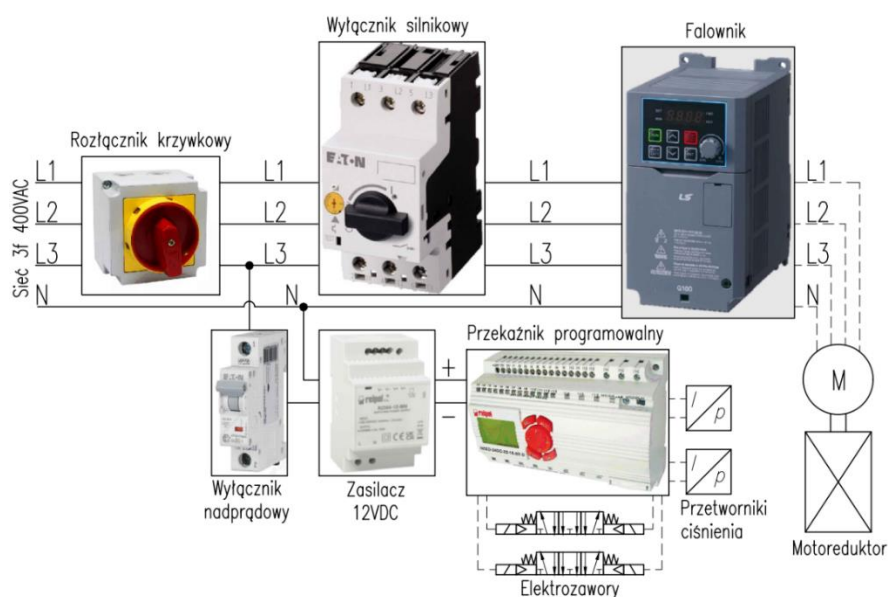
zaprojektowania całego pneumatycznego układu sterującego. Jego schemat zaprezentowano na Rysunku 5.8.

Układ pneumatyczny stanowiska może być zasilany przy pomocy dedykowanej sprężarki lub stacjonarnej magistrali pneumatycznej. Sprężone powietrze w pierwszej fazie trafia do zespołu przygotowania powietrza, gdzie jest osuszane i dokonywana jest pierwsza nastawa ciśnienia przy pomocy reduktora. Następnie kierowane jest na płytę elektrozaworów. Sterowanie przepływem przez jeden z nich kieruje strugę powietrza do zaworów redukcyjnych, gdzie nastawione jest ciśnienia powietrza wykorzystywane podczas prób stanowiskowych z występującym obciążeniem dynamicznym. Sterowanie drugim z elektrozaworów powoduje skierowanie powietrza z pominięciem reduktorów bezpośrednio do siłowników pneumatycznych, przy ciśnieniu nastawy z zespołu przygotowania powietrza (zadania operacyjne). Zastosowane po drodze zawory alternatywne determinują pożądany kierunek przepływu medium i uniemożliwiają rozładowanie ciśnienia przez nieużywany elektrozawór (w pozycji „zero” rozładowują układ). Monitorowanie ciśnienia odbywa się w sposób ciągły za pomocą przetworników ciśnienia. Układ wyposażony jest w szereg regulatorów przepływu, które w uzasadnionych przypadkach mają ograniczać prędkość elementów wykonawczych.



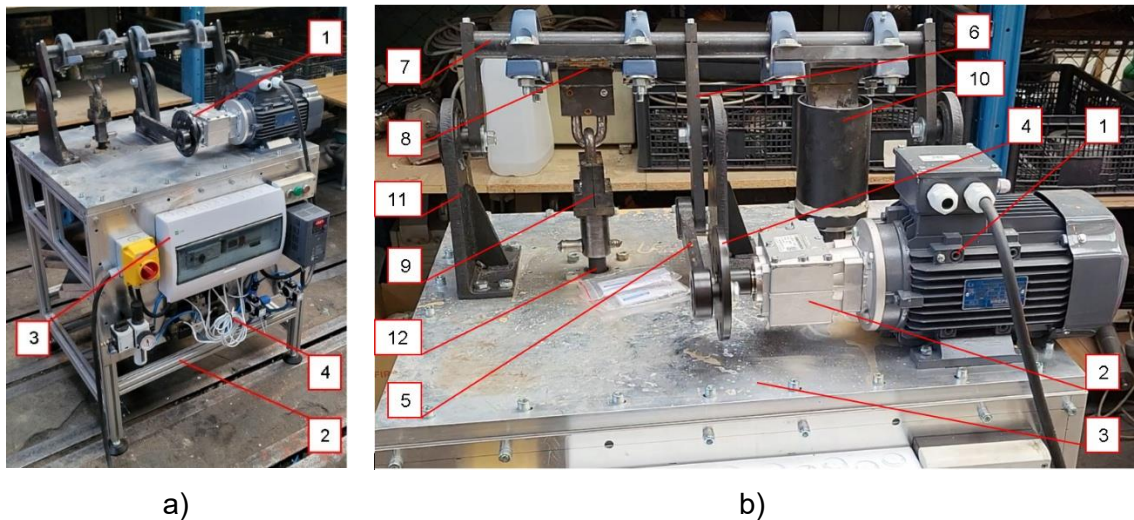
Rys. 5.8. Schemat pneumatycznego sterowania stanowiskiem badawczym; oznaczenia 1 – wlot sprężonego powietrza, 2 – regulator przepływu, 3 – zespół przygotowania powietrza, 4 – elektrozawór 5/2, 5 – reduktor ciśnienia, 6 – zawór alternatywny/logiczny, 7 – siłownik pneumatyczny, 8 – przetwornik ciśnienia

Zastosowanie sterowanych elektrycznie elementów zespołu pneumatycznego i elektrycznych zespołów napędowych stanowiska wymagało wprowadzenia prostego układu zasilająco-sterującego (Rys. 5.9). Stanowisko zasilane jest z 3-fazowej sieci 400VAC. Uruchomienie stanowiska odbywa się poprzez załączenie rozłącznika krzywkowego, który przekazuje napięcie na wyłącznik nadprądowy 230VAC i wyłącznik silnikowy 400VAC. Z wyłącznika silnikowego zasilany jest falownik, odpowiedzialny za sterowanie prędkością obrotową silnika elektrycznego stanowiącego integralną część motoreduktora stanowiska badawczego. Stanowisko wyposażone jest również w linię niskiego napięcia wytwarzaną przez zasilany z wyłącznika nadprądowego zasilacz 12VDC. Zasilacz ten odpowiedzialny jest za zasilanie przekaźnika programowalnego odpowiedzialnego za zasilanie przetworników ciśnienia oraz sterowanie pracą elektrozaworów (impulsowo w przypadku generowania obciążenia dynamicznego lub w trybie ciągłym dla elektrozaworu odpowiedzialnego za prace operacyjne).

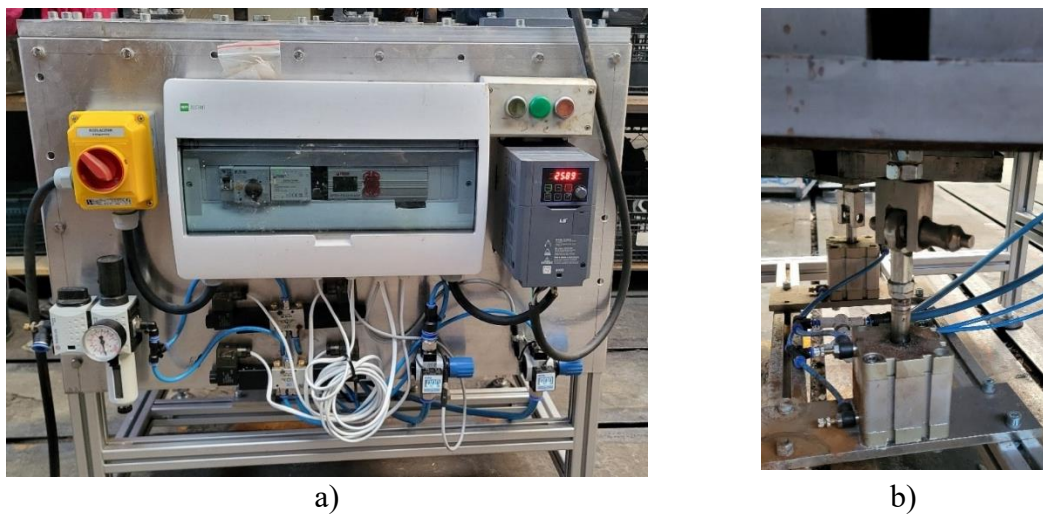


Rys. 5.9. Schemat układu elektryczno-sterującego stanowiska badawczego.

Zrealizowane prace projektowe umożliwiły opracowanie dokumentacji technicznej zawierającej rysunki wykonawcze i złożeniowe elementów mechanicznych oraz rysunki zawierające schematy elektryczne i pneumatyczne. Na ich podstawie zakupiono i zlecono wykonanie elementów składowych stanowiska, które to w dalszej kolejności zmontowano i przetestowano. Widok zbudowanego stanowiska z uszczegółowieniem najważniejszych podzespołów przedstawiono na Rysunkach 5.10 i 5.11.



Rys. 5.10. Stanowisko badawcze a) widok ogólny; oznaczenia: 1 – stół roboczy, 2 – rama, 3 – zespół zasilający – sterujący, 4 – zespół pneumatyczny); b) stół roboczy; oznaczenia: 1 – silnik elektryczny, 2 – reduktor, 3 – blat, 4 – tuleja mimośrodowa, 5 – łącznik, 6 – wahacz, 7 – pręt nośny, 8 – uchwyt ogniwa ruchomego, 9 – uchwyt ogniwa nieruchomego, 10 – zbiornik ścierniwa i wody, 11 – stojak, 12 – pręt obciążnikowy.

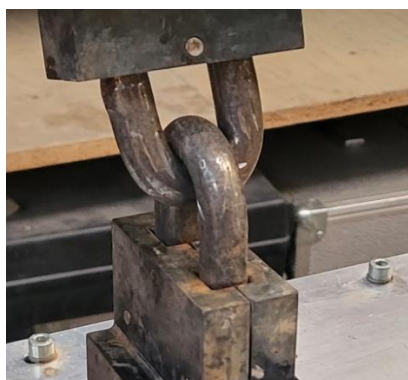


Rys. 5.11. Stanowisko badawcze: a – widok zespołu zasilającego – sterującego i pneumatycznego, b – widok zespołu obciążającego.

5.1.3. Sposób realizacji stanowiskowych badań zużyciowych

Zbudowane stanowisko badawcze przeznaczone jest do prowadzenia badań zużywania przegubów łańcuchów z uwzględnieniem synergii oddziaływania skojarzeń czynników środowiskowych. Zaprojektowane i wykonane rozwiązania techniczne zastosowane w stanowisku umożliwiły prowadzenie badań skojarzeniowych w następujących konfiguracjach (Rys. 5.12):

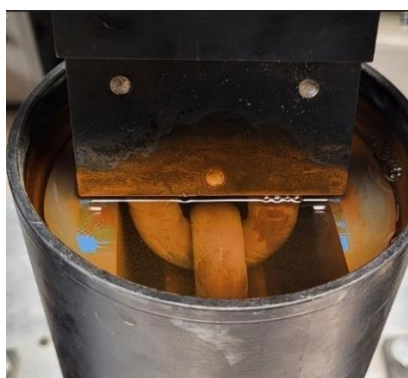
- badania zużycia łańcuchów bez obecności czynników wzmagających korozję i zużycie ściernie,
- badania zużycia łańcuchów w obecności ścierniwa,
- badania zużycia łańcuchów w obecności wody demineralizowanej,
- badania zużycia łańcuchów w obecności wody kopalnianej,
- badania zużycia łańcuchów w obecności ścierniwa i wody demineralizowanej,
- badania zużycia łańcuchów w obecności ścierniwa i wody kopalnianej,
- badania zużycia łańcuchów bez obecności ścierniwa z wymuszeniami dynamicznymi,
- badania zużycia łańcuchów w obecności ścierniwa z wymuszeniami dynamicznymi,
- badania zużycia łańcuchów w obecności ścierniwa i wody demineralizowanej z wymuszeniami dynamicznymi,
- badania zużyciowe łańcuchów w obecności ścierniwa i wody kopalnianej z wymuszeniami dynamicznymi.



a)



b)



c)



d)

Rys. 5.12. Różne konfiguracje montażu próbek na stanowisku badawczym w zależności od wariantu badawczego: a – brak czynników środowiskowych, b – ogniwo w otoczeniu ścierniwa, c – ogniwo w otoczeniu wody, d – ogniwo w otoczeniu mieszaniny wody i ścierniwa

Model wieloczynnikowego zużywania się łańcuchów przenośnikowych opracowany wg. powyższego założenia umożliwił ustalenie 12 wariantów badawczych, zależnych od zestawionych czynników i dodatkowego trzynastego wariantu specjalnego. Wytypowane warianty badawcze wraz z opisem występujących w nich czynników potęgujących zużywanie się ogniw zestawiono w przedstawionej wcześniej Tabeli 5.1.

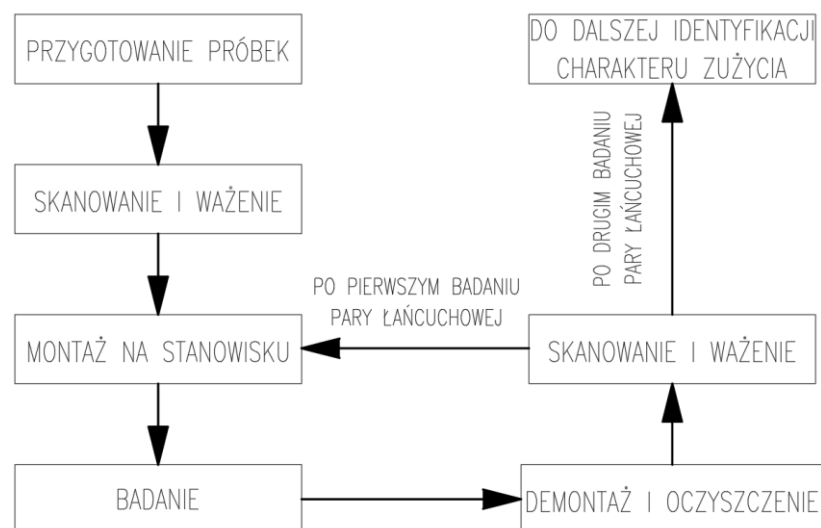
Dla każdego z wariantów 1÷12 wykorzystano dwie pary ogniw (4 próbki), natomiast wariant specjalny (0) zrealizowano dla 2 próbek. Czas pojedynczego badania wynosił 30 h i został dobrany eksperymentalnie tak, aby z jednej strony występujące zużycia były zauważalne i mierzalne, z drugiej strony nie przekraczały wartości, które producenci łańcuchów określają jako dyskwalifikujące je z dalszego stosowania (opis w dalszej części pracy). Stanowisko badawcze umożliwia testy z prędkością 80 wychyleń na minutę (144 000 wychyleń na pojedynczy test zużycia). Każde pojedyncze wychylenie odpowiada przetoczeniu pary ogniw przez gwiazdę łańcuchową. Nie można odnieść tej wartości bezpośrednio do czasu pracy przenośnika zgrzeblowego z uwagi na ich bardzo zróżnicowaną długość (od kilku do kilkuset metrów). Zakładając, że na stanowisku można badać dwie próbki jednocześnie, sumarycznie - dla wszystkich przewidzianych wariantów - dawało to 780 godzin pracy stanowiska badawczego, co z kolei odpowiada realizacji 3 744 000 cykli wychyleń.

Obiekt badań, a jednocześnie próbki badawcze, stanowiły pary ogniw pochodzących z łańcucha górniczego 14x50 kl. 8/C wg PN-G-46701. Przygotowanie łańcucha polegało na odcięciu 2 ogniw z cięgna łańcuchowego oraz wykonaniu na nich metodą obróbki skrawaniem nacięć, ułatwiających identyfikację poszczególnych ogniw w czasie procesu skanowania przestrzennego (3D). Nacięcia wykonywane były poza obrębem przegubu, tak aby nie naruszyć powierzchni objętej właściwymi testami.

Wyznaczanie miar charakteryzujących zużycie badanych ogniw następowało z wykorzystaniem dwóch metod:

- ważenia,
- skanowania przestrzennego (3D).

Skanowanie 3D i ważenie odbywało się zarówno przed próbą badawczą jak i każdorazowo po niej. Pomiary odbywały się przed pierwszym testem zużyciowym (wtedy próbom podlegał pierwszy przegub), bezpośrednio po nim oraz po drugim teście, w którym, po obróceniu ogniw badaniom zużyciowym podlegał drugi przegub (Rys. 5.13). Każdorazowo, niezwłocznie po zakończeniu próby zużyciowej, oczyszczano próbki w myjce ultradźwiękowej (jeszcze przed ważeniem i skanowaniem) z uwagi na dalsze degradacyjne oddziaływanie czynników korozyjnych. Po przeprowadzeniu pomiarów miar zużycia powierzchnie badanych ogniw zabezpieczano antykorozyjnie.



Rys. 5.13. Schemat działań związanych z pomiarem zużycia pary ogniw łańcuchowych

Pomiar zużycia masowego prowadzono poprzez wyznaczenie różnicy masy przed i po trzydziestogodzinnej próbie zużyciowej, określonej danym wariantem badawczym (Tab. 5.1). Pomiar masy wykonywano z wykorzystaniem wagi laboratoryjnej SBS-LW-500 firmy Steinberg Systems [73] o II klasie dokładności pomiarowej. Każdy pomiar był powtarzany co najmniej trzykrotnie. Zgodnie z wytycznymi zawartymi w PN- EN 45501:2015-05 – Zagadnienia metrologiczne wag nieautomatycznych [74] oraz zaleceń producenta, wyznaczono błąd pomiarowy urządzenia z wykorzystaniem takich parametrów jak klasa dokładności, zakres ważenia (0,05 g do 500 g), działka elementarna ($d_w=0,01$ g) oraz zakres ważenia. Wagi klasy II charakteryzują się różnymi dopuszczalnymi błędami w zależności od wartości mierzonego elementu m_w (Tab. 5.2).

Tab. 5.2. Tabela dopuszczalnych błędów granicznych (MPE) dla wagi klasy II [74]

Obciążenie m_w	Błąd graniczny (MPE)
$0 d_w \leq m_w \leq 5000 d_w$	$\pm 0,5 d_w$
$5000 d_w < m_w \leq 20000 d_w$	$\pm 1 d_w$
$20000 d_w < m_w \leq 100000 d_w$	$\pm 1,5 d_w$

W celu wyznaczenia błędu granicznego konieczne było wyznaczenie, dla przyjętego zakresu pomiarowego $400g \pm 10g$, liczby działek elementarnych przypadających na pomiar zgodnie z zależnością:

$$i_w = \frac{m_w}{d_w} = \frac{410}{0,01} = 41000 \quad (5.1)$$

Na bazie przeprowadzonych obliczeń określono wartość dopuszczalnego błędu granicznego (MPE) równą $\pm 1,5 d_w$, co odpowiada wartości 0,015 g.

Poza błędem wynikającym z dokładności samego urządzenia pomiarowego, należy uwzględnić błąd pomiarowy związany z rozrzutem wyników. Aby obliczyć błąd pomiarowy postępowano wg następujących kroków:

1. Obliczenie wartości średniej pomiarów:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \Rightarrow \bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3} \quad (5.2)$$

gdzie:

$\bar{x}$ – średnia pomiarów,

x_1, x_2, x_3 – wartości poszczególnych pomiarów,

n – liczba pomiarów.

2. Obliczenie odchylenia standardowego:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (5.3)$$

gdzie:

s – odchylenie standardowe.

3. Obliczenie błędu średniego pomiaru:

$$\Delta x = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (5.4)$$

gdzie:

Δx – średni błąd pomiarowy.

4. Niepewność całkowita uwzględniająca błąd wynikający z klasy urządzenia jak i rozrzutu:

$$\Delta_{masa_i} = \sqrt{\Delta x^2 + MPE^2} \quad (5.5)$$

gdzie:

Δ_{masa_i} – błąd całkowity pomiaru masy.

Wynikiem pojedynczego badania jest różnica masowa próbki przed i po próbie badawczej. W związku z tym wynik końcowy powinien uwzględniać odchylenia z obydwu pomiarów:

$$\Delta_{różnica_i} = \sqrt{\Delta_{masa_1}^2 + \Delta_{masa_2}^2} \quad (5.6)$$

gdzie:

$\Delta_{różnica_i}$ – błąd całkowity różnicy masowej próbek przed i po badaniach,

Δ_{masa_1} – błąd całkowity pomiaru masy próbki przed badaniami,

Δ_{masa_2} – błąd całkowity pomiaru masy próbki po badaniach.

Wynik końcowy dla każdego z wariantów badawczego stanowi średnia arytmetyczna różnicy mas dla 4 prób badawczych. Aby obliczyć niepewność dla średniej arytmetycznej

różnic mas, można skorzystać z metody propagacji niepewności. Niepewność średniej zależy od niepewności poszczególnych pomiarów. Zakładając, że pomiary są niezależne, niepewność średniej jest obliczana wzorem:

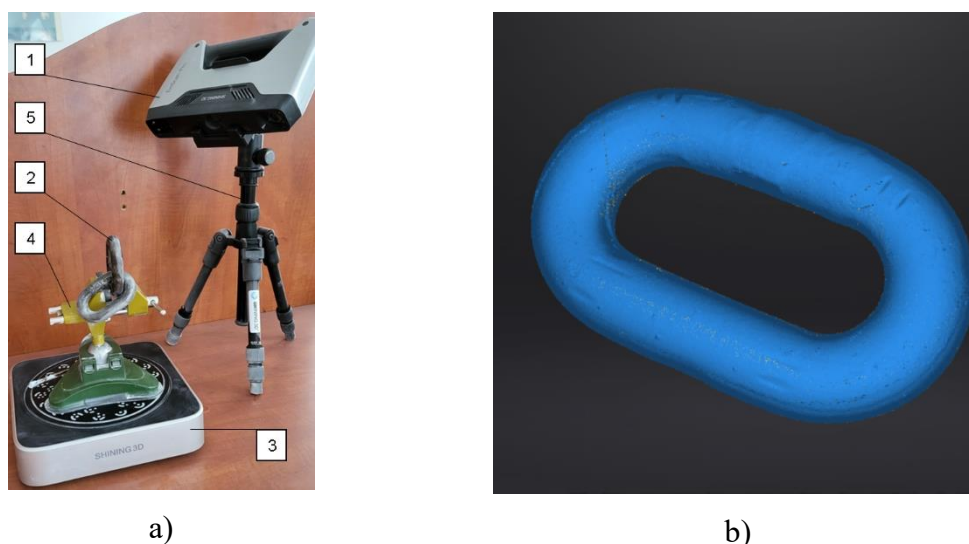
$$\delta_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_{różnica_i}^2)}{n_w^2}} \Rightarrow \sqrt{\frac{\Delta_{różnica_1}^2 + \Delta_{różnica_2}^2 + \Delta_{różnica_3}^2 + \Delta_{różnica_4}^2}{n_w}} \quad (5.7)$$

gdzie:

δ_m – błąd całkowity średniego ubytku masy próbek,

n_w – liczba pomiarów ubytku masy dla wariantu.

Drugim parametrem charakteryzującym zużycie, obok ubytku masy, była głębokość zużycia próbek łańcuchowych w obszarze kontaktu. Parametr ten wyznaczano z wykorzystaniem metody skanowania przestrzennego (3D) za pomocą skanera Shining3D EinScan Pro HD (Rys. 5.14) [75].



Rys. 5.14. Sposób pomiaru głębokość zużycia próbek łańcuchowych w obszarze kontaktu, a – widok skanera wraz z stołem pomiarowym, imadłem i badaną próbką, oznaczenia: 1 – skaner, 2 – próbka badawcza, 3 – stół obrotowy, 4 – imadło, 5 – statyw), b – przykładowy skan ogniwa

W celu wykonania pomiaru głębokości zużycia, para badanych ogniw łańcuchowych umieszczana była w imadle postawionym na obrotowym stole skonfigurowanym do współpracy ze skanerem. Sam skaner zamontowany był na statywie. Po każdym skanie stół obrotowy obracał próbkę o 45°, co dawało 8 skanów na jeden obrót i na jedną pozycję montażową próbki. Zeskanowanie powierzchni obydwu ogniw stanowiących pojedynczą próbkę wymagało 8 pozycji montażowych w imadle, co wynikowo dawało 64 skany.

Uzyskane skany w uniwersalnym formacie „stl” służyły do przeprowadzenia analizy porównawczej głębokości zużycia. Głębokość zużycia jest określona jako wartość ubytku wewnętrznego torusa przegubu łańcuchowego podczas próby zużyciowej. W celu wyznaczenia tego ubytku wykorzystano oprogramowanie GOM Inspect 2019 firmy ZEISS. Oprogramowanie to pozwala na precyzyjne przetwarzanie danych pochodzących ze skanerów 3D oraz na kompleksową analizę geometrii obiektów. W kontekście przedmiotowych badań zużycia ogniów łańcuchowych, GOM Inspect 2019 wykorzystano do porównania skanów przed i po próbie zużyciowej poprzez nakładanie skanów 3D tego samego ogniwa, co umożliwiło szczegółowe określenie stopnia zużycia.

Dla dokładności pomiaru głębokości zużycia, całkowity błąd pomiarowy wynika z dwóch jego składowych:

- dokładności skanowania wynikającej z parametrów zastosowanego urządzenia,
- odchyłki bazowania dwóch skanów ogniów łańcuchowych (przed i po próbie zużyciowej).

W pierwszym przypadku wartość ta jest stała dla wytypowanego skanera i wynosi przy skanie automatycznym 0,04 mm. W przypadku bazowania dwóch skanów analizowanego ogniwa odchyłka wyliczana jest przez zastosowane oprogramowanie i jest niezależna dla każdej analizy.

W związku z powyższym oraz z uwagi na fakt, że błędy te są niezależne, łączną niepewność obliczano jako pierwiastek sumy ich kwadratów wg poniższej zależności:

$$\Delta_{skan_i} = \sqrt{x_s^2 + x_{GOM}^2} \quad (5.8)$$

gdzie:

Δ_{skan_i} – błąd całkowity pomiaru głębokości zużycia,

x_s – błąd pomiarowy skanera deklarowany przez producenta,

x_{GOM} – błąd bazowania skanów w oprogramowaniu GOM.

Wynik końcowy dla każdego z wariantów badawczych stanowi średnia arytmetyczna maksymalnej głębokości zużycia dla 8 ogniów łańcuchowych. Aby obliczyć niepewność dla średniej arytmetycznej maksymalnej głębokości zużycia, również skorzystano z metody propagacji niepewności. Niepewność średniej zależy od niepewności poszczególnych pomiarów. Zakładając, że pomiary są niezależne, niepewność średniej w przypadku maksymalnej głębokości zużycia jest obliczana wzorem:

$$\delta_{skan} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_{skan_i}^2)}{n_s^2}} = > \frac{\sqrt{\Delta_{skan_1}^2 + \Delta_{skan_2}^2 + \dots + \Delta_{skan_8}^2}}{n_s} \quad (5.9)$$

gdzie:

δ_{skan_i} – błąd całkowity pomiaru głębokości zużycia,

n_s – liczba pomiarów maksymalnej głębokości zużycia dla wariantu.

5.2. Charakterystyka badań ustalających obciążenie układu badawczego

Na potrzeby ustalenia wartości parametrów charakteryzujących obciążenie układu badawczego (Etap 2 procesu badawczego), konieczne było:

- określenie zmienności obciążeń dynamicznych poprzez pomiar siły w ciągnie łańcuchowym,
- określenie warunków współpracy ogniów w przegubie,

Poprzez badania zmienności obciążeń dynamicznych rozumie się identyfikację obciążeń dynamicznych występujących w ciągnie łańcuchowym w czasie jego nominalnej pracy. W ramach rozważań wstępnych i studium literaturowego uznano, że zjawiska dynamiczne występujące podczas eksploatacji przenośników zgrzeblowych nie mogą zostać pominięte w badaniach synergistycznych, ponieważ stanowią nieodłączny element eksploatacji górniczej.

Problem wpływu obciążeń dynamicznych występujących w łańcuchach przenośnikowych jest szeroko opisany w dostępnej literaturze (m.in. [76, 77, 78, 79]). Badania te nie odnoszą się jednak do lekkich przenośników chodnikowych, ratowniczych czy stanowiących element wyposażenia kombajnu chodnikowego. Należy także wspomnieć, że wpływ obciążeń dynamicznych występujących w łańcuchach przenośnikowych na zużycie łańcuchów górniczych nie został do tej pory należycie wyjaśniony (wykazano to w analizie stanu wiedzy zawartej w niniejszej pracy). Uznano, że wyników prac zawartych w dostępnej literaturze nie można bezpośrednio zaimplementować jako parametrów stanowiska badawczego, gdyż wiązałoby się to z przyjęciem nieadekwatnych, dla przyjętego w pracy rozmiaru ogniwa łańcuchowego 14x50, wartości zmienności sił dynamicznych. Zdecydowano się więc, że w ramach opracowanego procesu badawczego zostaną przeprowadzone dedykowane badania sił dynamicznych w łańcuchu przenośnikowym. Z tym zagadnieniem wiąże się także określenie wartości nacisków wywołanych oddziaływaniem nominalnej siły obciążającej parę ogniów, a także pola styku powierzchni tych ogniów.

5.2.1. Metoda wyznaczenia zmienności obciążeń dynamicznych

Jednym z czynników mogących działać synergistycznie na proces zużywania się łańcuchów ogniowych są zmienne siły dynamiczne wynikające z nierównomierności obciążenia samego przenośnika, ciernego charakteru przesuwania się elementów ciągnowych i zgarniających przenośnika w rynnę, jak i innych czynników, których identyfikacja jest trudna do wyznaczenia. W celu wyznaczenia roli sił dynamicznych, które do tej pory nie były uwzględniane przy analizie synergii procesu degradacji łańcuchów górniczych, przeprowadzono identyfikację zmienności sił dynamicznych występujących

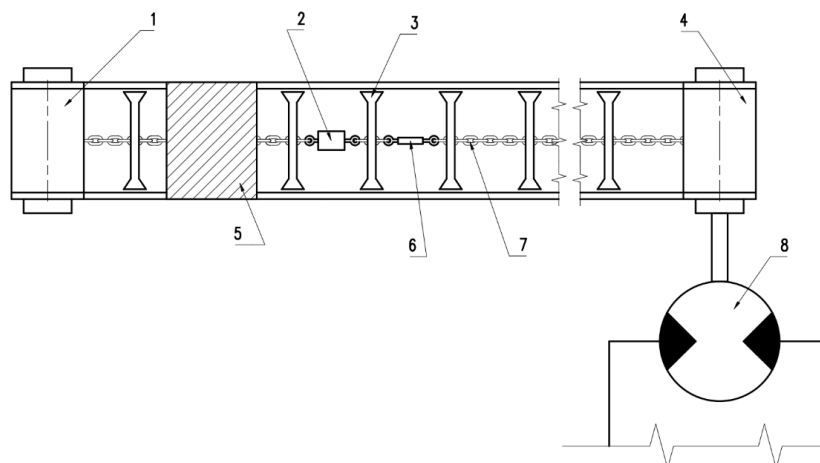
w ciągu łańcuchowym podczas ustalonej pracy modelowego przenośnika zgrzeblowego.

Na potrzeby tego działania opracowano i zbudowano dedykowane stanowisko badawcze (Rys. 5.15 i Rys. 5.16), oparte o będący na wyposażeniu partnera pracy – ITG Komag – ratowniczy przenośnik zgrzeblowy z łańcuchem ogniowym o rozmiarze 14x50, którego podstawowe parametry techniczne zaprezentowano w poniższej Tabeli 5.3.

Tab. 5.3. Parametry techniczne przenośnika ratowniczego konstrukcji ITG KOMAG [80]

Parametr	Oznaczenie	Jednostka	Wartość
Średnica podziałowa gwiazdy	D_{pr}	m	0,193
Rozmiar łańcucha	R_t	mm	14x50
Obroty silnika hydraulicznego	n_{pr}	min-1	60
Moment obrotowy silnika	M_{pr}	Nm	390 (dla $p=15$ MPa)
Liczba zębów koła łańcuchowego	Z_{pr}	-	6
Prędkość ciągu łańcuchowego	v_{pr}	$\frac{m}{s}$	$\frac{\pi \cdot D_{pr} \cdot n_{pr}}{60} = 0,606$
Moc jednostki napędowej	N_{pr}	kW	$\frac{M_{pr} \cdot n_{pr}}{9550} = \frac{390 \cdot 60}{9550} = 2,45$
Siła pociągowa	F_{pr}	kN	$F_{pr} = \frac{N_{pr} \cdot \eta_{pr}}{v_{pr}} = 3,32$
Wsp. sprawności napędu	η_{pr}	-	0,82
Masa zgrzebla	m_{zpr}	kg	3,9
Liczba nitów łańcucha	l_{pr}	-	1
Masa 1mb łańcucha	m_{lpr}	kg	4
Podziałka zgrzebeł	t_{pr}	mm	900
Długość przenośnika	L_{pr}	m	30

Badawczy przenośnik zgrzeblowy był złożony z 10 odcinków rynien oraz wyposażony w napęd zasadniczy (czynny) i zwrotny. Gwiazda napędowa przenośnika napędzana była za pomocą silnika hydraulicznego, zasilanego agregatem hydraulicznym. Elementem wywołującym obciążenie był przykręcany do zgrzebla hamulec cierny. Dodatkowo, obciążenie nominalne łańcucha różnicowano poprzez naciąg wstępny łańcucha, regulowany poprzez śrubę rzymską, zainstalowaną w ciągu łańcuchowym. Szczegóły związane z warunkami badań przedstawiono w publikacji [81].



Rys. 5.15. Schemat stanowiska do badań sił dynamicznych w ratowniczym przenośniku zgrzeblowym (1 – koło zwrotne, 2 – czujnik siły, 3 – zgrzebła, 4 – koło napędowe, 5 – hamulec cierny, 6 – śruba rzymska, 7 – łańcuch, 8 – silnik hydrauliczny)

Badania sił dynamicznych, występujących w łańcuchu ogniowym, prowadzone były na odcinku prostym przenośnika z użyciem czujnika siły U2A-2T produkcji firmy Hottinger Messtechnik [82]. Czujnik siły zamontowano w linii łańcucha ogniowego. Aby zapobiec jego uszkodzeniu, zainstalowano go na opracowanym i wykonanym ślizgu, którego budowa umożliwiała płynne przemieszczanie się czujnika po przenośniku, nie wywołując dodatkowych uderzeń dynamicznych przy przejazdach na łączeniach rynien. Dodatkowo, stanowisko badawcze wyposażono w układ pomiaru prędkości przejazdu, aby umożliwić prowadzenie badań przy stałej prędkości jazdy przenośnika. W tym celu wykorzystano dwa czujniki optyczne, zainstalowane wzdłuż trasy ze znanym rozstawem, rejestrujące prędkość przejazdu na podstawie różnicy czasowej w odczycie sygnału z odbłyśnika zamontowanego na przemieszczającym się wraz z łańcuchem hamulcu ciernym.

Badania realizowano przy stałej prędkości jazdy przenośnika, która wynosiła $\sim 1,3$ m/s. Obciążenie podstawowe (stałe) generowane było poprzez hamulec cierny zainstalowany na trasie, a różnicowanie obciążenia odbywało się poprzez stopień napięcia łańcucha ustawiany śrubą rzymską (odczytywany z danych dostarczanych przez czujnik siły). Próby wykonano dla obciążenia wstępnego wynoszącego 981 ± 5 N (wartość ta odpowiadała stosowanemu podczas badań stanowiskowych obciążeniu nominalnemu ogniów łańcuchowych).



a)



b)

Rys. 5.16. Stanowisko badawcze do wyznaczania sił dynamicznych, a) widok od strony napędu zwrotnego, oznaczenia: 1 – odbłyśnik, 2 – hamulec cierny, 3 – koło zwrotne, 4 – czujnik siły, b) widok od strony koła napędowego, oznaczenia: 1 – silnik hydrauliczny, 2 – koło napędowe.

Przeprowadzona seria testowa składała się z 10 przejazdów zasadniczych i 10 powrotnych. Poprzez przejazd zasadniczy rozumie się ruch łańcucha z czujnikiem w kierunku gwiazdy napędowej, a ruch powrotny – w przeciwnym kierunku. Podczas przejazdów rejestrowano wartość siły rozciągającej oraz kontrolnie wartość ciśnienia zasilania silnika hydraulicznego zespołu napędowego. Do wyznaczenia błędu pomiarowego wyznaczonej amplitudy i częstotliwości zmienności sił dynamicznych wykorzystano zależności (5.2) ÷ (5.4).

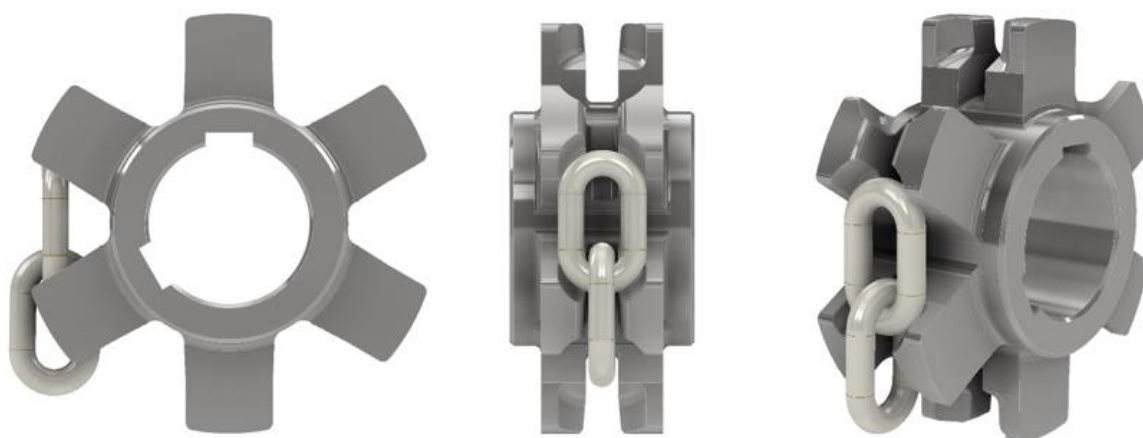
5.2.2. Metoda określenia warunków współpracy ogni w przegubie

Określenie warunków współpracy ogni łańcucha w przegubie ma kluczowe znaczenie dla analizy ich zużycia, ponieważ to właśnie w tym rejonie dochodzi do intensywnych obciążeń mechanicznych i tarcia. W przegubach łańcucha zachodzą skomplikowane procesy tribologiczne, które wpływają na tempo degradacji materiału, a tym samym na trwałość całego układu. Nieprawidłowe dopasowanie warunków pracy, takie jak nadmierne obciążenie, może prowadzić do przekroczenia granicy plastyczności materiału i zużycia o charakterze dekohezyjnym. Dlatego też w pracy, dla identyfikacji warunków współpracy pary ogni łańcuchowych wynikającej ze stanu obciążenia, postanowiono na drodze obliczeń numerycznych wyznaczyć:

- wartości naprężeń zredukowanych i odkształceń w zależności od przyłożonego obciążenia nominalnego,
- powierzchnię pola kontaktu ogni dla przyjętego obciążenia nominalnego,
- wartość nacisku w strefie kontaktu.

Wyznaczenie ww. wielkości wymagało przeprowadzenia analizy numerycznej z wykorzystaniem pre i postprocesora Patran oraz solvera obliczeniowego Nastran, będących kluczowymi elementami specjalistycznego oprogramowania firmy Hexagon. Przeprowadzono nieliniową analizę statyczną. Nieliniowości wynikały z symulowania zjawiska kontaktu oraz zastosowania sprężysto-plastycznego modelu materiału.

Przestrzenny model geometryczny (Rys. 5.17), stanowiący podstawę do utworzenia modelu obliczeniowego, zaprojektowano z wykorzystaniem oprogramowania Autodesk Inventor. Składał się on z gwiazdy napędowej oraz jednej pary ogniw o wymiarach 14x50. Model geometryczny przeniesiono do środowiska preprocesora Patran. Model ten poddano dyskretyzacji i utworzono siatkę elementów skończonych.



Rys. 5.17. Przestrzenny model geometryczny gwiazdy napędowej wraz z parą współpracujących ogniw

Dla analizy numerycznej przyjęto następujące własności materiału:

1. Gwiazda napędowa – materiał liniowo-sprężysty:
 - moduł Younga – $2,05 \times 10^{11}$ Pa,
 - liczba Poissona – 0,3,
2. ogniwa łańcucha – materiał sprężysto-plastyczny z umocnieniem, stal klasy D3 extra [63]
 - moduł Younga – $2,05 \times 10^{11}$ Pa,
 - liczba Poissona – 0,30,
 - umowna granica plastyczności – 900 MPa,
 - wytrzymałość na rozciąganie – 1080 MPa,
 - wydłużenie względne przy obciążeniu rozrywającym – 14%.

Ponadto przyjęto m.in. następujące warunki brzegowe:

- rotacja gwiazdy napędowej wokół osi obrotu – rotacja stanowiła wymuszenie

przemieszczeniem o wartości odpowiadającej wydłużeniu względnemu pary ogniw przy obciążeniu rozrywającym i wyniosła 0,002 rad,

- powiązanie gwiazdy napędowej z ogniwnem łańcucha oraz utwierdzenie dolnego ogniwa,
- na powierzchni ogniw oraz gwiazdy napędowej zastosowano kontakt przestrzenny,
- przyjęto wartość współczynnika tarcia $\mu = 0,1$.

Szczegóły przeprowadzonej symulacji numerycznej przedstawiono w pracy [83].

5.3. Charakterystyka wykorzystanych metod pomiarowych

W ramach niniejszej pracy, oprócz testów zużyciowych ściśle powiązanych z głównym celem badawczym oraz badań parametrów charakteryzujących obciążenie stanowiska badawczego, konieczne było przeprowadzenie licznych, złożonych badań o charakterze typowo laboratoryjnym, które służyły do:

- określenia własności czynników intensyfikujących zużycie,
- wyboru konkretnego rodzaju czynnika intensyfikującego zużycie,
- identyfikacji skutków skojarzonego oddziaływania czynników intensyfikujących zużycie.

W poniższych punktach opisano wykorzystane, na potrzeby ww. działań, metody badawcze.

5.3.1. Charakterystyka badań składu chemicznego i mineralnego rozpatrywanych ścierniw mineralnych

Na potrzeby przeprowadzenia testów zużyciowych w obecności ścierniwa mineralnego, występującego podczas drążenia podziemnych wyrobisk korytarzowych, pozyskano bezpośrednio z kopalń węgla kamiennego trzy rodzaje materiałów skalnych w postaci piaskowca i dwóch łowców. Ponadto do badań wybrano węgiel kamienny – ekogroszek wyprodukowany przez Węglkoks Kraj S.A.

Na potrzeby badań identyfikacyjnych przeprowadzono:

- obserwacje mikroskopowe w płytkach cienkich, w świetle przechodzącym,
- identyfikację faz metodą dyfrakcji rentgenowskiej (XRD),
- analizę składu chemicznego metodą fluorescencji rentgenowskiej (WD-XRF).

Mikroskopowe obserwacje wykonano w świetle przechodzącym na płytkach cienkich, korzystając z polaryzacyjnego mikroskopu diagnostycznego OPTA-TECH LAB-40 HAL [84]. Ilościową analizę składu piaskowca przeprowadzono metodą punktową, wykorzystując mikroskop polaryzacyjny wyposażony w okular z krzyżem nici pajęczych

oraz stolik integracyjny. Analiza planimetryczna obejmowała całą powierzchnię preparatów, a dla trzech próbek wykonano po 500 zliczeń w odstępach co 0,2 mm.

Skład fazowy określono metodą dyfrakcji rentgenowskiej (XRD) przy użyciu dyfraktometru proszkowego PANalytical XPERT PRO MPD. Aparatura obejmowała lampę rentgenowską z anodą Cu, monochromator grafitowy po stronie wiązki ugiętej, półprzewodnikowy licznik paskowy X'Celerator oraz stolik obrotowy na próbki. Dyfraktogramy rejestrowano w zakresie kątów 5–80° 2 Θ , stosując parametry lampy: 35 mA i 45 kV. Do identyfikacji składu fazowego wykorzystano oprogramowanie HighScore firmy PANalytical oraz bazę danych ICDD PDF-4+. Analizę ilościową przeprowadzono metodą Rietvela w wersji bezwzorcowej za pomocą programu SIROQUANT. Dodatkowo zastosowano korekty uwzględniające anomalne rozpraszanie promieniowania rentgenowskiego oraz efekt mikroabsorpcji.

Skład chemiczny próbek określono metodą fluorescencji rentgenowskiej (WD-XRF). Przed analizą próbki zmielono na uziarnienie poniżej 63 μ m, używając młynka z wykładziną z węgla wolframu, a następnie suszono w temperaturze 105°C do uzyskania stałej masy. Około 1 g materiału, odważonego z dokładnością do 0,0001 g, poddano ośmiogodzinnemu ogrzewaniu w wodzie królewskiej na łaźni gazowej, po czym odparowano do sucha. Pozostałość trawiono kwasem solnym, ponownie odparowano i rozpuszczono w rozcieńczonym roztworze tego kwasu. Przesącz poddano analizie techniką ICP, a osad spopielił i wyprażono w temperaturze 1025°C. Pozostałość po prażeniu stopiono z bezwodnym węglanem sodu, a uzyskany stop rozpuszczono w kwasie solnym i ponownie odparowano. Następnie próbkę poddano kolejnym etapom trawienia, odparowywania i filtracji w celu pełnego wydzielenia krzemionki. Osad zwilżono kwasem siarkowym, dodano kwas fluorowodorowy i odparowano na łaźni gazowej. Proces ten powtórzono do zaniku białych dymów kwasu siarkowego, po czym pozostałość wyprażono w temperaturze 1025°C. Na tej podstawie obliczono zawartość krzemionki w próbce według poniższego wzoru

$$X_{Si} = m_{przed} - m_{po} \quad (5.10)$$

gdzie:

X_{Si} – masa krzemionki, g,

m_{przed} – masa tygla z wyprażonym osadem przed dodaniem kwasu fluorowodorowego, g.

m_{po} – masa tygla z pozostałością po usunięciu krzemionki, g.

Pozostałość w tyglu po oznaczeniu krzemionki stopiono z 1,5 g bezwodnego węglanu sodu, a uzyskany stop rozpuszczono w uprzednio przygotowanym i zachowanym do analizy przesączu. Otrzymane roztwory przeniesiono do kolb miarowych o pojemności

200 ml, a następnie przeanalizowano za pomocą spektrometru ICPE-9800 firmy Shimadzu. Aparat pracował z pionowym palnikiem, bocznym kierunkiem obserwacji i czasem ekspozycji wynoszącym 30 sekund.

5.3.2. Charakterystyka badań składu chemicznego rozpatrywanych wód dołowych

Na potrzeby przeprowadzenia testów zużyciowych, w obecności wód kopalnianych i ich mieszanin ze ścierniwami mineralnymi, pozyskano próbki wody o objętości ok. 20 dm³ z czterech różnych zakładów wydobywczych. Określenie składu chemicznego wody polegało na przeprowadzeniu badań zawartości wybranych jonów i parametrów, wg normy PN-EN 12502-3 [85]. Analizowanymi grupami chemicznymi były: azotany, chlorki, siarczany, wapń, wodorowęglany oraz zasadowość ogólna (do wyznaczenia poszczególnych związków wykorzystano normy przedstawione w Tab. 5.4). Wymienione wyżej pomiary zostały wykonane w Akredytowanym Laboratorium PWiK Sp. z o.o. w Gliwicach. Poza ww. związkami chemicznymi dokonano pomiaru stężenia pH i do tego celu wykorzystano urządzenie 06-700PVS produkcji Chem-Land.

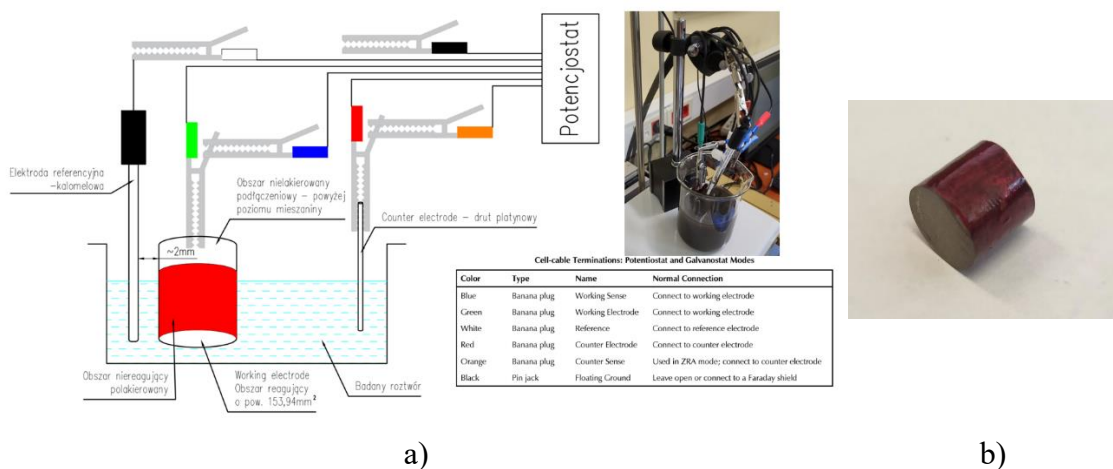
Tab. 5.4. Zakres badań w Laboratorium PWiK Gliwice i wykorzystane metody pomiarowe

Parametr	Metoda pomiarowa
Azotany	PN-EN ISO10304-1:2009+AC:2012E [86]
Chlorki	PN-EN ISO10304-1:2009+AC:2012E [86]
Siarczany	PN-EN ISO10304-1:2009+AC:2012E [86]
Wapń	PN-EN ISO 7980:2002 [87]
Wodorowęglany	PN-EN ISO 9963-1:2001+Ap1:2004 [88]
Zasadowość ogólna	PN-EN ISO 9963-1:2001+Ap1:2004 [88]

5.3.3. Charakterystyka badań oddziaływania korozyjnego wód kopalnianych i mieszanin wodno-mineralnych na materiał ogniów

Badania oddziaływania korozyjnego wód kopalnianych i mieszanin wodno-mineralnych na materiał ogniów przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych z wykorzystaniem potencjostatu Gamry Reference 620 [89]. Środowisko przewodzące stanowiła woda zrobowa pozyskana z kopalń węgla kamiennego oraz mieszanina tej wody z próbkami ścierniwa mineralnego. Badania rozszerzono o mieszaniny ścierniwa mineralnego z wodą demineralizowaną z uwagi na spodziewane rozpuszczanie wybranych składników ścierniwa i możliwość wystąpienia środowiska korozyjnie czynnego.

Schemat pomiaru szybkości korozji z wykorzystaniem potencjostatu przedstawiono na Rysunku 5.18a. Powierzchnię nie objętą badaniami zabezpieczano lakierem (Rys. 5.18b).



Rys. 5.18. Badania potencjodynamiczne, a) Schemat podłączenia elektrod potencjostatu z badaną próbką, b) widok próbki zabezpieczonej lakierem

Pierwszy etap badań korozyjnych obejmował wyznaczenie potencjału obwodu otwartego (OCP – Open Circuit Potential), który charakteryzuje stabilność elektrochemiczną badanego materiału. Procedura polegała na monitorowaniu zmian potencjału elektrody próbki względem elektrody odniesienia przez określony czas w celu osiągnięcia wartości stabilnej. Otrzymane wartości OCP pozwoliły na wstępną ocenę właściwości korozyjnych materiału oraz stanowiły punkt odniesienia dla dalszych pomiarów elektrochemicznych.

Drugi etap tych badań obejmował analizę parametrów korozyjnych przy użyciu metody Tafel'a. Metoda ta pozwala na określenie takich parametrów procesu korozyjnego, jak gęstość prądu korozyjnego (I_{corr}), potencjał korozyjny (E_{corr}) oraz szybkości korozji wyrażonej w mm/rok. Pomiary realizowano poprzez przeprowadzenie polaryzacji potencjałowej próbki w zakresie anodowym i katodowym ($\pm 50\text{mV}$). Następnie, na podstawie uzyskanych wykresów półlogarytmicznych, oprogramowanie potencjostatu wyznaczało nachylenia anodowe i katodowe, co umożliwiło dokładne określenie wartości I_{corr} . Nachylenia te odpowiadały kinetyce procesów elektrochemicznych, takich jak redukcja tlenu lub wydzielanie wodoru na katodzie oraz utlenianie żelaza na anodzie. Wyznaczone parametry pozwoliły na ilościową ocenę odporności korozyjnej próbek łańcuchowych oraz umożliwiły porównanie ich zachowania w różnych warunkach eksperymentalnych (dokładny opis w rozdziale 7).

Błąd pomiarowy prądu korozyjnego i potencjału korozyjnego wynika ze specyfikacji urządzenia pomiarowego, który według informacji zawartych w karcie katalogowej wynosi $\pm 0,2\%$. Oprogramowanie do wyznaczenia szybkości korozji wykorzystuje zależność:

$$CR = \frac{I_{corr} \cdot K \cdot EW}{\rho \cdot A} \quad (5.11)$$

gdzie:

CR – szybkość korozji, mm/rok,

I_{corr} – prąd korozyjny, μA ,

K – stała Faradaya,

EW – ekwiwalent wagowy, g/mol elektronów,

ρ – gęstość metalu, g/cm³,

A – powierzchnia próbki, cm².

Określenie niepewności pomiaru wymaga także określenia błędu przynależnego polu powierzchni aktywnej, który wynika z jakości wykonania ogniów łańcuchowych. Na potrzeby badań próbki wykonane zostały z łańcucha $\varnothing 14 \times 50$ poprzez 2 prostopadłe cięcia pręta na odcinku prostym po stronie niezgrzewanej. Jedna z uzyskanych w ten sposób powierzchni przekroju o średnicy 14 mm stanowiła właśnie wspomniane pole aktywne. Norma PN-G-46701:1997 [58] podaje wymaganą dokładność średnicy pręta na poziomie $\pm 0,4$ mm. Błąd ten przynależny jest średnicy pręta, stąd należy przeliczyć go na pole powierzchni A . Obliczony względny błąd powierzchni $\frac{\Delta A}{A}$, wynika z błędu promienia $\frac{\Delta r}{r}$. Ponieważ powierzchnia A zależy od r^2 , należy uwzględnić, jak błąd promienia wpływa na powierzchnię.

Względny błąd promienia dla zastosowanego łańcucha wynosi zatem:

$$\frac{\Delta r}{r} = 0,0286 = 2,86\% \quad (5.12)$$

Względny błąd powierzchni to wobec powyższego:

$$\frac{\Delta A}{A} = 2 \cdot 0,0286 = 0,0572 = 5,72\% \quad (5.13)$$

Błąd względny szybkości korozji CR stanowi sumę błędów względnych prądu korozyjnego i powierzchni aktywnej:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta CR}{CR} &= \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta I}{I} \\ \frac{\Delta CR}{CR} &= 0,0572 + 0,002 = 0,0592 = 5,92\% \end{aligned} \quad (5.14)$$

Po przekształceniu, bezwzględny błąd wyznaczenia szybkości korozji wynikający z użytej metody wynosi:

$$\Delta CR = 0,0592 \cdot CR \quad (5.15)$$

Oprócz badań samych wód kopalnianych założono, że w badaniach zostanie uwzględniony wpływ ich mieszaniny z minerałami (składającymi się na urobek transportowany przez przenośnik zgrzeblowy) na procesy korozyjne zachodzące w parze ogniów łańcuchowych. Z tego powodu istotne było ustalenie udziału części stałych w roztworze wodnym, z uwagi na potrzebę zapewnienia przedostawania się mieszaniny w obszar przegubu pary badanych ogniów, a także ograniczenia efektu sedymentacji ziaren ścierniwa w mieszaninie. Nastąpiło to poprzez sporządzenie mieszanin sproszkowanego ścierniwa mineralnego o różnej konsystencji i ich obserwacji w zlewce szklanej w celu stwierdzenia tendencji do rozdzielania składników, a następnie sprawdzano zdolność danej mieszaniny do przylegania do powierzchni metalowych. Na podstawie przeprowadzonych testów dobrano mieszaninę 40 g ścierniwa i 100 ml wody kopalnianej jako reprezentatywną dla badań zużyciowych. Sama procedura badania parametrów korozyjnych z użyciem potencjostatu pozostała analogiczna do badań korozyjnych samej wody.

5.3.4. Charakterystyka badań tribologicznych

Badania tribologiczne, mające na celu dobór materiału ściernego do badań stanowiskowych, realizowano z wykorzystaniem tribometru TRB³ firmy AntonPaar [90]. Badania prowadzono dla próbki w postaci dysku o średnicy 34 mm, wykonanego z ogniwa łańcucha górniczego typu THD firmy Thiele [6]. Badania realizowano w kielichu głowicy badawczej tribotestera, wypełnionym mieszaniną danego ścierniwa z wodą demineralizowaną. Parametry testu tribologicznego przedstawiono w Tabeli 5.5.

Badania prowadzone były dla wszystkich 4 pozyskanych z zakładów górniczych ścierniwi mineralnych. Po próbie zużycia dokonywano pomiaru śladu wytarcia w celu wyznaczenia miar zużycia. Wyznaczanymi parametrami były:

- powierzchnia śladu wytarcia,
- uśredniony współczynnik tarcia,
- maksymalna głębokość wytarcia.

Do ww. pomiarów wykorzystano mikroskop konfokalny MarSurf CM plus explorer 100 firmy Mahr [91].

5.3.5. Charakterystyka badań warstwy wierzchniej po testach skojarzonego zużycia

Po przeprowadzeniu badań stanowiskowych przeprowadzono identyfikację uszkodzeń powierzchni po testach skojarzonego zużycia.

Tab. 5.5. Parametry badania tribometru TRB³ [90]

Parametr	Wartość
Obciążenie nominalne	10 N
Typ ruchu	Kątowy, posuwisto-zwrotny
Zakres ruchu kątowego	70° (1,22 rad)
Element cierny	Węglik WC6
Częstotliwość ruchu	1,63 Hz
Promień ruchu kątowego	7,45 mm
Liczba cykli	12 000
Droga tarcia	218,45 m
Maksymalna prędkość liniowa	0,0466 m/s

W tym celu wykorzystano skaningową mikroskopię elektronową (SEM – Scanning Electron Microscopy) oraz dyspersyjną spektroskopię rentgenowską (EDS – Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy). Analizy SEM i EDS, wykonane w ramach pracy, zrealizowano na urządzeniu Axia ChemiSEM [92] firmy ThermoFisher Scientific. Analizie poddano reprezentatywne próbki dla 12 wariantów badawczych.

Po przeprowadzeniu wspomnianych testów, dokonywano przekroju ogniwa w obszarze największego zużycia, które zainkludowano w żywicy metodą na zimno, a następnie poddano szlifowaniu i polerowaniu celem wyznaczenia mikrostruktury (przykładowy widok przedstawiono na Rys. 5.19).



Rys. 5.19. Widok fragmentu ogniwa przygotowanego do badań mikroskopowych

Badania metalograficzne wykonano z wykorzystaniem świetlnego mikroskopu metalograficznego Nikon ECLIPSE MA200 [93] pracującego w układzie odwróconym.

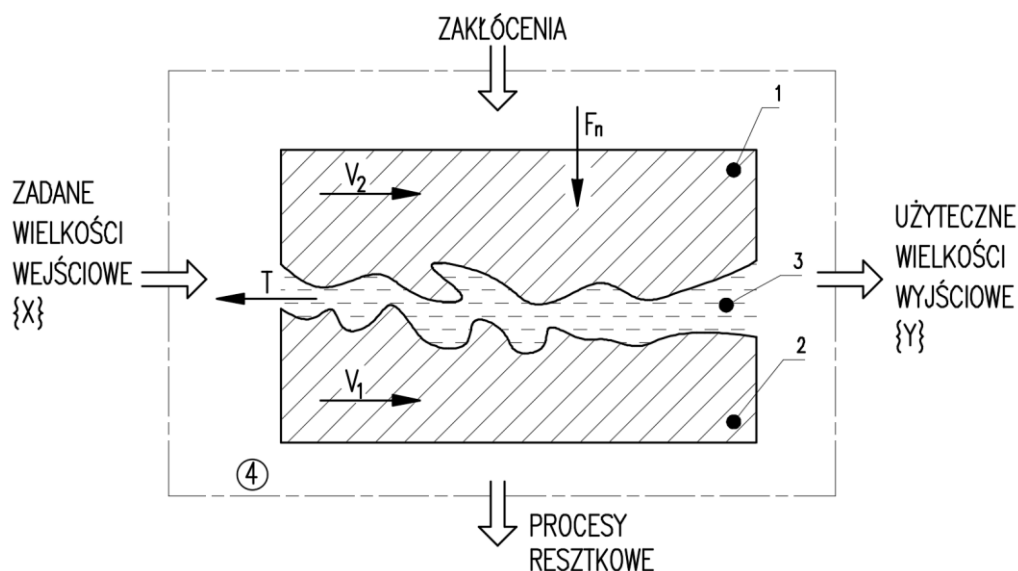
Na potrzeby identyfikacji składu chemicznego materiału badanych łańcuchów przeprowadzono pomiary z wykorzystaniem spektrometru PXC01 firmy SPECTRO [94] i metody Fe-01-MO. Badania przeprowadzono na rzeczywistych próbkach wykorzystanego w testach zużyciowych łańcucha górniczego. Badania powtarzano

trzykrotnie na próbkach pobranych z jednego ogniwa łańcuchowego. Błąd uśredniony pomiaru wyznaczono z wykorzystaniem zależności $(5.2) \div (5.4)$.

Ostatnim etapem badań warstwy wierzchniej była analiza rozkładu mikrotwardości próbek wykorzystanych wcześniej w badaniach mikrostrukturalnych. Przed pomiarami twardości próbki ponownie wypolerowano. Badania mikrotwardości przeprowadzono z użyciem metody Vickersa przy obciążeniu 50 g wykorzystując mikrotwardościomierz FM-700 firmy Future-Tech CORP [95]. Dla każdej z 12 próbek reprezentujących 12 wariantów badań stanowiskowych wykonane zostały 3 serie pomiarowe po 6 odcisków. Pierwszy odcisk wykonywano możliwie najbliżej strefy zużycia ($\sim 10 \div 15 \mu\text{m}$), a kolejne pięć wzdłuż linii, w odstępach $100 \mu\text{m}$, w kierunku środka przekroju ogniwa.

6. IDENTYFIKACJA CZYNNIKÓW CHARAKTERYZUJĄCYCH WARUNKI ŚRODOWISKA GÓRNICZEGO W ASPEKCIE ODWZOROWANIA ICH NA ETAPIE BADAŃ STANOWISKOWYCH

Celem niniejszego rozdziału była identyfikacja czynników charakteryzujących warunki środowiska górniczego w aspekcie odwzorowania tych warunków na etapie badań stanowiskowych. Aby zrealizować ten cel należało przede wszystkim określić elementy składowe układu – dwóch współpracujących ogniw łańcucha eksploatowanego w warunkach górnich. Układ ten można określić pojęciem systemu tribologicznego. Zgodnie z przedstawionym na Rysunku 6.1 schematem, system ten jest złożony zasadniczo z elementów współpracujących, tworzących węzeł tarcowy oraz warstwy pośredniej, mogącej rozgraniczyć te współpracujące elementy.

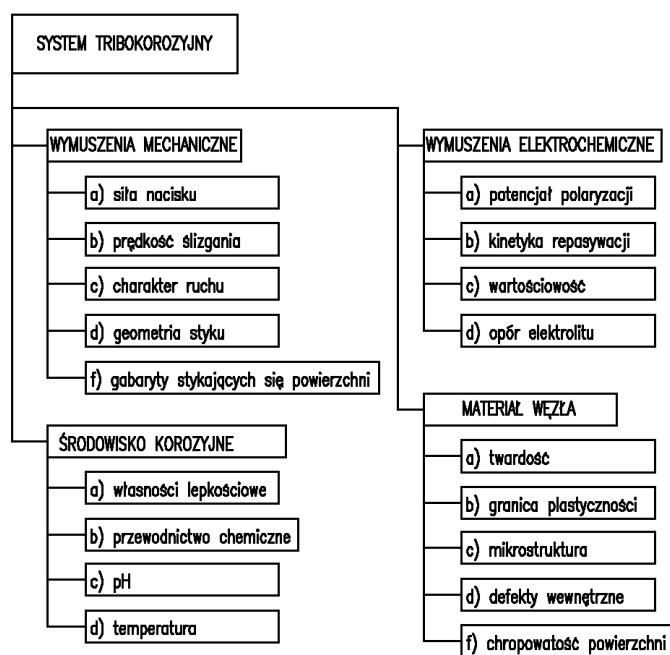


Rys. 6.1 System tribologiczny; oznaczenia: 1, 2 – elementy współpracujące tworzące węzeł tarcowy, 3 – warstwa pośrednia, 4 – otoczenie, F_n – obciążenie; $V_{1,2}$ – prędkości elementów węzła tribologicznego, na podstawie [5]

System ten definiują:

- zadane wielkości wejściowe w postaci np. nominalnych warunków obciążenia,
- wielkości wyjściowe w postaci parametrów charakteryzujących realizowaną funkcję,
- zakłócenia w postaci niezaplanowanych zmian warunków eksploatacyjnych (np. przeciążeń),
- procesy reszkowe wywołane działaniem systemu w postaci np. wzrostu temperatury, generacji drgań czy powstawania produktów zużycia.

Jak już wcześniej wspomniano, środowisko górnicze odznacza się zazwyczaj stałą obecnością ścierniw mineralnych oraz wód dołowych zawierających różnego rodzaju związki chemiczne. Stąd też system tworzony przez ogniwa łańcuchowe wraz z otoczeniem można zaklasyfikować jako system tribokorozyjny, który jest rodzajem systemu tribologicznego, uwzględniającego nie tylko wymuszenia mechaniczne, ale również właściwości materiałowe, środowiskowe oraz wymuszenia elektrochemiczne. Graficzne przedstawienie przykładowych elementów składających się na system tribokorozyjny (zaproponowany w pracy [46]) zostało zaprezentowane na Rysunku 6.2.



Rys. 6.2. Przykładowe elementy systemu tribokorozyjnego zaproponowane przez [46]

Oczywistym jest, że każdy układ cierny w swoim otoczeniu może być reprezentowany przez inne parametry. Taka sytuacja występuje właśnie w przypadku rozpatrywanego w pracy systemu. Posiada on charakterystyczne cechy pominięte na Rysunku 6.2. Do nich należy zaliczyć przede wszystkim oddziaływania dynamiczne i obecność ścierniw mineralnych.

W ramach poszczególnych grup czynników wytypowano, dla rozpatrywanego układu – łańcucha ogniwowego poddanego eksploatacji górniczej – następujące parametry, które będą go charakteryzowały. Są to:

- 1 Własności materiałowe węzła – w tym zakresie postanowiono określić skład chemiczny, mikrostrukturę i twardość stali zastosowanej do wytworzenia badanego łańcucha.
- 2 Wymuszenia mechaniczne – w tym zakresie postanowiono określić zmienność sił dynamicznych w ciągu łańcuchowym modelowego przENOŚNIKA i przetransponować ją na elementy próbcze stanowiska badawczego, ponadto została określona wartość

obciążenia stałego badanej pary ogniw na podstawie dopuszczalnego zużycia ogniw łańcuchowych (na stanowisku tym nie jest możliwe bowiem zadanie obciążenia zgodnego z faktycznym obciążeniem stosowanych maszyn) oraz wynikające z tego obciążenia naciski, naprężenia i powierzchnia styku.

- 3 Wymuszenia elektrochemiczne – w tym zakresie postanowiono określić szybkość korozji, prąd I_{kor} oraz potencjał korozji E_{kor} (parametry te wiąże się wprost z wyznaczeniem składowej zużycia korozyjnego, stąd też badania w tym zakresie były objęte zakresem Etapu 3).
- 4 Własności środowiska korozyjno-ciernego – w tym zakresie postanowiono określić skład chemiczny, pH, parametry charakteryzujące agresywność korozyjną S_1 i S_2 , zasadowość ogólną badanych wód dołowych oraz skład chemiczny i mineralny potencjalnych ścierniw.

Bezpośrednim efektem badań identyfikacyjnych przedstawionych w niniejszym rozdziale było ustalenie warunków obciążeniowych stanowiska badawczego, a końcowy wybór czynników korozyjno-ściernych nastąpił po działaniach określonych w Etapie 3 procesu badawczego (Rozdział 7 pracy).

6.1. Określenie własności materiałowych wężła tarcowego

Na potrzeby określenia własności materiałowych badanego łańcucha ogniwowego przeprowadzono:

- analizę składu chemicznego stali zastosowanej do wytworzenia ogniwa,
- badania twardości rdzenia ogniwa,
- analizę metalograficzną rdzenia ogniwa.

Wyniki badania składu chemicznego przedstawiono w Tabeli 6.1.

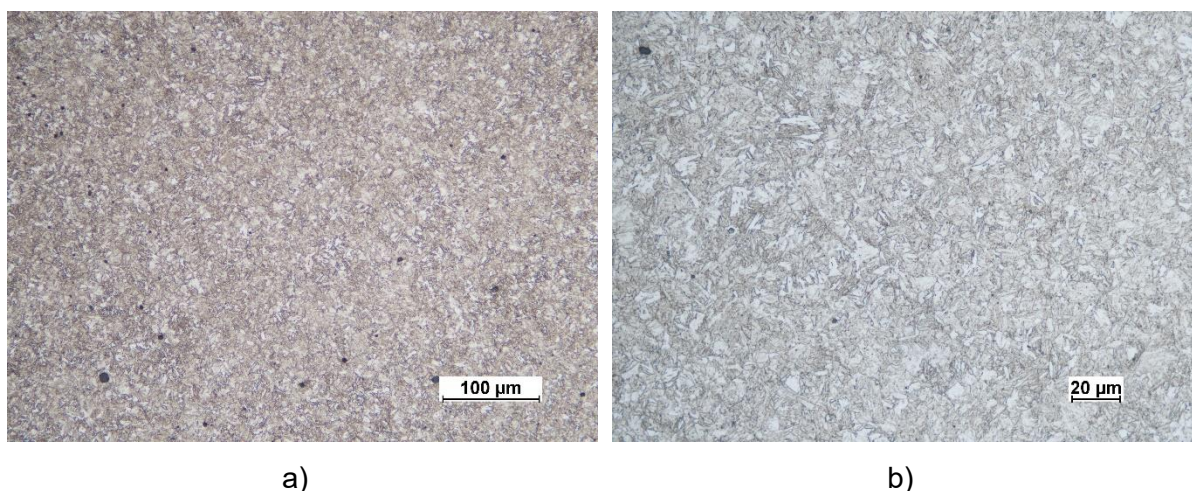
Tab. 6.1. Wyniki badań składu chemicznego materiału badanego łańcucha ogniwowego o rozmiarze 14x50

C	Si	Mn	Cr	Ni	Al
0,249±0,007	0,131±0,004	1,16±0,003	0,31±0,00	0,063±0,002	0,038±0,001
Ti	V	Sn	B	Fe	Cu
0,047±0,002	0,0054±0,0004	0,0080±0,0005	0,0039±0,0003	97,7±0,0	0,168±0,002

Na podstawie określonego w badaniu składu chemicznego łańcucha nie można wprost przyporządkować konkretnego gatunku stali. Skład ten różni się od składu bardzo często stosowanych stali na wysoko wytężone łańcuchy 23MnNiMoCr5-4 (oznaczenie wg normy PN-EN 10027-2 [96] to 1.6758) i 23MnNiMoCr5-2 (oznaczenie wg normy PN-EN 10027-2 [96] to 1.6541) gdyż nie zawiera molibdenu, a także posiada mniejsze udziały chromu, niklu i krzemu,

ale zawiera wanad. Stali pochodzącej z badanego łańcucha nie można także zaklasyfikować do gatunku 20HGS (wg normy PN-72/H-84030 [97]) również z uwagi na mniejsze udziały chromu, niklu i krzemu. Najprawdopodobniej jest to stal produkowana na specjalne zamówienie producenta łańcucha.

Na podstawie 42 pomiarów twardości w środku przekroju łańcucha ustalono twardość materiału ogniwa równą $447 \pm 3 \text{HV1}$. Na podstawie tej wartości ustalono, że materiał ogniwa został poddany ulepszeniu cieplnemu (połączenie zabiegu austenitzowania i średniego odpuszczania). O tej obróbce cieplnej świadczy także zaobserwowana mikrostruktura stali ogniwa łańcuchowego (Rys. 6.3), którą jest troostyt odpuszczony.



Rys. 6.3. Widok mikrostruktury stali w obszarze rdzenia badanego ogniwa łańcucha górniczego 14x50, a – powiększenie 200x, b – powiększenie 500.

6.2. Określenie wymuszeń mechanicznych węzła tarcowego

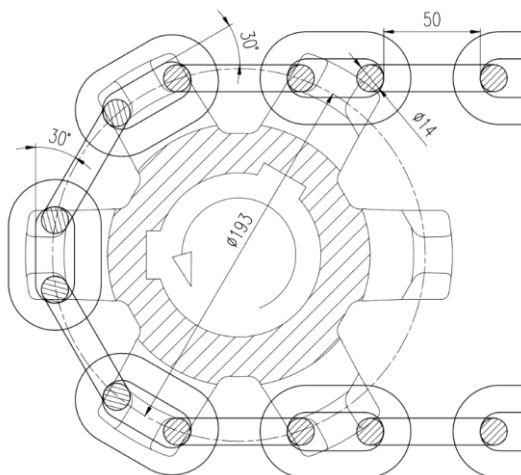
6.2.1. Określenie parametrów charakteryzujących warunki współpracy ogniw łańcuchowych stanowiska badawczego

W celu ustalenia warunków współpracy ogniw łańcuchowych stanowiska badawczego konieczne było określenie wartości takich podstawowych parametrów jak:

- kąt współpracy (kąt wychyłu między ogniwnem pionowym i poziomym) ogniw łańcuchowych,
- prędkość kątowa cykli przeginalania ogniw w przegubie,
- czas testu zużyciowego,
- siła nominalna obciążająca ogniwo łańcuchowe.

Parametry geometrycznej współpracy ogniw łańcuchowych wynikają z budowy samego przenośnika zgrzeblowego. W przypadku kąta współpracy ogniw, czyli kąt o jaki przegina się jedno ogniwo względem drugiego, wynika on wprost z liczby zębów koła łańcuchowego. W pracy, na potrzeby wyznaczenia tego kąta, przyjęto parametry referencyjnego przenośnika

ratowniczego (na którym przeprowadzono badania zmienności sił dynamicznych). Wytypowany przenośnik wyposażony był w koła łańcuchowe o średnicy podziałowej 193 mm i liczbie zębów $z=6$. Na podstawie analiz konstrukcyjnych stwierdzono, że kąt wychyłu między ogniwem pionowym i poziomym w czasie przetaczania przez koło łańcuchowe wynosi 30° (Rys. 6.4).



Rys. 6.4. Geometria współpracy łańcucha z kołem łańcuchowym w rozpatrywanym przenośniku ratowniczym

Aby zasymulować pełen cykl zużycia ogniw na próbce zdecydowano, że współpraca ogniw łańcuchowych odbywać będzie się w zakresie $\pm 30^\circ$ liczonych od pionu (30° w jednym kierunku, powrót do pozycji wyprostowanej, 30° w drugą stronę i powrót do pozycji wyprostowanej).

Kolejnym zagadnieniem wymagającym ustalenia na drodze analitycznej było określenie maksymalnej prędkości współpracy ogniw – liczona tutaj w liczbie wychyleń o kąt $\pm 30^\circ$ na minutę. Parametr ten ustalono na podstawie zależności:

$$I_{st\ max} = \frac{2\pi \cdot N_{p\ max}}{I_w \cdot \alpha_w} = \frac{2\pi \cdot 60}{2 \cdot \frac{\pi}{3}} = 180\ min^{-1} \quad (6.1)$$

gdzie:

$I_{st\ max}$ – obliczeniowa częstość pracy stanowiska w cyklach na minutę,

$N_{p\ max}$ – maksymalna prędkość obrotowa napędu przenośnika ($60\ min^{-1}$),

I_w – liczba wychyleń w ramach pojedynczego cyklu (2 – po 30° w każdą stronę i powroty),

α_w – kąt całkowitego pojedynczego wychylenia (wychylenie i wyprostowanie).

W dalszym etapie prac ustalających warunki początkowe stanowiska badawczego, przeprowadzono na bazie doświadczalnej testy stabilności termicznej układu. Dla wstępnie ustalonej wartości $I_{st\ max} = 180$ cykli/min przeprowadzono pomiary temperatury styku ogniw podczas próby bez dodatkowych czynników środowiskowych przy zadanym obciążeniu 981 N. Pomiary te wykazały, poprzez pomiar metodą bezkontaktową, po czasie ok. 1 godziny wzrost temperatury styku do wartości $60^\circ C$, jednakże obserwowano tendencję rosnącą tego

parametru. Uznano, że w rzeczywistych warunkach użytkowych, gdzie współpraca ogni w przegubie następuje na dwóch przeciwległych kołach łańcuchowych, a zwłoka czasowa powodowana przemieszczaniem ogni między kołami powoduje ostudzenie ich, efekt podgrzania w ogóle nie następuje. Efekt ten mógłby prowadzić do zafałszowania wyników, w szczególności w czasie prób ze spodziewanym dużym oddziaływaniem zjawisk korozyjnych.

W związku z powyższym uznano, że zasadne jest obniżenie prędkości roboczej stanowiska w celu uzyskania przyrostu temperatury nie wyższej niż 5°C w czasie 1 godziny testu pod obciążeniem nominalnym 981 N. Na drodze iteracyjnej ustalono, że najwyższą częstość wychyleń spełniającą powyższy warunek jest wartość $I_{st} = 80$ cykli/min, co odpowiada operacyjnej prędkości obrotowej napędu przenośnika referencyjnego $N_{pr} = 26,66 \text{ min}^{-1}$.

Ostatnimi parametrami koniecznymi do ustalenia były: nominalna wartość siły osiowej obciążającej układ 2 ogni badawczych oraz czas trwania próby. Maksymalna wartość siły w ciągu łańcuchowym, z uwagi na zastosowany w rozpatrywanym przenośniku napęd, wynosiła 3,32 kN. Jednakże, jak to wynika z praktyki górniczej, chodnikowe przenośniki zgrzeblowe relatywnie rzadko pracują pod pełnym obciążeniem. Uznano więc, że dobranie wartości obu parametrów testu nastąpi poprzez określenie maksymalnego zużycia w strefie przegubu badanych ogni dla następujących wartości siły osiowej obciążającej F : 490,5 N (odpowiadało to masie 50 kg obciążenia zawieszonego na uchwycie pary ogni), 735,75 N (odpowiadało to masie 75 kg obciążenia zawieszonego na uchwycie pary ogni) i 981 N (odpowiadało to masie 100 kg obciążenia zawieszonego na uchwycie pary ogni). Podobnie, wstępnie założono, że testy ustalające zostaną przeprowadzone dla czasów t : 30, 40 i 50 godzin. Takie założenie wynikało z obserwacji zużycia po 1 godzinnej próbie odbiorczej nowo zmontowanego stanowiska, dla której wyznaczane zużycie pary ogni nie przekraczało 0,1 mm.

Kryterium optymalizującym czas i obciążenie próby było osiągnięcie w czasie próby, przy obecności piaskowca i wody kopalnianej o najniższej wartości zasadowości ogólnej (woda z kopalni A), poziomu zużycia bliskiego wykluczającemu ogniwo z eksploatacji, który to dla jego łukowej części wynosi 15% ubytku średnicy [6], co odpowiada wartości 2,1 mm dla ogniwa o średnicy 14 mm.

Już w pierwszej serii testów trwających 30 godzin, dla siły $F=981 \text{ N}$, zużycie liniowe w obszarze przegubu badanej pary ogni wyniosło ponad 2 mm, co uznano za wartość wystarczającą dla ustalenia warunków badań stanowiskowych (testu już nie kontynuowano dla czasów próby 40 i 50 godzin). Widok strefy zużycia pary ogni po teście trwającym 30 godzin i pod obciążeniem siłą osiową $F=981 \text{ N}$ przedstawiono na Rysunku 6.5.

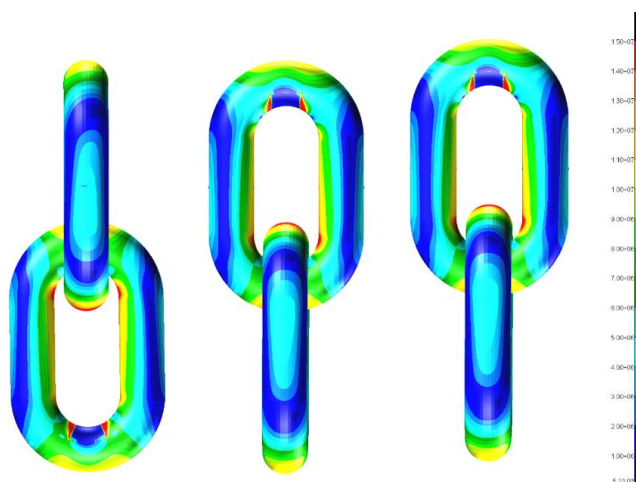


Rys. 6.5. Widok strefy zużycia pary ogniw po teście trwającym 30 godzin i pod obciążeniem siłą osiową $F=981\text{ N}$

Dla ustalonej wartości siły obciążającej parę ogniw $F=981\text{ N}$ wyznaczono z zastosowaniem symulacji numerycznej (opisanej w punkcie 5.2.2):

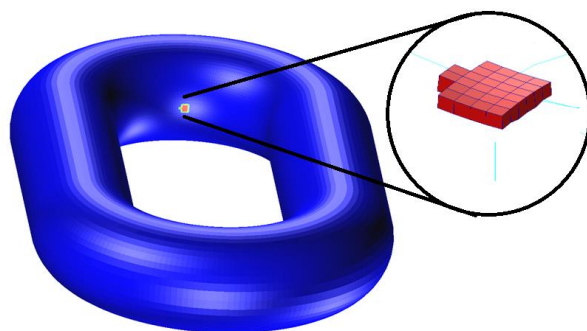
- rozkład naprężeń zredukowanych i odkształceń,
- powierzchnię pola kontaktu ogniw,
- wartość nacisku w strefie kontaktu.

Wyznaczony rozkład naprężeń zredukowanych przedstawiono na Rysunku 6.6. Jak wynika z tego rysunku, naprężenia zredukowane nie przekroczyły wartości 15 MPa , co świadczy o braku uplastycznienia w obszarze styku i o sprężystym charakterze współpracy ogniw.



Rys. 6.6. Rozkład naprężeń zredukowanych uzyskany na podstawie symulacji numerycznych

Na Rysunku 6.7 przedstawiono kształt wyznaczonej powierzchni A_{Cont} kontaktu obu ogniw pod wpływem przyłożonej siły $F=981\text{ N}$, której wartość wyniosła $2 \cdot 10^{-6}\text{ m}^2$ (2 mm^2). Dla tej powierzchni naciski nominalne, określone jako stosunek siły F do powierzchni styku A_{Cont} , wyniosły $490,5\text{ MPa}$.



Rys. 6.7. Powierzchnia kontaktu pary ogniw pod wpływem przyłożonej siły $F=981\text{ N}$

6.2.2. Określenie zmienności obciążeń dynamicznych występujących w łańcuchu zgrzeblowym

Jak już wcześniej wspomniano w niniejszej pracy, jednym z czynników mogących intensyfikować procesy degradacji ogniw łańcuchowych, a także wywołać efekt synergistyczny, są zmienne w czasie obciążenia dynamiczne. Obciążenia te są nieodłączną częścią pracy nominalnej przenośnika oraz mają zróżnicowany i często stochastyczny charakter. Aby możliwie w dokładny sposób odwzorować je na stanowisku testowym, przeprowadzono badania doświadczalne wg metody opisanej w punkcie 5.2.1 na dedykowanym przenośniku ratowniczym dla napięcia wstępnego łańcucha $S=981\text{ N}$ (odpowiadającemu dobranemu obciążeniu nominalnemu stanowiska badawczego).

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów (pełny przebieg sił dynamicznych w łańcuchu uzyskany dla założonego napięcia wstępnego i 10 cykli przesuwu łańcucha wzdłuż przenośnika przedstawiono na Rys. 6.8) określono podstawowe parametry charakteryzujące zmienność siły dynamicznej występującej w ciągu łańcuchowym w czasie jazdy przenośnika ratowniczego. Przyjęto, że podstawowymi wyznaczanymi estymatami, charakteryzującymi zmienność sił dynamicznych podczas pojedynczego cyklu przesuwu łańcucha wzdłuż przenośnika i jednego kierunku jego ruchu, będą wartość maksymalna (Max_F) i minimalna (Min_F). Sposób ich określenia przedstawiono na Rysunku 6.9.

Jako adekwatny parametr umożliwiający odwzorowanie na stanowisku badawczym rzeczywistej zmienności sił chwilowych działających w łańcuchu przyjęto wartość amplitudy A_d zmian sił dynamicznych zgodnie z zależnością:

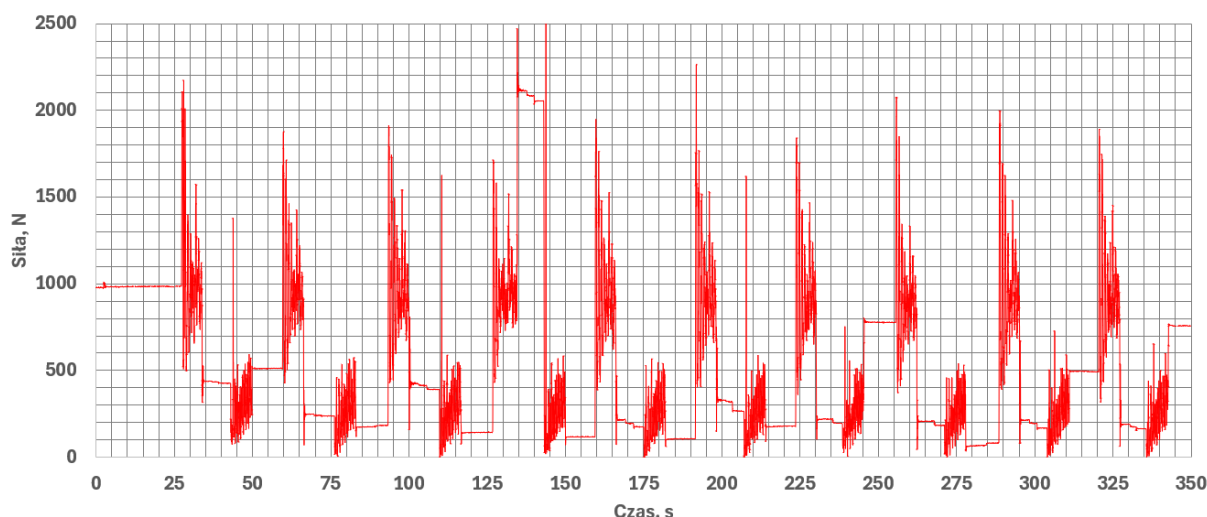
$$A_d = \frac{Max_F - Min_F}{2} \quad (6.2)$$

gdzie:

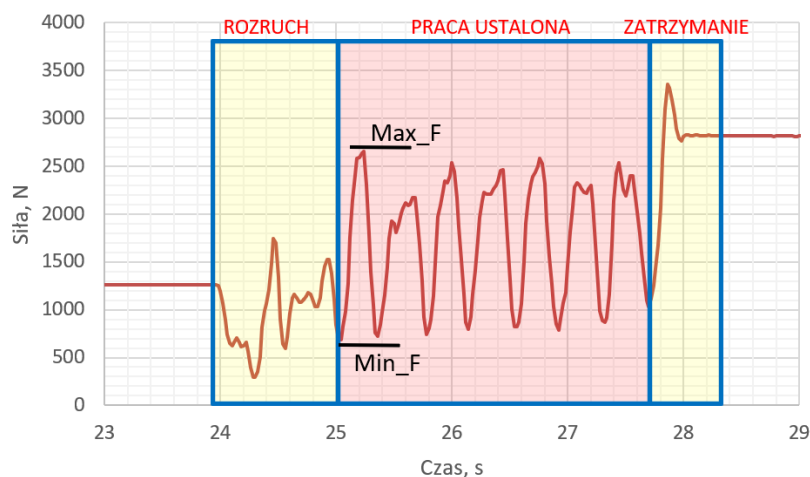
A_d – amplituda zmian sił dynamicznych,

Max_F – wartość maksymalna,

Min_F – wartość minimalna.



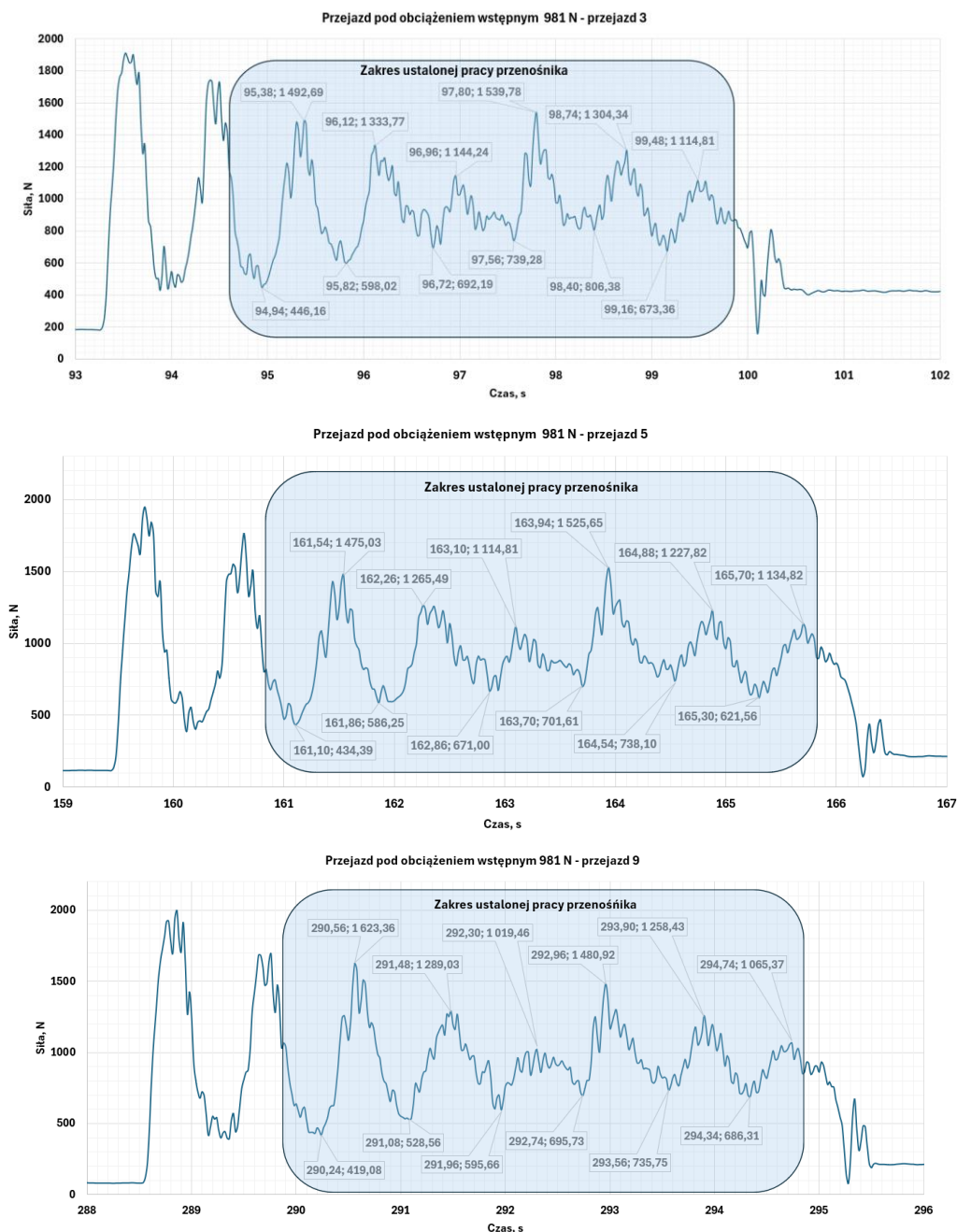
Rys. 6.8. Przebieg sił dynamicznych w łańcuchu uzyskany dla założonego napięcia wstępnego $S=981\text{ N}$ i 10 cykli przesuwu łańcucha wzdłuż przenośnika



Rys. 6.9. Przykładowy przebieg sił dynamicznych dla jednego biegu głowicy pomiarowej przy kierunku zasadniczym wraz z określeniem wartości Max_F i Min_F .

Na Rysunku 6.8 dostrzegalny jest wpływ kierunku ruchu łańcucha. Każdorazowo obserwowano większe wartości zmierzonej siły dla kierunku jazdy odpowiadającemu napinaniu części łańcucha znajdującej się w górnym przedziale rynny przenośnikowej (kierunek zasadniczy prowadzonych testów), stąd też przyjęto, że dla tego kierunku będzie wyznaczana amplituda A_d , czyli przyjęty parametr charakteryzujący zmienność sił dynamicznych w ogniwie łańcucha. Dla wszystkich przejazdów badawczych, przebiegi sił dynamicznych charakteryzowały się powtarzalnością co do ich charakteru, ale widoczne były różnice w wyznaczanych wartościach szczytowych (por. Rys. 6.10). W analizie zmienności przyjęto nie uwzględniać dwóch pierwszych wartości maksymalnych i pierwszej minimalnej wartości impulsu siły z uwagi na fakt, że są zasadniczo wywołane rozruchem układu

napędowego przonośnika, a także zwiększoną wartością tarcia między elementami ciernymi układu napędowego.



Rys. 6.10. Przebiegi sił dynamicznych w łańcuchu uzyskany dla napięcia wstępnego $S=981\text{ N}$ i 3 przykładowych przejazdów (3, 5 i 9 przejazd).

W celu ustalenia reprezentatywnej wartości amplitudy A_d zmienności sił dynamicznych w ogniwie dokonano uśrednienia arytmetycznego impulsów sił dynamicznych (bez uwzględnienia wartości wykluczonych, wywołanych rozruchem układu) dla pojedynczego przejazdu i wszystkich 10 przejazdów. Poza wyznaczeniem amplitudy siły dynamicznej w ogniwie, konieczne było określenie częstotliwości wymuszeń dynamicznych. W tym celu wykorzystano zależność:

$$\bar{f} = \frac{(f_{1_min} + f_{2_min} + \dots + f_{n_d_min}) + (f_{1_max} + f_{2_max} + \dots + f_{n_d_max})}{2 \cdot n_d} \quad (6.3)$$

gdzie:

$\bar{f}$ – średnia częstotliwość lokalnych wychyleń pojedynczego przejazdu,

f_{n_max} – częstotliwość pojedynczego lokalnego wychylenia liczona po estymacie maksymalnej,

f_{n_min} – częstotliwość pojedynczego lokalnego wychylenia liczona po estymacie minimalnej,

n_d – liczba wychyleń na przejazd w ruchu ustalonym.

Wyznaczone średnie wartości amplitudy i częstotliwości impulsów sił dynamicznych w ogniwie dla 10 przejazdów wyniosły:

- średnia amplituda wychyleń, $\bar{A}_d = 613,27 \pm 20,73$ N
- średnia częstotliwość wychyleń, $\bar{f} = 0,857 \pm 0,014$ Hz

W związku z powyższymi wynikami przyjęto, że na stanowisku obciążenia dynamiczne zostaną zasymulowane poprzez generowanie dodatkowego obciążenia o wartości ± 613 N z częstotliwością 0,86 Hz. Z uwagi na przyjęcie siłownika pneumatycznego jako elementu wykonawczego zadającego obciążenia dynamiczne oraz wynikającą z jego budowy różną powierzchnię oddziaływania ciśnienia po stronie pod- i nadłokowej, dla każdej strony obliczono wymagane ciśnienie zasilania. Wynosiło ono odpowiednio 0,197 MPa i 0,210 MPa.

6.3. Charakterystyka ścierniwa mineralnego

Ścierniwo mineralne będące urobkiem transportowanym przez przenośniki zgrzebłowe ma stały kontakt z jego zespołami roboczymi, w tym również w czasie przewijania łańcucha przez koło łańcuchowe. Stanowi w związku z tym istotny czynnik intensyfikujący procesy tribologiczne i tribokorozyjne zachodzące w przegubie ogniw łańcuchowych w czasie ich współpracy. Realizacja głównego celu pracy, czyli analizy synergii czynników środowiska górniczego w procesie zużywania ogniw łańcuchowych, wymaga uwzględnienia zróżnicowania rodzaju ścierniwa obecnego w przegubie tych ogniw.

W pracy uwzględniono to poprzez wybór trzech grup mineralnych: piaskowca, iłowców i węgla kamiennego. Przyjęto pozyskanie reprezentatywnych dla kopalń węgla kamiennego próbek piaskowca (1 rodzaj, dla którego przyjęto nazewnictwo piaskowiec z kopalni „C”) i iłowców (2 rodzaje, dla których przyjęto nazewnictwo iłowiec z kopalni „B” i iłowiec z kopalni „D”), a także pozyskano próbkę handlowego węgla kamiennego (1 rodzaj, dla którego przyjęto nazewnictwo „ekogroszek”).

Określenie własności rozpatrywanych materiałów skalnych nastąpiło zgodnie z metodyką opisaną w rozdziale 5.3.1.

6.3.1. Własności piaskowca z kopalni „C”

Badany piaskowiec (Rys. 6.11) ma jasnoszarą barwę, miejscami z ciemnoszarymi fragmentami, co sugeruje obecność substancji organicznej w spoiwie. Charakteryzuje się psamitową strukturą, słabym wysortowaniem ziaren oraz bezładną, zbitą teksturą, choć w niektórych miejscach jest mniej zwięzły i łatwo się kruszy. W składzie mineralnym widoczne są szare, szklście połyskujące ziarna kwarcu, białe, matowe ziarna skaleni oraz pojedyncze blaszki muskowitu z perłowym połyskiem.



a)

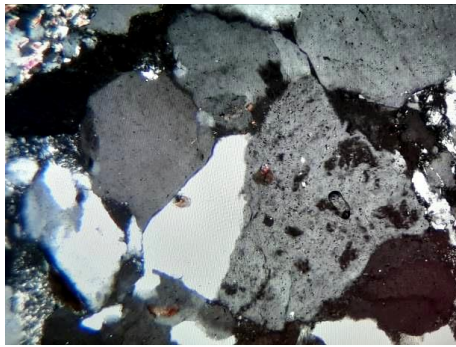


b)

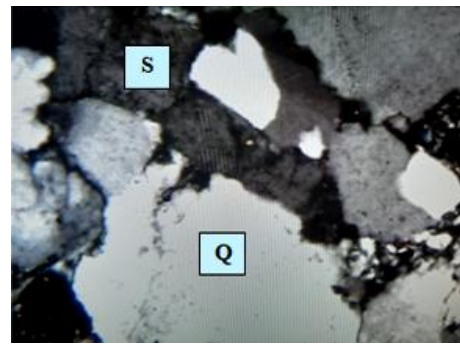
Rys. 6.11. Widok okruchów piaskowca z kopalni „C”

Mikroskopowe obserwacje (Rys. 6.12a) wykazały, że piaskowiec ma strukturę średnioziarnistą, z lokalnymi partiami drobnoziarnistymi. Ziarna materiału okruchowego są zarówno dobrze, jak i słabo obtoczone, a ich wysortowanie jest niskie. Tekstura skały jest zbita i bezładna. Pod względem spoiwa dominuje spoiwo porowe, z miejscowymi obszarami spoiwa kontaktowego.

Materiał okruchowy piaskowca składa się z kwarcu, łuszczyków, skaleni oraz minerałów ciężkich. Ziarna kwarcu mają zróżnicowaną wielkość (od 0,1 mm do 1 mm) i różny stopień obtoczenia (Rys. 6.12b). Obok zaokrąglonych ziaren kwarcu sporadycznie występują ostrokrawędziste fragmenty, powstałe w wyniku rozpadu większych ziaren z defektami sieciowymi. W świetle spolaryzowanym równolegle kwarc jest bezbarwny, ma słabo dodatni relief, często porysowaną powierzchnię i nieregularne spękania. W świetle spolaryzowanym skrzyżowanym wykazuje szare barwy interferencyjne I rzędu, a na niektórych ziarnach obserwuje się anomalie optyczne, objawiające się falistym wygaszaniem światła. Jest to efektem deformacji struktury kwarcu, spowodowanych dynamicznymi procesami, takimi jak ruchy tektoniczne.



a)

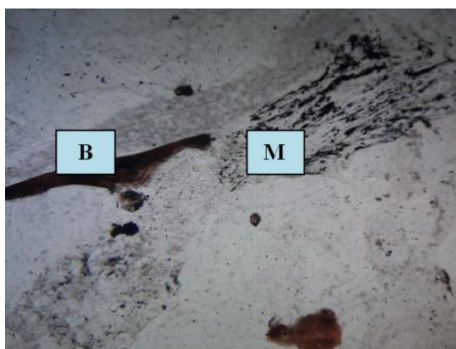


b)

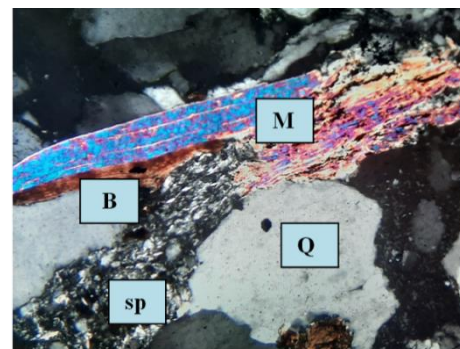
Rys. 6.12. Obrazy mikroskopowe piaskowca z kopalni „C”, a) widok ogólny; b) ziarna kwarcu (Q) w otoczeniu skaleni (S); polaryzatory skrzyżowane, powiększenie 100x,

Obok kwarcu występują również łyszczyki, w tym biotyt, który można zaobserwować w strukturze piaskowca. Ziarna biotyту występują w różnym stanie zachowania, od idiomorficznych kryształów z wyraźną łupliwością po silnie zwiertzałe, o poszarpanych brzegach. W świetle spolaryzowanym równolegle biotyt ma barwę od czerwono-brązowej do ciemnobrązowej, wykazuje silny pleochroizm, a na dobrze zachowanych ziarnach widoczna jest jednokierunkowa łupliwość. Szczeliny łupliwości często wypełniają produkty wietrzenia, głównie tlenki żelaza. W świetle spolaryzowanym skrzyżowanym biotyt charakteryzuje się prostym ściemnianiem i barwami interferencyjnymi II–III rzędu.

Obok biotyту występuje również muskowit, tworzący dobrze zachowane idiomorficzne, wydłużone formy, często powyginane na kontakcie z innymi minerałami. W świetle spolaryzowanym równolegle jest bezbarwny, nie wykazuje pleochroizmu i cechuje się jednokierunkową łupliwością. W świetle spolaryzowanym skrzyżowanym widoczne są typowe dla muskowitu barwy interferencyjne III rzędu (Rys. 6.13).



a)



b)

Rys. 6.13. Muskowit (M) w otoczeniu biotyту (B), kwarcu (Q) oraz spoiwa krzemionkowo-węglanowego (sp); a) polaryzatory równoległe, b) polaryzatory skrzyżowane

W badanym piaskowcu skalenie reprezentowane są przez skalenie sodowo-potasowe oraz plagioklasy. Skalenie sodowo-potasowe występują w formie bezbarwnych, tabliczkowych ziaren, które nie wykazują pleochroizmu. Są silnie zwiertzałe, mają poszarpane, nieregularne krawędzie i porysowaną powierzchnię. W świetle spolaryzowanym skrzyżowanym wykazują szare barwy interferencyjne I rzędu, a wśród nich zaobserwowano mikroklin z charakterystycznym układem polisyntetycznych zbliżniaczeń (Rys. 6.14a).

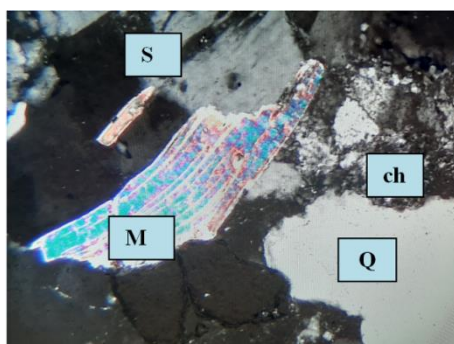
Plagioklasy (skalenie sodowo-wapniowe) występują sporadycznie, tworząc zbliżniaczone ziarna o szarych barwach interferencyjnych I rzędu oraz polisyntetycznych zbliżniaczeniach (Rys. 6.14b).



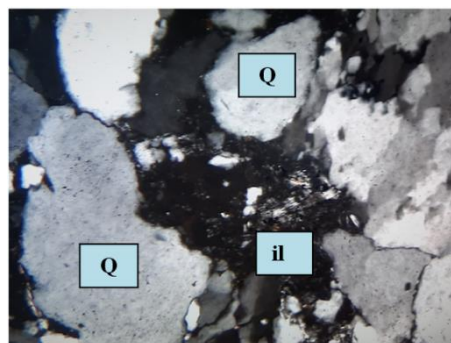
Rys. 6.14. Widok a) mikroklin (Mi) w otoczeniu kwarcu (Q); b) plagioklaz (Pl); polaryzatory skrzyżowane, powiększenie 100x

Spoiwo piaskowców ma głównie charakter porowy, rzadziej kontaktowy, i należy do typu mieszanego (cement). W jego skład mineralny wchodzi chalcodon, minerały węglanowe oraz minerały ilaste. Nie stwierdzono obecności spoiwa typu matrix, z wyjątkiem pojedynczych próbek, w których występowały niewielkie ilości drobnych ziaren kwarcu.

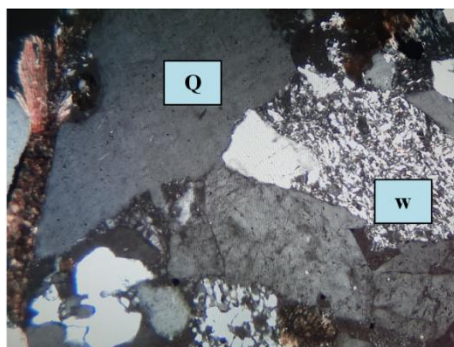
Chalcodon tworzy mikrokryształiczne agregaty, a na niektórych kryształach można sporadycznie dostrzec promienistą strukturę. Pod względem optycznym przypomina kwarc – jest bezbarwny, niepleochroiczny, ma zerowy lub słabo dodatni relief i nie wykazuje łupliwości. W świetle spolaryzowanym skrzyżowanym charakteryzuje się szarymi barwami interferencyjnymi I rzędu (Rys. 6.15a). Minerały ilaste występują w formie mikrokryształicznych agregatów o ciemnoszarych barwach interferencyjnych I rzędu. Często współwystępują z innymi składnikami spoiwa (Rys. 6.15b). Węglany, podobnie jak minerały ilaste, tworzą mikrokryształiczne agregaty. Przy skrzyżowanych polaryzatorach wyróżniają się barwami interferencyjnymi IV rzędu (Rys. 6.15c). Wśród minerałów materiału okruszowego występuje substancja węglowa w różnych formach. Makroskopowo widoczne są okruszki oraz rozproszona substancja węglowa, nadająca piaskowcom ciemnoszare zabarwienie. Mikroskopowo zaobserwowano zarówno okruszki, jak i drobne laminki (Rys. 6.15d).



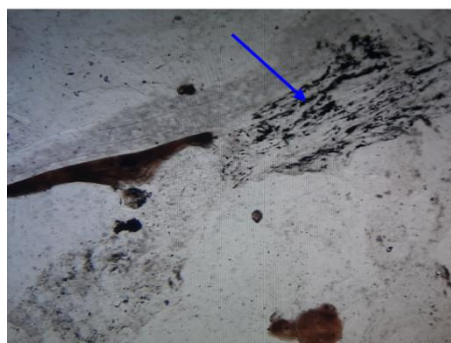
a)



b)



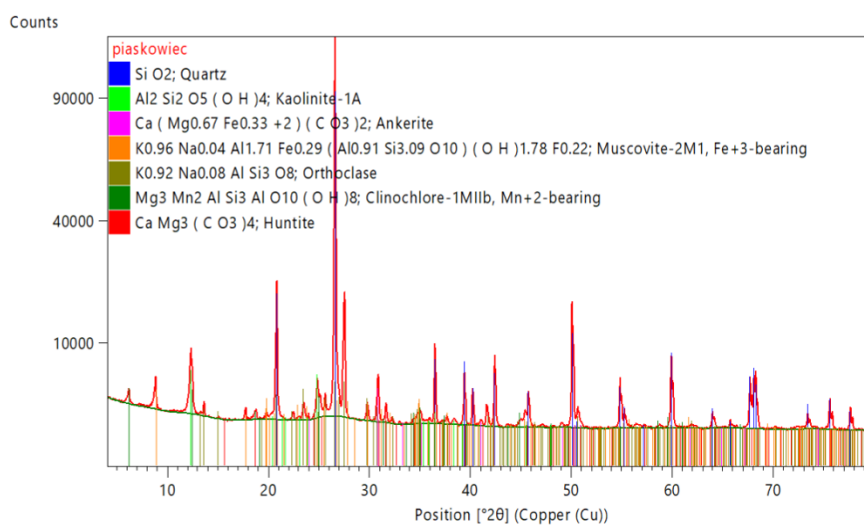
c)



d)

Rys. 6.15. a) skupienie chalcedonu (ch) w otoczeniu ziaren muskowitu (M), kwarcu (Q) i skalenia (S); polaryzatory skrzyżowane, powiększenie 100x; b) spoiwo ilaste (il) w otoczeniu ziaren kwarcu (Q); polaryzatory skrzyżowane, powiększenie 100x; c) spoiwo węglanowe (w) w otoczeniu ziaren kwarcu (Q); polaryzatory skrzyżowane, powiększenie 100x; d) okruchy i laminki substancji węglowej; polaryzatory równoległe, powiększenie 100x

Szczegółową identyfikację składników materiału okruchowego i spoiwa badanego piaskowca przeprowadzono metodą dyfrakcji rentgenowskiej (Rys. 6.16 i Tab. 6.2).



Rys. 6.19. Dyfraktogram piaskowca z kopalni „C”

Tab. 6.2. Składniki fazowe badanego piaskowca z kopalni „C”

Skład fazowy	Wzór	Udział ilościowy, %	Względne odchylenie standardowe, %
Kwarc	SiO ₂	69,9	1,4
Chloryt	(Fe,Mg,Al) ₆ [(OH) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀]	3,0	0,5
Muskowit	KAl ₂ (OH,F) ₂ AlSi ₃ O ₁₀	7,4	0,7
Ankeryt	Ca Fe[CO ₃] ₂	4,4	0,3
Huntyt	CaMg ₃ (CO ₃) ₄	0,6	0,4
Ortoklaz	K[AlSi ₃ O ₈]	9,9	0,6
Kaolinit	Al ₄ [Si ₄ O ₁₀](OH) ₈	4,8	1,4

Badania te potwierdziły dominację kwarcu i ortoklazu w materiale okruchowym oraz obecność muskowitu. Dodatkowo zidentyfikowano minerały spoiwa – wśród węglanów ankeryt i huntyt, a wśród minerałów ilastych kaolinit. Obecny jest także chloryt.

W składzie chemicznym (Tab. 6.3) piaskowca dominuje krzemionka (82,84%). W mniejszych ilościach występują Al₂O₃ (7,34%), K₂O (2,55%), Fe₂O₃ (1,68%) oraz MgO (1,16%). Zawartość pozostałych składników nie przekracza 1%.

Tab. 6.3. Skład chemiczny piaskowca z kopalni „C”

Składnik	Zawartość składnika, % mas.
SiO ₂	82,84
Al ₂ O ₃	7,34
Fe całk. przeliczone na Fe ₂ O ₃	1,68
TiO ₂	0,28
MnO	0,07
CaO	0,69
MgO	1,16
Na ₂ O	0,51
K ₂ O	2,55
P ₂ O ₅	0,04

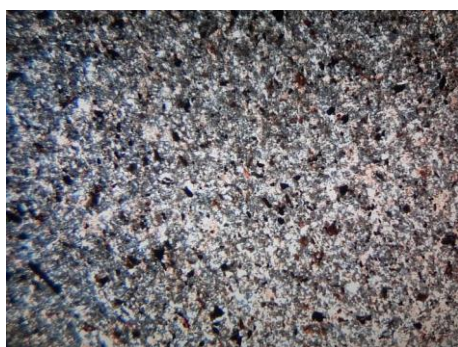
6.3.2. Iłowiec z kopalni „B”

Iłowiec z kopalni „B” wykazuje ciemnoszarą barwę, strukturę pelitową, a także zbitą teksturę (Rys. 6.20). Obserwacje mikroskopowe wykazały, że iłowiec z kopalni „B” ma drobne uziarnienie (Rys. 6.21a). W jego składzie mineralnym dominują minerały ilaste, a także drobne ziarna kwarcu, biotytu i muskowitu. W niektórych partiach skały występują większe

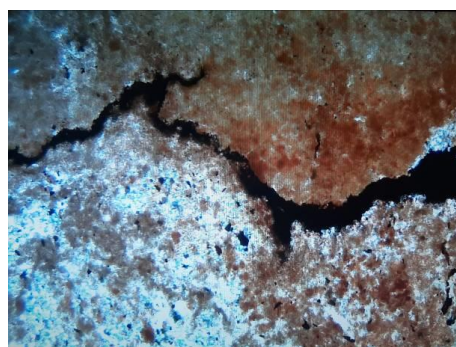
nagromadzenia tlenków żelaza. W łowcu widoczne są również domieszki substancji węglowej w postaci drobnych okruchów lub laminek (Rys. 6.21b).



Rys. 6.42. Łowiec - kopalnia „B”



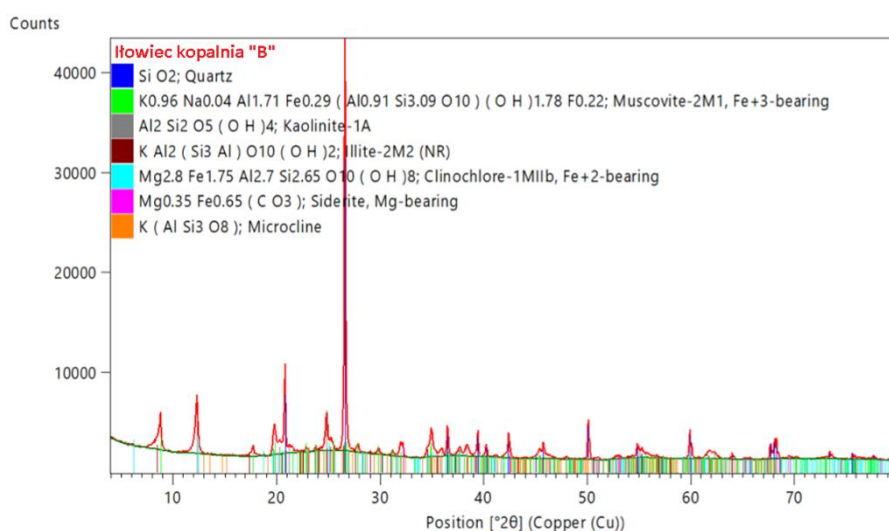
a)



b)

Rys. 6.21. Mikrofotografia łowca z kopalni „B”; a) uziarnienie, b) lamelle węglowe polaryzatory skrzyżowane, powiększenie 100x

Analiza składu mineralnego łowca kopalnia „B” wykazała obecność kwarcu, muskowitu i mikroklinu. Wśród minerałów ilastych zidentyfikowano illit i kaolinit, a w grupie węglanów – syderyt. Stwierdzono także obecność chlorytu (Rys. 6.22 i Tab. 6.4).



Rys. 6.22. Dyfraktogram łowca z kopalni „B”

Tab. 6.7. Składniki fazowe budujące łowiec z kopalni „B”

Skład fazowy	Wzór	Udział ilościowy %	Względne odchylenie standardowe, %
Substancja amorficzna	-	3,7	0,5
Kwarc	SiO ₂	28,5	0,4
Illit	K _{0,6-0,85} Al ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	11,6	0,7
Chloryt	(Fe,Mg,Al) ₆ [(OH) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀]	1,1	0,1
Syderyt	FeCO ₃	4,7	0,2
Mikroklin	KAlSi ₃ O ₈	0,8	0,1
Kaolinit	Al ₄ [Si ₄ O ₁₀](OH) ₈	20,6	0,5
Muskowit	KAl ₂ (OH, F) ₂ AlSi ₃ O ₁₀	29,0	0,8

Skład chemiczny łowca z kopalni „B” (Tab. 6.8) jest złożony głównie z SiO₂ (57,72%) oraz Al₂O₃ (22,16%), pozostałymi składnikami są Fe₂O₃ (3,32%), K₂O (3,08%), TiO₂ (1,06%) oraz MgO (1,01%).

Tab. 6.8. Skład chemiczny łowca z kopalni „B”

Składnik	Zawartość składnika,% mas.
SiO ₂	57,72
Al ₂ O ₃	22,16
Fe całk. przeliczone na Fe ₂ O ₃	3,32
TiO ₂	1,06
MnO	0,04
CaO	0,13
MgO	1,01
Na ₂ O	0,44
K ₂ O	3,08
P ₂ O ₅	0,10

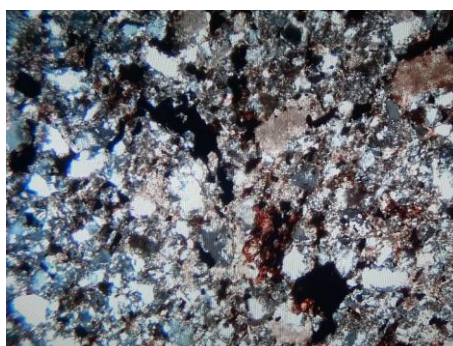
6.3.3. Łowiec z kopalni „D”

Łowiec z wyrobisk kopalni „D” ma barwę od czarnej do ciemnoszarej, co wynika z obecności rozproszonej substancji węglowej. Charakteryzuje się strukturą pelitową i zbitą teksturą. W kontakcie z wodą rozmaka, a jego zapach przypomina zaprawę murarską, co wskazuje na obecność minerałów ilastych (Rys. 6.23). Mikroskopowe obserwacje wykazały, że badany łowiec składa się głównie z minerałów ilastych, a także kwarcu i łuszczyków (biotytu

i muskowitu). Widoczne są również nieregularne nagromadzenia czerwono przeświecających tlenków żelaza oraz okruchy nieprzeźroczystej substancji węglowej (Rys. 6.24).

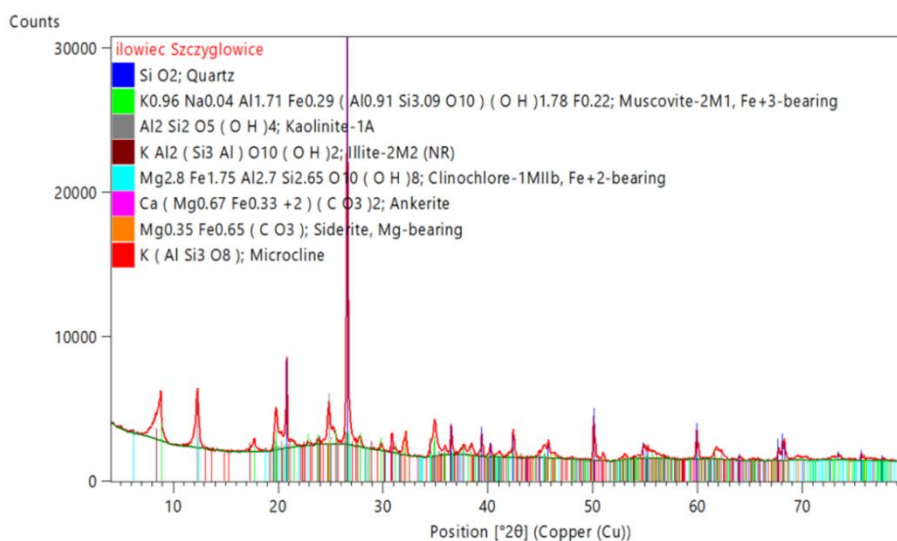


Rys. 6.23. Iłowiec z kopalni „D”



Rys. 6.24. Mikrofotografia ilowca z kopalnia „D”; polaryzatory skrzyżowane, powiększenie 100x

Badania metodą dyfrakcji rentgenowskiej wykazały, że ilowiec z kopalni „D” ma podobny skład mineralny jak ilowiec z kopalni „B” z tą różnicą, że stwierdzono w nim dodatkowo obecność ankerytu (Rys. 6.25 i Tab. 6.9).



Rys. 6.25. Dyfraktogram ilowca z kopalni „D”

Tab.6.9. Składniki fazowe iłowca z kopalni „D”

Skład fazowy	Wzór	Udział ilościowy, %	Względne odchylenie standardowe, %
Substancja amorficzna	-	10,2	0,5
Kwarc	SiO ₂	19,6	0,3
Illit	K _{0,6-0,85} Al ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	18,7	0,6
Chloryt	(Fe,Mg,Al) ₆ [(OH) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀]	0,7	0,1
Syderyt	FeCO ₃	3,8	0,2
Mikroklin	KAlSi ₃ O ₈	0,8	0,1
Kaolinit	Al ₄ [Si ₄ O ₁₀](OH) ₈	17,9	0,4
Muskowit	KAl ₂ (OH,F) ₂ AlSi ₃ O ₁₀	26,4	0,7
Ankeryt	Ca Fe[CO ₃] ₂	1,9	0,1

W składzie iłowca (tab. 6.10) występują SiO₂ (48,93%) oraz Al₂O₃ (20,51%). Poza tym w mniejszych ilościach występują: Fe₂O₃ (3,72%), K₂O (3,14%) oraz MgO (1,43%). Zawartość pozostałych nie osiąga 1%.

Tab. 6.10. Skład chemiczny iłowca z kopalni „D”

Składnik	Zawartość składnika,% mas.
SiO ₂	48,93
Al ₂ O ₃	20,51
Fe całk. Przeliczone na Fe ₂ O ₃	3,72
TiO ₂	0,90
MnO	0,05
CaO	0,56
MgO	1,43
Na ₂ O	0,47
K ₂ O	3,14
P ₂ O ₅	0,08

6.3.4. Węgiel kamienny

Badany węgiel „Ekogroszek” to paliwo energetyczne o granulacji do 25 mm z węgla kamiennego o niskiej zawartości siarki, wysokiej kaloryczności, niskiej wilgotności i niewielkiej ilości substancji niepalnych. Makroskopowo reprezentuje litotyp klaryn, zbudowany z naprzemianległych pasemek błyszczącego wityny i matowego durynu. Ma czarną barwę,

szklisty połysk w partiach witrażowych i matowy w miejscach występowania durynu (Rys. 6.26).



Rys. 6.26. Węgiel „Ekogroszek”

Analiza chemiczna wykazała, że zawartość węgla C w badanej próbce wynosi 80%, co mieści się w zakresie typowym dla węgla kamiennego (75÷97%). Zawartość siarki S wynosi 0,58%, co również odpowiada przyjętym wartościom dla węgla kamiennego (0,2÷2%) (Tab. 6.11).

Tab. 6.11. Skład chemiczny węgla

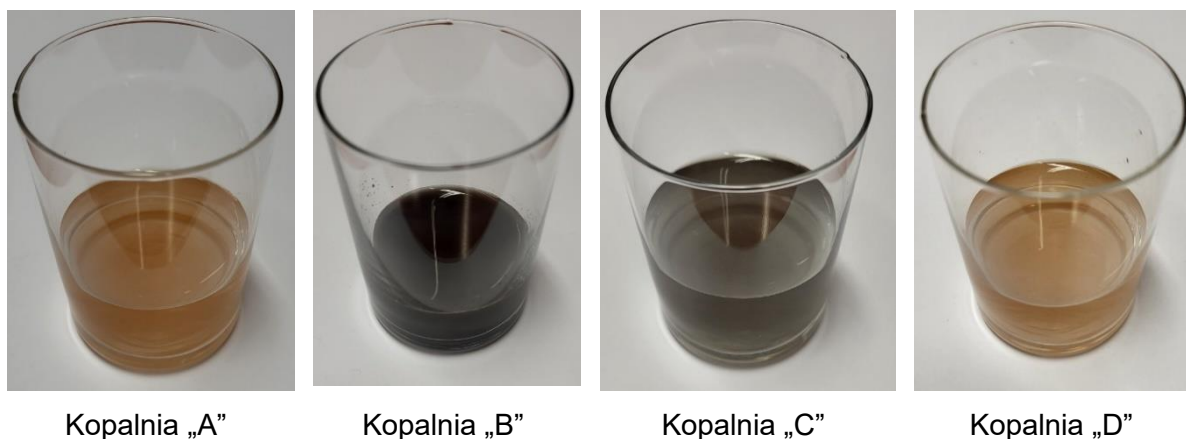
Składnik	Zawartość składnika, % mas.
SiO ₂	0,90
Al ₂ O ₃	0,74
Fe całkowite przeliczone na Fe ₂ O ₃	0,59
TiO ₂	0,03
MnO	0,01
CaO	0,58
MgO	0,29
Na ₂ O	0,06
K ₂ O	0,04
C całkowity	80,0
S całkowita	0,58
Zawartość popiołu (próbka prażona w temp. 815°C)	3,19

W składzie chemicznym badanego węgla stwierdzono obecność związków takich jak SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂, MnO, CaO, MgO, Na₂O i K₂O. Związki te tworzą mineralne zanieczyszczenia węgla. Badany węgiel należy do grupy niskopopiołowych.

6.4. Charakterystyka wód kopalnianych

Podobnie jak w poprzednim punkcie, na potrzeby badań synergii czynników środowiska górniczego w procesie zużywania ogniw łańcuchowych, uwzględniono zróżnicowanie

własności korozyjnych i elektrochemicznych wód kopalnianych. Nastąpiło to poprzez badania wstępne czterech wód dołowych wykazujących odmienne cechy makroskopowe (Rys. 6.27), które oznaczono jako woda z kopalni „A”, woda z kopalni „B”, woda z kopalni „C” i woda z kopalni „D”. Uzyskane wyniki pomiarów składu chemicznego badanych wód dołowych zestawiono w Tabeli 6.13.



Rys. 6.27. Barwa badanych wód kopalnianych

Tab. 6.13. Wyniki badań składu wody

Oznaczenie kopalni	Kopalnia A	Kopalnia B	Kopalnia C	Kopalnia D
Azotany, mg/l	428	19,3	398	24 085
Chlorki, mg/l	32 575	3 710	13 068	24 014
Siarczany, mg/l	4060	63	772	63 345
Wapń, mg/l	843	350	527	1000
Twardość ogólna, mval/l	16,86	7	10,54	20
Wodorowęglany, mg/l	300	200	100	80
Zasadowość ogólna, mmol/l	4,88	3,75	1,6	1,36
Odczyn pH	7,71	6,98	7	6,96

Na podstawie zawartości jonu chlorkowego i jonu siarczanowego (Tab.6.14) ujętych w normie branżowej BN-75/1071-05 „Wody kopalniane. Oznaczenie szybkości korozji i klasyfikacja agresywności korozyjnej względem stali węglowych konstrukcyjnych zwykłej jakości” dokonano przyporządkowania pozyskanych wód kopalnianych do odpowiednich grup agresywności korozyjnej (Tab. 6.15) oraz określenia szybkości korozji (Tab. 6.16) dla każdej z grup za pomocą poniższych zależności:

$$V_{C_{2A}} = 31,0661 - 0,00023 X - 2,9229 pH + 0,7452 Z_{og} \quad (6.4)$$

$$V_{C_{2B}} = 13,8322 - 0,1615 tw_{og} - 0,5891 Z_{og} \quad (6.5)$$

$$V_{C_{2C}} = 6,1832 + 0,00003 X - 0,0031 tw_{og} - 0,6275 Z_{og} \quad (6.6)$$

gdzie:

$V_{C_{2A}}$ – szybkość korozji dla grupy 2A,

$V_{C_{2B}}$ – szybkość korozji dla grupy 2B,

$V_{C_{2C}}$ – szybkość korozji dla grupy 2C,

X – zawartość jonu chlorkowego, mg/dm^3 ,

tw_{og} – twardość ogólna wody, mval/dm^3 ,

z_{og} – zasadowość ogólna wody, mval/dm^3 .

Tab. 6.14. Grupy wód kopalnianych wg BN-75/1071-05

Grupa wód kopalnianych		Zawartość jonu chlorkowego X mg/dm^3	Zawartość jonu siarczanowego X_1 mg/dm^3
1	A	≤ 200	≤ 200
	B		> 200
2	A	> 200	≤ 200
	B		$200 < X_1 < 1500$
	C		≥ 1500

Tab. 6.15. Przyporządkowanie pozyskanych próbek wód kopalnianych do poszczególnych grup agresywności korozyjnej (wg BN-75/1071-05)

Oznaczenie kopalni	Kopalnia A	Kopalnia B	Kopalnia C	Kopalnia D
Grupa agresywności korozyjnej	2C	2A	2B	2C

Tab. 6.16. Szybkość korozji pozyskanych próbek wg BN-75/1071-05

Oznaczenie kopalni	Kopalnia A	Kopalnia B	Kopalnia C	Kopalnia D
Szybkość korozji V_C , g/m^2 wg BN 1071-05:1975	0,99	13,37	10,24	5,14

Wyniki przedstawione w Tabeli 6.16 klasyfikują badaną wodę z kopalni A jako słabo agresywną, z kopalni D średnio agresywną, natomiast z kopalń B i C jako silnie agresywną.

W normie PN-EN 12502-3 „Ochrona materiałów metalowych przed korozją. Wytyczne do oceny ryzyka wystąpienia korozji w systemach rozprowadzania i magazynowania wody” określono sposób oceny wpływu parametrów wody na prawdopodobieństwo wystąpienia korozji, oparty o współczynniki:

- S_1 reprezentującego prawdopodobieństwo wystąpienia korozji wżerowej; jeżeli $S_1 < 0,5$ występuje bardzo niskie prawdopodobieństwo występowania korozji wżerowej, natomiast dla $S_1 > 3,0$ występuje bardzo wysokie prawdopodobieństwo występowania korozji wżerowej,
- S_2 reprezentującego prawdopodobieństwo występowania korozji selektywnej; korozję selektywną uważa się za małą, gdy wartość S_2 jest poniżej 1 lub powyżej 3, lub gdy parametr $c(\text{NO}_3^-)$ wynosi mniej niż $0,3 \text{ mmol/l}$.

Współczynniki te wyznacza się z zależności:

$$S_1 = \frac{c(Cl^-) + c(NO_3^-) + 2c(SO_4^{2-})}{c(HCO_3^-)} \quad (6.7)$$

$$S_2 = \frac{c(Cl^-) + 2c(SO_4^{2-})}{c(HCO_3^-)} \quad (6.8)$$

gdzie:

S_1 – współczynnik korozyjności wżerowej,

S_2 – współczynnik korozyjności selektywnej,

$c(HCO_3^-)$ – stężenie jonów wodorowęglanowych w mmol/dm³,

$c(Cl^-)$ – stężenie jonów chlorkowych w mmol/dm³,

$c(HSO_4^{2-})$ – stężenie jonów siarczanowych (VI) w mmol/dm³,

$c(NO_3^-)$ – stężenie jonów azotanowych w mmol/dm³.

Wyznaczone wartości współczynników S_1 i S_2 przedstawiono w Tabeli 6.17.

Tab. 6.17. Wyznaczone dla badanych wód kopalnianych wartości współczynników S_1 i S_2 wg PN-EN 12502-3

Oznaczenie kopalni	Kopalnia A	Kopalnia B	Kopalnia C	Kopalnia D
Korozyjność wżerowa S_1	205	32	239	1819
Korozyjność selektywna S_2	204	32	235	1523

Porównując wyniki przedstawione w Tabelach 6.16 i 6.17, można stwierdzić, że w zależności od metody określenia agresywności korozyjnej wody kopalnianej uzyskuje się różne oszacowanie możliwych skutków. Na bazie powyższego uznano, że wybór wody do badań zasadniczych powinien nastąpić poprzez wyznaczenie laboratoryjną metodą potencjodynamiczną szybkości korozji materiału ogniwa w środowisku wody kopalnianej.

7. BADANIA LABORATORYJNE

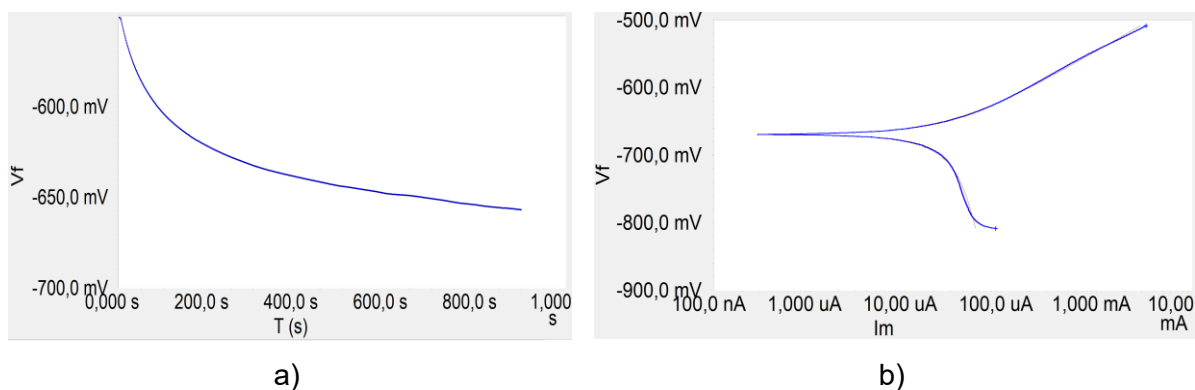
7.1. Badania szybkości zużycia korozyjnego pod wpływem wód kopalnianych

Wyniki badań składu wód kopalnianych, pomimo swojej dużej wartości poznawczej, nie przyniosły rozstrzygającej informacji determinujących dobór wody kopalnianej do zasadniczych badań zużyciowych. W związku z tym zdecydowano się na określenie szybkości zużycia korozyjnego w dedykowanych badaniach z wykorzystaniem potencjostatu. Próbkę, a jednocześnie elektrodę roboczą, stanowił wycinek przyjętego do badań stanowiskowych ogniwa łańcucha o rozmiarze 14x50. Opis urządzenia badawczego i procedury badawczej przedstawiono w Rozdziale 5.

Badania podzielone były na 2 etapy:

- badania potencjału obwodu otwartego OCP (czas pomiaru ok. 15 minut),
- badania potencjodynamiczne w zakresie $\pm 150\text{mV}$ z automatyczną ekstrapolacją Tafel'a i wyznaczeniem parametrów korozji (czas pomiaru ok. 5 minut).

Badania szybkości zużycia korozyjnego przeprowadzono dla każdej z 4 wód kopalnianych oraz kontrolnie jako punkt odniesienia dla wody demineralizowanej. Wyznaczenie parametrów korozyjnych nastąpiło w oparciu o wykres OCP i wykres Tafel'a rozpatrywanego wariantu wody dołowej (na Rys. 7.1 przedstawiono przykładowe wykresy OCP i Tafel'a uzyskane dla wody kopalnianej A)

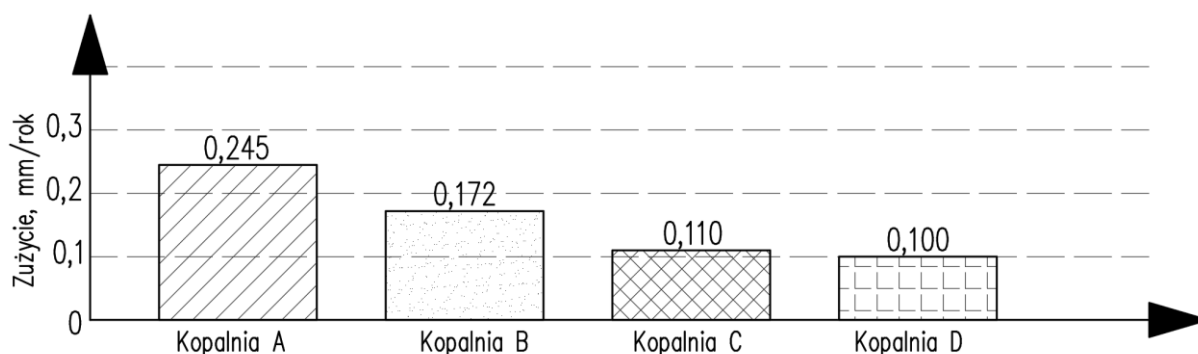


Rys. 7.1. Badania szybkości korozji w wodzie kopalnianej z kopalni A, a – wykres OCP, b – wykres Tafel'a

Uzyskane wyniki dla rozpatrywanych wód dołowych przedstawiono w Tabeli 7.1. W sposób graficzny przedstawiono porównanie szybkości korozji (w mm/rok) badanych wód na Rysunku 7.2.

Tab. 7.1. Wyniki badań korozyjnych pod wpływem wód kopalnianych

Oznaczenie wody	E_{kor} , mV	I_{kor} , μA	Zużycie V_k , mm/rok
Kopalnia A	$-669 \pm 1,3$	$32,6 \pm 0,07$	$0,245 \pm 0,015$
Kopalnia B	$-663 \pm 1,3$	$22,8 \pm 0,05$	$0,172 \pm 0,010$
Kopalnia C	$-522 \pm 1,0$	$14,6 \pm 0,03$	$0,110 \pm 0,007$
Kopalnia D	$-641 \pm 1,3$	$13,2 \pm 0,03$	$0,100 \pm 0,006$
Woda demineralizowana	0	0	0



Rys. 7.2. Porównanie szybkości korozji pod wpływem badanych wód kopalnianych

Jak wynika z Rysunku 7.2 i Tabeli 7.1, najwyższym zużyciem korozyjnym charakteryzuje się woda z kopalni A. W związku z tym właśnie tą wodę zdecydowano się wytypować jako czynnik intensyfikujący zużycie korozyjne w badaniach stanowiskowych.

Wyznaczone wartości szybkości korozji dla wody kopalnianej (także dla ich mieszanin ze ścierniwami mineralnymi) mają istotne znaczenie dla określenia synergii zużywania się ogniw łańcuchowych i stanowią jedną z podstawowych, jednoczynnikowych składowych. Można określić wartość zużycia korozyjnego odpowiadającą czasowi próby 30 godzin, co odpowiada wartości 1,25 doby, korzystając z zależności:

$$I_{CORR_G} = \frac{V_k \cdot \frac{t_{bad}}{t_{rok}}}{t_{rok}} \quad (7.1)$$

gdzie:

I_{CORR_G} – zużycie korozyjne w jednostce długości w czasie próby badawczej,

V_k – zużycie korozyjne, mm/rok,

t_{bad} – czas badania, doba,

t_{rok} – czas roku, doba.

W przypadku analizy porównawczej wyrażonej wartością ubytku masy próbki w czasie badania, uzyskaną wartość zużycia w odniesieniu do czasu próby ze wzoru 7.1 należy pomnożyć przez pole powierzchni reagującej i gęstość stali. Wynikowo uzyska się zależność w postaci:

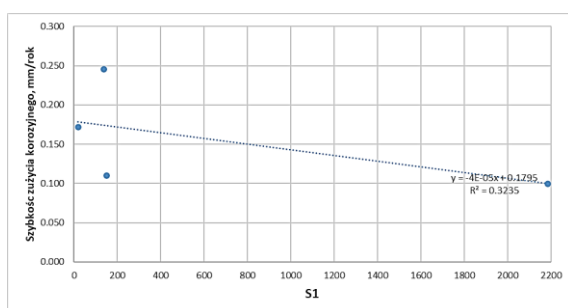
$$I_{CORR_M} = I_{CORR_G} \cdot A_{pr} \cdot \rho \quad (7.2)$$

I_{CORR_M} – zużycie korozyjne w jednostce masy w czasie próby badawczej,

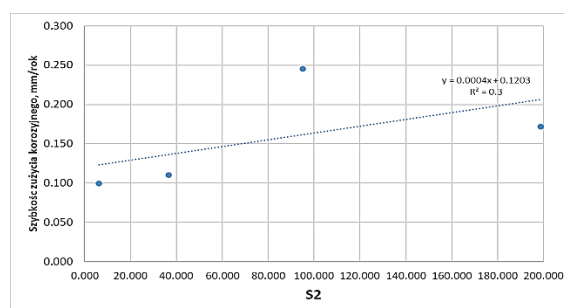
A_{pr} – pole powierzchni reagującej z wodą kopalnianą podczas badania,

ρ – gęstość badanego materiału (stali).

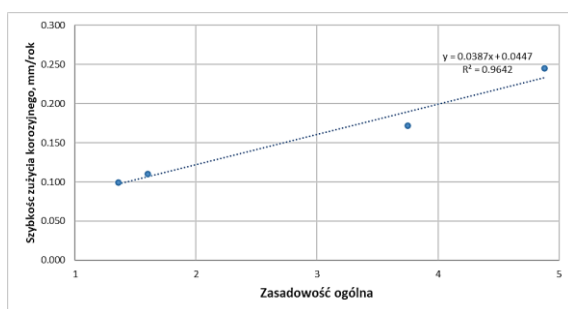
W tym miejscu należy przeanalizować zależność między wyznaczonymi z pomiarów metodą potencjodynamiczną wartościami szybkości pomiarów, a parametrami definiującymi agresywność korozyjną rozpatrywanych wód. Na Rysunku 7.3 przedstawiono wykresy szybkości korozji w funkcji: współczynnika S_1 , współczynnika S_2 , zasadowości ogólnej, stężenia pH i szacowanej szybkości korozji wg BN 1071-05:1975 [98] (parametry wyznaczone w ramach Etapu 2 procesu badawczego i przedstawione w rozdziale 6).



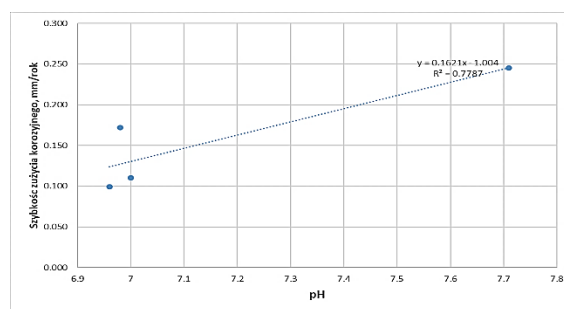
a)



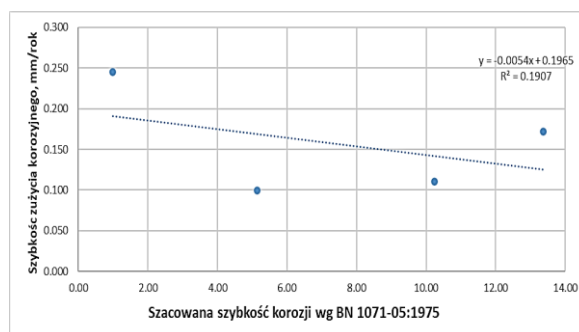
b)



c)



d)



e)

Rys. 7.3. Przebiegi szybkości korozji w funkcji: a) współczynnika S_1 , b) współczynnika S_2 , c) zasadowości ogólnej, d) stężenia pH, e) szacowanej szybkości korozji wg BN 1071-05:1975 [98].

Jak można łatwo zauważyć na Rysunku 7.3, wartość szybkości korozyjnej wyznaczonej metodą potencjodynamiczną jest skorelowana progresywnie ($R^2 > 0,5$) z dwoma parametrami: zasadowością ogólną i stężeniem pH (jednakże parametr determinacji R^2 jest wyższy dla zasadowości ogólnej). Charakter uzyskanej zależności między szybkością korozyjną a współczynnikiem S_2 jest progresywny, ale wartość parametru determinacji nie świadczy o wystąpieniu między nimi korelacji. Także pozostałe zależności między szybkością korozyjną wyznaczoną metodą potencjodynamiczną, a współczynnikiem S_1 i szacowaną szybkością korozji wg BN 1071-05:1975 [98] nie świadczą o ich wzajemnym skorelowaniu, przy czym charakter zależności jest regresywny. Powyższe pozwala stwierdzić, że wyznaczone analitycznie współczynniki i parametry korozyjne nie uwzględniają wpływu wszystkich związków chemicznych zawartych w wodzie korozyjnej, w szczególności ich zdolności do inhibitowania procesu korozji elektrochemicznej. Ponadto zależności pozwalające wyznaczyć szybkość korozji wg normy BN 1071-05:1975 [98] są przeznaczone dla grupy stali węglowych konstrukcyjnych zwykłej jakości, a nie jak powszechnie stosuje się na łańcuchy górnicze dla stali stopowych do ulepszenia.

7.2. Badania korozyjności mieszaniny woda ścierniwo

Badania ścierniwa mineralnego pozyskanego z kopalń wykazały obecność w ich składzie minerałów mogących rozpuszczać się w roztworze wodnym i w wyniku tego reagować z innymi substancjami zawartymi w tych roztworach. Skutkiem powstania mieszaniny wodno-mineralnej może być wzmocnienie lub osłabienie agresywności korozyjnej w stosunku do wyjściowego roztworu wodnego, tym samym obecność urobku mineralnego może wpłynąć synergistycznie lub antagonistycznie na procesy niszczenia łańcuchów. Badania szybkości korozyjnej mieszaniny wodno-mineralnej przeprowadzono zgodnie z metodą opisaną w punkcie 5.3.3, natomiast uzyskane wyniki przedstawiono w Tabelach 7.2 i 7.3. W Tabeli 7.4 przedstawiono różnice względnej szybkości korozji mieszaniny względem wody dołowej.

Tab. 7.2. Wyniki pomiarów parametrów korozyjności mieszanin wodno-mineralnych

Oznaczenie wody	Mieszanina wodno-mineralna							
	Piaskowiec		Iłowiec z kopalni B		Iłowiec z kopalni D		Węgiel	
	E_{kor} , mV,	I_{kor} , μA	E_{kor} , mV,	I_{kor} , μA	E_{kor} , mV,	I_{kor} , μA	E_{kor} , mV,	I_{kor} , μA
Kopalnia A	-708±1,4	16,8±0,03	-740±1,5	9,42±0,02	-695±1,4	20,3±0,04	-737±1,5	36,8±0,07
Kopalnia B	-699±1,4	23,6±0,05	-744±1,5	26,9±0,05	-722±1,4	27±0,05	-703±1,4	106±0,21
Kopalnia C	-693±1,4	25,5±0,05	-745±1,5	15,6±0,03	-663±1,3	26,1±0,05	-724±1,4	42,3±0,08
Kopalnia D	-680±1,4	9,51±0,02	-746±1,5	5,65±0,01	-654±1,3	8,33±0,02	-730±1,5	25,9±0,05
Demineralizowana	-710±1,4	21,6±0,04	-733±1,5	51,6±0,10	-727±1,5	44,3±0,09	-717±1,4	74,4±0,15

Tab. 7.3. Wyniki badań szybkości korozji mieszanin wodno-mineralnych

Oznaczenie wody	Brak ścierniwa	Mieszanina wodno-mineralna, mm/rok			
		Piaskowiec	Iłowiec z kopalni B	Iłowiec z kopalni D	Węgiel
Kopalnia A	0,245±0,015	0,127±0,007	0,071±0,004	0,153±0,009	0,278±0,016
Kopalnia B	0,172±0,010	0,178±0,011	0,203±0,012	0,203±0,012	0,795±0,047
Kopalnia C	0,110±0,007	0,192±0,011	0,117±0,007	0,197±0,012	0,319±0,019
Kopalnia D	0,100±0,006	0,072±0,004	0,043±0,003	0,063±0,004	0,196±0,012
Demineralizowana	0,000	0,163±0,010	0,389±0,023	0,334±0,020	0,561±0,033

Tab. 7.4. Względna zmiana szybkości korozji mieszaniny wodno-ścierniej względem szybkości korozji wody dołowej

Oznaczenie wody	Mieszanina wodno-mineralna							
	Piaskowiec		Iłowiec z kopalni B		Iłowiec z kopalni D		Węgiel	
Kopalnia A	-48%	K↓↓	-71%	K↓↓↓	-38%	K↓	13%	K↑
Kopalnia B	3%	K↑	18%	K↑↑	18%	K↑↑	362%	K↑↑↑↑
Kopalnia C	75%	K↑↑↑	6%	K↑	79%	K↑↑↑	190%	K↑↑↑↑
Kopalnia D	-28%	K↓	-57%	K↓↓↓	-37%	K↓	96%	K↑↑↑

Oznaczenia:

K↓ - niewielkie obniżenie szybkości korozji (do 10%),
 K↓↓ - średnie obniżenie szybkości korozji (do 50%),
 K↓↓↓ - duże obniżenie szybkości korozji (do 100%).

K↑ - niewielki przyrost szybkości korozji (do 10%),
 K↑↑ - średni przyrost szybkości korozji (do 50%),
 K↑↑↑ - duży przyrost szybkości korozji (do 100%),
 K↑↑↑↑ - bardzo duży przyrost szybkości korozji (ponad 100%).

Oprócz badań szybkości korozji z wykorzystaniem potencjostatu, przeprowadzono także analizę wpływu ścierniwa mineralnego na stężenie pH utworzonej mieszaniny. Wyniki pomiarów stężenia pH zawarto w Tabeli 7.5, natomiast różnice stężenia pH mieszaniny wodno-ścierniej względem pH wody dołowej w Tabeli 7.6.

Jak wynika z zaprezentowanych Tabel 7.2÷7.5, wpływ dodania danego składnika mineralnego do roztworu wodnego na stężenie jonów wodorowych (pH) jest zróżnicowany, ale na ich podstawie można zasadniczo stwierdzić:

Tab. 7.5. Wyniki badań pH mieszaniny wód kopalnianych i ścierniwa

Oznaczenie wody	Brak ścierniwa	Mieszanina wodno-mineralna			
		Piaskowiec	Iłowiec z kopalni B	Iłowiec z kopalni D	Węgiel
Kopalnia A	7,71	7,07	7,03	7,45	5,87
Kopalnia B	6,98	7,27	7,23	7,86	6,14
Kopalnia C	7	7,19	7,18	7,76	5,93
Kopalnia D	6,96	6,87	6,82	7,33	5,37
Demineralizowana	6,08	7,54	7,66	8,82	5,83

Tab. 7.6. Zmiana stężenia pH mieszaniny wodno-ścierniej względem pH wody dołowej

Oznaczenie wody	Mieszanina wodno-mineralna							
	Piaskowiec		Iłowiec z kopalni B		Iłowiec z kopalni D		Węgiel	
Kopalnia A	-0,64	pH↓	-0,68	pH↓	-0,26	pH↓	-1,84	pH↓↓
Kopalnia B	0,29	pH↑	0,25	pH↑	0,88	pH↑	-0,84	pH↓
Kopalnia C	0,19	pH↑	0,18	pH↑	0,76	pH↑	-1,07	pH↓↓
Kopalnia D	-0,09	pH↓	-0,14	pH↓	0,37	pH↑	-1,59	pH↓↓
Demineralizowana	1,46	pH↑↑	1,58	pH↑↑	2,74	pH↑↑	-0,25	pH↓

Oznaczenia:

pH↓ - niewielkie obniżenie pH (zwiększenie kwasowości),
pH↓↓ - znaczne obniżenie pH (zwiększenie kwasowości),

pH↑ - niewielki wzrost pH (zwiększenie zasadowości),
pH↑↑ - znaczny wzrost pH (zwiększenie zasadowości),

- dodanie węgla do wszystkich wód kopalnianych spowodowało bardzo istotne zwiększenie szybkości korozji (poza przypadkiem wody z kopalni A) oraz obniżenie stężenia pH,
- w przypadku wód dołowych z kopalni A i D, dodanie jakiegokolwiek ścierniwa obniżyło szybkość korozji i stężenie pH, prawdopodobnie w tym przypadku zaistniał przypadek rozcieńczenia substancji korozyjnie aktywnych (głównie chlorków i siarczanów),
- w przypadku wód dołowych z kopalni B i C, dodanie jakiegokolwiek ścierniwa zwiększyło szybkość korozji i stężenie pH (za wyjątkiem węgla), prawdopodobnie w tym przypadku doszło do dezaktywacji związków działających inhibitująco na procesy korozji.

Powyższe obserwacje nie wpłynęły na zmianę decyzji o przyjęciu wody z kopalni A (charakteryzowała się ona najwyższą szybkością korozji bez dodatku ścierniwa) jako czynnika intensyfikującego procesy korozyjne na etapie badań stanowiskowych. Co prawda doszło do obniżenia szybkości korozji w obecności mieszaniny wody z rozpatrywanymi minerałami (poza węglem), ale korozyjność mieszaniny rankinguje ją pośrodku analizowanego zbioru czynników degradujących, co zapewnia jej reprezentatywność w podjętych badaniach synergii.

7.3. Badania tribologiczne ścierniw mineralnych

Czynnikiem środowiska górniczego oddziałującym degradacyjnie na powierzchnię ogniw łańcuchowych są ścierniwa mineralne. Jak już wcześniej wspomniano, na potrzeby realizacji badań zużyciowych, pozyskane zostały 4 rodzaje rzeczywistego ścierniwa mineralnego transportowanego z wykorzystaniem przenośników zgrzeblowych: piaskowiec, dwie odmiany łowca i węgiel kamienny (ich własności zidentyfikowano w rozdziale 6).

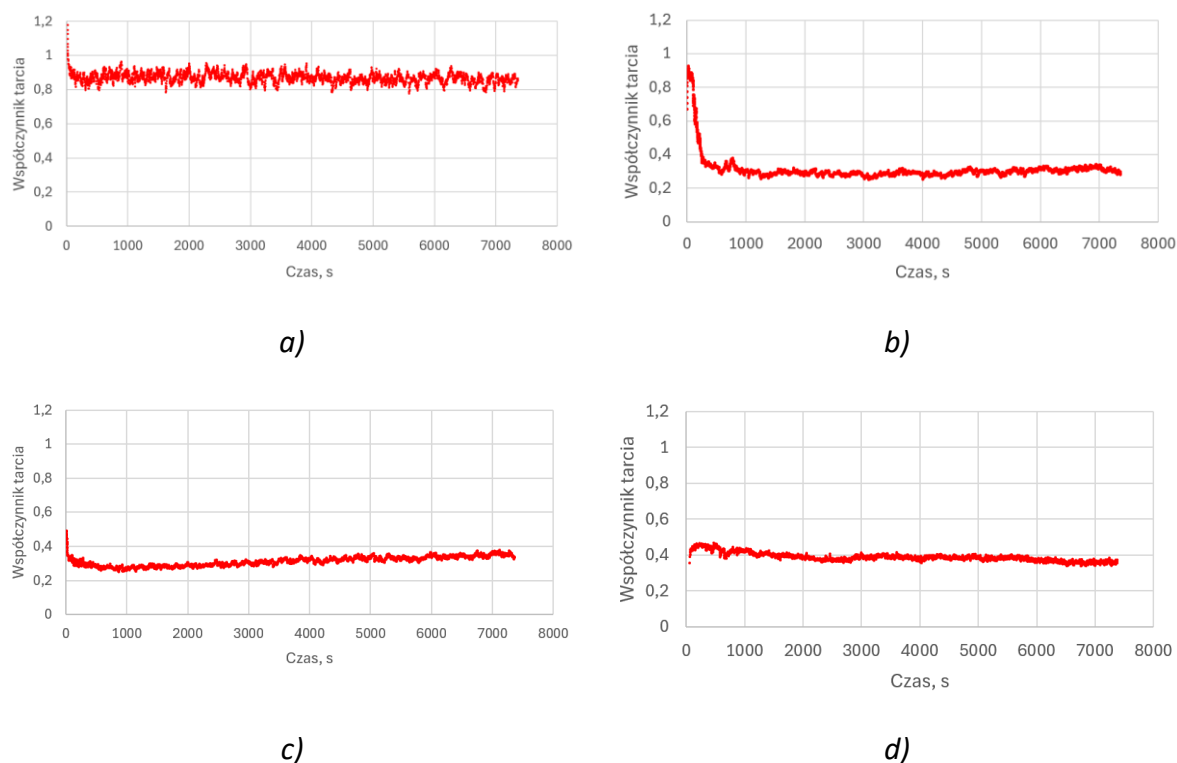
Celem niniejszych badań było wytypowanie materiału ścierniwa, które zostanie wykorzystane we właściwych badaniach stanowiskowych związanych z analizą synergii czynników środowiska górniczego. Wśród analizowanych 3 grup minerałów, jak wynika z danych literaturowych, piaskowce odznaczają się najwyższą zdolnością do niszczenia ściernego powierzchni. Istotą weryfikacji na tribotesterze typu kulka – dysk (ang. ball-on-disc) była ocena ustalonych mieszanin mineralnych wszystkich ścierniw z wodą w zakresie zapewnienia przez nie właściwego wypełnienia obszaru zużycia. Na ww. tribotesterze nie było możliwości badań suchego ścierniwa, bo dochodziło do jego usunięcia z obszaru zużycia przez trzpień stanowiska.

Oczywistym celem badań było także wyznaczenie parametrów zużycia i współczynnika tarcia oraz dobór ścierniwa (tym samym także mieszaniny wodnej opartej na tym ścierniwie), dla którego kryterium wyboru będzie maksymalizacja zużycia ściernego. Warunki samego testu i użytego wyposażenia opisano w rozdziale 5. Należy przypomnieć, że w teście założono ruch kątowy elementu zużywającego (kulki stalowej), co powoduje, że podczas pojedynczego cyklu występuje dwukrotne spowolnienie i zatrzymanie pary kinematycznej oraz zmiana kierunku ruchu. Identyczna sytuacja zachodzi także podczas przejścia ogniw przez bęben napędowy przenośnika. Pomiar zużycia następował w obszarach o ustalonych parametrach testu, czyli poza obszarami zakończeń śladu wytarcia, gdyż w tych miejscach gromadziło się ścierniwo i obserwowano wyższe zużycie niż na pozostałych odcinkach tego śladu.

Na Rysunku 7.4 przedstawiono uzyskane w trakcie testu tribologicznego przebiegi współczynnika tarcia. W przypadku badań współczynnika tarcia z mieszaninami piaskowca i łowców widoczna jest faza dotarcia, w której obserwuje się wyższe wartości niż w fazie ustabilizowanej pracy. Tego efektu nie stwierdzono w przypadku mieszaniny z węglem.

Po etapie wstępnym testu następował etap stabilizacji, gdzie wartość współczynnika tarcia do końca badania nie zmieniała się w sposób znaczący. Dla przypadku badań z użyciem piaskowca i łowca z kopalni B wartość współczynnika tarcia dla całego badania utrzymywała się na stałym poziomie, dla przypadku łowca z kopalni „D” zaobserwowano nieznacznie progresywny charakter zmian współczynnika, natomiast dla węgla charakter zmian był przeciwny – lekko regresywny. Wyniki uzyskane dla piaskowca charakteryzowały się najwyższymi wartościami współczynnika tarcia – ok. 0,9. Natomiast najniższe wartości

zaobserwowano dla przypadku obu łowców – współczynnika tarcia na poziomie ok. 0,3, natomiast dla węgla wartości te były nieznacznie wyższe i wynosiły ok. 0,4.



Rys. 7.4. Wyniki badań współczynnika tarcia realizowanych w obecności mieszanin wodno-ściernych, a) mieszanina wody z piaskowcem, b) mieszanina wody z łowcem z kopalni B, c) mieszanina wody z łowcem z kopalni D, d) mieszanina wody z węglem.

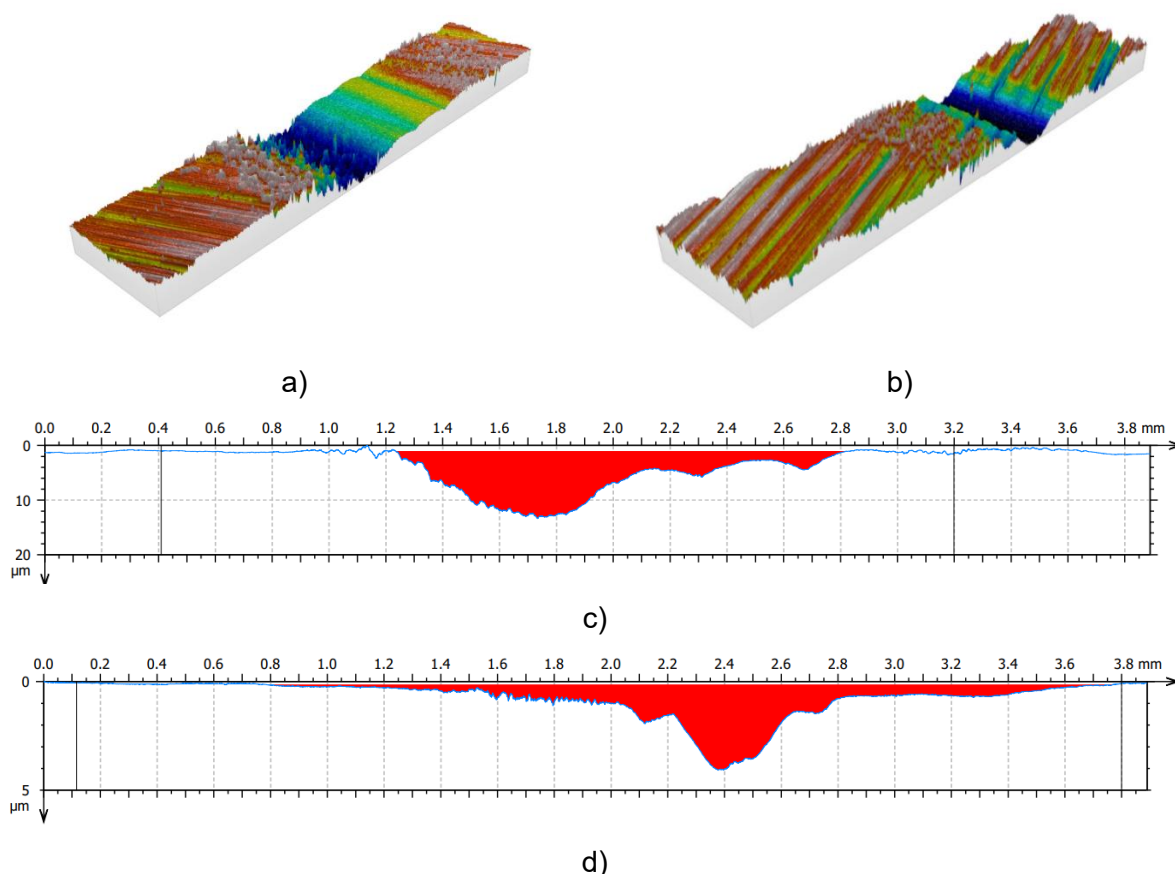
Wartości wyznaczonych miar zużycia próbek wykonanych z łańcucha górniczego w obecności mieszanin wodno-ściernych zawarto w Tabeli 7.7, natomiast przykładowe widoki śladów wytarcia wraz z polami ich przekroju przedstawiono na Rysunku 7.5.

Tab. 7.5. Wartości wyznaczonych miar zużycia próbek wykonanych z łańcucha górniczego w obecności mieszanin wodno-ściernych

Rodzaj ścierniwa mineralnego	Maksymalna głębokość śladu zużycia, μm	Pole przekroju śladu zużycia, μm^2
Piaskowiec	$12,590 \pm 0,020$	$9111 \pm 1,9$
Łowiec kopalnia „B”	$3,493 \pm 0,003$	$889,5 \pm 0,6$
Łowiec kopalnia „D”	$4,006 \pm 0,003$	$2662 \pm 1,0$
Węgiel	$2,887 \pm 0,003$	$1354 \pm 0,7$

Największe zużycie, zgodnie z oczekiwaniami, zaobserwowano w przypadku próbki zużywanej w obecności piaskowca. Maksymalna głębokość zużycia dla uśrednionego profilu wynosiła 12,59 μm . Zauważalny jest również niesymetryczny przekrój śladu zużycia.

Świadczyć to może o odrzucaniu ziaren piaskowca ze strefy współpracy przez kulkę i ścieraniu obszaru poza bezpośrednim stykiem. Najmniejszą maksymalną głębokość zużycia, 2,887 μm , spośród przebadanych wariantów zestawienia ścierniw mineralnych, zaobserwowano dla badania w obecności węgla. Przekrój ten cechował się dużą symetrycznością, wynikającą z braku ziaren odrzucanych ze strefy kontaktu.



Rys. 7.5. Obszar zużycia po teście typu kulka-dysk; a) widok śladu zużycia uzyskanego w obecności piaskowca, b) widok śladu zużycia uzyskanego w obecności iłowca z kopalni „D”, c) powierzchnia przekroju śladu zużycia uzyskanego w obecności piaskowca, d) powierzchnia przekroju śladu zużycia uzyskanego w obecności iłowca z kopalni „D”.

Pośrednie wartości zużycia stwierdzono dla przypadków obu iłowców, w przypadku iłowca z kopalni „D” głębokość śladu zużycia wynosiła 4,006 μm , natomiast dla iłowca z kopalni „B” – 3,493 μm . Obydwa profile cechują się, podobnie jak w przypadku węgla, symetrycznością śladu zużycia.

W związku ze stwierdzonymi, dla mieszaniny piaskowca i wody, najwyższymi wartościami współczynnika tarcia i miar zużycia, wytypowano ten materiał do dalszych badań stanowiskowych.

8. WYNIKI EKSPLOATACYJNIE ZORIENTOWANYCH BADAŃ ZUŻYCIA OGNIW ŁAŃCUCHÓW GÓRNICZYCH

Stanowiskowe testy zużyciowe przeprowadzono w warunkach odwzorowujących środowisko pracy chodnikowego przenośnika zgrzeblowego. Parametry charakteryzujące te testy (ustalono je na podstawie działań badawczych przedstawionych w Rozdziałach 6 i 7) przedstawiono w Tabeli 8.1.

Tab. 8.1. Zestawienie parametrów badań stanowiskowych

Grupa czynników	Parametr	Jednostka	Wartość
Parametry ogólne	Czas badania	godzina	30
	Jednoczesna liczba badanych próbek	szt.	2
	Liczba prób badawczych na wariant	-	4
	Rozmiar badanego łańcucha	mm	14x50
	Moc napędu	kW	1,6
Własności materiałowe	Skład chemiczny stali	-	wg. Tab. 6.1
	Mikrostruktura	-	Troostyt
	Twardość	HV1	447±3
Wymuszenia mechaniczne	Prędkość współpracy ogniów	min ⁻¹	80
	Zakres współpracy ogniów	°	±30
	Obciążenie nominalne	N	981
	Powierzchnia styku	m ²	2·10 ⁻⁶
	Nominalne naciski	MPa	490,5
	Amplituda siły zmiennej sinusoidalnie	N	613
	Częstotliwość siły zmiennej sinusoidalnie	Hz	1,16
Wymuszenia elektrochemiczne	Prąd korozji w wodzie (kop. A)	μA	32,6±0,07
	Potencjał korozji w wodzie (kop. A)	mV	-669±1,3
	Prąd korozji w mieszaninie wody kop. A i piaskowca	μA	16,8±0,03
	Potencjał korozji w mieszaninie wody kop. A i piask.	mV	-708±1,4
	Prąd korozji w mieszaninie wody demineralizowanej i piaskowca	μA	21,6±0,04
	Potencjał korozji w mieszaninie wody demineralizowanej i piaskowca	mV	-710±1,4
	Szybkość korozji stali w wodzie (kop. A)	mm/rok	0,245±0,015
	Szybkość korozji stali w mieszaninie wody demineralizowanej i piaskowca	mm/rok	0,163±0,010
	Szybkość korozji stali w mieszaninie wody kop. A i piaskowca	mm/rok	0,127±0,007

Cd. Tab. 8.1.

Własności środowiska korozyjno-ściernego	Skład chemiczny ścierniwa (piaskowca)	-	wg. Tab. 6.2
	Skład mineralny ścierniwa (piaskowca)	-	wg. Tab. 6.3
	Skład mineralny wody (Kopalnia A)	-	wg. Tab. 6.12
	Zasadowość ogólna	-	4,88
	Odczyn pH	-	7,71
	Współczynnik S_1	-	205
	Współczynnik S_2	-	204

Podane wyżej parametry charakteryzują także system tribokorozyjny, który przyjęto na potrzeby identyfikacji synergii czynników środowiskowych, zachodzących podczas eksploatacji łańcuchów górniczych.

Badania zostały podzielone na 3 grupy wariantów środowiska pracy:

1. Grupa I wariantów czynników środowiskowych z Tab. 5.1. - brak obecności jakiegokolwiek wody (zarówno kopalnianej jak i z układu zraszania) w strefie współpracy ogniw łańcucha. Warunki odpowiadające wydobywaniu prowadzonemu z wykorzystaniem metod strzałowych w wyrobisku suchym.
2. Grupa II wariantów czynników środowiskowych z Tab. 5.1. - obecność wody technologicznej z układu zraszania w strefie współpracy ogniw łańcucha. Warunki odpowiadające wydobywaniu prowadzonemu z wykorzystaniem kombajnu z układem zraszania podczas urabiania.
3. Grupa III wariantów czynników środowiskowych z Tab. 5.1. - obecność wody kopalnianej w strefie współpracy ogniw łańcucha. Warunki odpowiadające wydobywaniu prowadzonemu z wykorzystaniem metod strzałowych w wyrobisku z wypływającą wodą zrobową.

W trakcie badań stanowiskowych analizowano także wariant specjalny (Wariant 0 wg Tab. 5.1). Wariant ten symulował sytuację niewystępującą w trakcie normalnej eksploatacji, czyli impulsowe działanie siły dynamicznej w nominalnie nieruchomym węźle tarcowym w obecności środowiska ścierno-korozyjnego w czasie 30 godzinowego testu. Pozwolił on jednak ustalić wartości początkowe do modelu synergii procesu zużycia ogniw łańcuchowych. Przeprowadzone testy wykazały średni ubytek masy próbek wynoszący $2,5 \cdot 10^{-3}$ g $\pm 1,7 \cdot 10^{-3}$ g. Uzyskane wyniki zużycia były ponad stukrotnie mniejsze w porównaniu z wartościami zużycia wyznaczonymi w trakcie testów stanowiskowych dla Wariantu 7, który charakteryzował się najmniejszym zużyciem spośród wszystkich analizowanych przypadków. W związku z tym uznano, że składowa jednoczynnikowa wynikająca z wyizolowanego oddziaływania siły dynamicznej w środowisku ścierno-korozyjnym, ma wartość pomijalnie małą i nie będzie uwzględniana przy obliczeniach poszczególnych składowych interakcyjnych. Jednocześnie należy dodać, że składowa

interakcyjna wywołana oddziaływaniem siły dynamicznej ma wartości znacząco większe od samego czynnika degradacyjnego i będzie uwzględniana w analizach interakcji zachodzących w procesie wieloczynnikowego zużycia ogniw łańcucha (poprzez pojęcie interakcji rozumie się możliwość synergistycznego lub antagonistycznego oddziaływania poszczególnych czynników na procesy degradacyjne rozważanego węzła tarcowego).

8.1. Wyniki badań dla Grupy I wariantów czynników środowiskowych

Pierwsza z rozpatrywanych grup wariantów czynników środowiska górniczego reprezentuje warunki eksploatacyjne, w których transportowany urobek nie ma kontaktu zarówno z wodą pochodzącą z procesów technologicznych, jak i tą pochodzącą ze zrobów (dla ich określenia można użyć sformułowania „środowisko górnicze suche”).

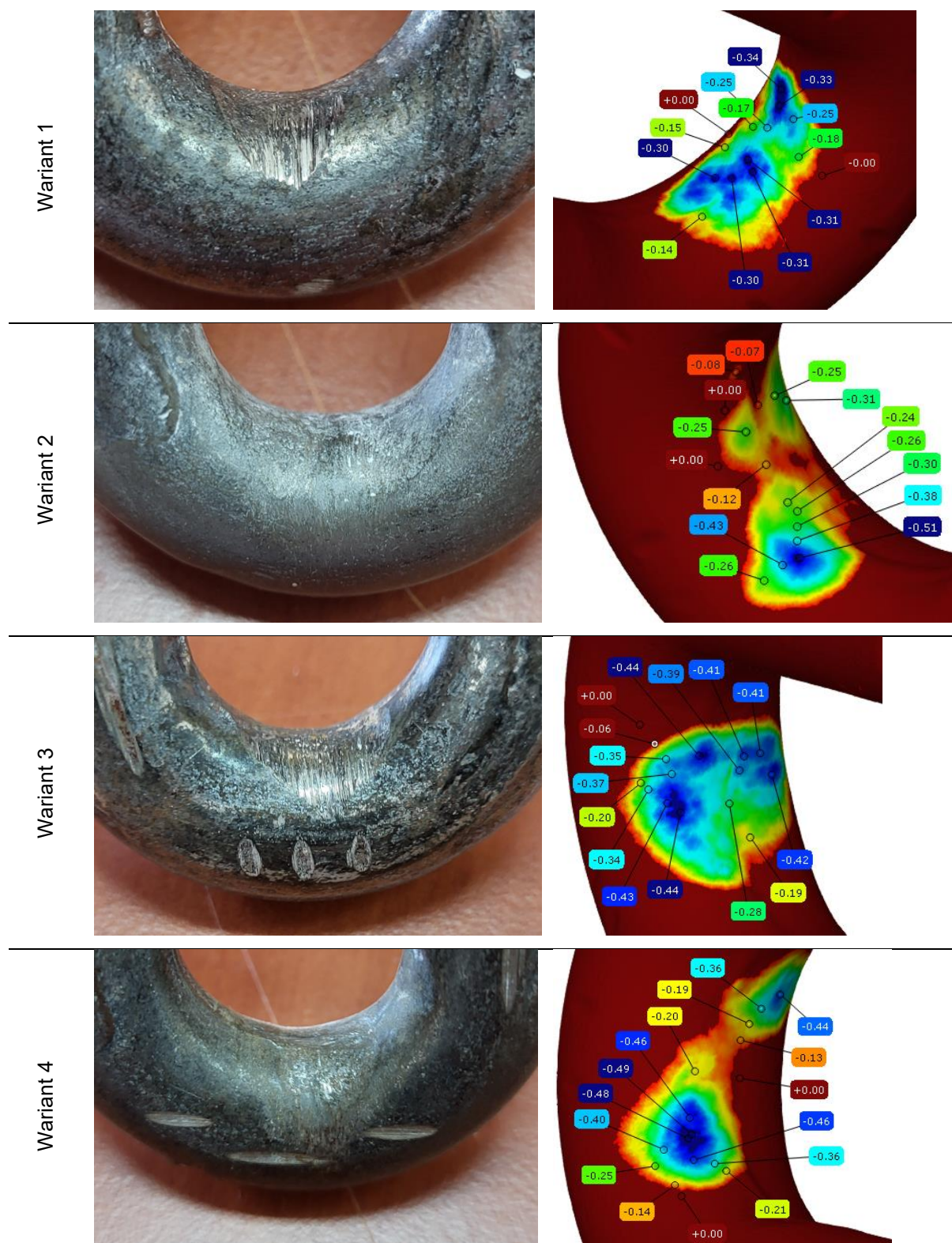
Niniejszy przypadek eksploatacyjny jest typowy dla eksploatacji górniczej i występuje powszechnie w przodkach urabianych techniką strzałową, w których nie dochodzi do wypływu wody z górotworu. Urobek, najczęściej w postaci fragmentów relatywnie twardej skały płonnej po robotach strzałowych, z wykorzystaniem ładowarek spągowych, przenoszony jest na pierwszą linię odstawy, czyli przenośnik zgrzeblowy.

W ramach badań stanowiskowych dla omawianego środowiska pracy łańcuchów ogniowych tj. przy braku obecności wody kopalnianej lub technologicznej w transportowanym urobku, przetestowane zostały 4 warianty badawcze:

- przemieszczenia kątowe ogniw łańcuchowych poddanych stałemu obciążeniu grawitacyjnemu,
- przemieszczenia kątowe ogniw łańcuchowych poddanych stałemu obciążeniu grawitacyjnemu z obecnością ścierniwa mineralnego w obszarze ich kontaktu,
- przemieszczenia kątowe ogniw łańcuchowych poddanych wypadkowemu obciążeniu stałej siły grawitacyjnej i sinusoidalnie zmiennego wymuszenia siłowego,
- przemieszczenia kątowe ogniw łańcuchowych poddanych wypadkowemu obciążeniu stałej siły grawitacyjnej i sinusoidalnie zmiennego wymuszenia siłowego z obecnością ścierniwa mineralnego w obszarze styku tych ogniw.

Porównanie, w skali makroskopowej, śladów wytarcia wariantów 1÷4 w strefie przegubu ogniw łańcuchowych oraz uzyskany metodą skanowania przestrzennego rozkład głębokości zużycia ogniwa przedstawiono na Rysunku 8.1.

Na podstawie uzyskanych wyników, z użyciem metod opisanych w Rozdziale 5, określono jednoliczbowe miary charakteryzujące zużycie: średni ubytek masy i maksymalną głębokość zużycia dla danego wariantu Grupy I (Tab. 8.2).



Rys. 8.1. Widoki śladów wytarcia wariantów 1÷4 (grupa I) w obszarze przegubów ogniwo-łańcuchowych (kolumna lewa) i rozkładów głębokości ich zużycia (kolumna prawa).

Tab. 8.2 Wartości średniego ubytku masy i maksymalnej głębokości zużycia wyznaczone dla poszczególnych wariantów 1÷4 (grupa I)

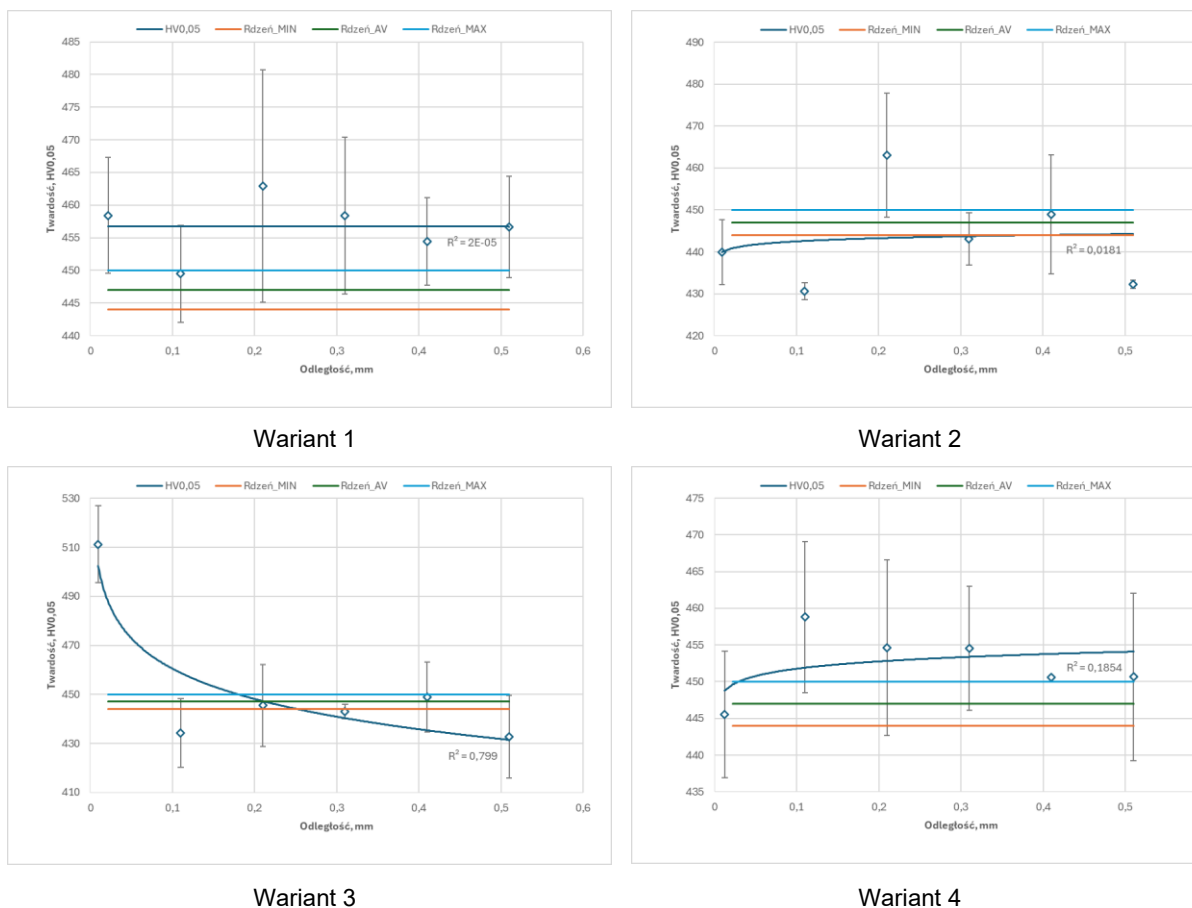
Wariant	Czynnik degradacyjny	Podstawowa forma zużycia	Średni ubytek masy próbek, g	Maksymalna głębokość zużycia, mm
1	Wierzchołki nierówności powierzchni	Zużycie mechaniczne	0,378±0,013	0,385±0,015
2	Wierzchołki nierówności powierzchni i ścierniwo mineralne	Zużycie ścierne	0,492±0,011	0,441±0,015
3	Wierzchołki nierówności powierzchni i wymuszenia dynamiczne	Zużycie mechaniczne intensyfikowane zmiennymi siłami	0,513±0,011	0,478±0,015
4	Wierzchołki nierówności powierzchni, ścierniwo mineralne i wymuszenia dynamiczne	Zużycie ścierne intensyfikowane zmiennymi siłami	0,477±0,012	0,435±0,015

Wytarcia widoczne na Rysunku 8.1, wyznaczone dla wariantów z Grupy I, wykazują zróżnicowanie zależne od obecności czynnika degradacyjnego w postaci ścierniwa mineralnego. Warianty 1 i 3, w których zużycie następowało bez udziału tego czynnika, charakteryzują się symetrycznymi, błyszczącymi śladami zużycia, z minimalnym ubytkiem w centralnej części. Z kolei w Wariantach 2 i 4, gdzie obecne było ścierniwo mineralne, ślady są matowe, a ich rozmieszczenie jest niesymetryczne. Pomiary ubytku masy i maksymalnej głębokości zużycia potwierdzają tę zależność, pozwalając na uszeregowanie wariantów Grupy I w kolejności rosnącego zużycia: Wariant 1 < Wariant 4 < Wariant 2 < Wariant 3.

Na Rysunku 8.2. przedstawiono rozkłady twardości warstwy wierzchniej uzyskane dla badanych wariantów grupy I. Na tym rysunku można zauważyć, że efekt wzrostu twardości wykazał tylko Wariant 3, w przypadku pozostałych wariantów nie stwierdzono tego efektu. Wyniki uzyskane dla Wariantów 2 i 4 wykazały tendencje odwrotne, czyli efekt zmniejszenia twardości, natomiast dla Wariantu 1 nie stwierdzono żadnej tendencji. Wyjaśnienie kwestii możliwego umocnienia lub osłabienia warstwy wierzchniej ogniów łańcuchowych zostało przedstawione w poniższych punktach niniejszego podrozdziału, a ponadto dokonano analizy mechanizmów zużycia wymienionych wariantów oraz zmian towarzyszących tym procesom.

8.1.1. Analiza mechanizmów zużycia Wariantu 1

Spodziewanym podstawowym rodzajem niszczenia w Wariacie 1 było zużycie mechaniczne, wywołane wierzchołkami nierówności powierzchni, oraz zużycie ścierne spowodowane oderwanymi lub rozkruszonymi wierzchołkami, stanowiącymi produkty zużycia.

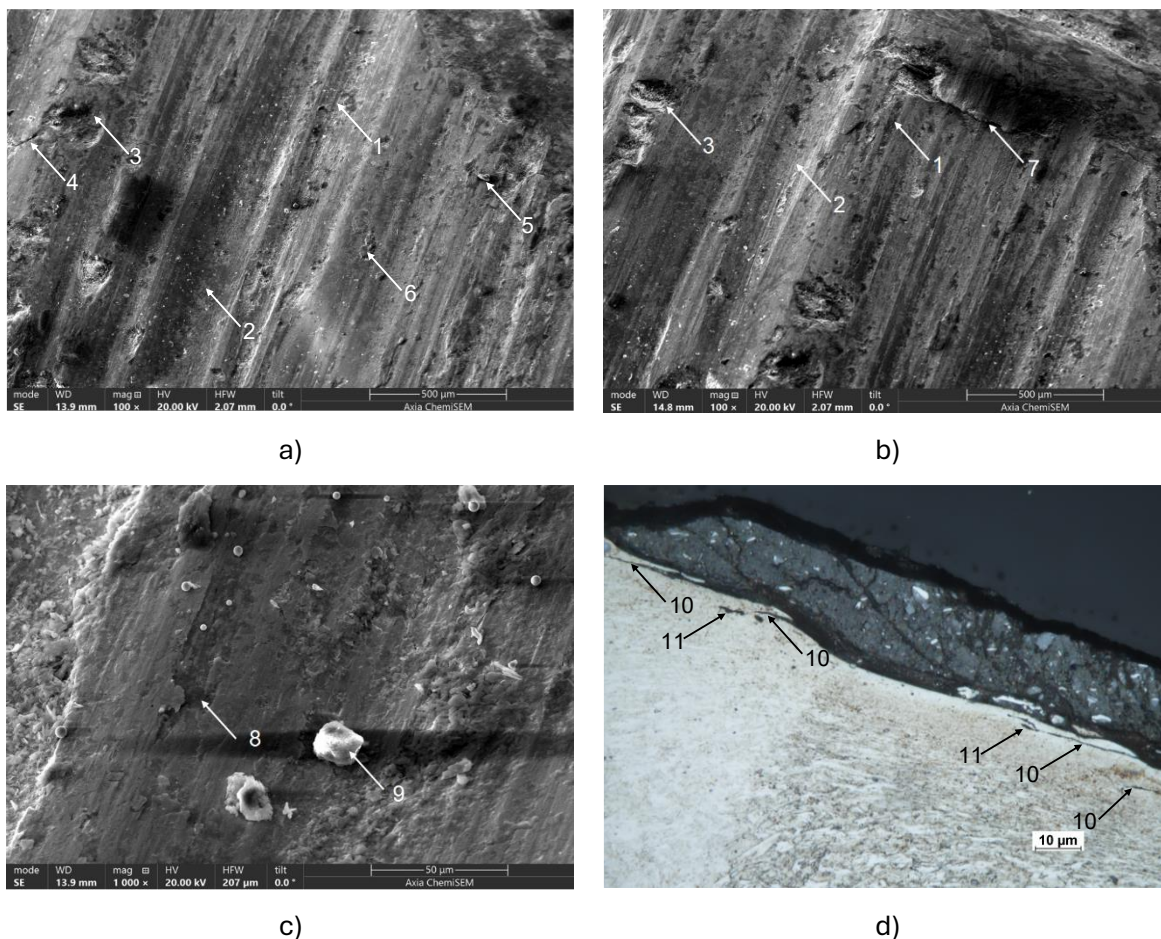


Rys. 8.2. Rozkłady twardości warstwy wierzchniej uzyskane dla wariantów grupy I.

Założenia te potwierdzają, przedstawione na Rysunkach 8.3a÷c, widoki powierzchni w strefie współpracy ogniów, uzyskane z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego. Dominujący charakter w procesie zużycia mechanicznego mają procesy mikrorysowania powierzchni, które są spowodowane oddziaływaniem skrawającym wierzchołków nierówności. Nierówności te, jak wynika z analizy uzyskanych obrazów, mogą zostać oderwane od powierzchni i oddziaływać na nią tworząc bruzdy. Pod działaniem przemieszczających się ogniów dochodzi w strefie współpracy do defragmentacji produktu zużycia, co skutkuje kolejnymi procesami mikroskrawania lub wgnieceniem ich w powierzchnię. Wielokrotne przesuwanie się wierzchołków nierówności lub oderwanych fragmentów po współpracującej powierzchni skutkuje inicjacją jej pęknięć, co prowadzi do formowania się płytek delaminacyjnych i ich wykruszania, co jest źródłem kolejnych rozdrobnionych metalicznych produktów zużycia.

Na Rysunkach 8.3d÷e przedstawiono obrazy mikrostruktury przekroju ogniwa w strefie współpracy. Obrazy te ujawniają, że pęknięcia delaminacyjne formują się odpowierzchniowo, ale przechodzą w formę pęknięć lokalizujących się równolegle do powierzchni. Przedstawione uszkodzenie należy kwalifikować jako wykruszenie powierzchni spowodowane niskocyklowymi zjawiskami zmęczeniowymi, będącymi następstwem

nakładających się na siebie kumulacji naprężeń powstających w czasie nominalnej współpracy ogniów łańcuchowych w przegubie. Inicjującą rolę w procesie tworzenia się tych pęknięć najprawdopodobniej mają wtrącenia niemetaliczne w strukturze stali, które stanowią obszar koncentracji naprężeń, sprzyjający propagacji uszkodzeń o charakterze rozdzielczym.



Rys. 8.3. Analiza uszkodzeń strefy współpracy ogniów łańcucha po teście zużycia w warunkach określonych Wariantem 1, a), b) c), widoki powierzchni (SEM), d) widok przekroju w obszarze styku (OM), oznaczenia: 1 – rysa, 2 – bruzda, 3 – wyrwa po wierzchołku, 4 – pęknięcie powierzchniowe, 5 – rozkruszony produkt zużycia, 6 – wgnieciony produkt zużycia, 7 – pęknięcie powierzchni z utworzoną płytką delaminacyjną, 8 – wykruszenie delaminacyjne, 9 – częściowo zachowany odspojony wierzchołek nierówności, 10 – pęknięcie delaminacyjne w przekroju, 11 – wtrącenia niemetaliczne w strukturze stali.

Analizując ujawnioną mikrostrukturę przekroju badanego ogniwa, można stwierdzić odmienną jej teksturę w strefie przypowierzchniowej w porównaniu do obszaru głębiej leżącego. W szczególności zauważa się wydłużony kształt ziaren oraz ich częściowe rozdrobnienie. Cechy te są typowe dla tzw. tekstury zgniotu [99], tworzącej się pod wpływem oddziaływania sił zewnętrznych. Często tej teksturze towarzyszy wzrost twardości, jednakże

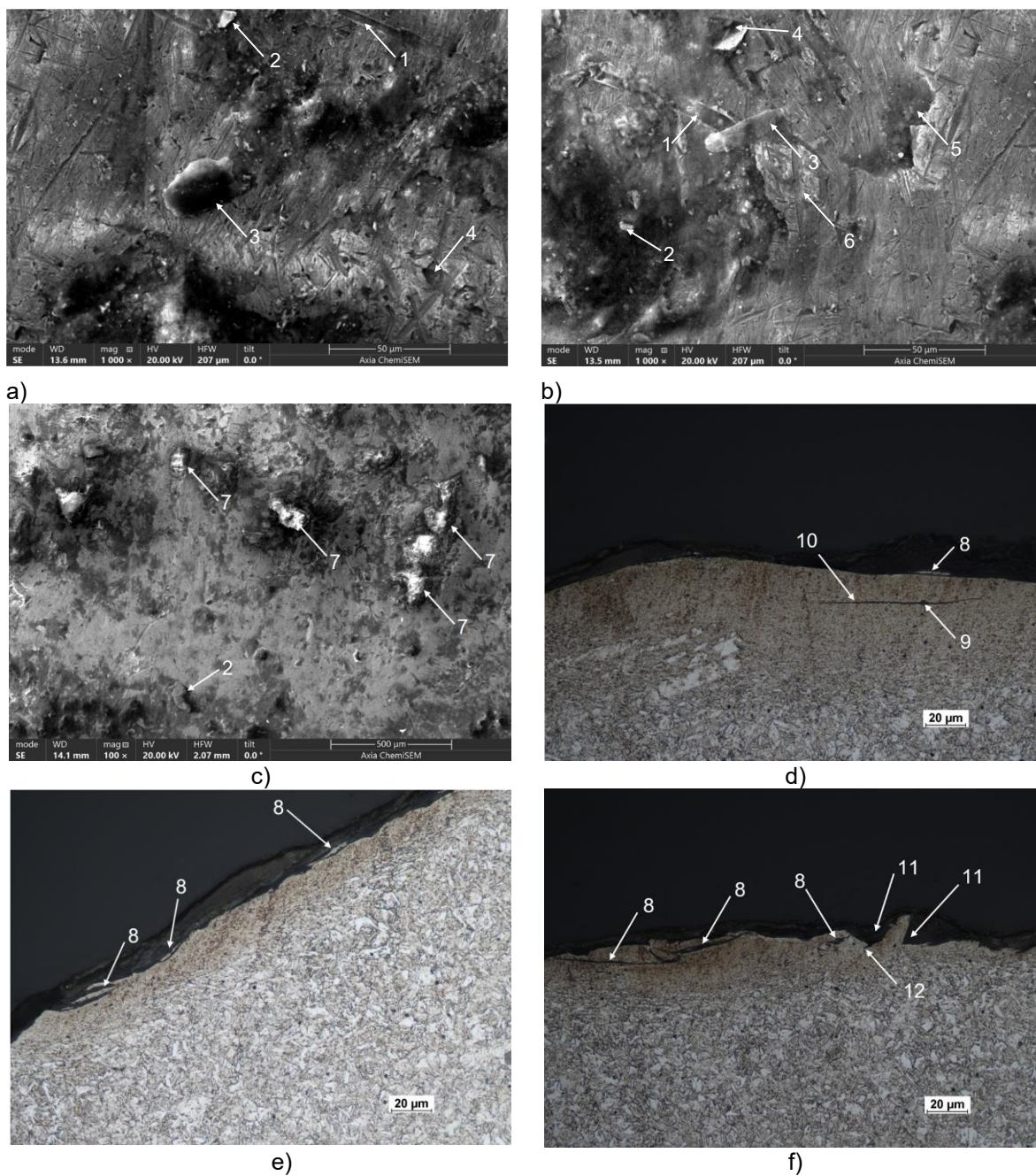
w analizowanym wariantcie tego nie stwierdzono. Powodem braku umocnienia warstwy wierzchniej mogły być procesy osłabiające powierzchnię, takie jak wspomniana delaminacja.

8.1.2. Analiza mechanizmów zużycia Wariantu 2

W przypadku Wariantu 2, dominującym rodzajem zużycia było zużycie ściernie ziarnami piaskowca (patrz Rys. 8.4a÷c). Oddziaływanie ziaren piaskowca powodowało powstawanie licznych, stochastycznie ułożonych, rys na powierzchni ogniów, które formowały się w relatywnie długie skrawy. Usunięty materiał podlegał dalszemu rozkruszeniu i stanowił część ścierniwa lub był wprasowywany w powierzchnię próbki. Innym przejawem oddziaływania ściernego piaskowca były wbite w powierzchnię ziarna, a także ślady (odciski) po nich. Na powierzchni ogniwa widoczne są obszary wygładzone przez ścierniwo. Zauważalna jest dla Wariantu 2 mniejsza liczba pęknięć delaminacyjnych w porównaniu z Wariantem 1. Powodem tego najprawdopodobniej było agresywne oddziaływanie ścierniwa mineralnego, które powodowało przyspieszone zużycie powierzchni, nim w niej wypropagowały uszkodzenia o charakterze zmęczeniowym.

Na Rysunku 8.4f widoczne są głębokie ubytki powierzchni spowodowane działaniem skrawającym ziaren piaskowca. W zagłębieniach tych skrawów tworzą się pęknięcia propagujące w głąb warstwy wierzchniej, które wywołane są efektem rozklinowującym ziaren minerału podczas procesu rysowania powierzchni. Pęknięcia tego typu mogą ułatwiać dalsze degradacyjne oddziaływanie ziaren mineralnych. Na Rysunku 8.4d został przedstawiony ciekawy przypadek tworzenia się rozległego pęknięcia zmęczeniowego zainicjowanego w otoczeniu wtrącenia niemetalicznego w mikrostrukturze stali. Efekt ten mógł zaistnieć w wyniku niskocyklowego oddziaływania powierzchni ogniów tworzących parę cierną, prawdopodobnie nie został wywołany procesem zużycia, ale mógł przez nie zostać przyspieszony. Przypadek ten świadczy o powiązaniu między procesami zużyciowymi i typowo zmęczeniowymi (nie dotyczącymi wykruszeń zmęczeniowych związanych z oddziaływaniem tarciovym), które może prowadzić do przyspieszonej dekohezji materiału ogniów łańcuchowych.

Na wspomnianym Rysunku 8.4d, jak i też 8.4e, widoczna jest tekstura zgniotu, która także w przypadku Wariantu 2 nie wywołała efektu utwardzenia (patrz Rys. 8.2).

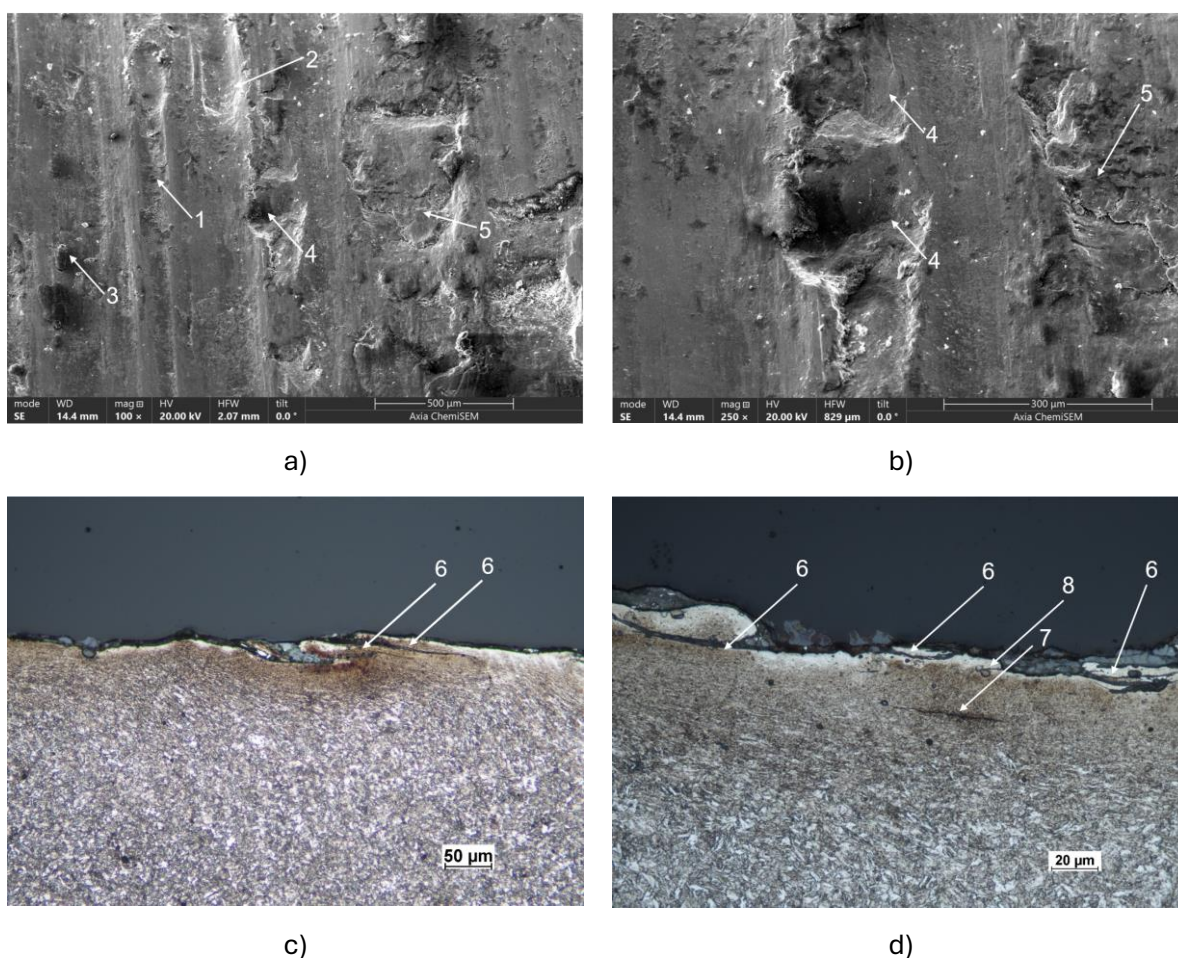


Rys. 8.4. Analiza uszkodzeń strefy współpracy ogniów łańcucha po teście zużycia w warunkach określonych Wariantem 2, a), b), c) widoki powierzchni (SEM), d), e), f) widoki przekroju w obszarze styku (OM), oznaczenia: 1 – rysa, 2 – rozkruszony produkt zużycia, 3 – wgnieciony skraw powierzchni, 4 – odcisk po wbitym ziarnie ścierniwa, 5 – wykruszenie delaminacyjne, 6 – pęknięcie powierzchni z formującą się płytką delaminacyjną, 7 – białe ziarna ścierniwa, 8 – pęknięcie delaminacyjne w przekroju, 9 – wtrącenia niemetaliczne w strukturze stali, 10 – pęknięcie zmęczeniowe w przekroju, 11 – obszar usunięty w wyniku mikrorysowania, 12 – formujące się pęknięcia odpowierzchniowe.

8.1.3. Analiza mechanizmów zużycia Wariantu 3

W przypadku Wariantu 3 należało się spodziewać, podobnie jak dla Wariantu 2, zużycia mechanicznego wywołanego wierzchołkami nierówności powierzchni oraz zużycia ściernego spowodowanego powstałymi produktami zużycia, przy czym intensywność procesów zużyciowych powinna być większa z uwagi na dodatkowo działające siły dynamiczne. Wyniki przedstawione w tabeli 8.2 potwierdziły te założenia.

W zakresie podstawowych mechanizmów zużyciowych, zaistniałych podczas zużywania w warunkach bieżącego wariantu, analiza strefy kontaktu (Rys. 8.5) współpracujących ogniw wykazała wystąpienie rysowania i bruzdowania powierzchni.



Rys. 8.5. Analiza uszkodzeń strefy współpracy ogniw łańcucha po teście zużycia w warunkach określonych Wariantem 3, a), b), widoki powierzchni (SEM), c), d) widoki przekroju w obszarze styku (OM), oznaczenia: 1 – rysa, 2 – bruzda, 3 – wgnieciony produkt zużycia, 4 – odcisk po produktach zużycia, 5 – pęknięcie powierzchni z formującą się płytką delaminacyjną, 6 – pęknięcie delaminacyjne w przekroju, 7 – pęknięcie zmęczeniowe w przekroju, 8 – inicjacja pęknięcia w przekroju.

W porównaniu z Wariantem 1, uszkodzenia spowodowane odspojonymi fragmentami wierzchołków nierówności są bardziej wyraźne i głębsze. Także ślady wbicia tych fragmentów w powierzchnię ogniów są rozleglejsze (Rys. 8.5a+b). W Wariacie 3 zauważa się również wystąpienie uszkodzeń delaminacyjnych, układających się płasko do powierzchni. Podobnie jak w przypadku zużywania ściernego z udziałem piaskowca, na przekroju (Rys. 8.5c+d) przez obszar współpracy ujawniają się pęknięcia odpowierzchniowe, zlokalizowane we wgłębieniach rys i dochodzące do obszarów z wtrąceniami niemetalicznymi oraz zmęczeniowe, zlokalizowane pod powierzchnią, zainicjowane również obecnością wtrąceń w mikrostrukturze.

Należy także zwrócić uwagę, że w analizowanym przypadku zauważa się teksturę zgniotu w podpowierzchniowej części warstwy wierzchniej, co koreluje z wykazaną na Rysunku 8.3 zwiększoną jej twardością. Zwiększenie twardości powierzchni badanych ogniów stwierdzono, mimo wystąpienia licznych uszkodzeń powierzchni. Świadczy to o tym, że efekt umocnienia struktury powierzchniowej jest znacząco większy, jeśli oddziałują dodatkowe siły dynamiczne.

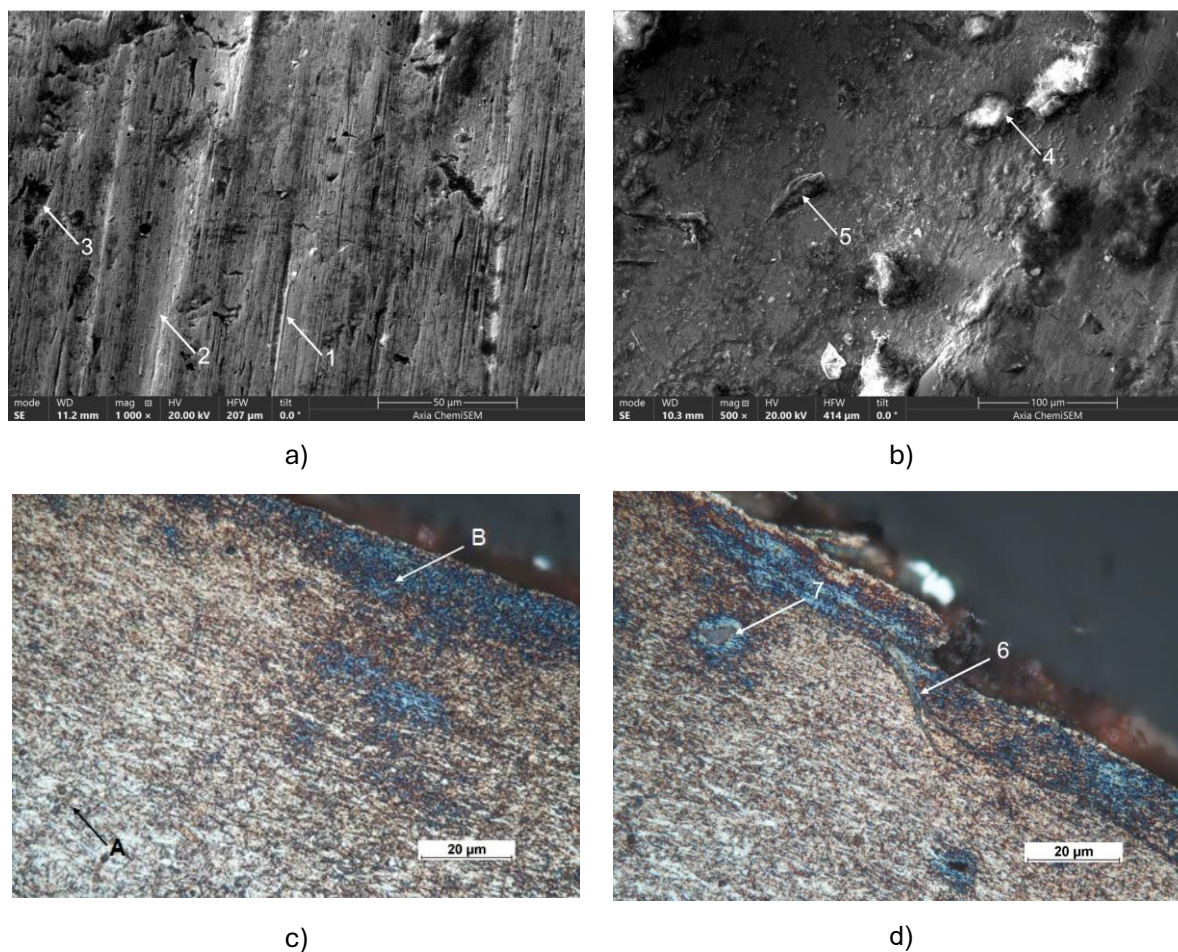
8.1.4. Analiza mechanizmów zużycia Wariantu 4

Wariant 4 reprezentuje najbardziej złożony pod względem oddziałujących czynników rodzaj zużycia ściernego intensyfikowanego działaniem zmiennych sił dynamicznych (krócej zużycia ścierno-dynamicznego) w warunkach suchych. Jak wynika z Tabeli 8.2, ta postać zużycia nie wiąże się jednak z największą intensywnością zużywania, co jest w pewnym stopniu niespodziewanym wynikiem.

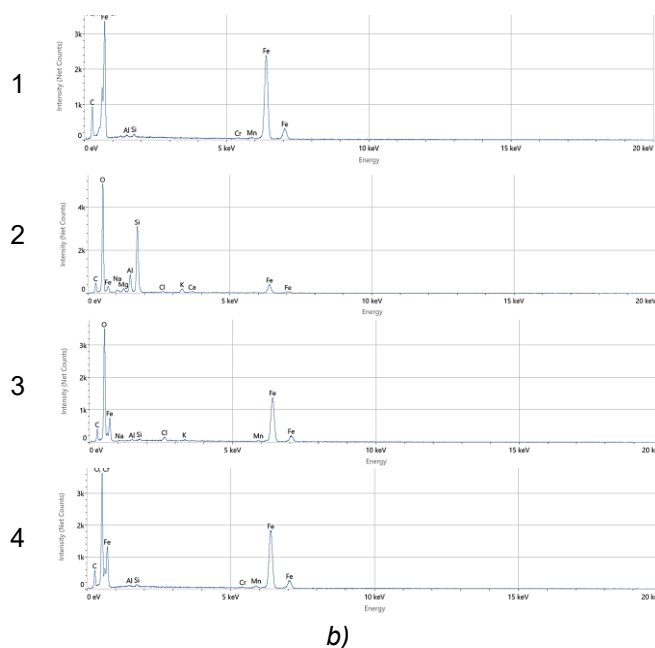
Mechanizmy zużycia uwidocznione na Rysunkach 8.6a+b są bardzo zbliżone do tych zidentyfikowanych dla Wariantu 2. Przede wszystkim widoczne są na ww. rysunku ślady mikrorysowania powierzchni ziarnami ścierniwa, układające się zgodnie z kierunkiem przemieszczania się ogniwa w strefie kontaktu. Widoczne są także rozkruszone ziarna ścierniwa, ziarna umocowane w powierzchni ogniwa oraz ślady po usuniętych ziarnach. Oddziaływanie ziaren na powierzchnię badanych próbek spowodowało także odkształcenie powierzchni w formie bruzd o szerokości porównywalnej z wbitymi ziarnami piaskowca.

Na przekroju przez strefę współpracy ogniów (Rys. 8.6d) ujawniły się pęknięcia delaminacyjne powierzchni, a także wtrącenia niemetaliczne. Także w przekroju widoczne są dwa obszary różniące się stekstrowaniem mikrostruktury, obszar bliższy powierzchni ma cechy typowe dla materiału poddanego zgniotowi, czyli ziarna zdeformowane o kształcie włóknistym i częściowo rozdrobnione. Z kolei obszar znajdujący się pod obszarem zgniotu wykazuje formę typową dla materiału rdzenia.

W przypadku zużycia ściernego intensyfikowanego siłami dynamicznymi (Wariant 4), oprócz form opisanych wyżej, a typowych także dla zużycia ściernego, zauważa się obszary rozkruszonego piaskowca, wypełniające wykruszenia powierzchni (Rys. 8.7) lub formujące płaskie warstewki (Rys. 8.8). Na wymienionych Rysunkach 8.7 i 8.8 przedstawiono wyniki pomiarów spektroskopii rentgenowskiej z dyspersją energii EDS w postaci analizy wybranych punktów i rozkłady analizowanych obszarów, które potwierdzają, że zauważone rozkruszone ziarna pochodzą faktycznie ze ścierniwa mineralnego – piaskowca.

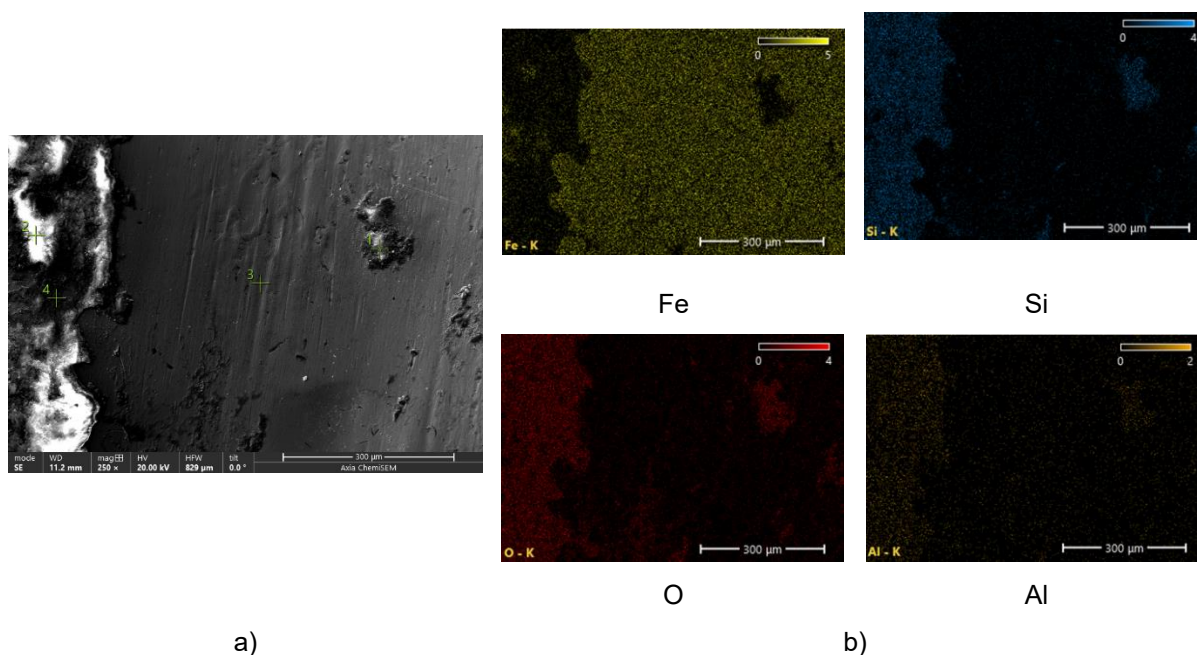


Rys. 8.6. Analiza uszkodzeń strefy współpracy ogniw łańcucha po teście zużycia w warunkach określonych Wariantem 4, a), b), widoki powierzchni (SEM), c), d) widoki przekroju w obszarze styku (OM), oznaczenia: 1 – rysa, 2 – bruzda, 3 – odcisk po usuniętym ziarnie ścierniwa, 4 – wbite ziarna ścierniwa, 5 – rozkruszone ziarno ścierniwa, 6 – pęknięcie delaminacyjne w przekroju, 7 – wtrącenia niemetaliczne w strukturze stali, A – obszar nie wykazujący tekstury zgniotu, B – obszar wykazujący teksturę zgniotu.



a) b)

Rys. 8.7. Widok zużytej powierzchni, a) wykruszenie powierzchni z rozdrobnionymi ziarnami piaskowca (pkt. 2), rozkruszonymi produktami zużycia (pkt. 3) i odkształconym fragmentem produktu zużycia (wierzchołka), b) wyniki pomiarów EDS dla punktów 1÷4.



Rys. 8.8. Widok zużytej powierzchni, a) powierzchnia ze śladami rysowania (pkt. 3) i rozdrobnionymi ziarnami piaskowca (pkt. 1, 2 i 4), b) rozkład Fe, Si, O i Al dla przedstawionego fragmentu powierzchni.

Spostrzeżenie to pozwala na wyjaśnienie przyczyny zmniejszenia wartości zużycia ścierno-dynamicznego względem zużycia ściernego. W warunkach suchych, bez udziału czynników korozyjnych, dodatkowe obciążenia powoduje zwiększenie intensywności rozkruszania się ziaren ścierniwa. Rozdrobnione ścierniwo odznacza się mniejszą zdolnością skrawającą, niż ziarna pierwotne, poza tym mogą być częściowo unieczynnione

w różnego typu wgłębieniach powierzchni lub posiadać zmniejszoną zdolność do skrawania z uwagi na formę warstw wprasowanych w powierzchnię. Ta druga forma rozkruszonych ziaren w dalszym ciągu może oddziaływać degradująco na powierzchnię współpracującą, ale intensywność niszczenia będzie niższa. Zmniejszenie intensywności zużycia formy ziaren umocowanych w powierzchni (tzw. układu „two body”) względem ziaren swobodnych (tzw. układ „three body”) jest potwierdzone w licznej literaturze dotyczącej tribologii [100].

8.2. Wyniki badań dla Grupy II wariantów czynników środowiskowych

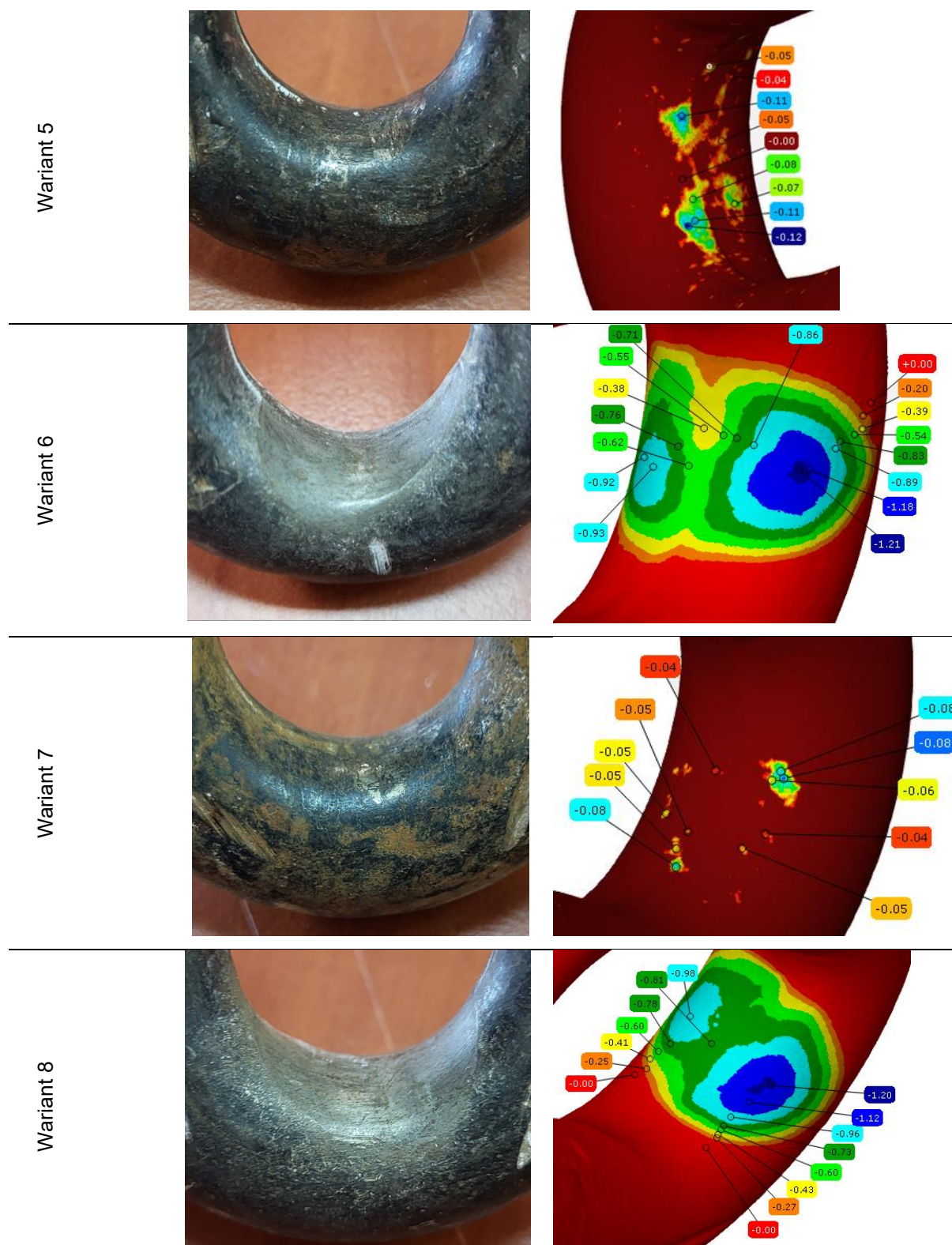
Kolejna z rozpatrywanych grup wariantów środowiska kopalnianego reprezentuje warunki eksploatacyjne, w których transportowany urobek ma kontakt z wodą pochodzącą z procesów technologicznych (dla ich określenia można użyć sformułowania „kopalnia sucha z wodą z układów zraszania”). Niniejszy przypadek eksploatacyjny również powszechnie występuje w górnictwie. Przede wszystkim dotyczy pokładów niezawodnionych, gdzie wydobywanie odbywa się w technice ścianowej lub korytarzowej z wykorzystaniem kombajnów. W celu minimalizacji zapylenia i ze względów bezpieczeństwa przeciwwybuchowego, organy urabiające wyposażone są w systemy wysokociśnieniowych dysz, które w sposób ciągły zraszają urabiany materiał skalny. Pomimo, że urobek sam w sobie wody zrobowej nie zawiera, to technologia jego urabiania wymaga ciągłego dopływu wody technologicznej o czystości wody wodociągowej. Urobek jest najczęściej w formie zawilgoconej, aby nie dochodziło do zapylenia miejsca pracy ludzi.

W ramach badań stanowiskowych dla kolejnego środowiska pracy łańcuchów ogniowych, tj. przy obecności wody technologicznej w transportowanym urobku, przetestowane zostały, analogicznie jak dla Grupy I, 4 warianty badawcze:

- przemieszczenia kątowe ogniów łańcuchowych poddanych stałemu obciążeniu grawitacyjnemu w obecności wody destylowanej w obszarze ich kontaktu,
- przemieszczenia kątowe ogniów łańcuchowych poddanych stałemu obciążeniu grawitacyjnemu z obecnością mieszaniny ścierniwa i wody destylowanej w obszarze ich kontaktu,
- przemieszczenia kątowe ogniów łańcuchowych poddanych wypadkowemu obciążeniu stałej siły grawitacyjnej i sinusoidalnie zmiennego wymuszenia siłowego w obecności wody destylowanej w obszarze ich kontaktu,
- przemieszczenia kątowe ogniów łańcuchowych poddanych wypadkowemu obciążeniu stałej siły grawitacyjnej i sinusoidalnie zmiennego wymuszenia siłowego z obecnością mieszaniny ścierniwa i wody destylowanej w obszarze ich kontaktu.

Porównanie śladów wytarcia, uzyskanych dla Wariantów 5÷8 (Grupa II), w strefie kontaktu ogniów łańcuchowych oraz rozkład zużycia ogniwa w przegubie przedstawiono na

Rysunku 8.9. W Tabeli 8.3 natomiast zostały zestawione miary charakteryzujące zużycie dla danego wariantu Grupy II.



Rys. 8.9. Widoki śladów wytarc wariantów 5÷8 (grupa II) przegubów ogniów łańcuchowych (kolumna lewa) i wyznaczonych na ich podstawie rozkładów zużycia (kolumna prawa)

Przedstawione na Rysunku 8.9 wytarcia różnią się w zależności od tego, czy w procesie zużycia występowała mieszanina wodno-mineralna. W przypadku Wariantów 5 i 7, w których w obszarze współpracujących ogniw tej mieszaniny nie było (występowała jedynie woda destylowana), ślady zużycia są praktycznie niewidoczne. Natomiast dla Wariantów 6 i 8, gdzie czynnikiem degradacyjnym była mieszanina wodno-mineralna (piaskowiec z wodą destylowaną), ślady wytarcia są bardzo duże, a ich wgłębienia są rozmieszczone niesymetrycznie. Wyznaczone wartości takich parametrów jak średni ubytek masy i maksymalna głębokość zużycia, pozwoliły na uszeregowanie wariantów w kolejności rosnącego zużycia: Wariant 7 < Wariant 5 < Wariant 6 < Wariant 8.

Tab. 8.3 Wartości średniego ubytku masy i maksymalnej głębokości zużycia wyznaczone dla poszczególnych wariantów 5-8 (grupa II)

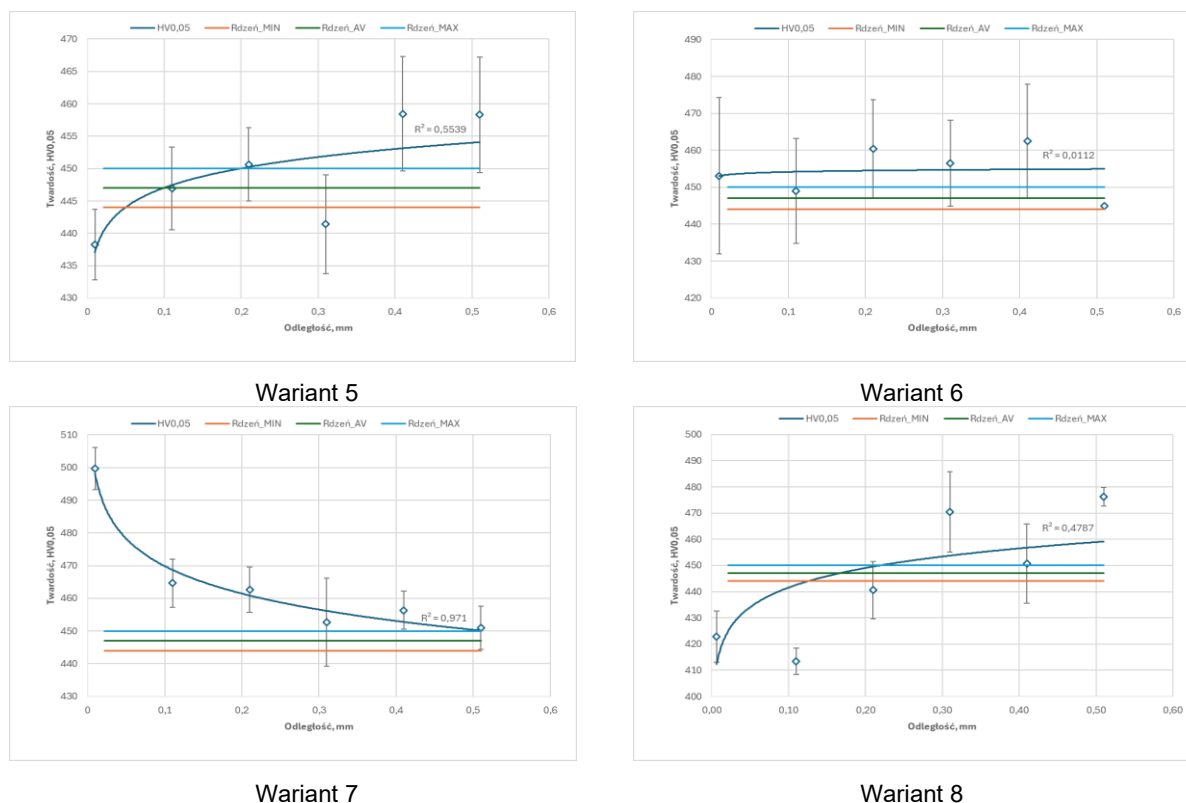
Wariant	Czynnik degradacyjny	Charakter zużycia	Średni ubytek masy próbek, g	Maksymalna głębokość zużycia, mm
5	Wierzchołki nierówności powierzchni i woda destylowana	Zużycie mechaniczne w obecności wody	0,284±0,012	0,113±0,015
6	Wierzchołki nierówności powierzchni, woda destylowana i ścierniwo mineralne	Zużycie ściernie w obecności wody	2,423±0,011	1,258±0,015
7	Wierzchołki nierówności powierzchni, woda destylowana i wymuszenia dynamiczne	Zużycie mechaniczne w obecności wody intensyfikowane zmiennymi siłami	0,247±0,013	0,091±0,015
8	Wierzchołki nierówności powierzchni, woda destylowana, ścierniwo mineralne i wymuszenia dynamiczne	Zużycie ściernie w obecności wody intensyfikowane zmiennymi siłami	2,611±0,014	1,296±0,015

Na Rysunku 8.10. zaprezentowano rozkłady twardości warstwy wierzchniej dla wariantów z grupy II. Analiza danych z wykresów przedstawionych na Rysunku 8.10 wskazuje, że wzrost twardości w wyniku zgniotu zaobserwowano wyłącznie dla Wariantu 7. W przeciwieństwie do tego, w Wariantach 5 i 8 zaobserwowano tendencję do spadku twardości w obszarze podpowierzchniowym warstwy wierzchniej. Dla Wariantu 6 nie odnotowano żadnej wyraźnej zmiany, ani tendencji.

8.2.1. Analiza mechanizmów zużycia Wariantu 5

W przypadku Wariantu 5 spodziewano się, że podstawowymi mechanizmami niszczenia będą zużycie mechaniczne spowodowane nierównościami powierzchni oraz zużycie ściernie wywołane oderwanymi fragmentami materiału, podobnie jak w Wariacie 1. Założenia te

zostały potwierdzone przez widoki powierzchni w strefie współpracy ogni, zaprezentowane na Rysunkach 8.11a i 8.11b.



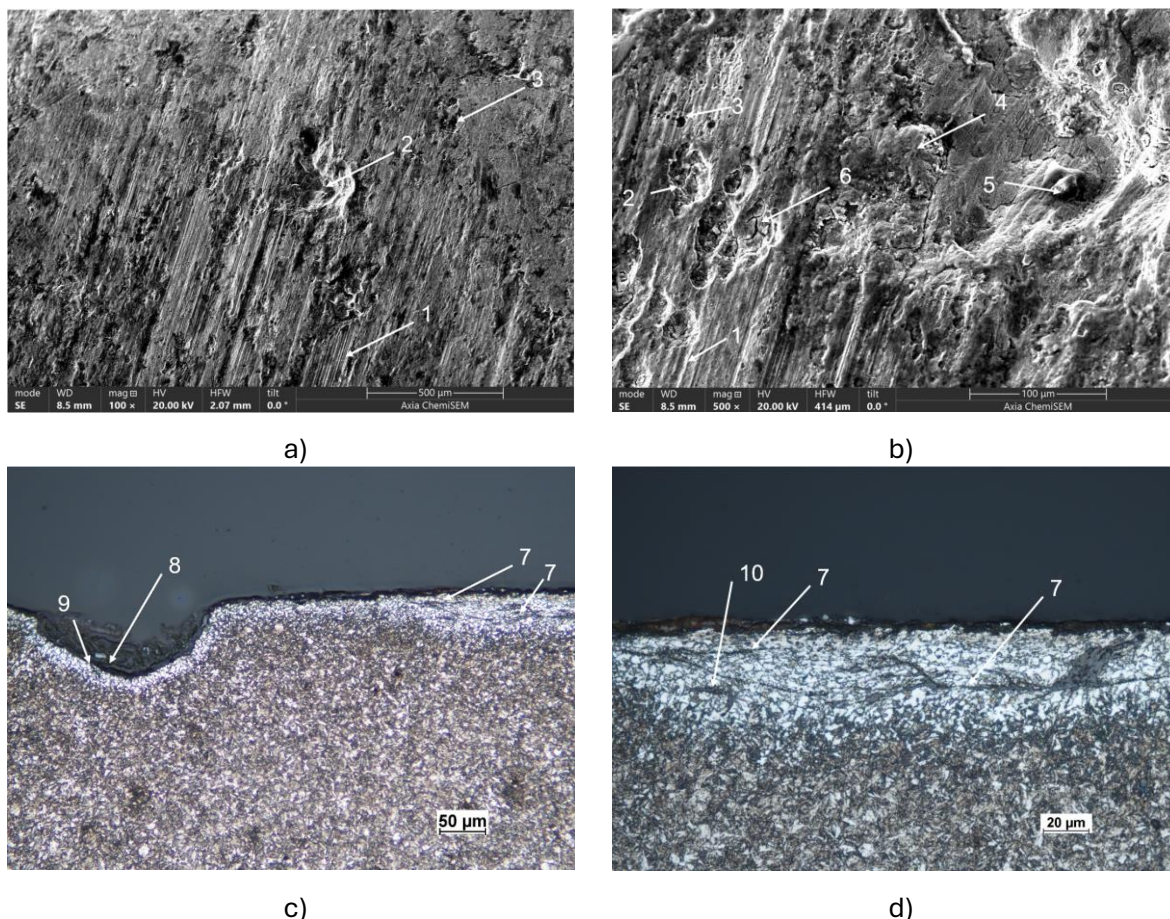
Rys. 8.10. Rozkłady twardości warstwy wierzchniej uzyskane dla wariantów Grupy II.

Na rysunkach tych (Rys. 8.11) zauważa się skutki procesu mikrorysowania powierzchni wierzchołkami nierówności, którymi były przede wszystkim wyraźne rysy oraz widoczne wyrwania wierzchołków nierówności powierzchni, brakuje jednak w przedstawionym obrazie bruzd występujących w Wariacie 1. Widocznymi konsekwencjami oddziaływania oderwanych fragmentów powierzchni były ślady po wbitych produktach zużycia oraz ich rozkruszone części. Na zaprezentowanych obrazach zauważa się także skutki niskocyklowych procesów zmęczeniowych w formie wielokierunkowych pęknięć powierzchni oraz odspajających się płytek delaminacyjnych. Oczywiście płytki te, w dalszej części procesu zużywania, mogą całkowicie się oderwać i być źródłem dalszych rozkruszonych produktów zużycia, oddziałujących skrawająco na powierzchnię.

Przekroje przez strefę współpracy (Rys. 8.11c+d) ujawniają liczne pęknięcia delaminacyjne w przekroju i nieliczne formujące się pęknięcia odpowierzchniowe, zlokalizowane we wrębach rys. Zauważa się też występowanie wtrąceń niemetalicznych w strukturze stali, ale nie towarzyszą im pęknięcia o charakterze zmęczeniowym.

Cechą charakterystyczną Wariantu 5 jest występowanie warstw tlenkowych (rdzy) na powierzchniach współpracujących ogni (Rys. 8.12a). Warstwy te mają postać rozproszonych pól występujących poza obszarami bezpośredniego oddziaływania produktów

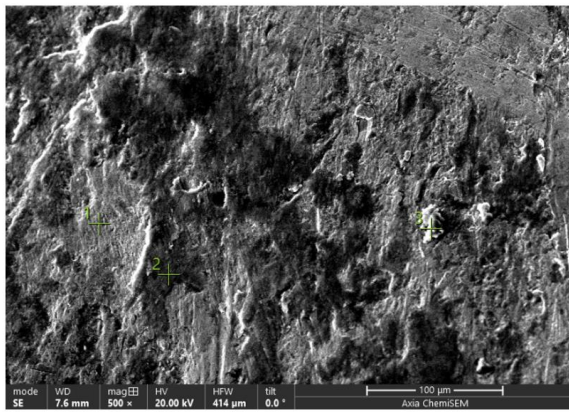
zużycia, co świadczy o tym, że ich tworzenie odbywało się w trakcie między kolejnymi oddziaływaniami tarciovymi. Obecność produktów korozji potwierdzono pomiarami EDS uwidocznionymi na Rysunku 8.12b. Intensywność oddziaływania procesów korozyjnych jest jednak niewielka, co potwierdzają uzyskane wyniki pomiaru miar zużycia.



Rys. 8.11. Analiza uszkodzeń strefy współpracy ogniw łańcucha po teście zużycia w warunkach określonych Wariantem 5, a), b), widoki powierzchni (SEM), c), d) widoki przekroju w obszarze styku (OM), oznaczenia: 1 – rysa, 2 – wyrwa po wierzchołku, 3 – odcisk po wbitym produkcie zużycia, 4 – pęknięcie powierzchni z formującą się płytką delaminacyjną, 5 – rozkruszony produkt zużycia, 6 – pęknięcie powierzchni, 7 – pęknięcie delaminacyjne w przekroju, 8 – obszar usunięty w wyniku mikrorysowania, 9 – formujące się pęknięcia odpowierzchniowe, 10 – wtrącenia niemetaliczne w strukturze stali.

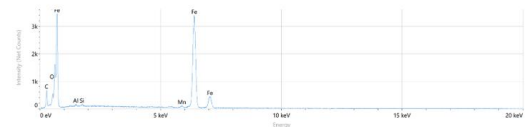
8.2.1. Analiza mechanizmów zużycia Wariantu 6

W przypadku Wariantu 6, dominującym rodzajem zużycia było zużycie ściernie ziarnami piaskowca (patrz Rys. 8.13a÷b), występującymi w mieszaninie wodno-mineralnej.

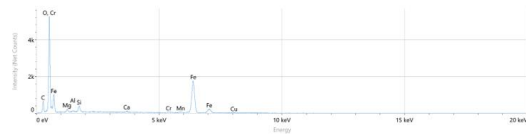


a)

1



2,3

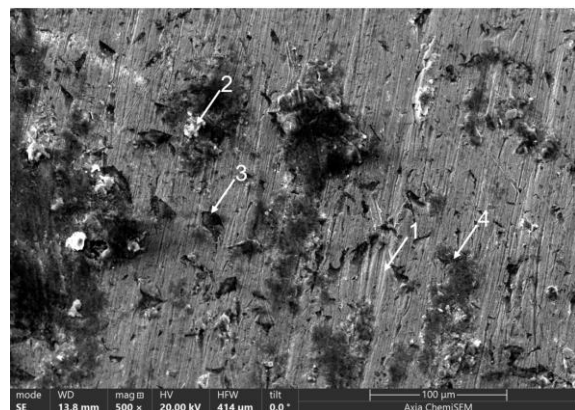


b)

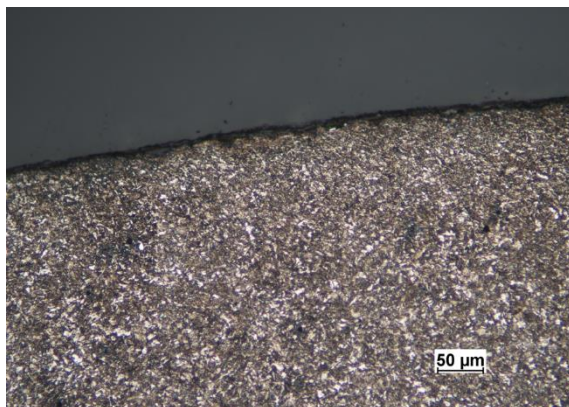
Rys. 8.12. Widok zużytej powierzchni, a) obszar powierzchni bez warstwy tlenkowej (pkt. 1) i z warstewkami (pkt. 2) tlenku żelaza (rdzy), b) wyniki pomiarów EDS dla punktów 1÷3.



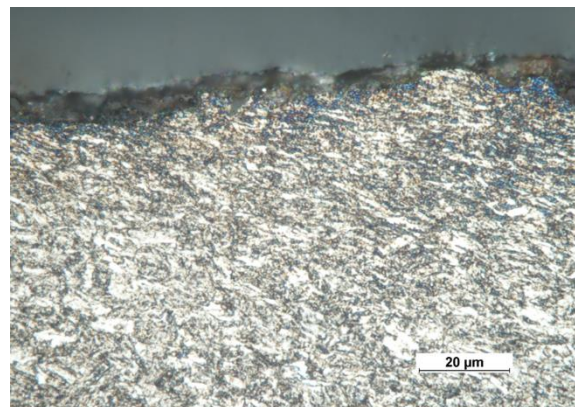
a)



b)



c)



d)

Rys. 8.13. Analiza uszkodzeń strefy współpracy ogniw łańcucha po teście zużycia w warunkach określonych Wariantem 6, a), b), widoki powierzchni (SEM), c), d) widoki przekroju w obszarze styku (OM), oznaczenia: 1 – rysa, 2 – białe ziarna ścierniwa, 3 – odcisk po wbitym ziarnie ścierniwa, 4 – obszar pokryty warstwą rdzy.

Jednakże, forma powierzchni znacząco się różni w porównaniu z analogicznym Wariantem 2. Przede wszystkim zauważa się, że liczba rys powierzchni jest relatywnie niewielka, obok nich występują płytkie ślady po usuniętych ziarnach piaskowca. Widoczne są także białe ziarna tego minerału. Obszary z widocznymi uszkodzeniami są rozdzielone powierzchniami wygładzonymi bez warstw tlenkowych (rdzy), jak i też z nimi. Istotne różnice zauważa się także w przypadku mikrostruktury ujawnionej na przekroju przez strefę współpracy (Rys. 8.13c+d), które polegają na całkowitym braku pęknięć delaminacyjnych oraz wtrąceń niemetalicznych.

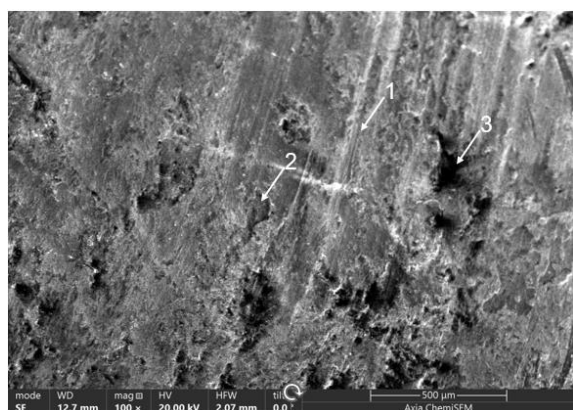
Wtrącenia niemetaliczne najczęściej występują bezpośrednio pod powierzchnią nowo wytworzonych ogniw, co spowodowane jest przeprowadzonymi zabiegami technologicznymi procesu wytwarzania prętów, będących materiałem wyjściowym do produkcji tych ogniw. Zaobserwowany na Rysunku 8.13c obszar jest zlokalizowany ok. 1,2 mm pod pierwotną powierzchnią badanych ogniw, stąd też jest on znacząco poniżej przypowierzchniowej strefy występowania wtrąceń niemetalicznych. Oczywiście, wtrącenia te mogą także znajdować się głębiej pod powierzchnią, jak wynika z analizy Wariantu 8, ale ich liczba jest mniejsza. Z kolei brak widocznych pęknięć delaminacyjnych tłumaczyć można intensywnym oddziaływaniem ścierno-korozyjnym mieszaniny wodno-mineralnej, której agresywne oddziaływanie powoduje bieżące usuwanie powierzchni zużywanej, tak że prawdopodobnie nie dochodzi do wyindukowania się niskocyklowych pęknięć zmęczeniowych. Nie można jednak całkowicie wyeliminować możliwości tworzenia tego typu uszkodzeń, jednakże na przedstawionych widokach ich nie stwierdzono. Należy w tym miejscu przypomnieć, że mieszanina piaskowca i wody destylowanej posiada właściwości korozyjne (patrz Rozdział 7), które powodują intensywne tworzenie warstw tlenkowych (rdzy) w warunkach tarcowych (czyli w warunkach tribokorozyjnych) na nowo odsłanianych przez ziarna ścierniwa powierzchniach. Powstające produkty korozyjne, z uwagi na ich relatywnie dużą twardość, mogą przedostawać się do mieszaniny piaskowca i wody i zwiększać w niej udział twardych frakcji, co z kolei intensyfikuje procesy zużyciowe.

Analizując Rysunek 8.13d można zauważyć stekstrowanie mikrostruktury typowe dla zgniotu, ale grubość tej strefy jest niższa niż w przypadku Wariantu 2. Świadczy to o tym, że proces zużycia korozyjno-ściernego może w pewnym stopniu zmniejszać efekt zgniotu, a także, co wykazano na Rysunku 8.10, powodować zmniejszenie twardości powierzchni warstwy wierzchniej badanych ogniw.

8.2.2. Analiza mechanizmów zużycia Wariantu 7

Na rysunkach 8.14a i 8.14b przedstawiono obrazy powierzchni badanych próbek po teście zużyciowym określonym Wariantem 7, na których widoczne są, podobnie jak dla

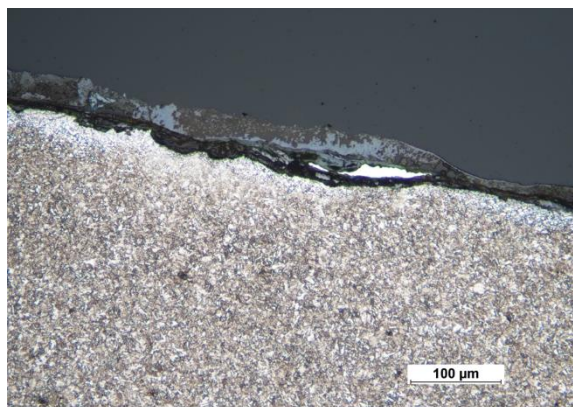
przypadku Wariantu 5, płytkie rysy oraz wgniecione i rozkruszone produkty zużycia. Świadczy to o tym, że podstawowymi mechanizmami niszczenia było zużycie mechaniczne spowodowane nierównościami powierzchni oraz zużycie ściernie wywołane oderwanymi fragmentami materiału. Na tych rysunkach widoczne są także obszary pokryte warstwą rdzy. Na Rysunku 8.14c widoczne jest pojedyncze pęknięcie delaminacyjne oraz tekstura zgniotu strefy przypowierzchniowej ogniwa. Na Rysunku 8.14d widoczne jest duże pęknięcie podpowierzchniowe. Prawdopodobnie powstało ono w wyniku obciążenia zmiennymi siłami, a jego inicjatorem było cienie wtrącenie niemetaliczne, ułożone prostopadłe do powierzchni badanego ogniwa.



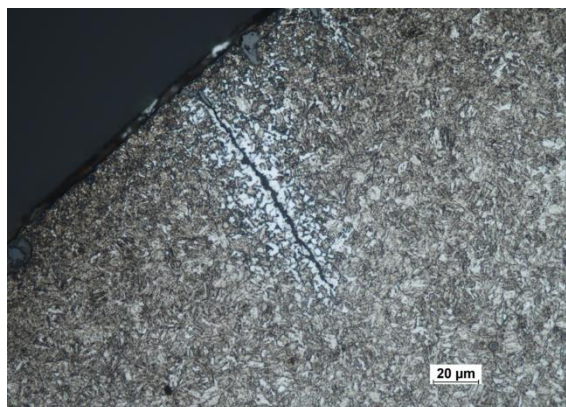
a)



b)



c)



d)

Rys. 8.14. Analiza uszkodzeń strefy współpracy ogniów łańcucha po teście zużycia w warunkach określonych Wariantem 7, a), b), widoki powierzchni (SEM), c), d) widoki przekroju w obszarze styku (OM), oznaczenia: 1 – rysa, 2 – wgnieciony produkt zużycia, 3 – obszar pokryty warstwą rdzy, 4 – rozkruszony produkt zużycia.

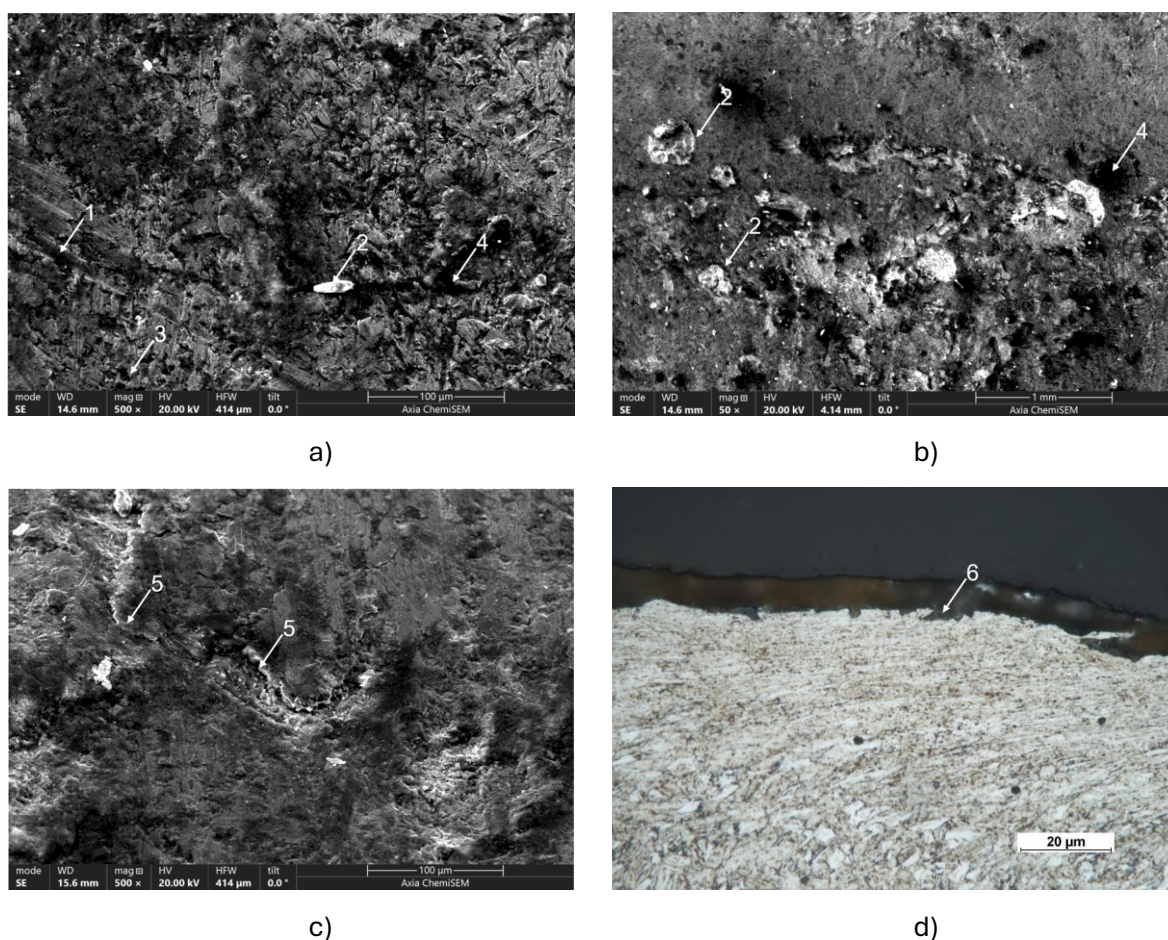
W przypadku Wariantu 7 procesy zużyciowe były nieznacznie mniej intensywne niż te obserwowane w przypadku Wariantu 5. Wynik ten świadczy, że siły dynamiczne mogą

wywołać zmiany zarówno degradacyjne (świadczą o tym pęknięcia powierzchni), jak i też umocnieniowe, o czym świadczy tekstura zgniotu i wzrost twardości powierzchni ogniw.

Wystąpienie umocnienia mikrostruktury może także przeciwdziałać procesom zmęczenia niskocyklowego, o czym świadczy niewielka liczba pęknięć powierzchni i wykruszeń delaminacyjnych. Prawdopodobnie w analizowanym Wariancie 7 na minimalizację intensywności procesów delaminacyjnych korzystnie wpłynęło także zmniejszenie tarcia w strefie współpracy ogniw łańcuchowych, spowodowane obecnością wody destylowanej (efektu tego jednak nie zaobserwowano w przypadku Warianu 5).

8.2.3. Analiza mechanizmów zużycia Warianu 8

Na rysunkach 8.15a÷c, przedstawiono obrazy powierzchni badanych próbek po teście zużyciowym określonym Warianem 8.



Rys. 8.15. Analiza uszkodzeń strefy współpracy ogniw łańcucha po teście zużycia w warunkach określonych Warianem 8, a), b) widoki powierzchni (SEM), c), d) widoki przekroju w obszarze styku (OM), oznaczenia: 1 – rysa, 2 – białe ziarna ścierniwa, 3 – odcisk po wbitym ziarnie ścierniwa, 4 – obszar pokryty warstwą rdzy, 5 – pęknięcie powierzchni, 6 – obszar usunięty w wyniku mikrorysowania.

Wariant 8 charakteryzował się największą intensywnością zużycia spośród wszystkich wariantów czynników środowiskowych Grupy II. Wynik ten był spodziewany i wynikał z łącznego oddziaływania ścierno-korozyjnego mieszaniny wodno-mineralnej intensyfikowanego siłami dynamicznymi.

Na Rysunku 8.15a zauważalne są rysy powierzchni wraz z licznymi śladami po wbitych i usuniętych ziarnach piaskowca otoczone obszarami pokrytymi rdzą, a także fragmenty ziaren mineralnych wbite w powierzchnię. Wbite ziarna piaskowca mogą tworzyć rozległe kompleksy na powierzchni ogniw (Rys. 8.15b). Oddziaływaniem zmiennych sił dynamicznych można tłumaczyć, widoczne na Rysunku 8.15c, pęknięcia powierzchni, jednakże nie tworzą one pęknięć delaminacyjnych, ani pęknięć odpowierzchniowych, nawet w obszarach wrębów rys (potwierdza to Rysunek 8.15d). Brak tych pęknięć może wynikać z wystąpienia efektu zgniotu wywołanego dodatkowymi zmiennymi siłami. Wystąpienie tekstury zgniotu potwierdza Rysunek 8.15d. Należy jednak pamiętać, że procesy ścierno-dynamiczne cały czas odbywały się w warunkach korozyjnych, identycznie jak w opisanym wcześniej przypadku Wariantu 6. Proces korozji wspomagał zużycie ścierne, a także oddzielanie się fragmentów powierzchni, co mogło też w pewnym stopniu spowodować, że ewentualne formujące się mikropęknięcia zostały usunięte przed wystąpieniem pełnej formy niskocyklowego uszkodzenia zmęczeniowego.

8.3. Wyniki badań dla Grupy III wariantów czynników środowiskowych

Ostatnia z rozpatrywanych grup wariantów środowiska kopalnianego reprezentuje warunki eksploatacyjne, w których transportowany urobek ma kontakt z wodą pochodzącą z procesów technologicznych, jak i tą pochodzącą ze zrobów (dla ich określenia można użyć sformułowania „kopalnia mokra”). Niniejszy przypadek eksploatacyjny również powszechnie występuje w górnictwie. Przede wszystkim dotyczy pokładów zawodnionych, gdzie drążenie wyrobisk korytarzowych prowadzone jest zarówno w technologii strzelniczej, jak i też kombajnowej. Woda wypływająca z górotworu miesza się z odspajanym urobkiem i tworzy mieszaniny wodno-mineralne, które mogą oblepiać łańcuchy i inne elementy przenośników zgrzeblowych. Dodatkowa obecność wody technologicznej może wynikać ze zraszania skrawanego urobku w czasie urabiania kombajnem chodnikowym, jednakże jej oddziaływanie korozyjne jest najczęściej mniej intensywne niż wody dołowej.

W ramach badań stanowiskowych dla omawianego środowiska pracy łańcuchów ogniowych tj. przy obecności wody zrobowej w transportowanym urobku (kopalnia sucha stosująca układy zraszania urobku), przetestowane zostały, analogicznie jak w poprzednich podrozdziałach, 4 warianty badawcze:

- przemieszczenia kątowe ogniw łańcuchowych poddanych stałemu obciążeniu grawitacyjnemu w obecności wody kopalnianej w obszarze ich kontaktu,

- przemieszczenia kątowe ogniw łańcuchowych poddanych stałemu obciążeniu grawitacyjnemu z obecnością mieszaniny ścierniwa i wody kopalnianej w obszarze ich kontaktu,
- przemieszczenia kątowe ogniw łańcuchowych poddanych wypadkowemu obciążeniu stałej siły grawitacyjnej i sinusoidalnie zmiennego wymuszenia siłowego w obecności wody kopalnianej w obszarze ich kontaktu,
- przemieszczenia kątowe ogniw łańcuchowych poddanych wypadkowemu obciążeniu stałej siły grawitacyjnej i sinusoidalnie zmiennego wymuszenia siłowego z obecnością mieszaniny ścierniwa i wody kopalnianej w obszarze ich kontaktu.

Rysunek 8.16 przedstawia porównanie śladów wytarcia w strefie styku ogniw łańcuchowych oraz rozkład zużycia ogniw w przegubie dla wariantów od 9 do 12 (Grupa III). Tabela 8.4 zawiera zestawienie miar charakteryzujących zużycie dla wariantów Grupy III. Natomiast na Rysunku 8.17 przedstawiono rozkłady twardości warstwy wierzchniej uzyskane dla omawianych wariantów.

Przedstawione na Rysunku 8.16 formy wytarcia Grupy III czynników środowiskowych są bardzo zbliżone do tych wyznaczonych dla Grupy II. Wytarcia powierzchni podczas zużycia w warunkach określonych Wariantami 9 i 11, w których tej mieszaniny nie było w obszarze współpracujących ogniw, a tylko była woda kopalniana, ślady zużycia są nieznaczne.

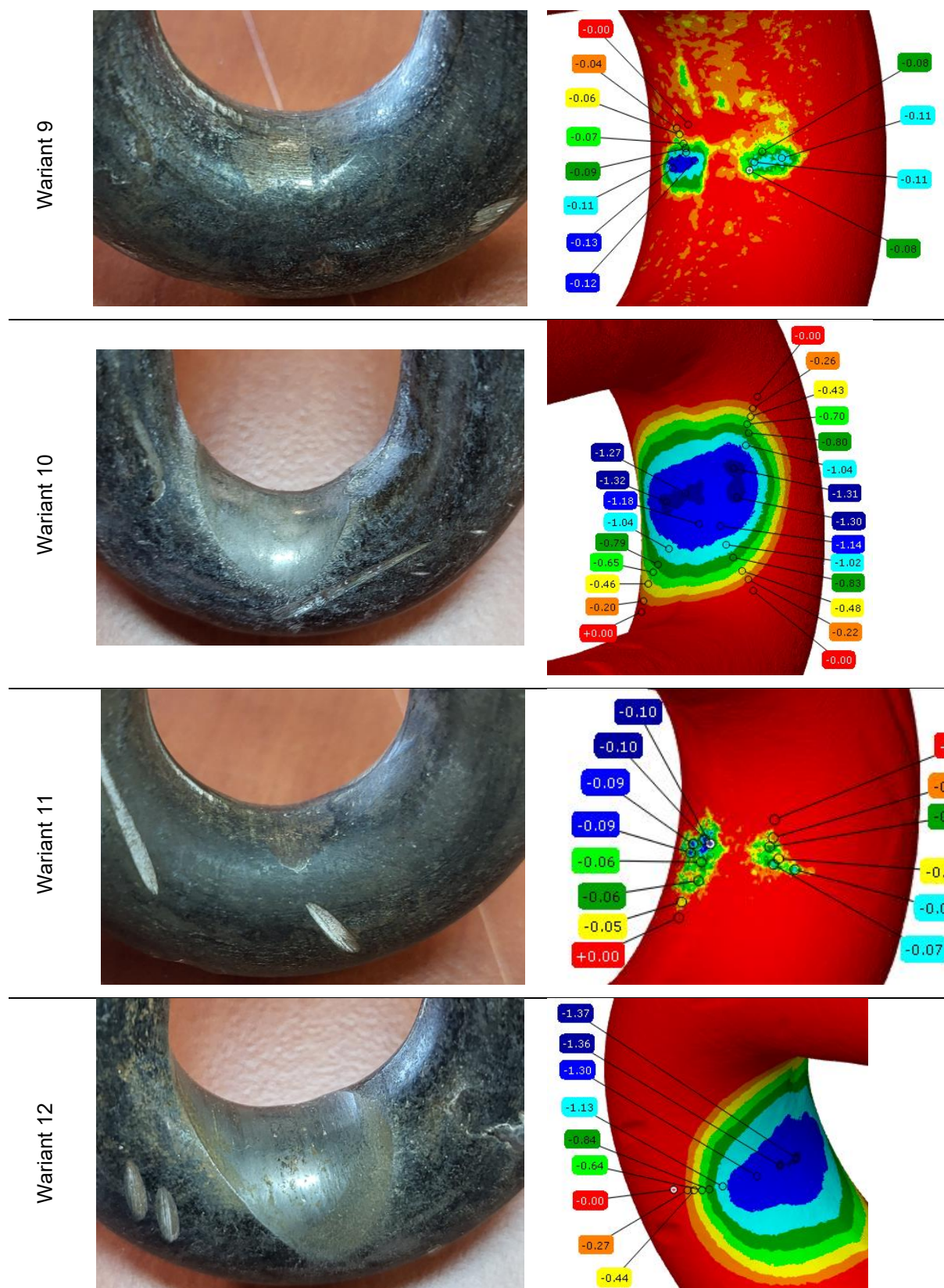
W przypadku Wariantów 10 i 12, gdzie głównym czynnikiem degradacyjnym była mieszanina wodno-mineralna (piaskowiec z wodą mineralną), zaobserwowano bardzo duże ślady wytarcia z niesymetrycznym rozmieszczeniem wgłębień. Analiza parametrów, takich jak średni ubytek masy oraz maksymalna głębokość zużycia, umożliwiła uporządkowanie wariantów w kolejności rosnącego zużycia: Wariant 9 < Wariant 11 < Wariant 10 < Wariant 12.

Analiza danych z wykresów przedstawionych na Rysunku 8.17 wskazuje, że istotny wzrost twardości w wyniku zgniotu zaobserwowano dla Wariantów 9 i 11, natomiast dla Wariantu 12 stwierdzono również umocnienie warstwy wierzchniej, ale efekt ten tuż pod powierzchnią był mniejszy w porównaniu z wspomnianymi wcześniej wariantami. Tylko dla przypadku Wariantu 10 zaobserwowano spadek twardości w obszarze podpowierzchniowym warstwy wierzchniej.

8.3.1. Analiza mechanizmów zużycia Wariantu 9

Widoki powierzchni w strefie współpracy ogniw po teście zużycia w warunkach Wariantu 9 zaprezentowano na Rysunkach 8.18a+c. Na rysunkach tych zauważa się formy uszkodzeń podobne jak w Wariacie 5, czyli wyraźne rysy oraz widoczne wyrwania wierzchołków

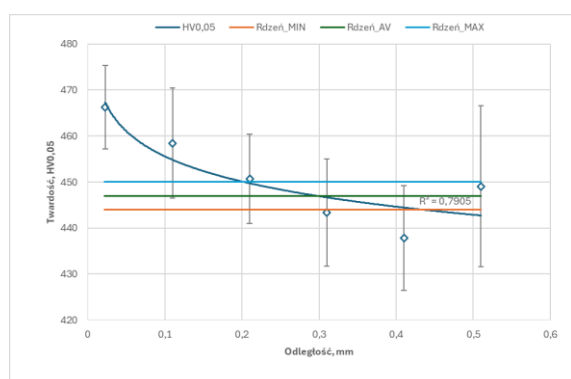
nierówności powierzchni, spowodowane procesem mikrorysowania powierzchni wierzchołkami nierówności.



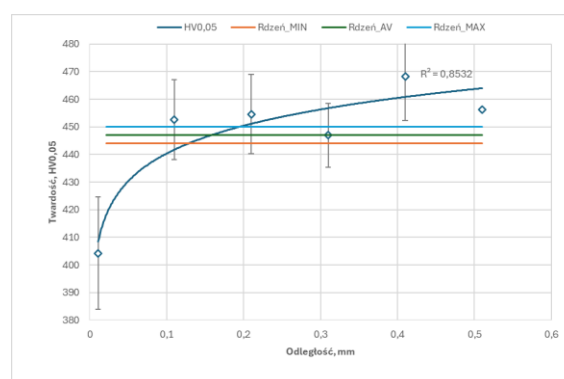
Rys. 8.16. Widoki śladów wytarcia wariantów 9÷12 (grupa III) przegubów ogniów łańcuchowych (kolumna lewa) i wyznaczonych na ich podstawie rozkładów zużycia (kolumna prawa)

Tab. 8.4 Wartości średniego ubytku masy i maksymalnej głębokości zużycia wyznaczone dla poszczególnych wariantów 9÷12 (grupa III)

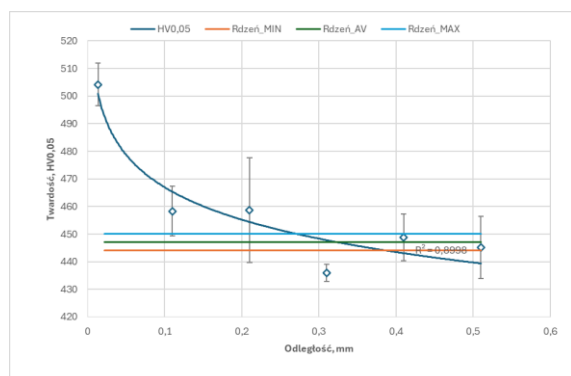
Wariant	Czynnik degradacyjny	Charakter zużycia	Średni ubytek masy próbek, g	Maksymalna głębokość zużycia, mm
9	Wierzchołki nierówności powierzchni i woda kopalniana	Zużycie mechaniczne w obecności czynnika korozyjnego	0,451±0,012	0,116±0,015
10	Wierzchołki nierówności powierzchni, woda kopalniana i ścierniwo mineralne	Zużycie ściernie w obecności czynnika korozyjnego	2,534±0,013	1,221±0,015
11	Wierzchołki nierówności powierzchni, woda kopalniana i wymuszenia dynamiczne	Zużycie mechaniczne w obecności czynnika korozyjnego intensyfikowane zmiennymi siłami	0,458±0,013	0,133±0,015
12	Wierzchołki nierówności powierzchni, woda kopalniana, ścierniwo mineralne i wymuszenia dynamiczne	Zużycie ściernie w obecności czynnika korozyjnego intensyfikowane zmiennymi siłami	2,953±0,012	1,374±0,014



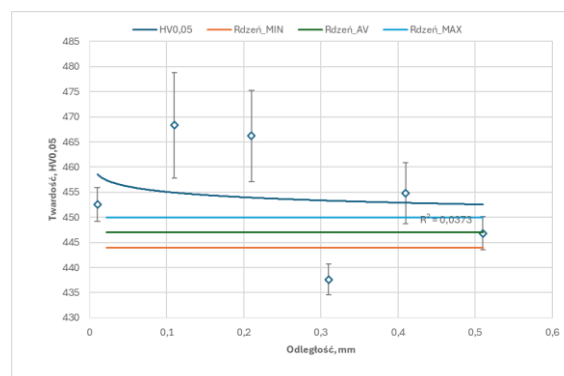
Wariant 9



Wariant 10



Wariant 11

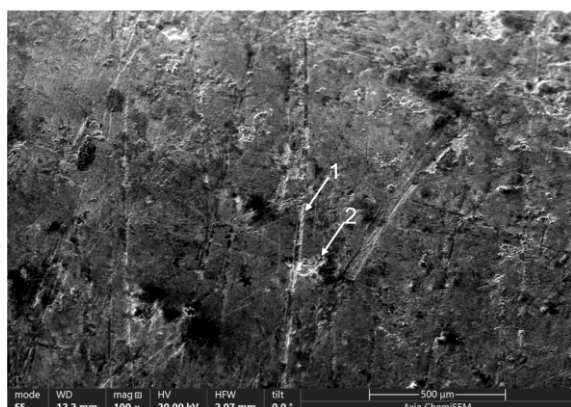


Wariant 12

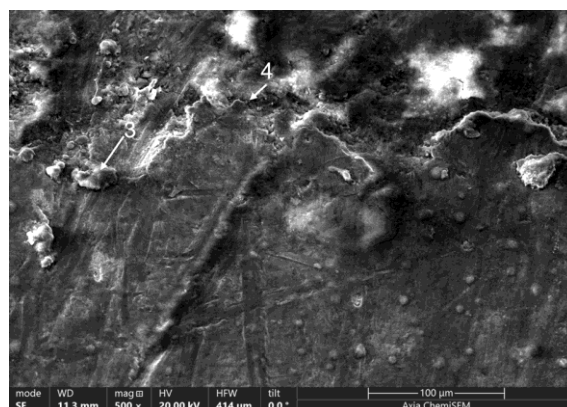
Rys. 8.17. Rozkłady twardości warstwy wierzchniej uzyskane dla wariantów grupy III.

Widoczne są także ślady po wbitych produktach zużycia oraz ich rozkruszone części, a także rozległe warstwy rdzy. Na zaprezentowanych obrazach zauważa się także skutki niskocyklowych procesów zmęczeniowych w formie rozległych pęknięć powierzchni. Przekrój przez strefę współpracy (Rys. 8.18d) nie ujawnił pęknięć delaminacyjnych, co może

świadczą, że widoczne na Rysunku 8.18b pęknięcie nie przechodzi w formę płytki delaminacyjnej. Także wystąpieniu wtrącenia niemetalicznego tuż pod powierzchnią ogniwa nie towarzyszy pęknięcie podpowierzchniowe. Powodem tego mogło być, podobnie jak w przypadku Wariantu 7, wystąpienie umocnienia mikrostruktury oraz zmniejszenie tarcia w strefie współpracy ogniów łańcuchowych, spowodowane obecnością wody kopalnianej. Na podstawie przedstawionych obrazów ustalono, że w przypadku Wariantu 9 podstawowymi mechanizmami niszczenia jest zużycie mechaniczne, spowodowane nierównościami powierzchni oraz zużycie ścierne, wywołane oderwanymi fragmentami materiału, intensyfikowane jednak obecnością produktów korozji.



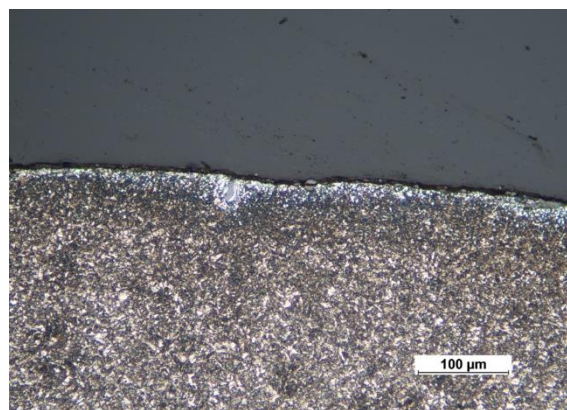
a)



b)



c)

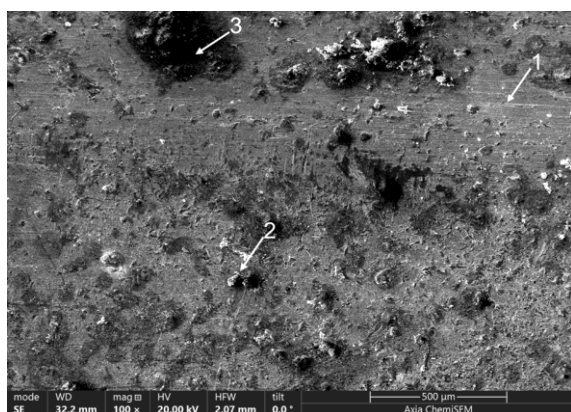


d)

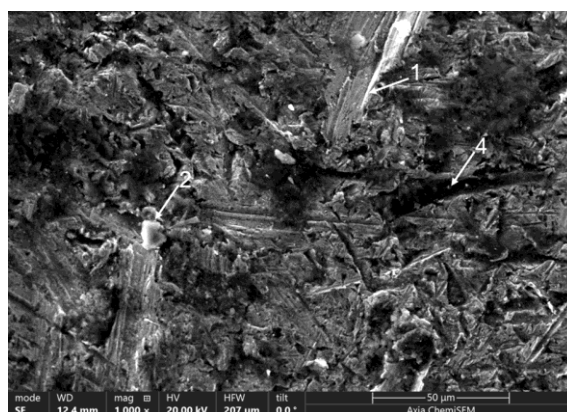
Rys. 8.18. Analiza uszkodzeń strefy współpracy ogniów łańcucha po teście zużycia w warunkach określonych Wariantem 9, a), b), widoki powierzchni (SEM), c), d) widoki przekroju w obszarze styku (OM), oznaczenia: 1 – rysa, 2 – wyrwa po wierzchołku, 3 – rozkruszony produkt zużycia (fragment wierzchołka), 4 – pęknięcie powierzchni, 5 – odcisk po wbitym produkcie zużycia, 6 – obszar pokryty warstwą rdzy.

8.3.1. Analiza mechanizmów zużycia Wariantu 10

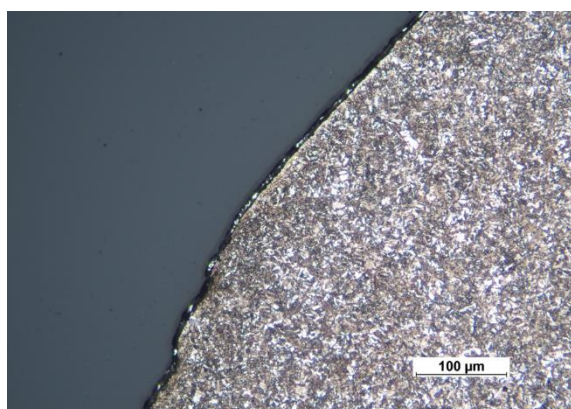
Widoki powierzchni w strefie współpracy ogniów po teście zużycia w warunkach Wariantu 10 zaprezentowano na Rysunkach 8.19a÷b. W przypadku tego wariantu, dominującym rodzajem zużycia było zużycie ściernie intensyfikowane powstałymi produktami zużycia korozyjnego. Widoki powierzchni uzyskane w przypadku Wariantu 10 są bardzo zbliżone do tych uzyskanych dla Wariantu 6. Identycznymi cechami widoków powierzchni obu wariantów są: nieliczne rysy powierzchni, płytkie ślady po usuniętych ziarnach piaskowca, obecność rozdrobnionego ścierniwa, obszary wygładzone przez rozdrobnione ścierniwo oraz obecność warstw tlenkowych (rdzy). Także mikrostruktura przekroju Wariantu 10, podobnie jak w Wariacie 6, cechuje się brakiem pęknięć delaminacyjnych oraz nielicznymi wtrąceniami niemetalicznymi.



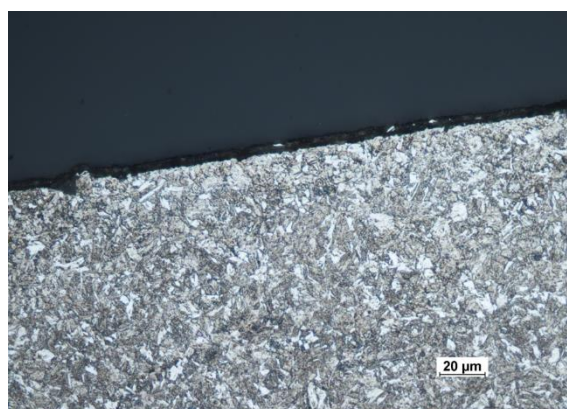
a)



b)



c)



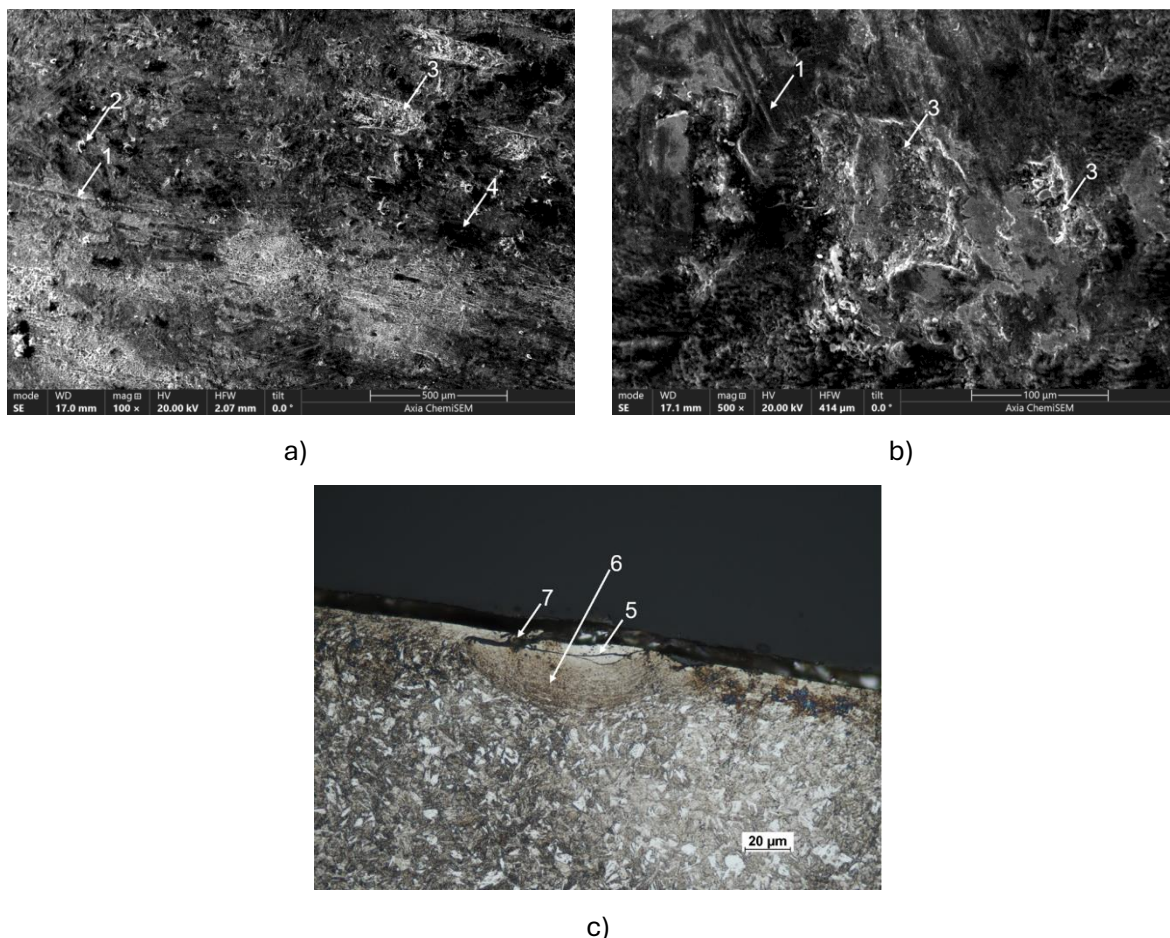
d)

Rys. 8.19. Analiza uszkodzeń strefy współpracy ogniów łańcucha po teście zużycia w warunkach określonych Wariantem 10, a), b), widoki powierzchni (SEM), c), d) widoki przekroju w obszarze styku (OM), oznaczenia: 1 – rysa, 2 – rozkruszone ziarno ścierniwa, 3 – obszar pokryty warstwą rdzy, 4 – odcisk po wbitym produkcie zużycia.

Mikrostruktura ogniów przedstawiona na Rysunku 8.19c i 8.19d nie wykazuje cech zgniotu. Obserwacja ta wspiera wnioski z analizy Wariantu 6, które sugerują, że zużycie korozyjno-ścierne może osłabiać efekt zgniotu i obniżać twardość powierzchniową ogniów.

8.3.2. Analiza mechanizmów zużycia Wariantu 11

Rysunki 8.20a i 8.20b przedstawiają widoki powierzchni w strefie styku ogniów po teście zużycia przeprowadzonym w warunkach Wariantu 11.



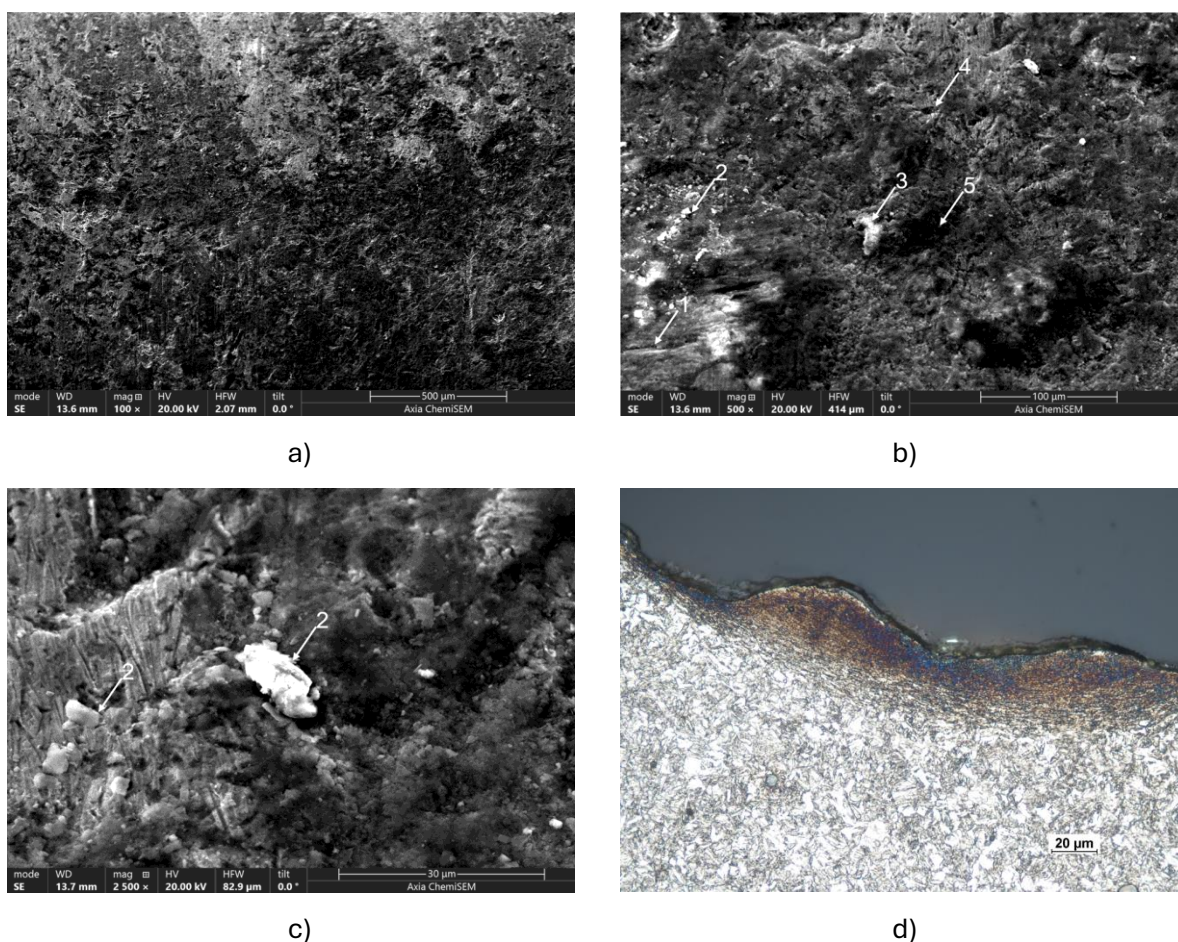
Rys. 8.20. Analiza uszkodzeń strefy współpracy ogniów łańcucha po teście zużycia w warunkach określonych Wariantem 11, a), b), widoki powierzchni (SEM), c), widok przekroju w obszarze styku (OM), oznaczenia: 1 – rysa, 2 – białe produkty zużycia, 3 – wykruszenie delaminacyjne, 4 – obszar pokryty warstwą rdzy, 5 – pęknięcie delaminacyjne w przekroju, 6 – ognisko pęknięcia zmęczeniowego, 7 – wtrącenie niemetaliczne w strukturze stali.

Podobnie jak w przypadku Wariantu 7, podstawowymi mechanizmami niszczenia było zużycie mechaniczne intensyfikowane zmiennymi siłami dynamicznymi. Efekt rysowania powierzchni był spowodowany nierównościami powierzchni oraz oderwanymi fragmentami

materiału. Powierzchnia zużytego ogniwa charakteryzuje się nielicznymi płytkimi rysami, obecnością warstw produktów korozji i wygładzonymi obszarami. Cechą odznaczającą Wariant 11 od Wariantu 7 jest obecność licznych powierzchniowych wykruszeń. Wykruszenia te mają formę pęknięć delaminacyjnych, co potwierdza Rysunek 8.20c. Na tym rysunku można zauważyć ognisko pęknięcia zmęczeniowego, świadczące o tym, że zużyciu mechaniczno-dynamicznemu mogą towarzyszyć procesy zmęczeniowe oraz teksturę zgniotu strefy przypowierzchniowej ogniwa.

8.3.3. Analiza mechanizmów zużycia Wariantu 12

Rysunki 8.21a÷c przedstawiają widoki powierzchni w strefie styku ogniw po teście zużycia przeprowadzonym w warunkach Wariantu 12.



Rys. 8.21. Analiza uszkodzeń strefy współpracy ogniw łańcucha po teście zużycia w warunkach określonych Wariantem 12, a), b), c) widoki powierzchni (SEM), d) widok przekroju w obszarze styku (OM), oznaczenia: 1 – rysa, 2 – rozkruszone ziarno ścierniwa, 3 – białe ziarna ścierniwa, 4 – odcisk po wbitym ziarnie ścierniwa, 5 – obszar pokryty warstwą rdzy.

Wariant 12, podobnie jak Wariant 8 w Grupie II, wykazał największą intensywność zużycia ze wszystkich wariantów z Grupy III. Był to spodziewany rezultat, wynikający z jednoczesnego działania ściernego i korozyjnego mieszaniny wodno-mineralnej, które było dodatkowo wzmacniane przez siły dynamiczne.

Na Rysunku 8.22a widoczne są rozległe obszary pokryte rdzą, ślady po wybitych i usuniętych ziarnach, jak również fragmenty pozbawione widocznych uszkodzeń. Z kolei Rysunki 8.22b i 8.22c ukazują nieliczne rysy, płytkie wgłębienia po wybitych i usuniętych ziarnach oraz białe ziarna piaskowca. W przypadku Wariantu 12 nie zaobserwowano pęknięć powierzchni, ani delaminacyjnych wykruszeń. Wynika to najprawdopodobniej, jak już wspomniano przy Wariacie 8, z bardzo intensywnego działania procesów korozyjnych, wspieranych tarciem i dynamicznym oddziaływaniem, które usuwały inne formy uszkodzeń. Występowanie tekstury zgniotu, potwierdzone na Rysunku 8.22d, w niektórych obszarach warstwy wierzchniej zostało zatarte przez procesy zużyciowe.

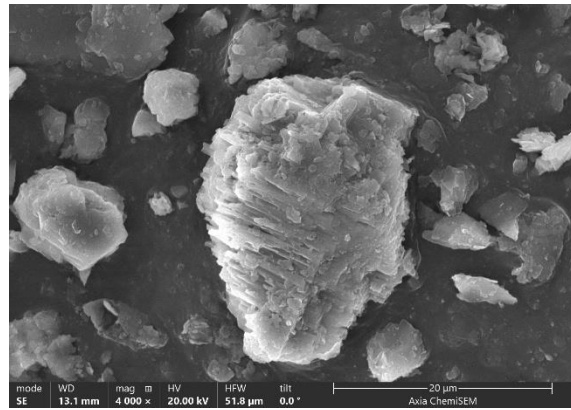
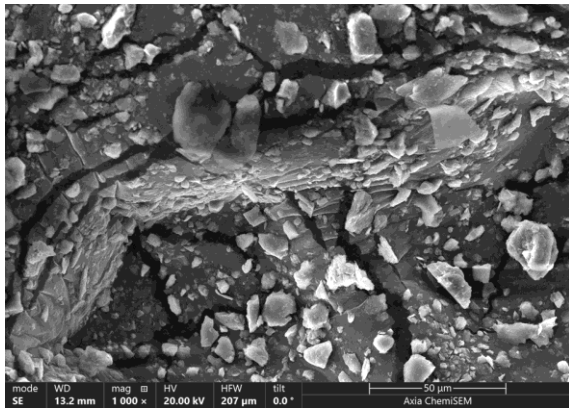
8.4. Analiza produktów zużycia

W celu dokonania oceny zmian w ścierniwie, które nastąpiły po testach zużyciowych, przeprowadzono analizę materiału wyjściowego oraz ścierniwa z Wariantów 2 i 10. W celu oceny wpływu procesu zużycia na ziarna ścierniwa, zostały przeprowadzone następujące pomiary: ocena makroskopowa, badania przy użyciu mikroskopii skaningowej i spektroskopii rentgenowskiej z dyspersją energii EDS oraz dyfrakcji rentgenowskiej XRD.

Badania makroskopowe piaskowca po testach w warunkach Wariantu 2 nie wykazały znaczącej zmiany barwy, natomiast w przypadku wysuszonej mieszaniny użytej do badań zużycia w Wariacie 10 doszło po testach do zmiany barwy na ciemnoczerwoną, co sugerowało obecność w niej produktów korozji.

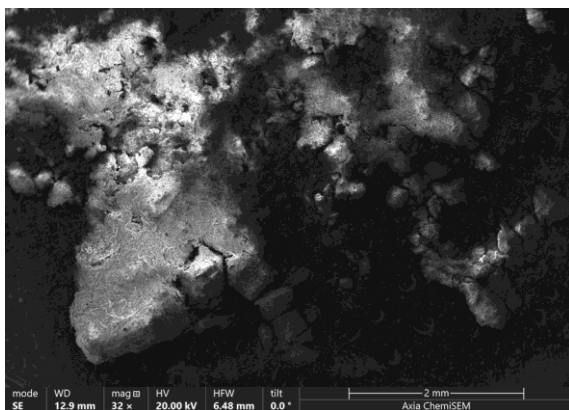
Na Rysunku 8.22 przedstawiono widoki ziaren piaskowca wykorzystanego w badaniach stanowiskowych (dokładna charakterystyka mineralogiczna i chemiczna piaskowca została przedstawiona w Rozdziale 6). Na tym rysunku można zauważyć występowanie ziaren o zróżnicowanej wielkości, przy czym ich maksymalna wielkość określona jest wielkością oczka sita (50 μm) użytego do przesiania zmielonego piaskowca. Dodatkowo widoczne są ziarna o ostrych krawędziach skrawających.

Rysunek 8.23 ukazuje ziarna piaskowca po 30-godzinnych testach Wariantu 2, które symulowały typowe zużycie ściernie w obecności tych ziaren. Po testach, ziarna piaskowca miały w większości zaokrąglone krawędzie, a także widoczne były na nich pęknięcia liniowe, przy czym duża ich część uległa defragmentacji. Pomiary EDS nie wykazały obecności tlenków żelaza, a skład odpowiadał wyłącznie kwarcowi i innym składnikom mineralnym.

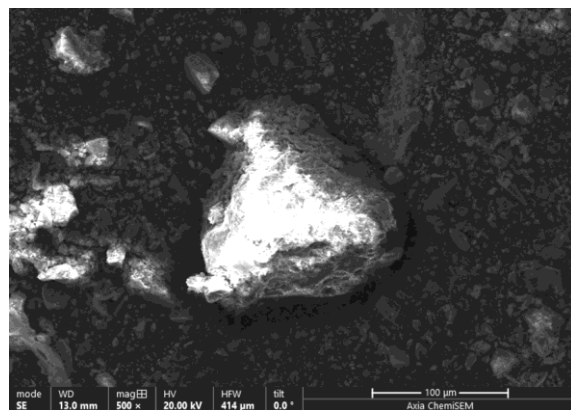


Rys. 8.22. Widoki ziaren piaskowca użytego do badań stanowiskowych.

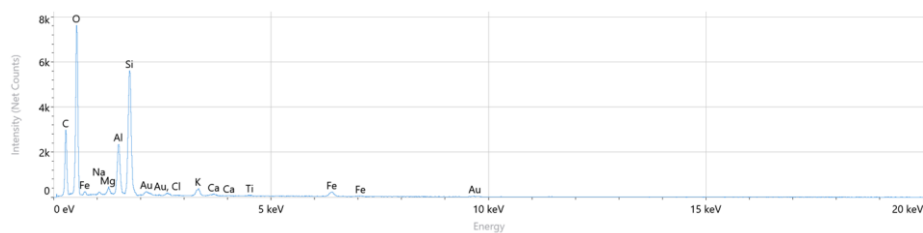
Rysunek 8.24 przedstawia stan ziaren po 30-godzinym teście, który symulował warunki Wariantu 10. Ziarna te są znacznie obtoczone i mają wewnętrzne pęknięcia. Analiza rozkładu pierwiastków (Rys. 8.25) wykazała, że ich powierzchnie są równomiernie pokryte żelazem i tlenem, co sugeruje kontakt z produktami korozji, czyli rdzą.



a)

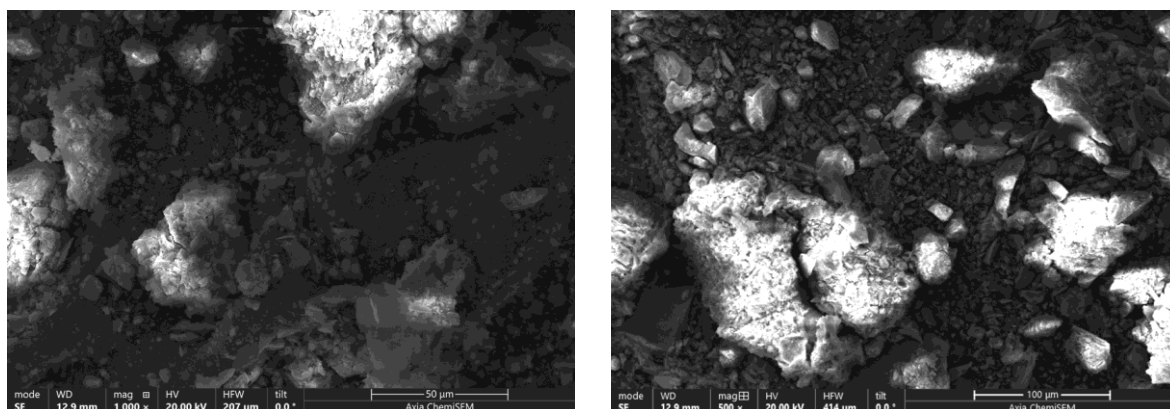


b)

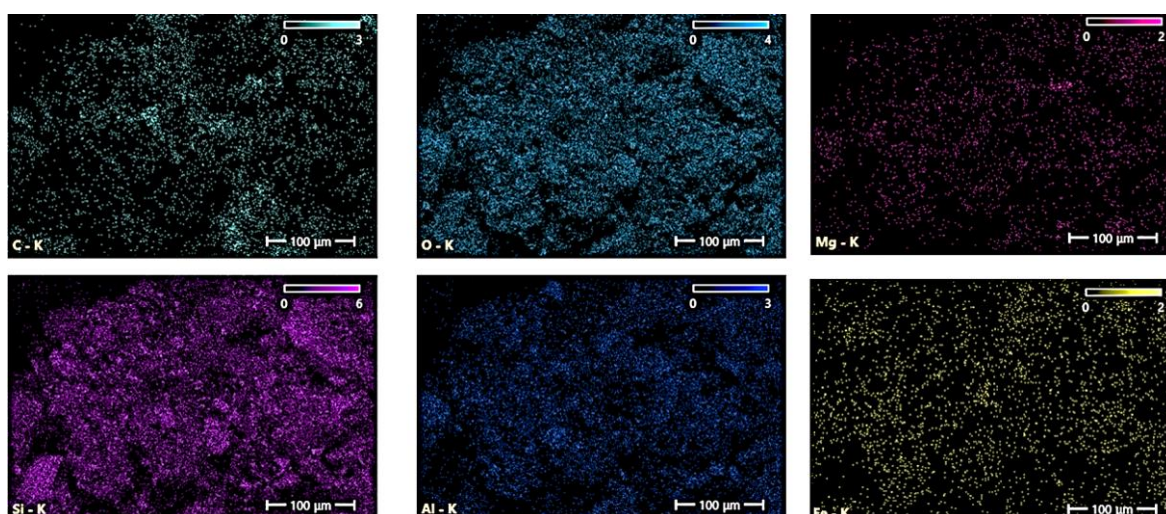


c)

Rys. 8.23. Widoki ziaren piaskowca po testach zużycia ściernego (Wariant 2),
a) zdefragmentowane i spękane ziarna, b) obtoczone ziarna, c) wynik analizy EDS
powierzchni ziaren.



Rys. 8.24. Widoki ziaren piaskowca po testach zużycia ściernego (Wariant 10)



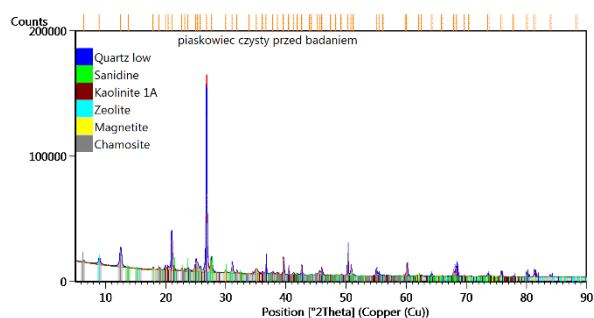
Rys. 8.25. Wyniki analizy rozkładu pierwiastków powierzchni z Rys. 8.24b

Jak już wspomniano, w celu stwierdzenia wpływu przeprowadzonych testów zużyciowych na skład mineralny badanych ścierni, przeprowadzono również testy z użyciem metody XRD, przy czym badania rozszerzono o wysuszoną mieszaninę piaskowca z wodą kopalnianą. Uzyskane wyniki przedstawiono na Rysunku 8.26.

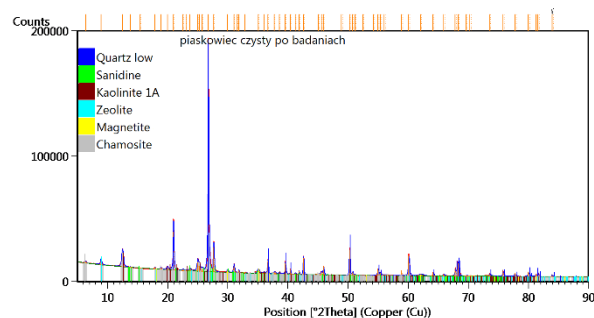
Badania ścierniwa użytego w Wariancie 2 wykazały, że głównym składnikiem, zarówno przed, jak i po testach, jest kwarc (SiO_2). Analiza dyfraktogramów potwierdziła również obecność innych krzemianów, takich jak zeolit i sanidyn. Zidentyfikowano także minerał ilasty kaolinit oraz magnetyt. Ponadto, w próbkach znaleziono niewielkie ilości szamozytu. Co istotne, badania nie wykazały obecności tlenków żelaza, ani fragmentów ogniw łańcucha, co sugeruje, że ich udział w ogólnym składzie ścierniwa jest pomijalny.

W przypadku mieszaniny wodno-ścierniej z Wariantu 10, dominującym minerałem był również kwarc (SiO_2). Podobnie jak w Wariancie 2, zidentyfikowano także inne minerały krzemianowe, w tym zeolit, sanidyn, minerał ilasty kaolinit oraz magnetyt. Dodatkowo, w próbce po teście zidentyfikowano hematyt (Fe_2O_3), krystalizujący w układzie heksagonalnym. Choć jego ilościowy udział był niewielki, wykryto go dzięki głównemu pikowi

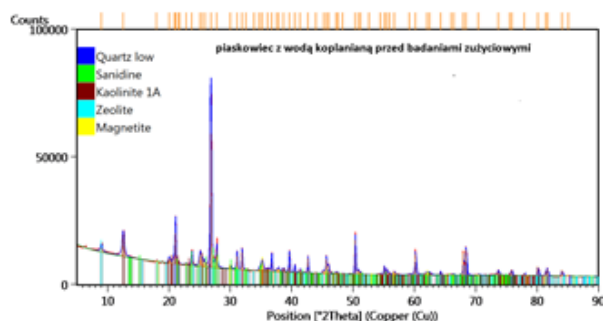
przy kącie $34,77^\circ$, co wskazuje, że już po 30 godzinach testu ścierniwo zawierało w sobie wystarczającą ilość produktów zużycia, by były one wykrywalne w analizie XRD.



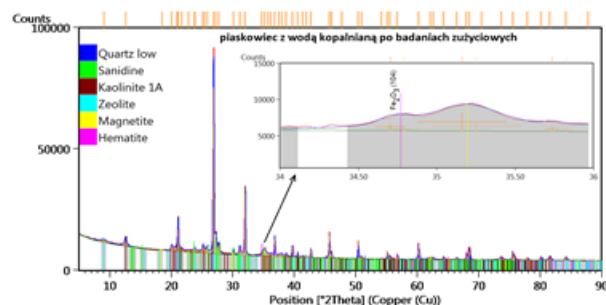
a)



b)



c)



d)

Rys. 8.26. Wyniki badań XRD, a) dyfraktogram ścierniwa mineralnego użytego w Wariancie 2 przed testami zużyciowymi, b) dyfraktogram ścierniwa mineralnego użytego w Wariancie 2 po testach zużyciowych, c) dyfraktogram mieszaniny wodno-mineralnej użytej w Wariancie 10 przed testami zużyciowymi, d) dyfraktogram mieszaniny wodno-mineralnej użytej w Wariancie 10 po testach zużyciowych.

9. IDENTYFIKACJA ODDZIAŁYWANIA INTERAKCYJNEGO PROCESÓW WIELOCZYNNIKOWEGO ZUŻYWANIA SIĘ PRZEGUBÓW OGNIW ŁAŃCUCHOWYCH

9.1. Dotychczasowe modele zużycia wieloczynnikowego

W zakresie zużycia wieloczynnikowego, polegającego na łącznym działaniu czynników zużyciowych i korozyjnych, określanego jako tribokoroza, powszechnie jest stosowany tzw. model Watsona [34], który opiera się na założeniu synergii pomiędzy tymi procesami. Całkowite zużycie V_C stanowi wypadkową trzech składowych: zużycia mechanicznego w warunkach braku korozji V_m , ubytku materiału wskutek korozji przebiegającej bez udziału tarcia V_k oraz składnika synergistycznego ΔV . Składnik ten uwzględnia zarówno wpływ procesów tarcowych na intensyfikację zjawisk korozyjnych $V_{m \rightarrow k}$, jak i oddziaływanie korozji na mechanizmy zużycia tribologicznego $V_{k \rightarrow m}$. Model ten jest opisany zależnością:

$$V_C = V_m + V_k + \Delta V = V_m + V_k + (V_{m \rightarrow k} + V_{k \rightarrow m}) \quad (9.1)$$

Istnienie synergii w procesie zużycia tribokorozyjnego potwierdzono także doświadczalnie w wielu badaniach, w tym [103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110], natomiast modele predykcji szybkości zużycia tribokorozyjnego przedstawione zostały m.in. w [111, 112, 113, 114].

Niewiele jednak spośród dostępnych prac dotyczy synergistycznego zużycia w rzeczywistych systemach tribologicznych. W pracach Tyczewskiego i innych [115, 116, 117, 118] zaproponowano zmodyfikowaną formę modelu Watsona, dostosowaną do specyfiki warunków eksploatacyjnych przemysłu cukrowniczego, w którym dominuje złożone zużycie o charakterze ścierno-korozyjno-mechanicznym.

W modelu Tyczewskiego [115] całkowite zużycie jest sumą oddziaływań mechanicznych I_M , korozyjnych I_K , ściernych I_S oraz efektów ich wzajemnych interakcji ΔI :

$$I_C^T = I_M + I_K + I_S + \Delta I \quad (9.2)$$

Składowa ΔI stanowi sumę synergistycznych efektów wynikających ze współdziałania procesów destrukcyjnych: ścierno-mechanicznych ΔI_{SM} , korozyjno-mechanicznych ΔI_{KM} , ścierno-korozyjnych ΔI_{SK} oraz jednoczesnego oddziaływania procesów ścierno-korozyjno-mechanicznych ΔI_{SKM} . Można to przedstawić w postaci wzoru:

$$\Delta I = \Delta I_{SM} + \Delta I_{KM} + \Delta I_{SK} + \Delta I_{SKM} \quad (9.3)$$

Przedstawione modele nie uwzględniają typowej dla branży górniczej zmienności sił obciążających dany system tribokorozyjny. Czynnik ten został uwzględniony przez Wieczorka [5] przy analizie synergii zachodzącej w procesach zużycia ścierno-dynamicznego i ścierno-korozyjno-dynamicznego (Autor ten, we wspomnianej pracy,

wprowadził dla tego kompleksu czynników degradacyjnych pojęcie zużycia tribokorozyjno-dynamicznego) bębnow łańcuchowych przenośników zgrzeblowych.

W przypadku zużycia ścierno-dynamicznego został zaproponowany model uwzględniający składową synergistyczną wywołaną siłami dynamicznymi w postaci:

$$Z_{SD} = Z_S + Z_D + \Delta Z_{DYN} = Z_S + \Delta Z_{SD} \quad (9.4)$$

gdzie:

Z_S – zużycie spowodowane oddziaływaniem ścierniwa mineralnego,

Z_D – zużycie spowodowane oddziaływaniem siły dynamicznej,

ΔZ_{SD} – składowa synergistyczna wynikająca z łącznego oddziaływania siły dynamicznej i ścierniwa.

W przedstawionym modelu zużycia ścierno-dynamicznego założono, że zużycie spowodowane siłą dynamiczną jest pomijalnie małe i nie było uwzględniane w dalszych obliczeniach.

Z kolei dla zużycia ścierno-korozyjno-dynamicznego, Wieczorek zaproponował model w postaci:

$$Z_{SDC} = Z_S + Z_C + \Delta Z_{SDC} \quad (9.5)$$

gdzie:

Z_C – zużycie spowodowane oddziaływaniem czynnika korozyjnego,

ΔZ_{SDC} – składowa synergistyczna wynikająca z łącznego oddziaływania siły dynamicznej, czynnika korozyjnego i ścierniwa.

Powyższe zależności zostały potwierdzone empirycznie serią testów stanowiskowych odtwarzających rzeczywistą pracę przenośnika zgrzeblowego w trakcie transportu zawodnionego urobku.

9.2. Podział zużycia łańcuchów z uwagi na rodzaj środowiska i warunki pracy

Zużycie ogniw łańcuchowych zależy od zestawienia czynników środowiskowych determinujących dany system tribologiczny lub tribokorozyjny. Modele zużycia powinny uwzględniać zarówno pojedyncze formy degradacji, jak i ich interakcje z innymi rodzajami wymuszeń środowiskowych. Powinny one także uwzględniać warunki pracy elementów maszyn podlegających procesom niszczenia.

Stąd też podstawowym rozróżnieniem, przyjętym na potrzeby modelowania interakcji procesu zużycia ogniw łańcuchowych, był podział ze względu na ruch ogniw w przegubie.

Zużycie zachodzące w przegubach ogniw łańcuchowych można zatem podzielić na:

- procesy niszczące występujące w nieruchomych lub quasi-nieruchomych przegubach ogniw,
- procesy niszczące mające miejsce w kątowo przemieszczających się przegubach.

Na potrzeby analizy zagadnień procesów zużywania łańcuchów przenośników zgrzeblowych mających miejsce w kątowno przemieszczających się przegubach, dokonano rozróżnienia 3 systemów tribokorozyjnych (w pracy nazywanych środowiskami górniczymi):

- środowisko górnicze suche,
- środowisko górnicze suche z wodą z układów zraszania,
- środowisko górnicze mokre.

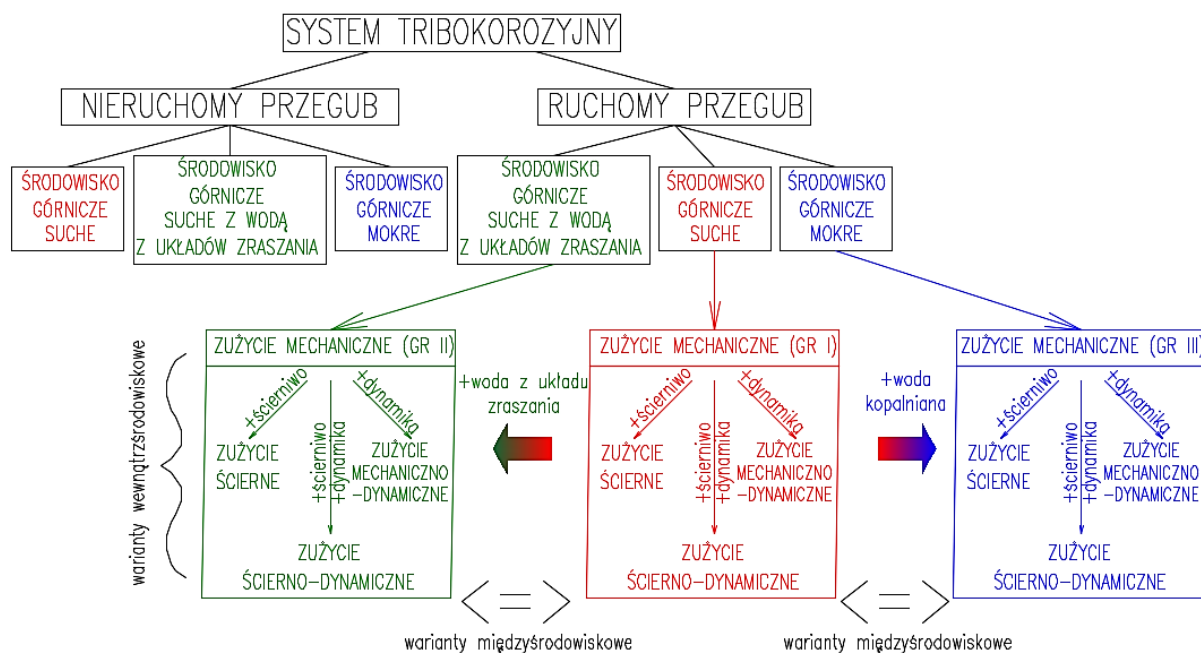
Środowisko górnicze suche charakteryzuje się brakiem obecności jakiegokolwiek wody (zarówno kopalnianej jak i z układu zraszania) w strefie współpracy ogniw łańcucha. Temu środowisku przyporządkowano Grupę I czynników środowiskowych z Tab. 5.1, czyli Warianty 1÷4. W przypadku definiowania zależności synergistycznych, składowe dotyczące tego środowiska wyróżnia indeks górny „DRY”.

Środowisko górnicze suche z wodą z układów zraszania charakteryzuje się obecnością wody technologicznej z układów zraszania w strefie współpracy ogniw łańcucha. Temu środowisku przyporządkowano Grupę II czynników środowiskowych z Tab. 5.1, czyli Warianty 5÷8. W przypadku definiowania zależności synergistycznych, składowe dotyczące tego środowiska wyróżnia indeks górny „DRY+H₂O”.

Środowisko górnicze mokre charakteryzuje się obecnością wody kopalnianej w strefie współpracy ogniw łańcucha. Temu środowisku przyporządkowano Grupę III czynników środowiskowych z Tab. 5.1, czyli Warianty 9÷12. W przypadku definiowania zależności synergistycznych, składowe dotyczące tego środowiska wyróżnia indeks górny „WET”.

Dla każdego z tych środowisk górniczych, w ramach poszczególnych grup czynników, zostały opracowane modele interakcyjne uwzględniające rodzaj i liczbę czynników degradacyjnych (determinant środowiskowych) definiujących poszczególne formy zużycia. Taki układ modeli w pracy określony został jako wewnętrzny (w ramach jednego systemu tribokorozyjnego). W ramach każdej grupy wariantów charakteryzujących dane środowisko górnicze rozróżniane są 4 formy zużycia, wzajemnie odpowiadające sobie pod względem podstawowej formy uszkodzenia, lecz różniące się środowiskiem korozyjnym systemu tribokorozyjnego (por. Tab. 8.1.) Możliwe więc było porównywanie efektu interakcyjnego dla danego sposobu niszczenia w zależności od oddziaływania czynnika korozyjnego. Z kolei taki układ modeli w pracy określono jako międzysystemowy (łączy dwa systemy tribokorozyjne). Przyjęty podział został przedstawiony na Rysunku 9.1.

Na bazie podziałów uwzględniających wzajemne przemieszczanie się ogniw w węźle tarciovym, formę niszczenia i rodzaj środowiska górniczego, w kolejnych podrozdziałach przedstawiono odpowiadające im modele zużycia, biorące pod uwagę interakcje między czynnikami degradacyjnymi.



Rys. 9.1. Podział środowisk górniczych z uwagi na obecność wyróżniającego czynnika degradacyjnego

9.3. Modele zużycia w nieruchomym przegubie ogniów łańcuchowych

W przypadku zużycia zachodzącego w nieruchomych lub quasi-nieruchomych przegubach ogniów rozróżnia się następujące możliwe nieskojarzone oddziaływania degradacyjne:

- korozję elektrochemiczną I_K materiału ogniów wywołaną zasoloną wodą (w przypadku górnictwa będzie to woda dołowa wypływająca z górotworu),
- oddziaływanie suchego ścierniwa I_S na powierzchnię ogniwa,
- oddziaływanie zmiennej siły dynamicznej I_D na powierzchnię ogniwa.

W powyższym podrozdziale zdefiniowano czynnik I_K jako składową zużycia wynikającą z obecności czynników korozyjnych oddziałujących na ogniwa łańcuchowe przy braku wzajemnego przemieszczenia ogniów. Zgodnie z tą definicją, składowa zużycia korozyjnego występuje zasadniczo tylko w mokrym środowisku górniczym i odpowiada wartościowi szybkości korozji rozpatrywanych wód kopalnianych. Co prawda, dla środowiska górniczego suchego z wodą z układów zraszania określono szybkość korozji wody demineralizowanej, ale wyniosła ona 0 mm/rok (Rozdział 7), tym samym formalnie należy przyjąć:

$$I_K^{\text{DRY}+\text{H}_2\text{O}} = 0 \quad (9.6)$$

Zjawisko występowania wody pochodzącej w procesów technologicznych mającej stały kontakt z łańcuchami przenośnikowymi i transportowanym ścierniwem zachodzi w rzeczywistych warunkach podczas postoju przenośnika.

Składowa zużycia korozyjnego w mokrym środowisku górniczym przyjmuje wartości szybkości korozji dla rozpatrywanych wód kopalnianych (wody kopalniane A÷D) większe od zera (patrz. Rys. 9.2), co można z kolei zapisać w postaci:

$$I_K^{WET} > 0 \quad (9.7)$$

Dodanie składników mineralnych do wody demineralizowanej powoduje utworzenie mieszaniny wodno-mineralnej, która posiada istotne własności korozyjne. Zmianie będzie także podlegał parametr szybkość korozji (Rys. 9.3.).

W ujęciu interakcyjnym można powyższe zapisać w postaci zależności:

$$I_{K+S}^{DRY+H_2O} = I_K^{DRY+H_2O} + \Delta I_{K+S}^{DRY+H_2O} > 0 \quad (9.8)$$

Składowa interakcyjna $\Delta I_{K+S}^{DRY+H_2O}$, jak wynika z Rysunku 9.3, ma charakter synergistyczny, gdyż ma wartość dodatnią, tym samym dodanie składnika mineralnego do wody demineralizowanej powoduje wzrost szybkości korozji ogniów łańcuchowych wytworzonej mieszaniny.

W przypadku dodania składników mineralnych do rozpatrywanych wód kopalnianych dojdzie również do utworzenia mieszanin wodno-mineralnych o zmienionych własnościach korozyjnych (Rys. 9.1).

Można zapisać te relacje jako zależność interakcyjną:

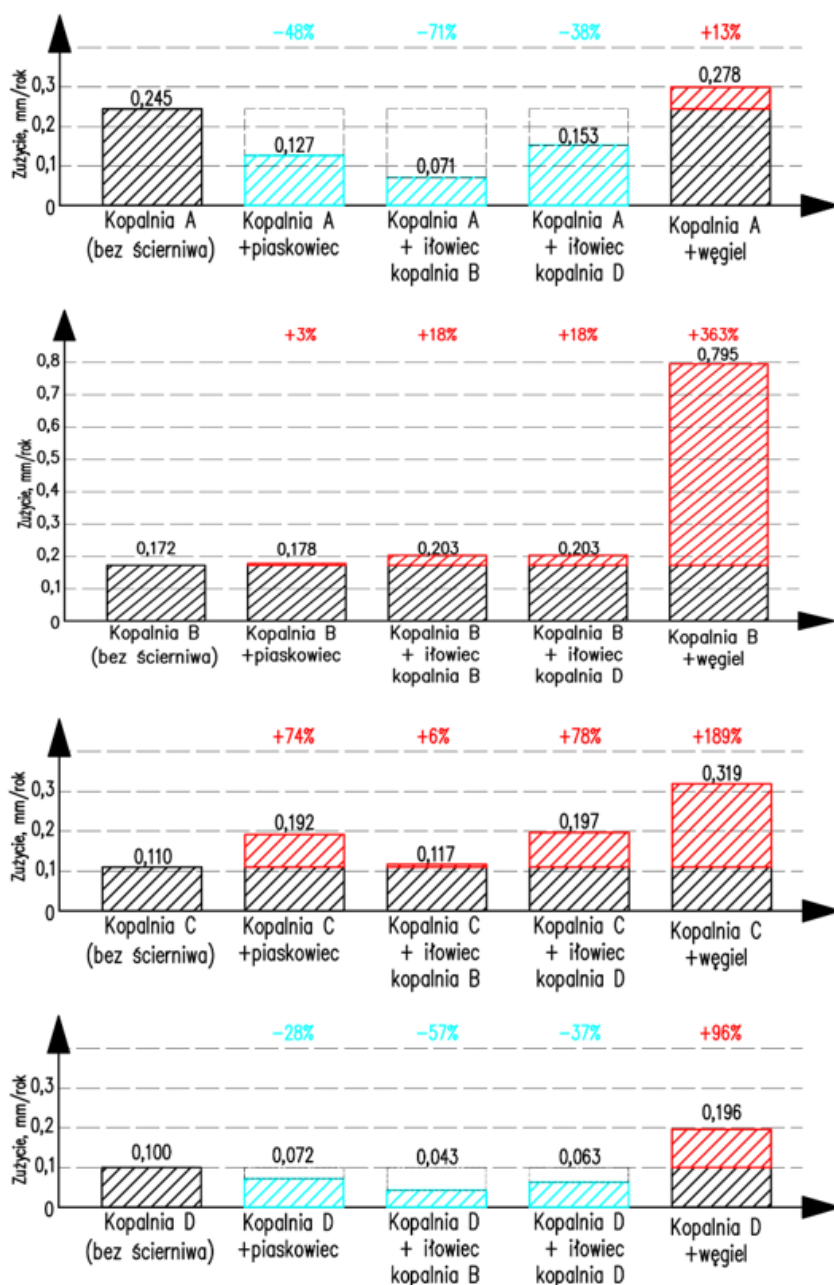
$$I_{K+S}^{WET} = I_K^{WET} + \Delta I_{K+S}^{WET} > 0 \quad (9.9)$$

W przypadku wszystkich wód kopalnianych, dodanie do nich węgla powoduje wzrost ich agresywności korozyjnej, czyli uzyskany zostanie efekt synergistyczny. W przypadku pozostałych materiałów mineralnych, efekt ten nie jest jednoznaczny, może być zarówno synergistyczny jak i antagonistyczny.

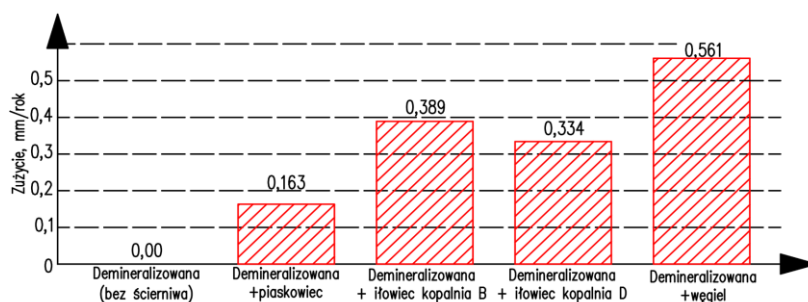
W celu określenia wartości składowych zużycia korozyjnego $I_{K+S}^{DRY+H_2O}$, I_K^{WET} i I_{K+S}^{WET} , dokonano obliczeń wartości zużycia korozyjnego czasie próby badawczej w postaci ubytku masowego i liniowego. Do obliczeń wykorzystano wzory (7.1) i (7.2), ponadto przyjęto czas badania równy 30 godzin, gęstość stali, z której wykonane są ogniwa łańcuchowe, równą 7860 kg/m^3 oraz pole powierzchni obydwu ogniów próbki równe $14\,674 \text{ mm}^2$.

Uzyskane wartości przedstawiono w Tabeli 9.1. Jak łatwo zauważyć, wyniki te są nawet o 5 rzędów wielkości mniejsze, od tych otrzymanych w badaniach stanowiskowych przy przemieszczającym się kątowno przegubie ogniów. Powoduje to, że nie będą one miały istotnego wpływu na obliczenia składowych interakcyjnych, dlatego też w ujęciu liczbowym zostaną pominięte przy ich wyliczeniu. Przy tworzeniu poszczególnych zależności składowe zużycia korozyjnego (I_K^{WET} i ΔI_{K+S}^{WET}) będą uwzględniane, gdyż w warunkach rzeczywistej eksploatacji trwającej nawet kilkanaście miesięcy, całkowity wpływ korozji będzie już znaczący.

W przypadku braku wzajemnego przemieszczenia ogni, czyli w sytuacji niefunkcjonującego przenośnika, może dojść do obecności ścierniwa mineralnego w otoczeniu tych ogni. W środowisku górniczym suchym, przy kontakcie materiału łańcuchów ze składnikami mineralnymi, nie dochodzi do korozji elektrochemicznej, a także do zużycia ściernego.



Rys. 9.2. Wyznaczone wartości szybkości korozji rozpatrywanych wód kopalnianych i ich mieszanin z badanymi surowcami mineralnymi.



Rys. 9.3. Wyznaczone wartości szybkości korozji wody demineralizowanej i jej mieszaniny z badanymi surowcami mineralnymi.

Tab. 9.1 Wartości zużycia wyznaczone dla składowej korozji $I_{K+S}^{DRY+H_2O}$

Rodzaj składowej zużycia		Woda demineralizowana+ Piaskowiec	Woda demineralizowana + łowiec Kopalnia B	Woda demineralizowana + łowiec Kopalnia D	Woda demineralizowana + Węgiel
$I_{K+S}^{DRY+H_2O}$	ubytek masowy, g	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$3,1 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$5,3 \cdot 10^{-6}$
	głębokość zużycia, mm	$180 \cdot 10^{-6}$	$360 \cdot 10^{-6}$	$420 \cdot 10^{-6}$	$610 \cdot 10^{-6}$
Rodzaj składowej zużycia		Woda kopalniana A	Woda kopalniana B	Woda kopalniana C	Woda kopalniana D
I_K^{WET}	ubytek masowy, g	$270 \cdot 10^{-6}$	$190 \cdot 10^{-6}$	$120 \cdot 10^{-6}$	$110 \cdot 10^{-6}$
	głębokość zużycia, mm	$2300 \cdot 10^{-6}$	$1600 \cdot 10^{-6}$	$1000 \cdot 10^{-6}$	$900 \cdot 10^{-6}$
Rodzaj składowej zużycia		Woda kopalniana A + piaskowiec	Woda kopalniana B + piaskowiec	Woda kopalniana C + piaskowiec	Woda kopalniana D + piaskowiec
I_{K+S}^{WET}	ubytek masowy, g	$140 \cdot 10^{-6}$	$190 \cdot 10^{-6}$	$210 \cdot 10^{-6}$	$80 \cdot 10^{-6}$
	głębokość zużycia, mm	$1200 \cdot 10^{-6}$	$1700 \cdot 10^{-6}$	$800 \cdot 10^{-6}$	$700 \cdot 10^{-6}$
Rodzaj składowej zużycia		Woda kopalniana A + łowiec Kopalnia B	Woda kopalniana B + łowiec Kopalnia B	Woda kopalniana C + łowiec Kopalnia B	Woda kopalniana D + łowiec Kopalnia B
I_{K+S}^{WET}	ubytek masowy, g	$170 \cdot 10^{-6}$	$220 \cdot 10^{-6}$	$210 \cdot 10^{-6}$	$70 \cdot 10^{-6}$
	głębokość zużycia, mm	$1400 \cdot 10^{-6}$	$1900 \cdot 10^{-6}$	$1800 \cdot 10^{-6}$	$600 \cdot 10^{-6}$
Rodzaj składowej zużycia		Woda kopalniana A + łowiec Kopalnia D	Woda kopalniana B + łowiec Kopalnia D	Woda kopalniana C + łowiec Kopalnia D	Woda kopalniana D + łowiec Kopalnia D
I_{K+S}^{WET}	ubytek masowy, g	$80 \cdot 10^{-6}$	$220 \cdot 10^{-6}$	$130 \cdot 10^{-6}$	$50 \cdot 10^{-6}$
	głębokość zużycia, mm	$700 \cdot 10^{-6}$	$1900 \cdot 10^{-6}$	$1100 \cdot 10^{-6}$	$400 \cdot 10^{-6}$
Rodzaj składowej zużycia		Woda kopalniana A + Węgiel	Woda kopalniana B + Węgiel	Woda kopalniana C + Węgiel	Woda kopalniana D + Węgiel
I_{K+S}^{WET}	ubytek masowy, g	$300 \cdot 10^{-6}$	$860 \cdot 10^{-6}$	$340 \cdot 10^{-6}$	$210 \cdot 10^{-6}$
	głębokość zużycia, mm	$2600 \cdot 10^{-6}$	$7500 \cdot 10^{-6}$	$3000 \cdot 10^{-6}$	$1800 \cdot 10^{-6}$

Powyższe założenie opisują zależności:

$$I_K^{DRY} = 0 \quad (9.10)$$

$$I_S^{DRY} = 0 \quad (9.11)$$

W przypadku eksploatacji przenośników górniczych możliwa jest sytuacja nieudanego jego rozruchu, co może spowodować impulsowe napięcie łańcucha, bez jego przemieszczenia w przegubie. Za pracę [5] przyjęto, że w środowisku suchym, składowa zużycia wynikająca z wymuszeń dynamicznych oddziałujących na ogniwa łańcuchowe będzie bliska wartości zero, co wyraża równanie:

$$I_D^{DRY} \cong 0 \quad (9.12)$$

W nieruchomym przegubie są możliwe różne dwu- lub trójskładnikowe skojarzenia wyżej wymienionych czynników. Każde z tych skojarzeń może wywołać własny efekt interakcyjny. W warunkach stanowiskowych, przy nieruchomych ogniwach łańcucha, trudno osiągnąć wyizolowane warunki zużycia tylko dla dwóch czynników. W celu oszacowania skutków możliwych interakcji wieloczynnikowych I_{PN} postanowiono przeprowadzić badania stanowiskowe, w warunkach typowych dla środowiska górniczego mokrego, łączące wszystkie trzy czynniki degradacyjne. Dla takiego zestawienia czynników środowiskowych określono zależności interakcyjne w postaci:

$$I_{PN}^{WET} = I_S^{WET} + I_D^{WET} + I_K^{WET} + \Delta I_{PN}^{WET} \quad (9.13)$$

$$\Delta I_{PN}^{WET} = \Delta I_{K+D}^{WET} + \Delta I_{K+S}^{WET} + \Delta I_{S+D}^{WET} + \Delta I_{S+D+K}^{WET} \quad (9.14)$$

gdzie:

I_{PN}^{WET} – zużycie całkowite w przegubie nieruchomym.

I_S^{WET} – składowa zużycia wynikająca z obecności ścierniwa mineralnego w otoczeniu ogniów łańcuchowych przy braku wzajemnego przemieszczenia ogniów,

I_D^{WET} – składowa zużycia wynikająca z wymuszeń dynamicznych oddziałujących na ogniwa łańcuchowe przy braku wzajemnego przemieszczenia ogniów,

I_K^{WET} – składowa zużycia wynikająca z obecności czynników korozyjnych oddziałujących na ogniwa łańcuchowe przy braku wzajemnego przemieszczenia ogniów,

ΔI_{S+D}^{WET} – składowa interakcyjna wynikająca z wzajemnego oddziaływania ścierniwa mineralnego i wymuszeń dynamicznych przy braku wzajemnego przemieszczenia ogniów,

ΔI_{S+K}^{WET} – składowa interakcyjna wynikająca z wzajemnego oddziaływania ścierniwa mineralnego i czynników korozyjnych przy braku wzajemnego przemieszczenia ogniów,

ΔI_{K+D}^{WET} – składowa interakcyjna wynikająca z wzajemnego oddziaływania czynników korozyjnych i wymuszeń dynamicznych przy braku wzajemnego przemieszczenia ogniów,

ΔI_{S+D+K}^{WET} – składowa interakcyjna wynikająca z wzajemnego oddziaływania ścierniwa mineralnego, czynników korozyjnych i wymuszeń dynamicznych przy braku wzajemnego przemieszczenia ogniów.

Wartość zużycia całkowitego I_{PN}^{WET} w przegubie nieruchomym została określona w badaniach stanowiskowych w warunkach określonych Wariantem 0 wg. Tabeli 5.1

(tzw. Wariant specjalny). Jak wynika z Rozdziału 8, składowa I_{PN} reprezentowana przez wartość średniego ubytku masy próbek wynosi $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ g} \pm 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ g}$. Zaobserwowane zużycie było ponad stukrotnie niższe, niż w przypadku Wariantu 7, który uzyskał najniższy wynik spośród wszystkich przeprowadzonych testów. To wskazuje, że łączne oddziaływanie siły dynamicznej w środowisku ścierny-korozyjnym i przy braku przemieszczeń ogniów w przegubie ma znikomy wpływ na zużycie i nie będzie ono, jak i też pozostałe składowe (za wyjątkiem składowej zużycia korozyjnego I_K^{WET} i składowej interakcyjnej ΔI_{S+K}^{WET} , które są wymagane dla zagwarantowania poprawności tych modeli), brane pod uwagę w przy opracowywaniu modelu interakcji.

Konsekwencją powyższego stwierdzenia, dla sytuacji braku wzajemnego przemieszczenia ogniów, są zależności:

$$I_{PN}^{WET} \cong 0 \quad (9.15)$$

$$\Delta I_{PN}^{WET} \cong 0 \quad (9.16)$$

9.4. Modele interakcyjne wewnątrzsystemowe środowiska górniczego suchego w warunkach przemieszczających się ogniów

W przypadku środowiska górniczego suchego, jak już wspomniano, przyjęto, że jest to system tribologiczny (z uwagi na brak wyraźnego czynnika korozyjnego postanowiono stosować to określenie, w przeciwieństwie do dwóch pozostałych środowisk, które zawierają determinanty środowiska korozyjnego i będą określane jako systemy tribokorozyjne) charakteryzujący się brakiem obecności jakiegokolwiek wody – zarówno kopalnianej jak i pochodzącej z układu zraszania – w strefie współpracy ogniów łańcucha. Podobną sytuację obserwuje się podczas stosowania technologii eksploatacji korytarzowej prowadzonej z wykorzystaniem metod strzałowych w wyrobisku suchym.

W przyjętym podziale badań stanowiskowych, do opisu tego środowiska w zakresie zależności synergistycznych lub antagonistycznych, wykorzystane zostały wyniki uzyskane dla Grupy I czynników środowiskowych z Tab. 5.1, czyli Warianty 1÷4.

W poniższych podpunktach przedstawione zostały zależności interakcyjne dotyczące poszczególnych przypadków eksploatacyjnych.

9.4.1. Model interakcyjny procesu zużycia Wariantu 1

W Wariacie 1 dochodziło do kątownego przemieszczenia ogniów łańcuchowych poddanych stałemu obciążeniu grawitacyjnemu bez obecności żadnego dodatkowego medium. Jak już ustalono w Rozdziale 8, podstawową formą zużycia jest zużycie mechaniczne wynikające z wzajemnego przemieszczania się ogniów łańcuchowych w przegubie, a przyczyną degradacji – wzajemne oddziaływanie wierzchołków nierówności obu kontaktujących się powierzchni. Dla Wariantu 1, zużycie można określić w postaci:

$$I_{W1} = I_M^{DRY} \quad (9.17)$$

gdzie:

I_{W1} – składowa zużycia całkowitego Wariantu 1,

I_M^{DRY} – składowa zużycia mechanicznego występującego podczas kątownego ruchu ogniów w przegubie.

Wartość składowej zużycia I_M^{DRY} stanowi poziom odniesienia dla ustalenia ewentualnych zależności synergistycznych związanych ze złożonymi formami niszczenia w środowisku górnym suchym.

9.4.2. Model interakcyjny procesu zużycia Wariantu 2

Głównym czynnikiem degradującym w przypadku Wariantu 2 jest obecność w obszarze współpracy ogniów ścierniwa mineralnego (piaskowca), które powoduje zużycie ścierni obu powierzchni. Na potrzeby modelu interakcji tego Wariantu przyjęto, że składowa zużycia tego wariantu I_{W2} stanowi sumę zużycia mechanicznego oraz składowej interakcyjnej wynikającej z oddziaływania ścierniwa na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kątownego przemieszczania się ogniów łańcuchowych.

Dla Wariantu 2, zużycie można określić w postaci:

$$I_{W2} = I_M^{DRY} + \Delta I_{M+\dot{S}}^{DRY} \quad (9.18)$$

gdzie:

I_{W2} – składowa zużycia całkowitego Wariantu 2,

$\Delta I_{M+\dot{S}}^{DRY}$ – składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania ścierniwa na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kątownego przemieszczania się ogniów łańcuchowych.

9.4.3. Model interakcyjny procesu zużycia Wariantu 3

W przypadku Wariantu 3 dochodzi do zużycia mechanicznego, intensyfikowanego wymuszeniami dynamicznymi (w pracy na określenie tej formy zużycia stosowano sformułowanie: zużycie mechaniczno-dynamiczne).

Analogicznie do wcześniejszych zależności, składowa zużycia całkowitego Wariantu 3 stanowi sumę wartości zużycia mechanicznego podczas współpracy ogniów, wymuszeń dynamicznych oraz interakcji między tymi czynnikami. W przypadku dodatkowych wymuszeń dynamicznych wcześniej przyjęto, że składowa zużycia wynikająca z wymuszeń dynamicznych oddziałujących na ogniwa łańcuchowe będzie równa zero (por. równanie 9.12). Stąd zależność przyjmie postać:

$$I_{W3} = I_M^{DRY} + \Delta I_{M+D}^{DRY} \quad (9.19)$$

gdzie:

I_{W3} – składowa zużycia całkowitego Wariantu 3,

ΔI_{M+D}^{DRY} – składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania wymuszeń dynamicznych na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kątownego przemieszczania się ogniów łańcuchowych.

9.4.4. Model interakcyjny procesu zużycia Wariantu 4

Podobnie jak w przypadku Wariantu 2, głównym czynnikiem degradującym w przypadku Wariantu 2 jest obecność w obszarze współpracy ogniów ścierniwa mineralnego, jednakże w układzie tym dochodzi do dodatkowych oddziaływań dynamicznych (w pracy na określenie tej formy zużycia będzie stosowane sformułowanie zużycie ścierno-dynamiczne). Składowa zużycia I_{W4} stanowi sumę wartości zużycia mechanicznego podczas współpracy ogniów bez dodatkowych czynników oraz interakcji wynikających z obecności ścierniwa mineralnego i dodatkowych wymuszeń dynamicznych.

$$I_{W4} = I_M^{DRY} + \Delta I_{M+D+\dot{\zeta}}^{DRY} \quad (9.20)$$

gdzie:

I_{W4} – składowa zużycia całkowitego Wariantu 4,

$\Delta I_{M+D+\dot{\zeta}}^{DRY}$ – składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania ścierniwa i wymuszeń dynamicznych na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kątownego przemieszczania się ogniów łańcuchowych.

Składową $\Delta I_{M+D+\dot{\zeta}}^{DRY}$ można określić jako sumę składowych interakcyjnych wynikających z wpływu ścierniwa i wymuszeń dynamicznych na proces zużycia mechanicznego, zachodzący podczas kątownego przemieszczania się ogniów łańcuchowych oraz wzajemnej interakcji tych dwóch czynników. Opisać to można zależnością:

$$\Delta I_{M+D+\dot{\zeta}}^{DRY} = \Delta I_{M+\dot{\zeta}}^{DRY} + \Delta I_{M+D}^{DRY} + \Delta I_{D \rightarrow \dot{\zeta}}^{DRY} \quad (9.21)$$

gdzie:

$\Delta I_{D \rightarrow \dot{\zeta}}^{DRY}$ – składowa interakcyjna wynikająca wzajemnego oddziaływania wymuszeń dynamicznych na ścierniwo.

Model zużycia dla niniejszego wariantu przyjmie wobec tego postać:

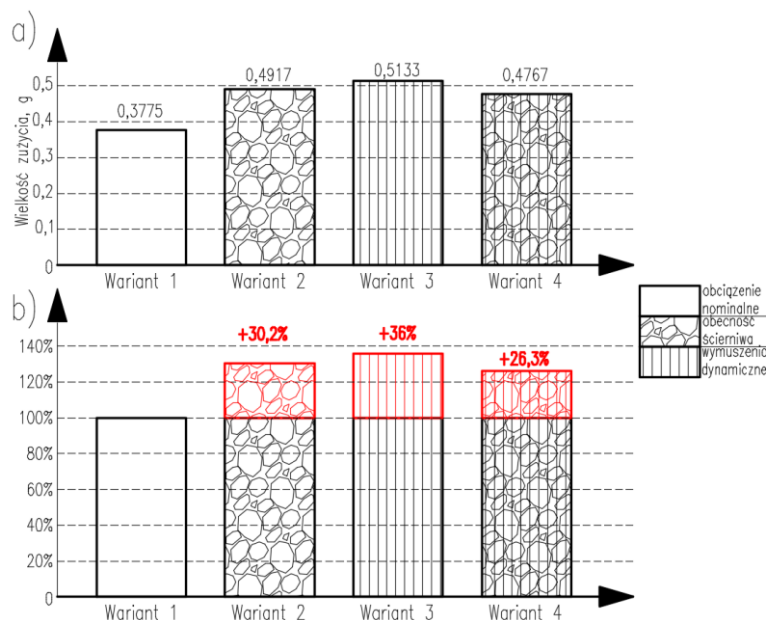
$$I_{W4} = I_M^{DRY} + \Delta I_{M+\dot{\zeta}}^{DRY} + \Delta I_{M+D}^{DRY} + \Delta I_{D \rightarrow \dot{\zeta}}^{DRY} \quad (9.22)$$

9.4.5. Składowe interakcyjne procesu zużywania w środowisku górniczym suchym (Grupa I wariantów czynników środowiskowych)

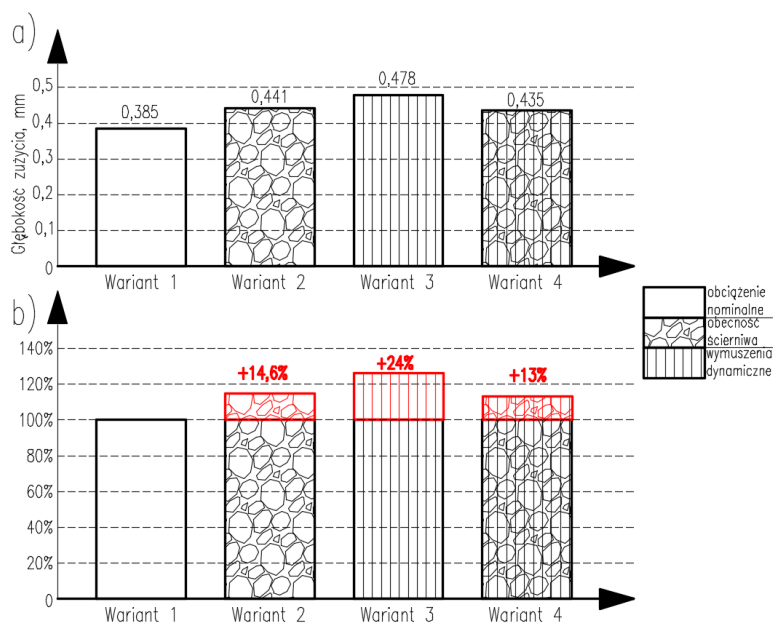
W celu wyznaczenia liczbowych wartości poszczególnych składowych zużycia i czynników interakcyjnych wykorzystano wyniki uzyskane w Rozdziale 8. Dla przyjętego wewnątrzsystemowego sposobu określenia zależności synergistycznych lub

antagonistycznych dla środowiska górniczego suchego w warunkach przemieszczających się ogniów, wymagane jest przyjęcie poziomu odniesienia. Jak już wcześniej wspomniano, jako ten poziom przyjęto wartość zużycia mechanicznego Wariantu 1.

Na Rysunku 9.4 zaprezentowano, w formie wykresów słupkowych, wartości ubytku masy uzyskane w stanowiskowych badaniach Wariantów 1÷4, natomiast na Rysunku 9.5 – odpowiadające im ubytki liniowe.



Rys. 9.4. Wyniki badań ubytku masy wyznaczone podczas stanowiskowych badań Wariantów 1÷4, a – wartości bezwzględne, b – zmiana procentowa względem wariantu odniesienia.



Rys. 9.5. Wyniki badań ubytku liniowego (głębokość zużycia) wyznaczone podczas stanowiskowych badań Wariantów 1÷4, a – wartości bezwzględne, b – zmiana procentowa względem wariantu odniesienia.

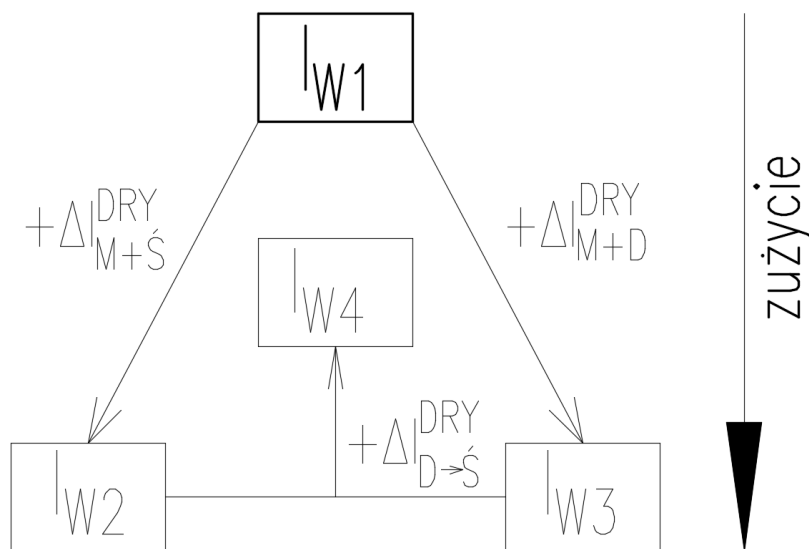
Jak można zauważyć na przedstawionych Rysunkach 9.4 i 9.5, między procesem zużycia mechanicznego zachodzącym podczas kątownego przemieszczania się ogniwa łańcuchowych i każdym z czynników degradacyjnych, ścierniwa i wymuszeń dynamicznych, dochodzi do wyraźnego synergizmu. Dodanie ścierniwa mineralnego spowodowało wzrost ubytku masowego względem wariantu odniesienia o średnio 30,2% oraz 14,6% w przypadku pomiaru maksymalnej głębokości zużycia z wykorzystaniem technologii skanowania przestrzennego. W przypadku dodatkowych wymuszeń dynamicznych, również zaobserwowano synergizm zużycia o średniej wartości 36% w przypadku pomiaru ubytku masowego oraz 24% w przypadku pomiaru maksymalnej głębokości zużycia próbek ogniwa łańcuchowego.

Dla przypadku oddziaływania ścierniwa mineralnego, jak i wymuszeń dynamicznych na proces zużycia mechanicznego zachodzący podczas kątownego przemieszczania się ogniwa łańcuchowych (Wariant 4), wzrost zużycia mierzonego ubytkiem masy względem wariantu odniesienia wynosił średnio 26,3% oraz 13% w przypadku pomiaru maksymalnej głębokości zużycia. W tym przypadku również występuje synergizm względem wariantu bazowego, jednak składowa interakcyjna, wynikająca ze wzajemnego oddziaływania wymuszeń dynamicznych na ścierniwo $\Delta I_{D \rightarrow S}$ przyjmuje wartości ujemne. Świadczy to o tym, że pod wpływem zmiennych sił dynamicznych zachodzą procesy ograniczające oddziaływanie ściernie składników mineralnych. Jak wynika z przeprowadzonej analizy mechanizmów niszczenia powierzchni ogniwa, spowodowane jest to najprawdopodobniej intensywniejszym niż w przypadku zużycia ściernego rozkruszaniem ziaren piaskowca podczas zużycia ściernio-dynamicznego, co powoduje, że ich oddziaływanie skrawające jest mniejsze, niż w przypadku ziaren większych rozkruszanych stopniowo. Dodatkowo podczas procesu zużycia tworzą się obszary z wbitymi ziarnami, zarówno rozkruszonymi, jak i nierozkruszonymi, które zmieniają dominującą formę zużycia w luźnym ścierniwie na mniej intensywną formę zużycia ścierniwem umocowanym w powierzchni współpracującej.

Tab. 9.2. Wyznaczone dla środowiska górniczego suchej składowa zużycia i składowe interakcyjne

Wariant	Wyznaczona składowa	Wartość składowej		Charakter zmiany
		Ubytek masy, g	Głębokość zużycia, mm	
1	$I_M^{DRY} = I_{W1}$	0,378	0,385	-
2	$\Delta I_{M+S}^{DRY} = I_{W2} - I_M^{DRY}$	0,114	0,056	Synergia
3	$\Delta I_{M+D}^{DRY} = I_{W3} - I_M^{DRY}$	0,136	0,093	Synergia
4	$\Delta I_{M+D+S}^{DRY} = I_{W4} - I_M^{DRY}$	0,099	0,050	Synergia
4	$\Delta I_{D \rightarrow S}^{DRY} = I_{W4} - I_M^{DRY} - (\Delta I_{M+S}^{DRY} + \Delta I_{M+D}^{DRY})$	-0,151	-0,099	Antagonizm

Na Rysunku 9.6 przedstawiono graficznie zależności interakcyjne zachodzące w środowisku górnictwie suchym.



Rys. 9.6. Graficzne przedstawienie zależności interakcyjnych zachodzących w środowisku górnictwie suchym

9.5. Modele interakcyjne wewnątrzsystemowe środowiska górnictwa suchego z wodą z układów zraszania w warunkach przemieszczających się ogniw

W suchym środowisku górnictwie, gdzie woda pochodzi z systemów zraszania, procesy zużycia materiałów należy rozpatrywać jako system tribokorozyjny. W tym systemie czynnikiem korozyjnym jest mieszanina urobku mineralnego z czystą technologicznie wodą, używaną między innymi do zraszania. Podobna sytuacja zachodzi w przypadku stosowania technologii eksploatacji korytarzowej z użyciem kombajnu wyposażonego w system zraszania wodą w trakcie urabiania. W celu opisu synergistycznych i antagonistycznych zależności w badanym środowisku, wykorzystano wyniki uzyskane dla Grupy II czynników środowiskowych (Warianty 5–8) z Tabeli 5.1.

Poniższe podpunkty przedstawiają zależności interakcyjne właściwe dla poszczególnych warunków eksploatacyjnych.

9.5.1. Model interakcyjny procesu zużycia Wariantu 5

W Wariantcie 5 analizowano przypadek kątownego przemieszczania ogniw łańcuchowych poddanych stałemu obciążeniu grawitacyjnemu w obecności wody demineralizowanej. Zidentyfikowaną formą zużywania zachodzącą podczas testu Wariantu 5 jest zużycie mechaniczne wynikające z wzajemnego przemieszczania się ogniw łańcuchowych w przegubie, a przyczyną degradacji – wzajemne oddziaływanie wierzchołków nierówności

obu współpracujących powierzchni w obecności wody bez czynników korozyjnych. Dla Wariantu 5, zużycie całkowite można określić za pomocą następującego wyrażenia:

$$I_{W5} = I_M^{DRY+H_2O} \quad (9.23)$$

gdzie:

I_{W5} – składowa zużycia całkowitego Wariantu 5,

$I_M^{DRY+H_2O}$ – składowa zużycia mechanicznego występującego podczas kątownego ruchu ogniw w przegubie w obecności wody demineralizowanej.

Wartość składowej zużycia $I_M^{DRY+H_2O}$ stanowi poziom odniesienia dla ustalenia ewentualnych zależności synergistycznych związanych ze złożonymi formami niszczenia w środowisku górnictwa suchym z wodą z układów zraszania.

9.5.2. Model interakcyjny procesu zużycia Wariantu 6

W Wariantcie 6 głównym czynnikiem degradującym jest mieszanina ścierniwa mineralnego (piaskowca) i wody demineralizowanej. Powoduje ona zużycie ścierno-korozyjne obu współpracujących powierzchni (w Rozdziale 8 określono wstępnie dla tego wariantu formę zużywania jako zużycie ściernie w obecności wody, jednakże stwierdzone produkty korozji uzasadniają użycie nazewnictwa: zużycie ścierno-korozyjne). W celu określenia zależności interakcyjnych tego wariantu założono, że składowa zużycia I_{W6} stanowi sumę: zużycia mechanicznego w obecności wody demineralizowanej, zużycia korozyjnego mieszaniny ścierniwa i wody demineralizowanej w nieruchomym przegubie ogniw łańcuchowych oraz składowej interakcyjnej wynikającej z oddziaływania wodnej mieszaniny ścierniwa na proces zużycia mechanicznego, zachodzącego podczas kątownego przemieszczania się ogniw łańcuchowych.

Dla Wariantu 6, zużycie można określić w postaci:

$$I_{W6} = I_M^{DRY+H_2O} + I_{K+\dot{S}}^{DRY+H_2O} + \Delta I_{M+\dot{S}}^{DRY+H_2O} = I_M^{DRY+H_2O} + \Delta I_{M+\dot{S}}^{DRY+H_2O} \quad (9.24)$$

gdzie:

I_{W6} – składowa zużycia całkowitego Wariantu 6,

$I_{K+\dot{S}}^{DRY+H_2O}$ – składowa zużycia wynikająca z oddziaływania korozyjnego mieszaniny ścierniwa i wody demineralizowanej w nieruchomym przegubie ogniw łańcuchowych.

$\Delta I_{M+\dot{S}}^{DRY+H_2O}$ – składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania ścierniwa na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kątownego przemieszczania się ogniw łańcuchowych w obecności wody z układów zraszania.

W analizowanym Wariantcie 6, pominięto wartość składowej $I_{K+\dot{S}}^{DRY+H_2O}$ z uwagi na jej niewielką wartość (por. pkt. 9.3).

9.5.3. Model interakcyjny procesu zużycia Wariantu 7

W Wariacie 7 analizowano przypadek kąтового przemieszczania ogniów łańcuchowych poddanych stałemu obciążeniu grawitacyjnemu w obecności wody demineralizowanej i dodatkowych wymuszeń dynamicznych. Idąc tokiem postępowania z wcześniejszych zależności, składowa zużycia całkowitego Wariantu 7 stanowi sumę wartości zużycia mechanicznego podczas współpracy ogniów w obecności czystej chemicznie wody, wymuszeń dynamicznych oraz interakcji między tymi czynnikami. Analogicznie do poprzednich wariantów, w przypadku dodatkowych wymuszeń dynamicznych przyjęto, że składowa zużycia wynikająca z wymuszeń dynamicznych oddziałujących na ogniwa łańcuchowe będzie równa zero (por. równanie 9.12). Stąd zależność przyjmie postać:

$$I_{W7} = I_M^{DRY+H_2O} + \Delta I_{M+D}^{DRY+H_2O} \quad (9.25)$$

gdzie:

I_{W7} – składowa zużycia całkowitego Wariantu 7,

$\Delta I_{M+D}^{DRY+H_2O}$ – składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania wymuszeń dynamicznych na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kąтового przemieszczania się ogniów łańcuchowych w obecności wody z układów zraszania.

9.5.4. Model interakcyjny procesu zużycia Wariantu 8

Analogicznie do przypadku Wariantu 6, głównym czynnikiem degradującym w przypadku Wariantu 8 jest obecność w obszarze współpracy ogniów ścierniwa mineralnego zmieszanego z wodą z układów zraszania. W układzie tym dochodzi jednak do dodatkowych oddziaływań dynamicznych. Składowa zużycia I_{W8} stanowi sumę wartości zużycia mechanicznego podczas współpracy ogniów w środowisku wody z układów zraszania, zużycia korozyjnego mieszaniny ścierniwa i wody demineralizowanej w nieruchomym przegubie ogniów łańcuchowych oraz interakcji wynikających z obecności ścierniwa mineralnego i dodatkowych wymuszeń dynamicznych.

$$I_{W8} = I_M^{DRY+H_2O} + I_{K+\dot{S}}^{DRY+H_2O} + \Delta I_{M+D+\dot{S}}^{DRY+H_2O} = I_M^{DRY+H_2O} + \Delta I_{M+D+\dot{S}}^{DRY+H_2O} \quad (9.26)$$

gdzie:

I_{W8} – składowa zużycia całkowitego Wariantu 8,

$\Delta I_{M+D+\dot{S}}^{DRY+H_2O}$ – składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania mokrego ścierniwa (woda z układu zraszania) i wymuszeń dynamicznych na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kąтового przemieszczania się ogniów łańcuchowych.

Składową $\Delta I_{M+D+\dot{S}}^{DRY+H_2O}$ można określić jako sumę składowych interakcyjnych wynikających z wpływu mokrego ścierniwa (woda z układów zraszania) i wymuszeń dynamicznych na proces zużycia mechanicznego zachodzący podczas kąтового przemieszczania się ogniów

łańcuchowych oraz wzajemnej interakcji tych dwóch czynników. Opisać to można zależnością:

$$\Delta I_{M+D+\dot{S}}^{DRY+H_2O} = \Delta I_{M+\dot{S}}^{DRY+H_2O} + \Delta I_{M+D}^{DRY+H_2O} + \Delta I_{D \rightarrow \dot{S}}^{DRY+H_2O} \quad (9.27)$$

gdzie:

$\Delta I_{D \rightarrow \dot{S}}^{DRY+H_2O}$ – składowa interakcyjna wynikająca wzajemnego oddziaływania wymuszeń dynamicznych na mokre ścierniwo.

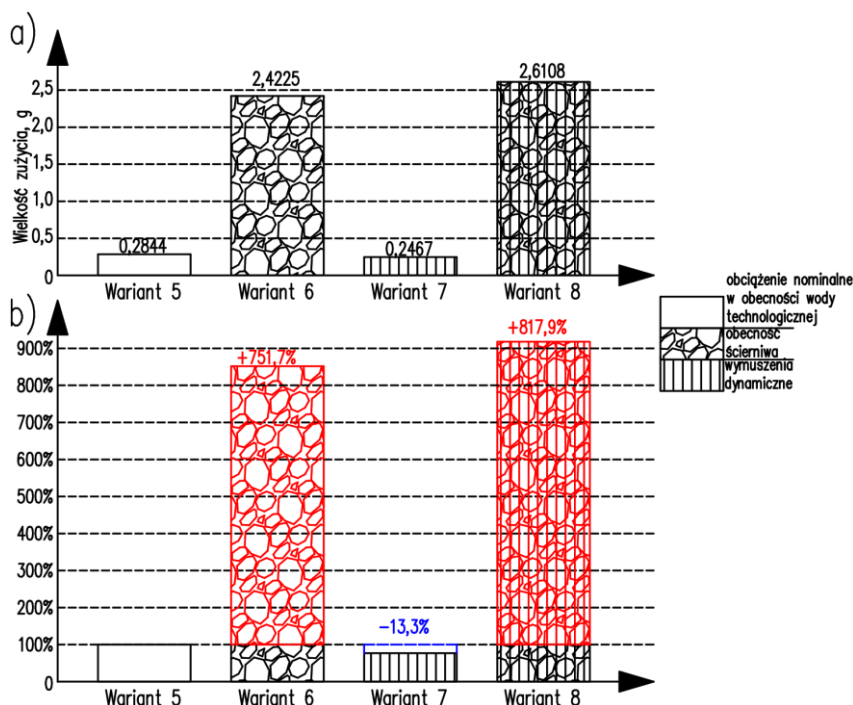
Model zużycia dla niniejszego wariantu przyjmie wobec tego postać:

$$I_{W8} = I_M^{DRY+H_2O} + \Delta I_{M+\dot{S}}^{DRY+H_2O} + \Delta I_{M+D}^{DRY+H_2O} + \Delta I_{D \rightarrow \dot{S}}^{DRY+H_2O} \quad (9.28)$$

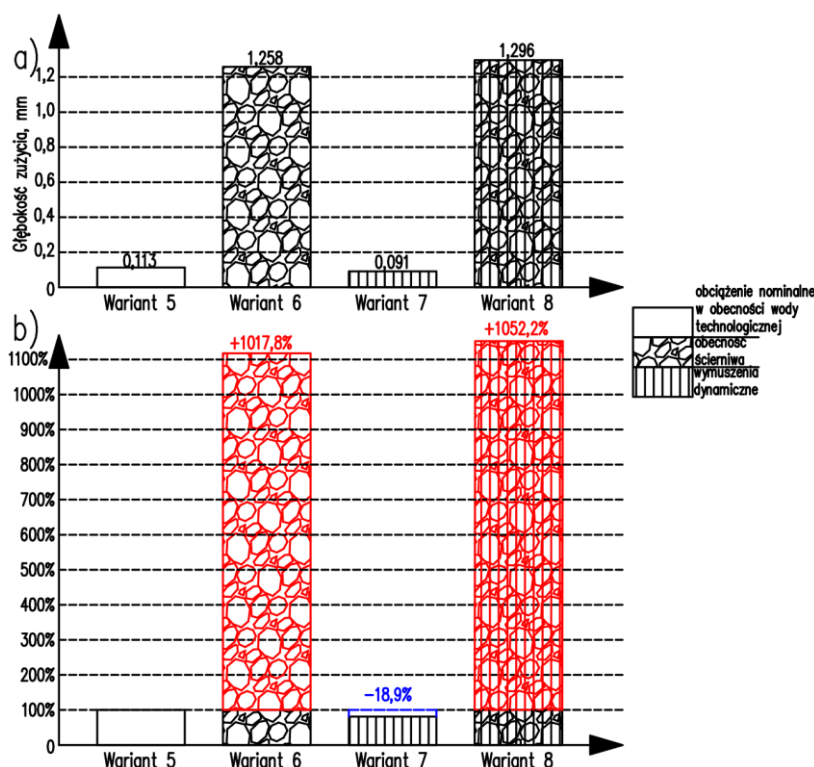
9.5.5. Składowe interakcyjne procesu zużywania w środowisku górnictwym suchym z wodą z układów zraszania (Grupa II wariantów czynników środowiskowych)

Dla przyjętego wewnątrzsystemowego sposobu określenia zależności interakcyjnych dla środowiska górnictwego suchego z wodą z układów zraszania w warunkach przemieszczających się ogniów, jako poziom odniesienia przyjęto wartość zużycia mechanicznego Wariantu 5.

Na Rysunku 9.7 zaprezentowano, w formie wykresów słupkowych, wartości ubytku masy uzyskane dla stanowiskowych badań Wariantów 5÷8, natomiast na Rysunku 9.8 – odpowiadające im ubytki liniowe.



Rys. 9.7. Wyniki badań ubytku masy wyznaczone podczas stanowiskowych badań Wariantów 5÷8, a – wartości bezwzględne, b – zmiana procentowa względem wariantu odniesienia.



Rys. 9.8. Wyniki badań ubytku liniowego (głębokość zużycia) wyznaczone podczas stanowiskowych badań Wariantów 5÷8, a – wartości bezwzględne, b – zmiana procentowa względem wariantu odniesienia.

Jak można zauważyć na Rysunkach 9.7 i 9.8, odmiennie jak w przypadku grupy wariantów środowiska suchego (Grupa I), w wariantach przynależnych do grupy środowiska górniczego suchego z wodą pochodzącą z układów zraszania wyniki nie mają charakteru jednoznacznie synergistycznego.

Zauważalny jest znaczący wpływ dodatkowej determinanty degradacyjnej w postaci ścierniwa mineralnego (Wariant 6). Dodanie piaskowca do wody i powstanie mokrego ścierniwa w strefie kontaktu ogniów spowodowało wzrost średniego zużycia masowego o 751,7% oraz wzrost średniej maksymalnej głębokości zużycia o 1017,8% w porównaniu dla bazowego dla środowiska kopalnianego Wariantu 5.

Dodanie kolejnego czynnika degradacyjnego w postaci wymuszeń dynamicznych (Wariant 8) spotęgowało ten proces powiększając średni ubytek masy ogniów o 817,9% i średnią maksymalną głębokość zużycia o 1052,2%. W przypadku Wariantu 8, składowa interakcyjna wynikająca ze wzajemnego oddziaływania wymuszeń dynamicznych na mieszaninę ścierniwa i wody demineralizowanej $\Delta I_{D \rightarrow \dot{S}}^{DRY+H_2O}$ (por. Tab. 9.3) ma wartość większą od zera, co świadczy o wpływie synergistycznym zmiennych sił na degradacyjne oddziaływanie ścierniwa mineralnego. Jak wynika z analizy mechanizmów uszkodzeń

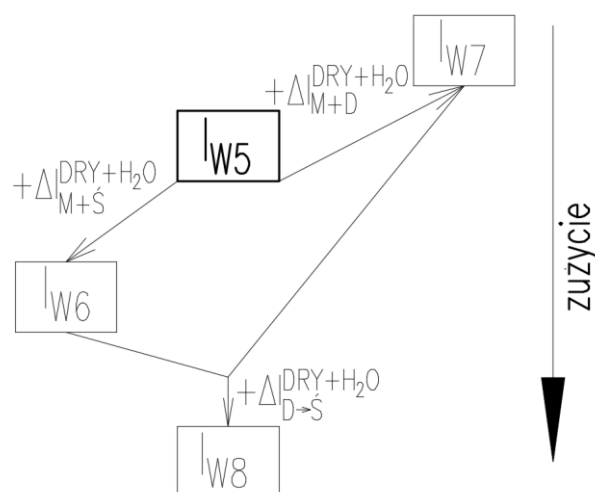
przedstawionych w Rozdziale 8, siły te powodowały głębsze wgłębienia ziaren ścierniwa oraz przyspieszały oddzielanie produktów korozji z powierzchni zużywanej.

Odmienny przypadek stanowił Wariant 7, w którym oprócz zużycia mechanicznego występującego podczas kątownego ruchu ogniów w przegubie w obecności wody demineralizowanej, wprowadzono dodatkową determinantę degradacyjną w postaci wymuszeń dynamicznych. Zaobserwowano w tym przypadku zależność antagonistyczną tj. zmniejszenie zużycia w ujęciu masowym o średnio 13,3% oraz zmniejszenie maksymalnej głębokości zużycia o średnio 18,9%. Przyczynę wystąpienia tego zjawiska upatruje się w powstaniu na powierzchni strefy kontaktu utwardzonej w wyniku zgniotu warstwy wierzchniej materiału, co wykazały badania mikrotwardości (Rozdział 8).

Tab. 9.3. Wyznaczone dla środowiska górniczego suchego z wodą z układów zraszania składowa zużycia i składowe interakcyjne

Wariant	Wyznaczona składowa	Wartość składowej		Charakter zmiany
		Ubytek masy, g	Głębokość zużycia, mm	
5	$I_M^{DRY+H_2O} = I_{W5}$	0,284	0,113	-
6	$\Delta I_{M+\dot{S}}^{DRY+H_2O} = I_{W6} - I_M^{DRY+H_2O}$	2,138	1,145	Synergia
7	$\Delta I_{M+D}^{DRY+H_2O} = I_{W7} - I_M^{DRY+H_2O}$	-0,038	-0,022	Antagonizm
8	$\Delta I_{M+D+\dot{S}}^{DRY+H_2O} = I_{W8} - I_M^{DRY+H_2O}$	2,326	1,183	Synergia
8	$\Delta I_{D \rightarrow \dot{S}}^{DRY+H_2O} = I_{W8} - I_M^{DRY+H_2O} - (\Delta I_{M+\dot{S}}^{DRY+H_2O} + \Delta I_{M+D}^{DRY+H_2O})$	0,226	0,060	Synergia

Na Rysunku 9.9 przedstawiono graficznie zależności interakcyjne zachodzące w środowisku górnym suchym z wodą z układów zraszania.



Rys. 9.9. Graficzne przedstawienie zależności interakcyjnych zachodzących w środowisku górnym suchym z wodą pochodzącą z układów zraszania

9.6. Modele interakcyjne wewnątrzsystemowe środowiska górniczego mokrego w warunkach przemieszczających się ogniw

W mokrym środowisku górniczym, gdzie woda pochodzi ze źródeł naturalnych, czyli górotworu otaczającego wyrobisko, procesy zużycia materiałów, podobnie jak w Grupie II należy rozpatrywać jako system tribokorozyjny. W tym systemie czynnikiem korozyjnym jest zarówno sama woda kopalniana jak i jej mieszanina z urobkiem mineralnym. Sytuacja transportu urobku zawodnionego wodą kopalnianą jest powszechnie występująca w górnictwie i przynależna jest różnym metodom urabiania skał, zarówno metodami strzałowymi jak i z wykorzystaniem maszyn urabiających. W celu opisania interakcyjnych zależności w niniejszym środowisku, wykorzystano wyniki uzyskane dla Grupy III czynników środowiskowych (Warianty 9–12) z Tabeli 5.1.

Poniższe podpunkty przedstawiają zależności synergistyczne właściwe dla poszczególnych warunków eksploatacyjnych.

9.6.1. Model interakcyjny procesu zużycia Wariantu 9

W Wariacie 9 analizowano przypadek kąтового przemieszczania ogniw łańcuchowych poddanych stałemu obciążeniu grawitacyjnemu w obecności wody kopalnianej. Zidentyfikowaną formą zużywania zachodzącą podczas testu Wariantu 9 jest zużycie mechaniczno-korozyjne, wynikające z wzajemnego przemieszczania się ogniw łańcuchowych w przegubie w obecności zasolonej wody kopalnianej, a przyczyną degradacji – wzajemne oddziaływanie wierzchołków nierówności obu współpracujących powierzchni w warunkach korozji elektrochemicznej. Odmienne niż w Wariacie 5, w którym współpraca zachodziła w obecności wody z układów zraszania, w przypadku rozpatrywanego wariantu modelowo nie można pominąć korozyjnego wpływu wody kopalnianej. Zużycie całkowite dla Wariantu 9 można zatem określić za pomocą następującego wyrażenia:

$$I_{W9} = I_M^{WET} + I_K^{WET} = I_M^{WET} \quad (9.29)$$

gdzie:

I_{W9} – składowa zużycia całkowitego Wariantu 9,

I_K^{WET} – składowa zużycia wynikająca z oddziaływania korozyjnego wody kopalnianej w nieruchomym przegubie ogniw łańcuchowych.

I_M^{WET} – składowa zużycia mechanicznego występującego podczas kąтового ruchu ogniw w przegubie w obecności wody kopalnianej.

W dalszych obliczeniach dotyczących poszczególnych składowych zużyciowych analizowanego Wariantu 9, wartość składowej I_K^{WET} z uwagi na jej niewielką wartość (por. pkt. 9.3) nie wpływa na wartość całkowitego zużycia, stąd w dalszych analizach została pominięta. Wartość składowej zużycia I_M^{WET} stanowi poziom odniesienia dla ustalenia

zależności synergistycznych związanych ze złożonymi formami niszczenia w środowisku górniczym mokrym.

9.6.2. Model interakcyjny procesu zużycia Wariantu 10

W Wariacie 10 głównym czynnikiem degradującym była mieszanina ścierniwa mineralnego (piaskowca) i wody kopalnianej. Powoduje ona zużycie ścierno-korozyjne obu współpracujących powierzchni. W celu określenia zależności interakcyjnych tego Wariantu założono, że składowa zużycia I_{W10} stanowi sumę: zużycia mechanicznego w obecności wody kopalnianej, zużycia korozyjnego mieszaniny ścierniwa i wody kopalnianej w nieruchomym przegubie oraz składowej interakcyjnej wynikającej z oddziaływania wodnej mieszaniny ścierniwa na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kąowego przemieszczania się ogniw łańcuchowych. Analogicznie do poprzedniego Wariantu 9, wartość składowej I_{K+S}^{WET} z uwagi na jej niewielką wartość (por. pkt. 9.3) nie wpływa na wartość całkowitego zużycia analizowanego wariantu, stąd w dalszych analizach została pominięta. Dla Wariantu 10, zużycie można określić jako:

$$I_{W10} = I_M^{WET} + I_{K+S}^{WET} + \Delta I_{M+S}^{WET} = I_M^{WET} + \Delta I_{M+S}^{WET} \quad (9.30)$$

gdzie:

I_{W10} – składowa zużycia całkowitego Wariantu 10,

I_{K+S}^{WET} – składowa zużycia wynikająca z oddziaływania korozyjnego mieszaniny ścierniwa i wody kopalnianej w nieruchomym przegubie ogniw łańcuchowych.

ΔI_{M+S}^{WET} – składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania ścierniwa na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kąowego przemieszczania się ogniw łańcuchowych w obecności wody kopalnianej.

9.6.3. Model interakcyjny procesu zużycia Wariantu 11

W Wariacie 11 przeanalizowano przypadek kąowego przemieszczania ogniw łańcuchowych, poddanych stałemu obciążeniu grawitacyjnemu, w obecności wody kopalnianej i dodatkowych wymuszeń dynamicznych. Składowa zużycia całkowitego Wariantu 11 stanowi sumę wartości: zużycia mechanicznego obciążonych grawitacyjnie ogniw podczas współpracy w obecności wody kopalnianej, korozyjnego oddziaływania wody kopalnianej na nieruchome ogniwa, wymuszeń dynamicznych oraz interakcji między tymi czynnikami. Analogicznie do poprzednich wariantów, w przypadku dodatkowych wymuszeń dynamicznych przyjęto, że składowa zużycia wynikająca z wymuszeń dynamicznych oddziałujących na ogniwa łańcuchowe będzie równa zero (por. równanie 9.12). Na potrzeby analizy badań stanowiskowych pominięto również wartość składowej korozyjnej z uwagi na

jej niewielką wartość (por. pkt. 9.3). Należy ją jednak uwzględniać w modelach odpowiadających rzeczywistym warunkom eksploatacyjnym. Zależność przyjmie zatem postać:

$$I_{W11}^{WET} = I_M^{WET} + I_K^{WET} + \Delta I_{M+D}^{WET} = I_M^{WET} + \Delta I_{M+D}^{WET} \quad (9.31)$$

gdzie:

I_{W11}^{WET} – składowa zużycia całkowitego Wariantu 11,

ΔI_{M+D}^{WET} – składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania wymuszeń dynamicznych na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kątownego przemieszczania się ogniw łańcuchowych w obecności wody kopalnianej.

9.6.4. Model interakcyjny procesu zużycia Wariantu 12

Podobnie jak w przypadku Wariantu 10, dominującym czynnikiem degradującym w przypadku Wariantu 12 jest obecność w obszarze współpracy ogniw ścierniwa mineralnego zmieszanego z wodą kopalnianą. W układzie tym zachodzi oddziaływanie kolejnego czynnika degradacyjnego w postaci wymuszeń dynamicznych. Składowa zużycia I_{W12} stanowi sumę wartości: zużycia mechanicznego podczas współpracy ogniw w środowisku wody kopalnianej, zużycia korozyjnego mieszaniny ścierniwa i wody kopalnianej w nieruchomym przegubie oraz interakcji wynikających z obecności ścierniwa mineralnego i dodatkowych wymuszeń dynamicznych. Zgodnie z powyższym, zależność przyjmuje postać:

$$I_{W12} = I_M^{WET} + I_{K+S}^{WET} + \Delta I_{M+D+S}^{WET} = I_M^{WET} + \Delta I_{M+D+S}^{WET} \quad (9.32)$$

gdzie:

I_{W12} – składowa zużycia całkowitego Wariantu 12,

ΔI_{M+D+S}^{WET} – składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania mokrego ścierniwa (woda kopalniana) i wymuszeń dynamicznych na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kątownego przemieszczania się ogniw łańcuchowych.

Analogicznie do Wariantów 4 i 8, składową ΔI_{M+D+S}^{WET} można określić jako sumę składowych interakcyjnych wynikających z wpływu mokrego ścierniwa (woda kopalniana) i wymuszeń dynamicznych na proces zużycia mechanicznego, zachodzący podczas kątownego przemieszczania się ogniw łańcuchowych oraz wzajemnej interakcji tych dwóch czynników. Opisać to można zależnością:

$$\Delta I_{M+D+S}^{WET} = \Delta I_{M+S}^{WET} + \Delta I_{M+D}^{WET} + \Delta I_{D \rightarrow S}^{WET} \quad (9.31)$$

gdzie:

$\Delta I_{D \rightarrow S}^{WET}$ – składowa interakcyjna wynikająca z wzajemnego oddziaływania wymuszeń dynamicznych na ścierniwo z wodą kopalnianą.

Wobec powyższego, model zużycia dla niniejszego wariantu przyjmie postać:

$$I_{W12} = I_M^{WET} + \Delta I_{M+\dot{S}}^{WET} + \Delta I_{M+D}^{WET} + \Delta I_{D \rightarrow \dot{S}}^{WET} \quad (9.32)$$

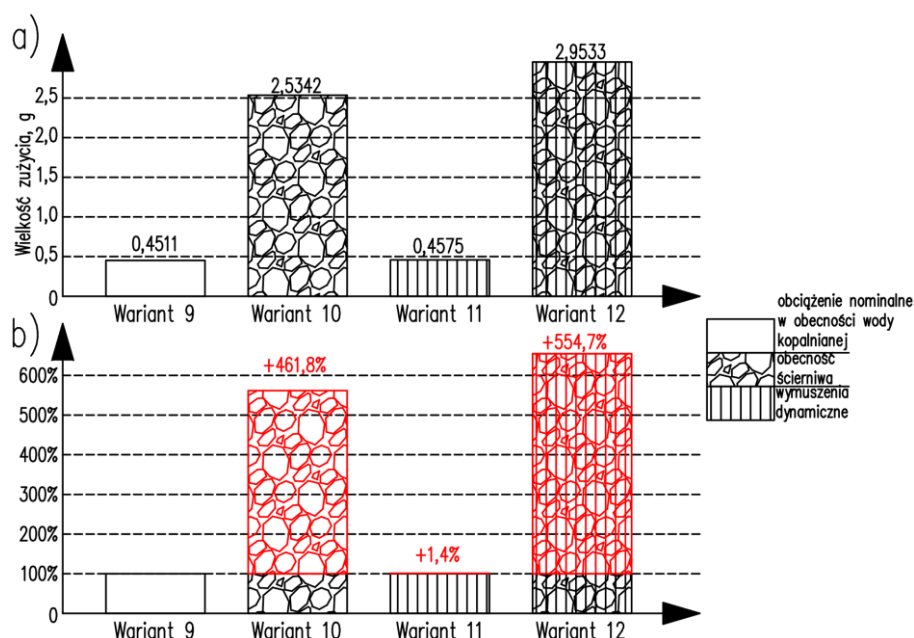
9.6.5. Składowe interakcyjne procesu zużywania w środowisku górniczym mokrym (Grupa III wariantów czynników środowiskowych)

Dla przyjętego wewnątrzsystemowego sposobu określenia zależności interakcyjnych dla środowiska górniczego mokrego w warunkach przemieszczających się ogniów, jako poziom odniesienia przyjęto wartość zużycia mechanicznego Wariantu 9.

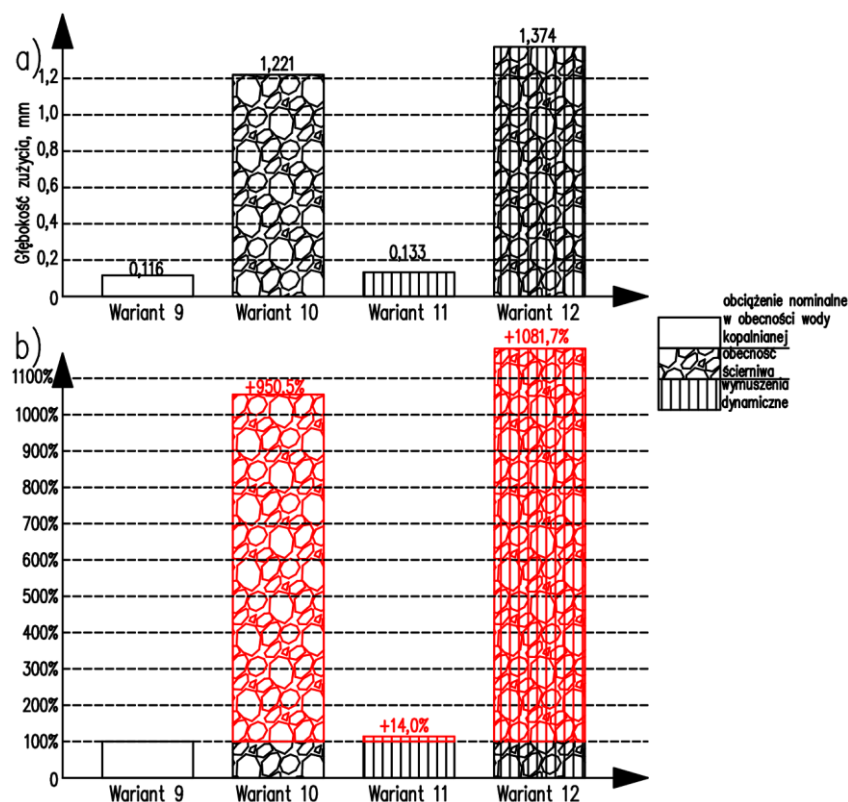
Na poniższych rys. 9.10-9.11 zaprezentowano w postaci wykresów słupkowych porównanie uśrednionych wyników dla każdego z wariantów badawczych przynależnych do Grupy III środowiska eksploatacji.

Przedstawione poniżej wykresy przedstawiają porównanie interakcji zużywania ogniów łańcuchowych w kontekście ubytku masowego i liniowego, które w przypadku rozpatrywanej Grupy III za każdym razem przyjmowało charakter synergistyczny.

Podobnie, jak w przypadku rozpatrywanej wcześniej Grupy II, wyraźnie zauważalny jest dominujący wpływ ścierniwa mineralnego (Wariant 10) na stopień degradacji ogniów łańcuchowych. Wpływ zawodnionego ścierniwa spowodował wzrost średniego zużycia masowego o 461,8% oraz wzrost średniej maksymalnej głębokości zużycia o 950,5% w porównaniu do bazowego Wariantu 9.



Rys. 9.10. Wyniki badań ubytku masy wyznaczone podczas stanowiskowych badań Wariantów 9÷12, a – wartości bezwzględne, b – zmiana procentowa względem wariantu odniesienia.



Rys. 9.11. Wyniki badań ubytku liniowego (głębokość zużycia) wyznaczone podczas stanowiskowych badań Wariantów 9÷12, a – wartości bezwzględne, b – zmiana procentowa względem wariantu odniesienia.

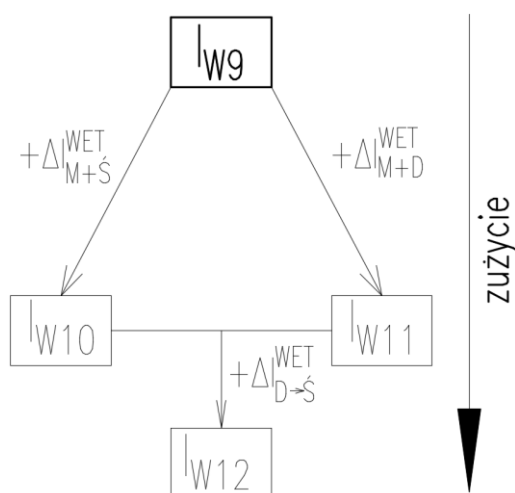
W Wariancie 11, w którym w stosunku do wariantu bazowego dodano czynnik degradacyjny w postaci wymuszeń dynamicznych, zaobserwowano jego znikomy wpływ synergistyczny na procesy zużyciowe: na poziomie 1,4% w przypadku porównania masowego i 14% w przypadku porównania maksymalnej głębokości zużycia.

Wariant 12, integrujący wszystkie trzy czynniki degradacyjne, wykazał największe zużycie bezwzględne ogniów. W stosunku do przyjętego poziomu odniesienia (Wariant 9) stwierdzono wzrost ubytku masy o 554,7% i głębokości zużycia o 1081,7%.

Na podstawie uzyskanych wyników oraz opracowanego powyżej modelu zużycia wyznaczono wartości składowych bazowych i interakcyjnych dla trzydziestogodzinnego badania na stanowisku (Tab. 9.4). Na Rysunku 9.12 przedstawiono graficznie zależności interakcyjne zachodzące w środowisku górnictwym mokrym.

Tab. 9.4. Wyznaczone dla środowiska górniczego mokrego składowa zużycia i składowe interakcyjne

Wariant	Wyznaczona składowa	Wartość składowej		Charakter zmiany
		Ubytek masy, g	Głębokość zużycia, mm	
9	$I_M^{WET} = I_{W9}$	0,451	0,116	-
10	$\Delta I_{M+\dot{S}}^{WET} = I_{W10} - I_M^{WET}$	2,083	1,105	Synergia
11	$\Delta I_{M+D}^{WET} = I_{W11} - I_M^{WET}$	0,006	0,017	Synergia
12	$\Delta I_{M+D+\dot{S}}^{WET} = I_{W12} - I_M^{WET}$	2,502	1,258	Synergia
12	$\Delta I_{D \rightarrow \dot{S}}^{WET} = I_{W12} - I_M^{WET} - (\Delta I_{M+\dot{S}}^{WET} + \Delta I_{M+D}^{WET})$	0,413	0,136	Synergia



Rys. 9.12. Graficzne przedstawienie zależności interakcyjnych zachodzących w środowisku górniczym mokrym

9.7. Modele interakcyjne międzysystemowe w warunkach przemieszczających się ogniw

Osobne zagadnienie w kontekście budowy modeli zużyciowych stanowi porównanie interakcji międzysystemowych. Czynnikiem odróżniającym poszczególne środowiska jest obecność oraz rodzaj determinanty środowiskowej w postaci wody generującej zjawiska korozyjne. W ramach interakcji międzysystemowych wyodrębnić można 4 grupy porównawcze:

- Grupę A – warianty zużycia mechanicznego (Wariant 1) i mechaniczno- korozyjnego (Warianty 5 i 9),
- Grupę B – warianty zużycia ściernego (Wariant 2) i ścierno-korozyjnego (Warianty 6 i 10),
- Grupę C – warianty zużycia mechaniczno-dynamicznego (Wariant 3) i mechaniczno-korozyjno-dynamicznego (Warianty 7 i 11),

- Grupę D – warianty zużycia ścierno-dynamicznego (Wariant 4) i ścierno-korozyjno-dynamicznego (Warianty 8 i 12).

Potrzeba takiego porównania wynika z obserwowanej w trakcie eksploatacji korytarzowej (np. podczas budowy długich przekopów łączących poszczególne pola eksploatacyjne kopalni) zmienności ilości dopływającej z górotworu wody oraz zmiany jej składu chemicznego.

9.7.1. Model interakcyjny procesu zużycia mechanicznego w środowiskach różniących się własnościami korozyjnymi

W przypadku zużycia mechanicznego, charakteryzującego się brakiem ścierniwa mineralnego i wymuszeń dynamicznych (Grupa A), czynnikiem różnicującym dany system tribokorozyjny była obecność i rodzaj czynnika intensyfikującego korozję. W przyjętym układzie porównawczym wyznaczono wpływ obecności wody z układów zraszania (reprezentowanej składową interakcyjną $\Delta I_{MK}^{DRY+H_2O}$) oraz obecności wody kopalnianej (reprezentowanej składową interakcyjną ΔI_{MK}^{WET}) na proces zużycia mechanicznego.

Składowa interakcyjna $\Delta I_{MK}^{DRY+H_2O}$ stanowi różnicę zużycia Wariantu 5 i 1 i przyjmuje postać:

$$\Delta I_{MK}^{DRY+H_2O} = I_{W5} - I_{W1} = I_M^{DRY+H_2O} - I_M^{DRY} \quad (9.33)$$

gdzie:

$\Delta I_{MK}^{DRY+H_2O}$ – składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania wody z układów zraszania na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kątowego przemieszczania się ogniów łańcuchowych.

Z kolei składowa interakcyjna ΔI_{MK}^{WET} stanowi różnicę zużycia Wariantu 9 i 1 i jest określona zależnością:

$$\Delta I_{MK}^{WET} = I_{W9} - I_{W1} = I_M^{WET} - I_M^{DRY} \quad (9.34)$$

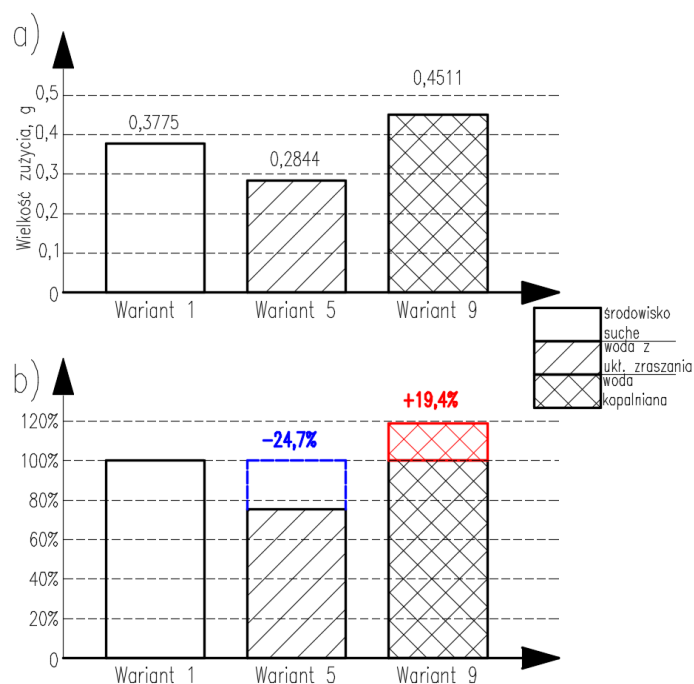
gdzie:

ΔI_{MK}^{WET} – składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania wody kopalnianej na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas przemieszczania się ogniów łańcuchowych.

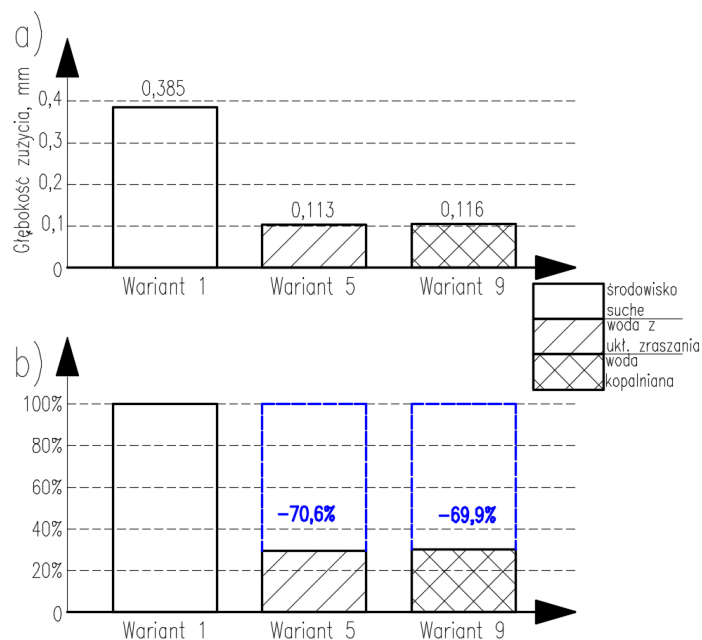
Dla przyjętego międzysystemowego sposobu określenia zależności interakcyjnych dla grupy zużycia mechanicznego nieintensyfikowanego wpływem ścierniwa i wymuszeń dynamicznych (Grupa A), jako poziom odniesienia przyjęto wartość zużycia mechanicznego Wariantu 1. Porównanie uśrednionych wyników dla rozpatrywanych wariantów w ramach Grupy A przedstawiono na Rysunkach 9.13 i 9.14.

Zauważalny jest antagonistyczny wpływ wody demineralizowanej (Wariant 5) na stopień degradacji ogniów, zarówno w aspekcie ubytku masowego (-24,7%), jak i maksymalnej

głębokości zużycia (-70,6%). Woda demineralizowana najprawdopodobniej spowodowała zmniejszenie współczynnika tarcia ograniczając tym samym skutki wzajemnego ruchu ogniw w przegubie.



Rys. 9.13. Wyniki badań ubytku masy wyznaczone podczas stanowiskowych badań Wariantów 1, 5, 9 (grupa międzysystemowa A), a – wartości bezwzględne, b – zmiana procentowa względem wariantu odniesienia.



Rys. 9.14. Wyniki badań ubytku liniowego (głębokość zużycia) wyznaczone podczas stanowiskowych badań 1, 5, 9 (grupa międzysystemowa A), a – wartości bezwzględne, b – zmiana procentowa względem wariantu odniesienia.

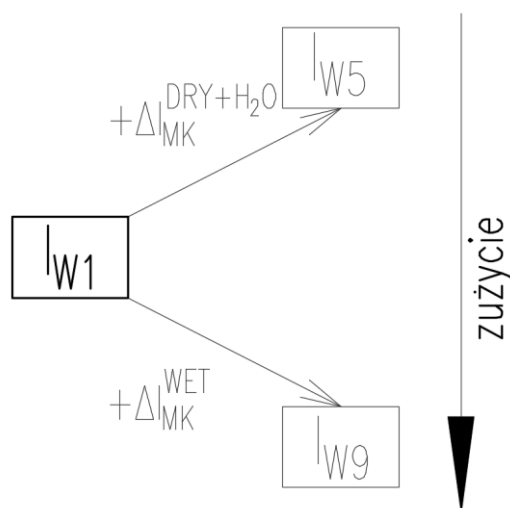
W przypadku oddziaływania wody kopalnianej na proces zużycia mechanicznego nie stwierdzono jednego spójnego charakteru zmiany intensywności degradacji ogniw łańcuchowych. Wystąpił wyraźny synergizm w ujęciu zużycia masowego osiągający wzrost zużycia na poziomie 19,4% w stosunku do poziomu odniesienia. W przypadku maksymalnej głębokości zużycia zauważalne jest jednak zmniejszenie zużycia w stosunku do poziomu odniesienia sięgające -69,9%, czyli zaistniał antagonizm w ujęciu liniowym. Taki wynik najprawdopodobniej był spowodowany nietypowym płaskim rozmieszczeniem wgłębień w obszarze styku ogniw.

Oddziaływanie wody kopalnianej spowodowało zasadniczą zmianę procesu zużywania z czysto mechanicznego (Wariant 1) na zużycie mechaniczno-korozyjne lub inaczej tribokorozyjne (Wariant 8).

Opracowanie wyżej przedstawionych wzorów modelu zużycia międzysystemowego umożliwiło obliczenie wartości składowych interakcyjnych (Tab. 9.5) oraz sporządzenie grafu obrazującego zależności interakcyjne (Rys. 9.15).

Tab. 9.5. Wyznaczone dla Grupy A składowe interakcyjne wariantów międzysystemowych

Wariant	Wyznaczona składowa	Wartość składowej		Charakter zmiany
		Ubytek masy, g	Głębokość zużycia, mm	
1	$I_M^{DRY} = I_{W1}$	0,378	0,385	Bazowy
5	$\Delta I_{MK}^{DRY+H_2O} = I_{W5} - I_{W1}$	-0,093	-0,272	Antagonizm
9	$\Delta I_{MK}^{WET} = I_{W9} - I_{W1}$	0,074	-0,269	Synergia/antagonizm



Rys. 9.15. Graficzne przedstawienie zależności interakcyjnych zachodzących w Grupie A interakcji międzysystemowych (dla pomiaru ubytku masowego)

9.7.2. Model interakcyjny procesu zużycia ściernego w środowiskach różniących się własnościami korozyjnymi

W przypadku zużycia ściernego, charakteryzującego się obecnością ścierniwa mineralnego (Grupa B), czynnikiem różnicującym dany system tribokorozyjny, podobnie jak w przypadku Grupy A, była obecność i rodzaj czynnika intensyfikującego korozję.

Analogicznie jak w przypadku zużycia mechanicznego, dla przyjętego układu porównawczego wyznaczono wpływ obecności wody z układów zraszania (reprezentowanej składową interakcyjną $\Delta I_{M\dot{S}K}^{DRY+H_2O}$) oraz obecności wody kopalnianej (reprezentowanej składową interakcyjną $\Delta I_{M\dot{S}K}^{WET}$) na proces zużycia ściernego.

Składowa interakcyjna $\Delta I_{M\dot{S}K}^{DRY+H_2O}$ stanowi różnicę zużycia Wariantu 6 i 2 przyjmuje postać:

$$\Delta I_{M\dot{S}K}^{DRY+H_2O} = I_{W6} - I_{W2} = (I_M^{DRY+H_2O} + \Delta I_{M+\dot{S}}^{DRY+H_2O}) - (I_M^{DRY} + \Delta I_{M+\dot{S}}^{DRY}) \quad (9.35)$$

gdzie:

$\Delta I_{M\dot{S}K}^{DRY+H_2O}$ – składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania wody z układów zraszania na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kątownego przemieszczania się ogniw łańcuchowych w obecności ścierniwa.

Składowa interakcyjna $\Delta I_{M\dot{S}K}^{WET}$ stanowi różnicę zużycia Wariantu 10 i 2 i jest określona zależnością:

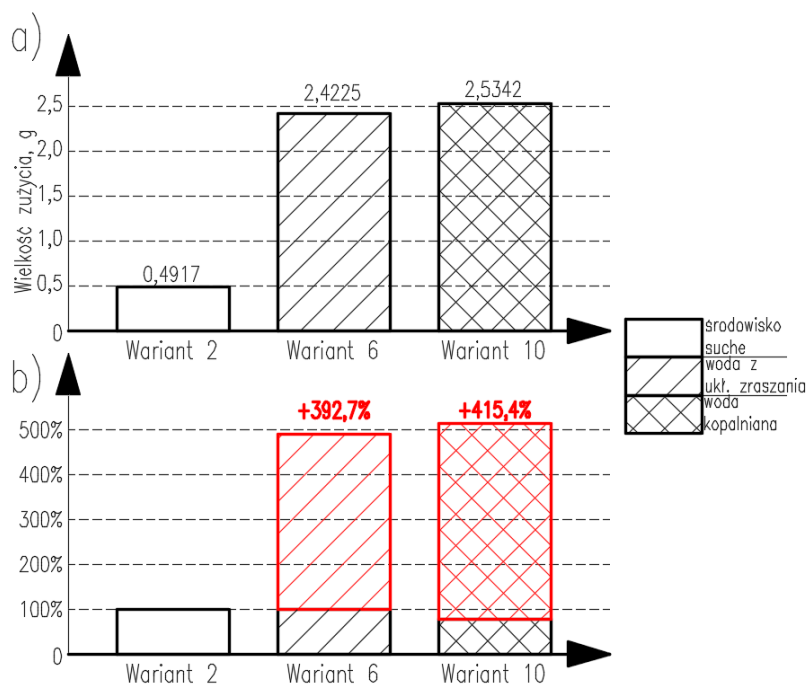
$$\Delta I_{M\dot{S}K}^{WET} = I_{W10} - I_{W2} = (I_M^{WET} + \Delta I_{M+\dot{S}}^{WET}) - (I_M^{DRY} + \Delta I_{M+\dot{S}}^{DRY}) \quad (9.36)$$

gdzie:

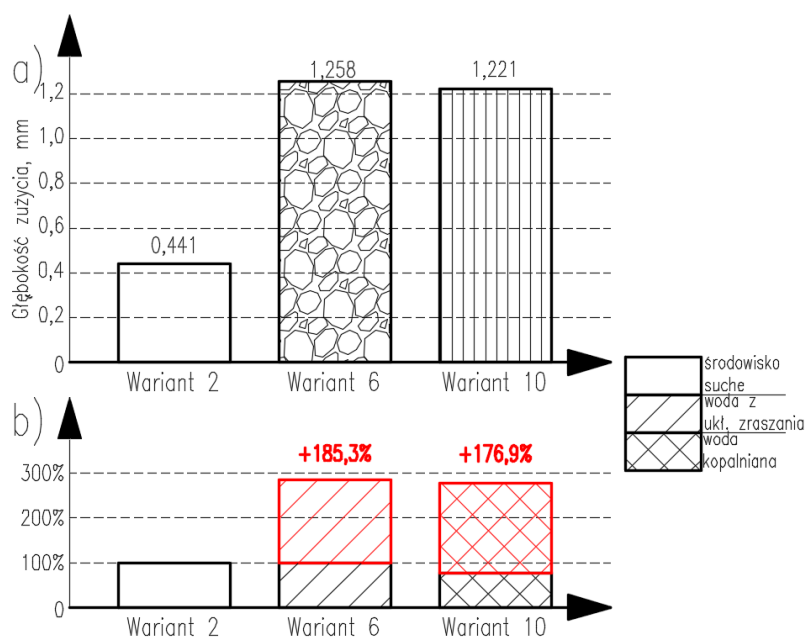
$\Delta I_{M\dot{S}K}^{WET}$ – składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania wody kopalnianej na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kątownego przemieszczania się ogniw łańcuchowych w obecności ścierniwa.

Porównanie uśrednionych wyników dla rozpatrywanych wariantów w ramach Grupy B przedstawiono na Rysunkach 9.16 i 9.17.

Zauważalny jest na tych rysunkach zdecydowanie synergistyczny wpływ zarówno wody technologicznej, jak i kopalnianej na zużycie w obecności ścierniwa mineralnego. W ujęciu zużycia masowego wzrost sięga 392,7% w przypadku dodania wody demineralizowanej i 415,4% w przypadku dodania wody kopalnianej. Również w aspekcie zużycia liniowego, mierzonego z wykorzystaniem skaningu 3D, wzrost zużycia jest znaczący: 185,5% dla wody demineralizowanej oraz 176,9% dla wody kopalnianej.



Rys. 9.16. Wyniki badań ubytku masy wyznaczone podczas stanowiskowych badań Wariantów 2, 6, 10 (grupa międzysystemowa B), a – wartości bezwzględne, b – zmiana procentowa względem wariantu odniesienia.

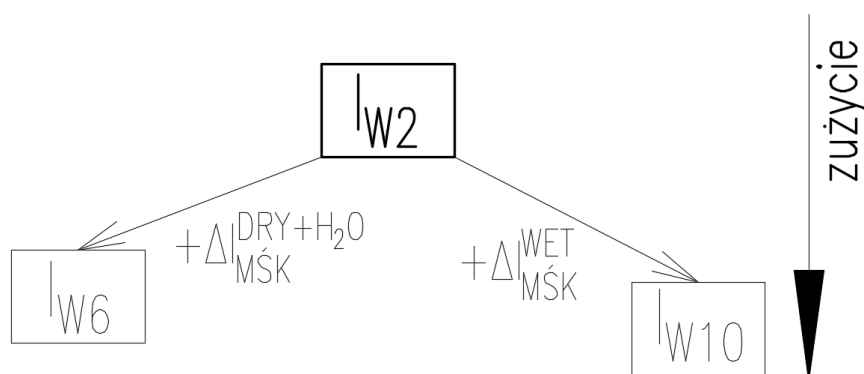


Rys. 9.17. Wyniki badań ubytku liniowego (głębokość zużycia) wyznaczone podczas stanowiskowych badań 2, 6, 10 (grupa międzysystemowa B), a – wartości bezwzględne, b – zmiana procentowa względem wariantu odniesienia.

Za pomocą przedstawionych wcześniej wzorów modelu zużycia międzysystemowego dla wariantów Grupy B, obliczono wartości składowych interakcyjnych (Tab. 9.6) oraz opracowano graf zależności interakcyjnych (Rys. 9.18).

Tab. 9.6. Wyznaczone dla Grupy B składowe interakcyjne wariantów międzysystemowych

Wariant	Wyznaczona składowa	Wartość składowej		Charakter zmiany
		Ubytek masy, g	Głębokość zużycia, mm	
2	$I_{W2} = I_M^{DRY} + \Delta I_{M+S}^{DRY}$	0,492	0,441	Bazowy
6	$\Delta I_{M\dot{S}K}^{DRY+H_2O} = I_{W6} - I_{W2}$	1,931	0,817	Synergizm
10	$\Delta I_{M\dot{S}K}^{WET} = I_{W10} - I_{W2}$	2,043	0,780	Synergizm



Rys. 9.18. Graficzne przedstawienie zależności interakcyjnych zachodzących w Grupie B interakcji międzysystemowych

9.7.3. Model interakcyjny procesu zużycia mechaniczno-dynamicznego w środowiskach różniących się własnościami korozyjnymi

W przypadku zużycia mechaniczno-dynamicznego, charakteryzującego się oddziaływaniem zmiennych sił dynamicznych (Grupa C), czynnikiem różnicującym dany system tribokorozyjny, podobnie jak w przypadku Grup A i B, była obecność i rodzaj czynnika intensyfikującego korozję.

Analogicznie jak wcześniej, dla przyjętego układu porównawczego, wyznaczono wpływ obecności wody z układów zraszania (reprezentowanej składową interakcyjną $\Delta I_{MDK}^{DRY+H_2O}$) oraz obecności wody kopalnianej (reprezentowanej składową interakcyjną ΔI_{MDK}^{WET}) na proces zużycia mechaniczno-dynamicznego.

Składowa interakcyjna $\Delta I_{MDK}^{DRY+H_2O}$ stanowi różnicę zużycia Wariantów 7 i 3, przyjmując postać:

$$\Delta I_{MDK}^{DRY+H_2O} = I_{W7} - I_{W3} = (I_M^{DRY+H_2O} + \Delta I_{M+D}^{DRY+H_2O}) - (I_M^{DRY} + \Delta I_{M+D}^{DRY}) \quad (9.37)$$

gdzie:

$\Delta I_{MDK}^{DRY+H_2O}$ – składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania wody z układów zraszania na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kątowego przemieszczania się ogniów łańcuchowych w obecności dodatkowych wymuszeń dynamicznych.

Składowa interakcyjna ΔI_{MDK}^{WET} stanowi różnicę zużycia Wariantu 11 i 3 i jest określona zależnością:

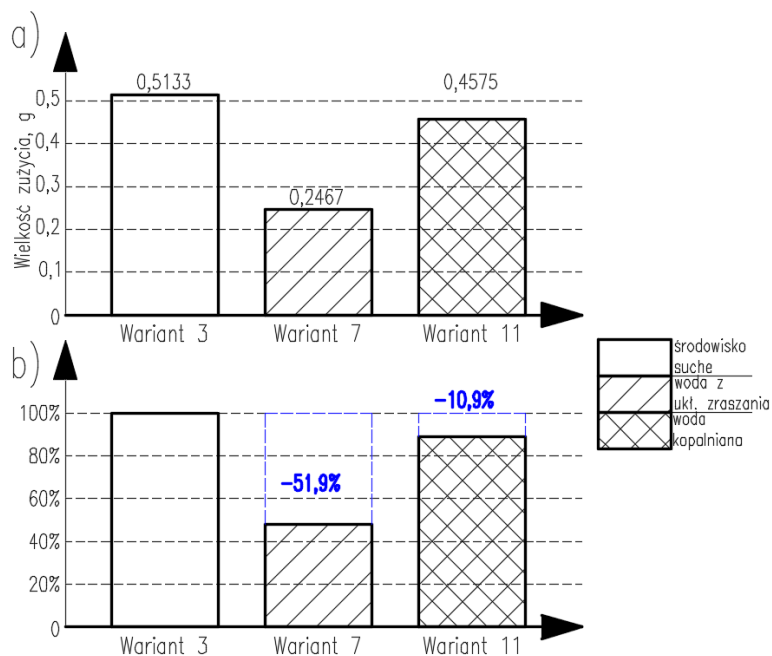
$$\Delta I_{MDK}^{WET} = I_{W11} - I_{W3} = (I_M^{WET} + \Delta I_{M+D}^{WET}) - (I_M^{DRY} + \Delta I_{M+D}^{DRY}) \quad (9.38)$$

gdzie:

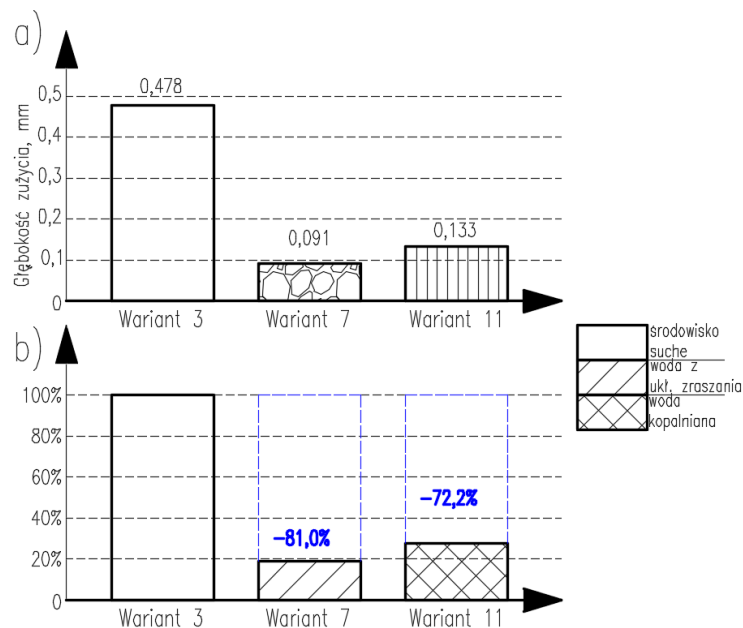
ΔI_{MDK}^{WET} – składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania wody kopalnianej na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kątowego przemieszczania się ogniów łańcuchowych w obecności dodatkowych wymuszeń dynamicznych.

Porównanie uśrednionych wyników dla rozpatrywanych wariantów w ramach Grupy C przedstawiono na Rysunkach 9.19 i 9.20.

Zauważalny na tych rysunkach jest antagonistyczny wpływ wody technologicznej i kopalnianej na zużycie dla wariantów mechaniczno-dynamicznych w każdym mierzonym aspekcie. W przypadku zużycia masowego, spadek ubytku masy wynosi 51,9% dla dodania wody demineralizowanej i 10,9% dla dodania wody kopalnianej. Również w aspekcie zużycia liniowego spadek zużycia jest wyraźny – 81,0% dla wody demineralizowanej i 72,2% dla wody kopalnianej.



Rys. 9.19. Wyniki badań ubytku masy wyznaczone podczas stanowiskowych badań Wariantów 3, 7, 11 (grupa międzysystemowa C), a – wartości bezwzględne, b – zmiana procentowa względem wariantu odniesienia.

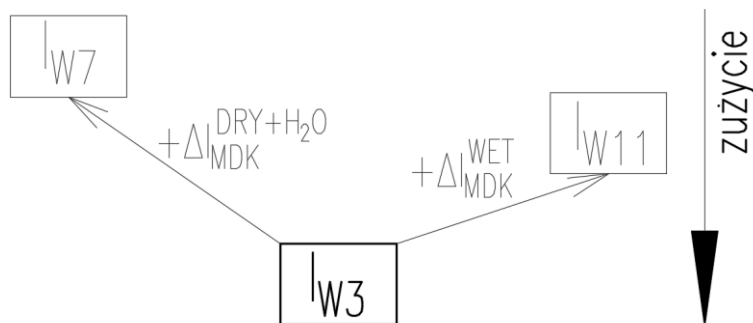


Rys. 9.20. Wyniki badań ubytku liniowego (głębokość zużycia) wyznaczone podczas stanowiskowych badań 3, 7, 11 (grupa międzysystemowa C), a – wartości bezwzględne, b – zmiana procentowa względem wariantu odniesienia.

Określenie wzorów modelu zużycia międzyśrodoiskowego dla wariantów Grupy C umożliwiło wyznaczenie wartości składowych interakcyjnych (Tab. 9.7) oraz opracowanie grafu interakcji (Rys. 9.21).

Tab. 9.7. Wyznaczone dla Grupy C składowe interakcyjne wariantów międzysystemowych

Wariant	Wyznaczona składowa	Wartość składowej		Charakter zmiany
		Ubytek masy, g	Głębokość zużycia, mm	
3	$I_{W3} = I_M^{DRY} + \Delta I_{M+D}^{DRY}$	0,513	0,478	Bazowy
7	$\Delta I_{MDK}^{DRY+H_2O} = I_{W7} - I_{W3}$	-0,267	-0,387	Antagonizm
11	$\Delta I_{MDK}^{WET} = I_{W11} - I_{W3}$	-0,056	-0,345	Antagonizm



Rys. 9.21. Graficzne przedstawienie zależności interakcyjnych zachodzących w Grupie C interakcji międzysystemowych

9.7.4. Model interakcyjny procesu zużycia ścierno-dynamicznego w środowiskach różniących się własnościami korozyjnymi

W przypadku zużycia ścierno-dynamicznego, charakteryzującego się oddziaływaniem ścierniwa mineralnego i zmiennych sił dynamicznych (Grupa D), czynnikiem różnicującym dany system tribokorozyjny, podobnie jak w przypadku pozostałych grup, była obecność i rodzaj czynnika intensyfikującego korozję.

Analogicznie jak wcześniej, dla przyjętego układu porównawczego, wyznaczono wpływ obecności wody z układów zraszania (reprezentowanej składową interakcyjną $\Delta I_{M\dot{S}DK}^{DRY+H_2O}$) oraz obecności wody kopalnianej (reprezentowanej składową interakcyjną $\Delta I_{M\dot{S}DK}^{WET}$) na proces zużycia ścierno-dynamicznego.

Składowa interakcyjna $\Delta I_{M\dot{S}DK}^{DRY+H_2O}$ stanowi różnicę zużycia Wariantu 8 i 4, przyjmując postać:

$$\Delta I_{M\dot{S}DK}^{DRY+H_2O} = I_{W8} - I_{W4} = (I_M^{DRY+H_2O} + \Delta I_{M+D+\dot{S}}^{DRY+H_2O}) - (I_M^{DRY} + \Delta I_{M+D+\dot{S}}^{DRY}) \quad (9.39)$$

gdzie:

$\Delta I_{M\dot{S}DK}^{DRY+H_2O}$ – składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania wody z układów zraszania na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kąowego przemieszczania się ogniów łańcuchowych w obecności ścierniwa mineralnego oraz dodatkowych wymuszeń dynamicznych.

Składowa interakcyjna $\Delta I_{M\dot{S}DK}^{WET}$ stanowi różnicę zużycia Wariantu 12 i 4 i jest określona zależnością:

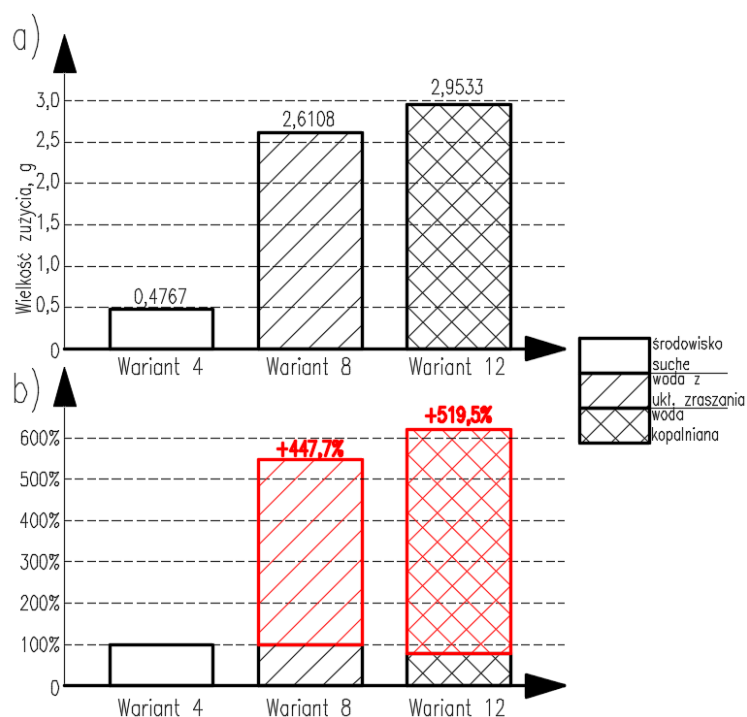
$$\Delta I_{M\dot{S}DK}^{WET} = I_{W12} - I_{W4} = (I_M^{WET} + \Delta I_{M+D+\dot{S}}^{WET}) - (I_M^{DRY} + \Delta I_{M+D+\dot{S}}^{DRY}) \quad (9.40)$$

gdzie:

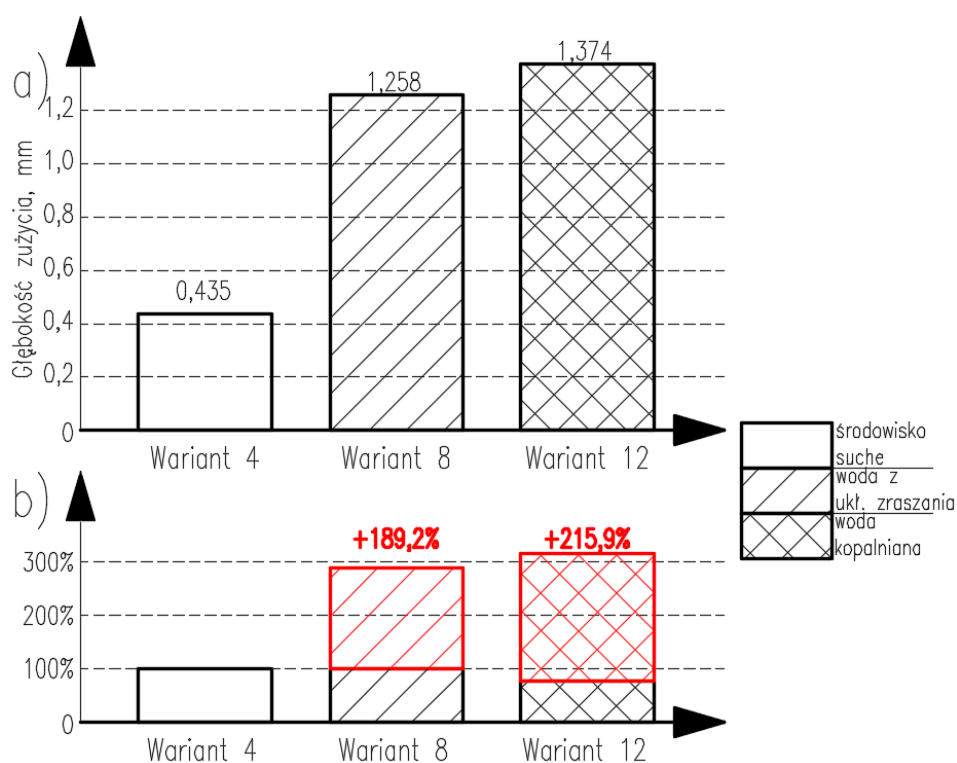
$\Delta I_{M\dot{S}DK}^{WET}$ – składowa interakcyjna wynikająca z oddziaływania wody kopalnianej na proces zużycia mechanicznego zachodzącego podczas kąowego przemieszczania się ogniów łańcuchowych w obecności ścierniwa mineralnego oraz dodatkowych wymuszeń dynamicznych.

Porównanie uśrednionych wyników dla rozpatrywanych wariantów w ramach Grupy C przedstawiono na Rysunkach 9.22 i 9.23.

W przypadku grupy wariantów ścierno-dynamicznych widoczny jest synergistyczny wpływ dodania czynników korozyjnych w postaci wody technologicznej lub kopalnianej. W aspekcie zużycia masowego wzrost wynosi 447,7% w przypadku wody demineralizowanej i 519,5% w przypadku wody kopalnianej. W aspekcie zużycia liniowego wzrost zużycia wynosi 189,2% dla wody demineralizowanej i 215,9% dla wody kopalnianej.



Rys. 9.22. Wyniki badań ubytku masy wyznaczone podczas stanowiskowych badań Wariantów 4, 8, 12 (grupa międzysystemowa D), a – wartości bezwzględne, b – zmiana procentowa względem wariantu odniesienia.

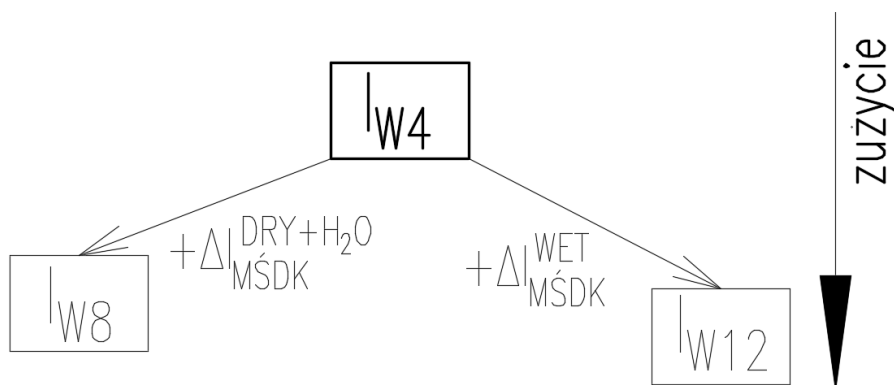


Rys. 9.23. Wyniki badań ubytku liniowego (głębokość zużycia) wyznaczone podczas stanowiskowych badań 4, 8, 12 (grupa międzysrodowiskowa D), a – wartości bezwzględne, b – zmiana procentowa względem wariantu odniesienia.

Wyprowadzone składowe interakcyjne wynikające z oddziaływania wody demineralizowanej i kopalnianej na proces zużycia ścierno-dynamicznego zachodzącego podczas kątownego przemieszczania się ogniwi łańcuchowych dla rozpatrywanej próby badawczej przedstawiono w Tabeli 9.8. Zależności interakcyjne przynależne Grupie D wariantów międzysystemowych przedstawiono na Rysunku 9.24.

Tab. 9.8. Wyznaczone dla Grupy D składowe interakcyjne wariantów międzysystemowych

Wariant	Wyznaczona składowa	Wartość składowej		Charakter zmiany
		Ubytek masy, g	Głębokość zużycia, mm	
4	$I_{W4} = I_M^{DRY} + \Delta I_{M+D+\dot{S}}^{DRY}$	0,477	0,435	Bazowy
8	$\Delta I_{M\dot{S}DK}^{DRY+H_2O} = I_{W8} - I_{W4}$	2,134	0,823	Synergizm
12	$\Delta I_{M\dot{S}DK}^{WET} = I_{W12} - I_{W4}$	2,477	0,939	Synergizm



Rys. 9.24. Graficzne przedstawienie zależności interakcyjnych zachodzących w Grupie D interakcji międzysystemowych

10. PODSUMOWANIE

Zakres tematyczny pracy doktorskiej dotyczył identyfikacji synergizmu oddziaływania czynników środowiska kopalnianego w aspekcie ograniczenia zużycia ogniw łańcuchowych przenośników zgrzeblowych. Pracę cechuje zarówno charakter poznawczy, jak i użytkowy.

Naukowy charakter pracy to przede wszystkim identyfikacja synergizmu oddziaływania poszczególnych czynników środowiska kopalnianego w aspekcie zużywania się ogniw. W sposób eksperymentalny określono uśrednione wartości dla 12 wariantów zużyciowych w trzech środowiskach górniczych (środowisko górnicze suche, z wodą pochodzącą z układów zraszania i mokre z wodą kopalnianą), odzwierciedlających występujące warunki eksploatacyjne przenośników zgrzeblowych. Przeanalizowano również warianty międzysystemowe w aspekcie wpływu czynnika korozyjnego na sumaryczne zużycie ogniw w przegubie. Badania jednoznacznie wykazały, że różna konfiguracja czynników degradujących w zróżnicowany sposób wpływa na wielkość zużycia łańcuchów w przegubie.

Praca podzielona została na 10 rozdziałów. W pierwszej części pracy uzasadniono celowość podjęcia tematu badawczego oraz zdefiniowano cel, zakres oraz tezę pracy doktorskiej. W dalszej kolejności dokonano charakterystyki procesów wytwarzania i eksploatacji łańcuchów górniczych oraz budowy przenośników zgrzeblowych. Na bazie przeprowadzonej analizy stanu wiedzy w zakresie procesów niszczenia łańcuchów ogniowych, opracowano koncepcję wieloetapowych badań laboratoryjnych i stanowiskowych, które pozwoliły na określenie w warunkach wyizolowanych, wpływu poszczególnych skojarzeń czynników degradacyjnych na zużycie ogniw łańcuchowych. Etap ten poprzedziły działania związane z określeniem warunków testów stanowiskowych. Tymi działaniami były:

- pozyskanie materiałów ściernych i wody z zakładów górniczych,
- analiza kinematyki współpracy ogniw łańcuchowych w przegubie,
- badania składu wody kopalnianej,
- badania składu ścierniwa mineralnego,
- badania sił dynamicznych występujących w łańcuchu w czasie jego ustalonej pracy,
- badania wyznaczające szybkości korozji ogniw pod wpływem wód kopalnianych oraz mieszanin wód kopalnianych i ścierniwa mineralnego,
- badania tribologiczne ścierniw mineralnych pozyskanych z zakładów górniczych.

Wiedza uzyskana podczas badań wstępnych i laboratoryjnych posłużyła zaprojektowaniu, a w dalszej kolejności budowie stanowiska badawczego umożliwiającego przeprowadzanie testów zużywania ogniw w przegubie przy różnym zestawieniu czynników degradacyjnych. Efektem tych prac było przeprowadzenie testów zużyciowych dla 12

wariantów skojarzenia czynników degradacyjnych, szczegółowo opisanych w 8 rozdziale pracy. Analiza uzyskanych wyników (Tab. 10.1) obejmowała jednocześnie dwuczynnikowy sposób pomiaru zużycia oraz analizę powierzchni kontaktu obejmującą skaningową mikroskopię elektronową (SEM), spektrometrię dyspersji energii (EDS), dyfraktometrię rentgenowską (XRD) oraz badania rozkładów twardości warstwy wierzchniej i jej mikrostruktury.

Na podstawie przeprowadzonych testów stanowiskowych można sformułować konkluzję, że synergizm jest najczęstszym zjawiskiem interakcyjnym procesu zużywania się ogniw łańcuchowych w przegubie, a jego występowanie i wielkość są ściśle zależne od rodzaju i charakteru zestawionych ze sobą czynników środowiskowych. Choć uzyskanych wyników w ujęciu ilościowym nie można wprost przetransponować na dane warunki eksploatacji łańcuchów, to jednak pozwalają one na jakościowe określenie intensywności poszczególnych skojarzeń czynników środowiskowych.

Badania wykazały, że sam dobór poszczególnych parametrów czynników środowiskowych ma kluczowe znaczenie na szybkość degradacji przegubów ogniw łańcuchowych. Każdorazowo wykazano, że dodanie lub zmiana konfiguracji czynników degradacyjnych wpływa interakcyjnie na sumaryczne zużycie przegubu ogniwa w próbie badawczej. Powyższe stwierdzenie potwierdza poprawność sformułowanego w Rozdziale 3 problemu badawczego:

W celu opracowania łańcuchów górniczych cechujących się wysoką odpornością na działania czynników eksploatacji konieczne jest określenie synergii w wieloczynnikowym procesie ich degradacji.

Opracowane w Rozdziale 9 wewnątrzsystemowe modele interakcyjne dla zużycia jedno- i wieloczynnikowego oraz wszystkich 12 wariantów czynników środowiskowych pozwoliły wyznaczyć składowe synergistyczne (w 2 przypadkach antagonistyczne) oraz wyliczyć dla cechujących je parametrów wartości liczbowe. Powyższe stwierdzenie jest z kolei przesłanką do uznania, że określony w pracy problem badawczy został w pełni rozwiązany.

W Rozdziale 9 pracy wykazano brak uwzględnienia zmiennych sił obciążających dany system tribokorozyjnym lub tribologiczny w większości dotychczasowych modeli uwzględniających istnienie synergii w procesach zużycia wieloczynnikowego. Poznanie tego aspektu procesu eksploatacji łańcuchów górniczych było jednym z głównych celów naukowych niniejszej pracy. Dlatego też, na bazie przeprowadzonej kwerendy literaturowej sformułowano następującą hipotezę pracy:

Łączne oddziaływanie ścierniwa i zmiennych sił dynamicznych w otoczeniu czynników korozyjnych, jak i też bez nich, skutkuje dodatkowym efektem interakcyjnym w trakcie procesu zużycia wieloczynnikowego ogniw łańcuchowych.

Tab. 10.1. Podsumowanie wyników badań i analizy uzyskanych wyników

Wariant	Zużycie masowe, g	Zużycie liniowe, mm	Formy uszkodzenia powierzchni	Formy uszkodzenia przekroju	Tekstura zgniotu	Zmiana twardości
1	0,378±0,013	0,385±0,015	mikroskrawanie, mikrobruzdowanie, wgniecenia,	pęknięcia, delaminacja, wykruszenia, wtrącenia niemetaliczne	występuje	nie stwierdzono
2	0,492±0,011	0,441±0,015	mikroskrawanie, mikrobruzdowanie, wgniecenia, odciski i wbite ziarna ścierniwa	pęknięcia zmęczeniowe, delaminacja, wtrącenia niemetaliczne	występuje	nie stwierdzono
3	0,513±0,011	0,478±0,015	mikroskrawanie, mikrobruzdowanie, wgniecenia produktów zużycia, odciski produktów zużycia	pęknięcia zmęczeniowe, pęknięcia w przekroju, delaminacja	występuje	wzrost twardości
4	0,477±0,012	0,435±0,015	mikroskrawanie, mikrobruzdowanie, odciski, wbite i rozkruszone ziarna ścierniwa	pęknięcia delaminacyjne, wtrącenia niemetaliczne w strukturze stali	występuje	nie stwierdzono
5	0,284±0,012	0,113±0,015	mikroskrawanie, wyrwy wierzchołkowe, odciski produktów zużycia	pęknięcia delaminacyjne, pęknięcia odpowierzchniowe i wtrącenia niemetaliczne	występuje	spadek twardości
6	2,423±0,011	1,258±0,015	mikroskrawanie, wbite ziarna ścierniwa, odciski po wbitych ziarnach ścierniwa, obecność rdzy	brak charakterystycznych uszkodzeń świadczący o szybkiej degradacji powierzchni	nie występuje	spadek twardości
7	0,247±0,013	0,091±0,015	mikroskrawanie, wgniecione produkty zużycia, obecność rdzy, rozkruszone produkty zużycia	pęknięcia powierzchniowe, wykruszenia delaminacyjne	występuje	wzrost twardości
8	2,611±0,014	1,296±0,015	mikroskrawanie, wbite ziarna ścierniwa, odciski po ziarnach ścierniwa, obecność rdzy	pęknięcia powierzchniowe, obszar usunięty w wyniku mikroskrawania	występuje	spadek twardości
9	0,451±0,012	0,116±0,015	mikroskrawanie, wyrwy po wierzchołkach skrawania, rozkruszone produkty zużycia, pęknięcia powierzchni, obecność rdzy	pęknięcia, podpowierzchniowe wtrącenia niemetaliczne	występuje	wzrost twardości
10	2,534±0,013	1,221±0,015	mikroskrawanie, rozkruszone i odciski ziarna ścierniwa, obecność rdzy	brak charakterystycznych uszkodzeń świadczący o szybkiej degradacji powierzchni	nie występuje	spadek twardości
11	0,458±0,013	0,133±0,015	Mikroskrawanie, wbite produkty zużycia, wykruszenia delaminacyjne, obecność rdzy	Pęknięcia delaminacyjne, zmęczeniowe, wtrącenia niemetaliczne pod powierzchnią	występuje	wzrost twardości
12	2,953±0,012	1,374±0,014	Mikroskrawanie, rozkruszone, odciski lub wbite ziarna ścierniwa, obecność rdzy	brak charakterystycznych uszkodzeń świadczący o szybkiej degradacji powierzchni	nie występuje	nie stwierdzono

Potwierdzeniem tego dodatkowego efektu interakcyjnego miało być wykazanie, że składowa interakcyjna od łącznego działania czynnika ściernego i dynamicznego w danym środowisku górnictwem (definiującym system tribokorozyjny) jest różna od sumy składowych interakcyjnych czynników dynamicznego i ściernego. Dla poszczególnych środowisk górnictwem można powyższe zapisać w postaci:

a) dla środowiska górnictwem suchego:

$$\Delta I_{M+D+\dot{S}}^{DRY} \neq \Delta I_{M+\dot{S}}^{DRY} + \Delta I_{M+D}^{DRY} \quad (10.1)$$

b) dla środowiska górnictwem suchego z wodą z układów zraszania:

$$\Delta I_{M+D+\dot{S}}^{DRY+H_2O} \neq \Delta I_{M+\dot{S}}^{DRY+H_2O} + \Delta I_{M+D}^{DRY+H_2O} \quad (10.2)$$

c) dla środowiska górnictwem mokrego:

$$\Delta I_{M+D+\dot{S}}^{WET} \neq \Delta I_{M+\dot{S}}^{WET} + \Delta I_{M+D}^{WET} \quad (10.3)$$

Na podstawie przeprowadzonych badań stanowiskowych wykazano, że rzeczywiście zachodzą te zależności. Wystąpienie tych zależności jednoznacznie świadczyło, że istnieje dodatkowy efekt interakcyjny oddziaływania sił dynamicznych na ścierniwo mineralne.

W szczególności dla środowiska górnictwem suchego stwierdzono, że różnica wynikająca ze wzoru 10.1, w pracy określona jako składowa $\Delta I_{D \rightarrow \dot{S}}^{DRY}$, ma charakter antagonistyczny i wyraża możliwe zmniejszenie zużycia ogniów w warunkach suchych na skutek znacznego rozkruszenia ścierniwa, co powoduje jego mniejsze oddziaływanie skrawające, oraz wystąpienie efektu umocnienia zgniotem strefy kontaktu ogniów łańcuchowych.

Z kolei dla środowiska górnictwem suchego z wodą z układów zraszania i środowiska górnictwem mokrego stwierdzono, że obie składowe oznaczone odpowiednio $\Delta I_{D \rightarrow \dot{S}}^{DRY+H_2O}$ i $\Delta I_{D \rightarrow \dot{S}}^{WET}$ mają charakter synergistyczny i wyrażają dodatkowe zwiększenie oddziaływania sił dynamicznych na procesy skrawania ziaren ścierniwo mineralnych, i co istotniejsze, zwiększenie intensywności procesów korozyjnych.

Stwierdzony charakter interakcyjny wszystkich trzech składowych wyrażających dodatkowy efekt sił dynamicznych na ziarna ścierniwa pozwalają uznać, że **przyjęta hipoteza pracy została wykazana**.

Niniejsza praca, poza celami naukowymi, ukierunkowana była również na rozwiązanie celu użytecznego, związanego z wdrożeniowym charakterem doktoratu. Efektem użytecznym pracy było opracowanie koncepcji i założeń technicznych dla pełnoskalowego stanowiska badawczego umożliwiającego prowadzenie badań zużyciowych na łańcuchach wielu rozmiarów zgodnie z normą PN-G-46701:1997 [58].

W tym miejscu Autor pracy pragnie podkreślić trudność przeprowadzonych testów zużyciowych wynikającą z oddziaływania pyłów z rozkruszających się ziaren piaskowca, co prowadziło do licznych uszkodzeń elementów stanowiska badawczego.

10.1. Wnioski

Na bazie przeprowadzonych wieloaspektowych badań wstępnych, jak i też testów laboratoryjnych i stanowiskowych sformułowano główny wniosek pracy:

Procesy interakcyjne, w tym szczególnie synergia, odgrywają kluczową rolę w procesie degradacji przegubów ogniwo łańcuchów górniczych.

Ponadto uzyskane wyniki badań pozwoliły na określenie następujących wniosków szczegółowych:

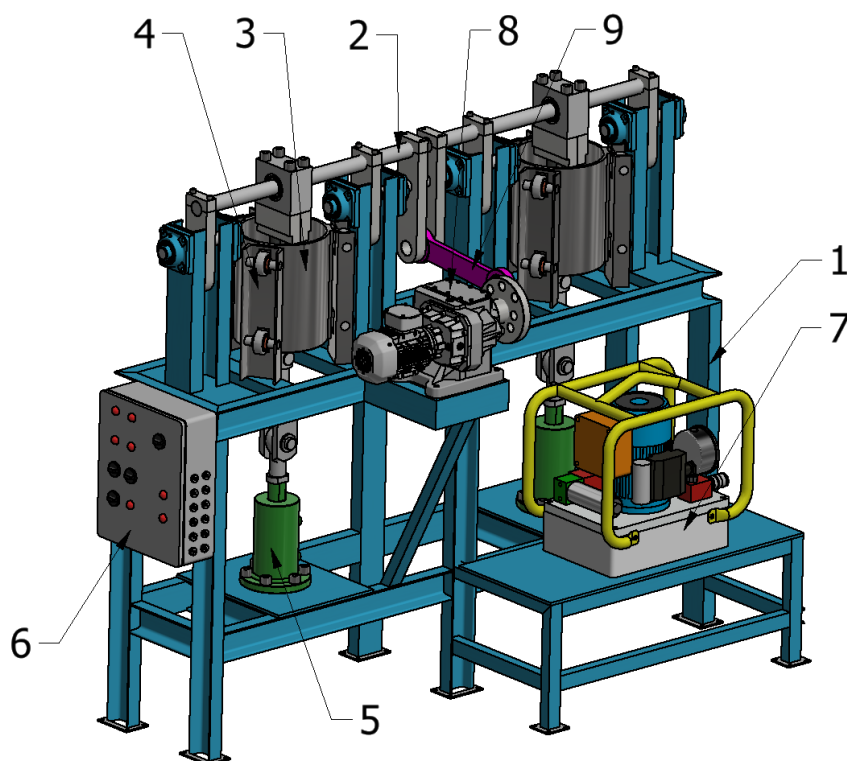
- 1) Zdecydowanie największy wpływ na postęp zużywania ogniwo łańcuchowych w rejonie współpracy ma obecność zawodnionego ścierniwa.
- 2) Transport suchego urobku powoduje znacznie mniejsze zużycie przegubów łańcuchowych, co daje podstawy do oczekiwania wyraźnie dłuższej trwałości łańcuchów przenośników pracujących w warunkach środowiskowych bez dostępu wody.
- 3) Obecność wody kopalnianej ma większy wpływ na degradację łańcuchów spowodowaną zjawiskami tribokorozyjnymi, niż obecność wody z układów zraszania.
- 4) Dodatkowe wymuszenia dynamiczne wpływają na sumaryczne zużycie ogniwo łańcuchowych, jednakże skutek ich jest złożony, gdyż ma charakter antagonistyczny, jak i też synergistyczny.
- 5) Badania rozkładów twardości warstwy wierzchniej w strefie kontaktu badanych ogniwo wykazały zjawisko utwardzenia w przypadku oddziaływania sił dynamicznych.
- 6) Wystąpienie efektu zgniotu mikrostruktury ogranicza intensywność zużycia ogniwo łańcuchowych.
- 7) Podstawową formą zużywania ogniwo w środowisku suchym są procesy tribologiczne, w tym głównie mikroskrawanie.
- 8) Pod wpływem procesów zużycia wieloczynnikowego dochodzi do podpowierzchniowych pęknięć warstwy wierzchniej o charakterze delaminacyjnym, a także do pęknięć zmęczeniowych wywołanych obecnością wtrąceń niemetalicznych i pęknięć odpowierzchniowych w obszarach wrębów rys.
- 9) Pod wpływem obciążenia możliwe jest wbicie ziaren mineralnych w powierzchnię ogniwo, co zmienia formę ich oddziaływania ściernego.
- 10) Produkty korozji powstają na powierzchniach ogniwo przy obecności wody demineralizowanej i kopalnianej oraz ich mieszanin ze składnikami mineralnymi.
- 11) Mieszaniny wód kopalnianych ze składnikami mineralnymi wykazują inne własności korozyjne, niż same wody kopalniane, co świadczy o zachodzeniu procesów interakcyjnych między ich składnikami chemicznymi.
- 12) Najbardziej intensywne procesy zużycia ogniwo łańcuchowych zachodzą przy łącznym oddziaływaniu ścierniwa mineralnego, wody korozyjnej i zmiennych sił obciążających.

10.2. Efekty wdrożeniowe pracy

Opracowane w ramach pracy stanowisko badawcze, przeznaczone było do badań zużycia łańcuchów w przegubie w warunkach skojarzonego oddziaływania czynników środowiskowych. Opracowane oprzyrządowanie było dostosowane do gabarytów ogniw łańcucha w rozmiarze 14×50, stosowanego w przenośnikach lekkich. Uzyskane wyniki jednoznacznie potwierdzają, że w zależności od zestawu czynników środowiskowych wartość zużycia ogniw znacząco się zmienia. Znajomość wspomnianych czynników oraz stosowanego rozmiaru łańcucha umożliwia przeprowadzenie badań stanowiskowych dla łańcuchów przeznaczonych do ścianowych przenośników zgrzebłowych, w przypadku których uzyskanie wysokiej trwałości jest szczególnie wymagane. Wynikiem takich badań stanowiskowych mogłaby być liczba cykli przegięć ogniw łańcuchowych w przegubie, po której wartość zużycia nie przekroczyłaby jeszcze wielkości dopuszczalnej przez producentów łańcuchów, a co z kolei pozwoliłoby na predykcję czasu eksploatacji ciągła łańcuchowego w danych warunkach eksploatacyjnych i dla danej długości przenośnika.

Realizacja ww. badań eksploatacyjnych może mieć postać usług badawczych, które mogą być wdrożone u pracodawcy Autora pracy. W celu wykazania możliwości wdrożenia rezultatów pracy, opracowano koncepcję stanowiska badawczego przeznaczonego do badań łańcuchów przenośników ścianowych o rozmiarach stosowanych w krajowym górnictwie. Sposób działania stanowiska w aspekcie kinematycznym oparto o przetestowane i zweryfikowane stanowisko badawcze łańcuchów do przenośników lekkich. Schematycznie stanowisko do badań łańcuchów do przenośników ścianowych przedstawiono na Rysunku 10.1.

Stanowisko badawcze służy do oceny trwałości ogniw łańcuchowych pracujących w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Próbkę stanowi para ogniw łańcuchowych: jedno z ogniw jest zamocowane nieruchomo, natomiast drugie porusza się w sposób wychylny względem przegubu. Ruch ten odwzorowuje współpracę ogniw podczas przetaczania się przez koło łańcuchowe przenośnika. Na ogniwo nieruchome przykładane jest obciążenie o stałej wartości, zależne od rozmiaru badanego łańcucha. Całość umieszczona jest w szczelnym zbiorniku otaczającym próbkę, który może być wypełniony ścierniwem mineralnym i/lub wodą. Taka konfiguracja pozwala na intensyfikację oddziaływań korozyjnych oraz tribokorozyjnych. Stanowisko umożliwia także zliczanie liczby pełnych cykli pracy do momentu osiągnięcia granicznego uszkodzenia próbki. Uzyskane dane służą do opracowania modelu predykcyjnego trwałości ciągła łańcuchowego w zależności od parametrów eksploatacyjnych maszyny, takich jak: długość przenośnika, jego prędkość, średni dobowy czas pracy oraz rodzaj transportowanego materiału.



Rys. 10.1. Konceptyjne stanowisko do badań pełnoskalowych – budowa konstrukcyjna (1-rama, 2-wahacz, 3-zbiornik z próbką, 4-prowadnica zbiornika, 5-siłownik hydrauliczny, 6-zeespół zasilająco-sterujący, 7-agregat hydrauliczny, 8-zeespół napędowy, 9-łącznik)

Pomimo podobieństwa w zakresie kinematyki działania, koncepcyjne stanowisko do badań pełnoskalowych (Rys. 10.1) różni się istotnie pod względem konstrukcyjnym od stanowisk laboratoryjnych.

Podstawę urządzenia stanowi spawana rama wykonana z ceowników hutniczych, która pełni funkcję nośną dla pozostałych elementów stanowiska. W górnej części ramy znajdują się punkty montażowe przeznaczone do łożyskowego zawieszenia wahacza. Wahacz pełni jednocześnie rolę uchwytu montażowego dla górnego ogniwa próbki, które połączone jest z nim przegubowo. Ruch obrotowy wahacza wokół osi montażowej, w określonym zakresie kątowym, powoduje wychylenie górnego ogniwa względem ogniwa dolnego. Dolne ogniwo próbki zamocowane jest w sposób swobodny: z jednej strony połączone jest przegubowo z górnym ogniwem, a z drugiej – za pomocą specjalnie zaprojektowanego uchwytu – z siłownikiem hydraulicznym. Siłownik ten odpowiada za wytwarzanie nominalnego obciążenia w trakcie badania, zastępując stosowane dotychczas obciążniki grawitacyjne. Zasilanie siłownika realizowane jest przez dedykowany agregat hydrauliczny, a wartość ciśnienia roboczego pozwala na precyzyjne określenie siły obciążającej, zależnej od rozmiaru badanego ogniwa. Zastosowanie hydraulicznego układu obciążającego umożliwia

przeprowadzanie badań także dla ogniw o większych wymiarach, dla których użycie obciążników byłoby niepraktyczne lub niemożliwe.

W celu umożliwienia jednoczesnego obciążania dolnego ogniwa oraz realizacji ruchu symulującego rzeczywistą współpracę między ogniwami łańcucha, konieczne było ograniczenie niepożądanej translacji pręta obciążającego w osiach prostopadłych do kierunku działania siły. Na podstawie doświadczeń eksploatacyjnych ze stanowiskiem dla łańcuchów typu 14×50 zastosowano zewnętrzne prowadzenie zbiornika w trzech słupkach rolkowych. Rozwiązanie to charakteryzuje się zwiększoną odpornością na siły boczne, które mogłyby prowadzić do przyspieszonego zużycia uszczelnień siłowników i zbiornika. Część napędowa stanowiska została zaprojektowana analogicznie do rozwiązania zastosowanego we wcześniejszym projekcie stanowiska. Geometria wahacza, łącznika oraz tarczy mimośrodowej zamontowanej na zespole napędowym zapewnia obustronne wychylenie ogniw w wymaganym zakresie kątowym, co umożliwia realistyczną symulację warunków pracy łańcucha.

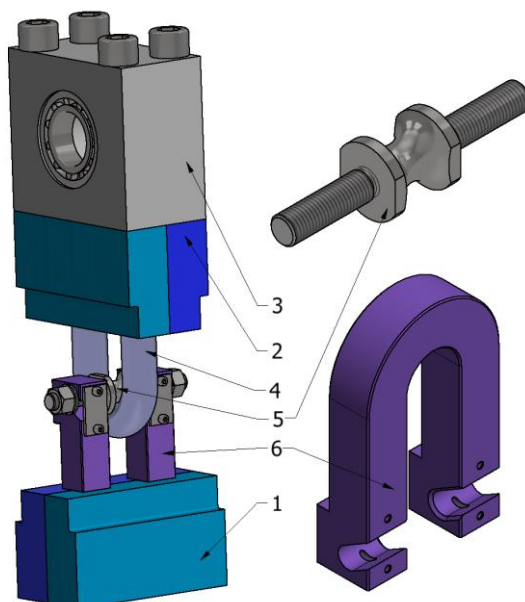
Kluczową różnicą względem wcześniejszego stanowiska badawczego jest także rezygnacja z mechanizmów generujących dodatkowe obciążenia dynamiczne. Decyzja ta została podjęta na podstawie analizy wyników wcześniejszych testów, które wykazały, że wpływ obciążeń dynamicznych na ogólny poziom zużycia ogniw nie zmienił w sposób znaczący poziomu tego zużycia.

W nowym stanowisku przewidziano możliwość montażu próbek o zunifikowanym kształcie (Rys. 10.2), umożliwiających badanie ich współpracy z ogniwami łańcuchowymi. Rozwiązanie to ma szczególne znaczenie w kontekście badań nad nowoczesnymi materiałami o zwiększonej trwałości i lepszych właściwościach tribologicznych. Wstępne badania przeprowadzone przez Autora z wykorzystaniem stali o ultrarozdrobnionej strukturze bainitycznej (niewłączone do niniejszej pracy) wykazały poprawę odporności na zużycie w warunkach współpracy z nominalnymi ogniwami. Wyniki te stanowią obiecującą podstawę do dalszych prac nad materiałami przeznaczonymi do produkcji co drugiego ogniwa ciągu łańcuchowego, które nie wymaga procesu zgrzewania, a tym samym może być zoptymalizowane pod kątem trwałości.

Prosta konstrukcja uchwytów (pozycje 1 i 2 na Rys. 10.2) oraz kształtowy sposób mocowania próbek umożliwiają rozszerzenie zastosowań stanowiska poza przemysł górniczy. Przykładem mogą być badania elementów zabezpieczających liny przed przecieraniem, takich jak kausze czy karabińczyki. Niewielka modyfikacja uchwytów umożliwia wyznaczanie granicznej liczby cykli dla różnych węzłów ciernych w zakresie dostępnych obciążeń.

Podsumowując, zaprezentowane stanowisko znacząco poszerza możliwości badawcze w zakresie analiz zużycia łańcuchów ogniowych w pełnym zakresie typowym dla norm

branżowych. Dzięki możliwości adaptacji do różnych par tribologicznych stanowisko staje się uniwersalnym narzędziem zwiększającym potencjał komercyjny jednostek badawczych zainteresowanych prowadzeniem badań trwałościowych i tribologicznych.



Rys. 10.2. Uchwyt przystosowany do badań zunifikowanych próbek specjalnych (1-uchwyt dolny, 2-uchwyt górny, 3-przegub wahacza, 4-ogniwo łańcuchowe, 5-próbka specjalna, 6-uchwyt próbki specjalnej)

10.3. Kierunki dalszych badań

Zbudowane stanowisko do badań łańcuchów do przenośników lekkich oraz opracowana koncepcja badań łańcuchów dużych stanowią podstawę do wyznaczenia kierunków dalszych prac badawczych. Szeroki zakres już przeprowadzonych prac badawczych w warunkach bliskich rzeczywistym warunkom eksploatacyjnym przenośników zgrzebłowych pozwolił wyjaśnić charakter procesów zużyciowych zachodzących w przegubie łańcuchowym. Jednocześnie ujawniły się zagadnienia, które powinny stanowić kontynuację niniejszych badań. Zdaniem Autora dalsze badania dotyczące tematyki pracy powinny dotyczyć:

1. Badania łańcuchów o innych rozmiarach – bieżący zakres prac badawczych skupił się jedynie na łańcuchu w rozmiarze 14×50. Uzyskane wyniki mają charakter jakościowy, nie ilościowy i nie można ich w prosty sposób przeskalować na inne rozmiary łańcuchów przenośnikowych. Opracowana koncepcja pełnoskalowego stanowiska badawczego powinna stanowić podstawę do wytworzenia aparatury badawczo-pomiarowej do badań łańcuchów z pełnego zakresu rozmiarowego normy PN-G-46701:1997 [58]. Opracowanie analizy zużyciowej dla całego typoszeregu łańcuchów górniczych wydaje się więc naturalną kontynuacją bieżącej pracy.

2. Badania zużyciowe dla zróżnicowanego ścierniwa mineralnego – badania realizowane w ramach pracy, z uwagi na określony czas jej realizacji, były ograniczone do jednego rodzaju ścierniwa mineralnego. Wstępne badania laboratoryjne na tribotesterze pokazały znaczące różnice w wartościach współczynnika tarcia, kształtu i rozmiaru śladu zużycia w zależności od testowanego materiału ściernego. Ilość najczęściej występujących materiałów skalnych transportowanych przenośnikami zgrzeblowymi jest ograniczona, dlatego takie badania są możliwe do realizacji.
3. Badania szybkości korozji w obecności zróżnicowanych mieszanin wodnych i wodno-mineralnych. Badania laboratoryjne składów chemicznych poszczególnych wód dołowych oraz badania potencjostatyczne i potencjodynamiczne wykazały, że stosowane do oceny korozyjności materiałów pod wpływem wód kopalnianych współczynniki, nie zawsze poprawnie przewidują agresywność korozyjną tych czynników środowiskowych. Z uwagi na możliwą różnorodność składów wód oraz wpływu na ich skład ścierniwa mineralnego, z którym się mieszają, zagadnienie to jest istotne w aspekcie możliwej predykcji zużycia elementów maszyn górniczych.
4. Badania nowych materiałów z potencjalnym zastosowaniem w produkcji łańcuchów – zaprezentowane stanowisko badawcze zostało rozbudowane o możliwość instalacji zunifikowanych próbek w uchwytach roboczych. Ich wykorzystanie umożliwia prowadzenie analiz porównawczych pod kątem zużycia w odniesieniu do niestosowanych obecnie w procesie produkcji materiałów. Poszukiwania materiałów zwiększających właściwości przeciwzużyciowe łańcuchów zgrzeblowych pozostają nadal aktualne i konieczne.

SPIS LITERATURY

- 1 ANTONIAK, J. *Tendencje rozwojowe w budowie napędów przenośników zgrzeblowych o dużej wydajności transportowej*. Projekt celowy 7TO7C-036-96-C/2999, 1998.
- 2 REMIORZ, E.; MIKUŁA, S. *Podstawowe formy degradacji własności użytkowych łańcuchów ogniowych górniczych stosowanych w maszynach ścianowych*. Maszyny Górnicze, 2017, 35.3: 14-26.
- 3 ZUM GAHR, K.-H. *Microstructure and wear of materials*. Amsterdam: Elsevier, 1987.
- 4 PHILIPP, G. B. *Die Rundstahlkette als Element der Leistungsübertragung bei Förderern im Strebbau*. 1999.
- 5 WIECZOREK, A. N. *Badania skojarzonego oddziaływania górniczych czynników środowiskowych na degradację powierzchni bębnow chodnikowych przenośników zgrzeblowych*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2018.
- 6 THIELE GMBH – Materiały katalogowe i informacyjne.
- 7 PHILIPP, G.; GERTH, A. *Assessing the corrosion risk to coal-face chains*. Journal of Mining Reports, 2016, t. 152, nr 2, s. 138–148.
- 8 PHILIPP, G.; FORCH, K. *Ocena mechanicznej podatności łańcuchów na pęknięcia w wyniku korozji*. Wiadomości Górnicze, 2006, t. 57, nr 10, s. 549–560.
- 9 KANDZIA, R. *Opracowanie metodyki doboru łańcuchów górniczych na podstawie badań laboratoryjnych i przemysłowych*. Praca doktorska. Kraków: Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Inżynierii Maszyn i Transportu, 2023.
- 10 KOTWICA, K.; FURMANIK, K.; SCHERF, B. *Wpływ warunków pracy na zużycie i trwałość ciągów łańcuchowych zgrzeblowych przenośników ścianowych w wybranych kopalniach węgla kamiennego*. Przegląd Górniczy, 2011, t. 67.
- 11 MIKUŁA, S. *Trwałość zmęczeniowa ciągów łańcuchowych górniczych maszyn urabiających i transportowych*. Gliwice: Centralny Ośrodek Projektowo-Konstrukcyjny Maszyn Górniczych KOMAG, 1978.
- 12 KANDZIA, R.; PHILIPP, G.; PYTLIK, A.; SZOT, M.; PARADOWSKI, K. *Możliwości podwyższenia niezawodności eksploatacji przenośników zgrzeblowych w wyrobiskach ścianowych w wyniku właściwego doboru łańcuchów górniczych z uwzględnieniem ich własności dynamicznych*. Wiadomości Górnicze, 2009, t. 60, nr 7–8, s. 421–428.

- 13 KOCAŃDA, S. *Zmęczeniowe niszczenie metali*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1972.
- 14 WIECZOREK, A. N.; WÓJCICKI, M.; KALITA, M.; KANDZIA, R. *Problems of wear of the chains used in mine scraper conveyors, caused by friction and corrosion*. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. 2024, 122, 293-304.
- 15 JIANG, S.B.; HUANG, S.; ZENG, Q.L.; WANG, C.L.; GAO, K.D. *Dynamic properties of chain drive system considering multiple impact factors*. International Journal of Simulation and Modelling, 2022, t. 21, s. 284–295.
- 16 SUCHOŃ, J.; DRWIĘGA, A.; GAŚSIOR, R. *Identyfikacja wpływu współpracy gwiazdy łańcuchowej z łańcuchem na obciążenia dynamiczne w przenośniku zgrzeblowym*. Międzynarodowa konferencja naukowo-techniczna „Trwałość elementów i węzłów konstrukcyjnych maszyn górniczych”. Gliwice-Ustroń: Instytut Mechanizacji Górnictwa Politechniki Śląskiej, 2008.
- 17 REMIORZ, E.; MIKUŁA, S. *The synergy of fatigue, corrosion and abrasive wear processes in operation of mining round link chains*. Archives of Mining Sciences, 2021, t. 66, nr 1, s. 29–42.
- 18 STACHOWIAK, G. B.; STACHOWIAK, G. W. *The effects of particle characteristics on three-body abrasive wear*. Wear, 2001, t. 249, nr 3–4, s. 201–207.
- 19 LABAŠ, M.; KREPELKA, F.; IVANIČOVÁ, L. *Assessment of abrasiveness for research of rock cutting*. Acta Montanistica Slovaca, 2012, t. 17, nr 1, s. 65.
- 20 XIA, R.; LI, B.; WANG, X.; YANG, Z.; LIU, L.; *Screening the main factors affecting the wear of the scraper conveyor chute using the Plackett–Burman method*. Mathematical Problems in Engineering, 2019, t. 2019, nr 1.
- 21 TLOTLENG, M. T. *Coal characteristics that lead to abrasion during grinding*. PhD Thesis. Johannesburg: University of the Witwatersrand, 2011.
- 22 RATIA, V.; HEINO, V.; VALTONEN, K.; VIPPOLA, M.; KEMPPAINEN, A.; SIITONEN, P.; KUOKKALA, V.T. *Effect of abrasive properties on the high-stress three-body abrasion of steels and hard metals*. Tribologia – Finnish Journal of Tribology, 2014, t. 32, nr 1, s. 3–18.
- 23 VALTONEN, K.; RATIA, V.; OJALA, N.; KUOKKALA, V.T. *Comparison of laboratory wear test results with the in-service performance of cutting edges of loader buckets*. Wear, 2017, t. 388, s. 93–100.
- 24 HAKAMI, F.; PRAMANIK, A.; BASAK, A.K. *Effect of the abrasive particle size*. Tribology of Elastomers. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022, s. 89–110.
- 25 LAWROWSKI, Z. *Tribologia: tarcie, zużycie i smarowanie*. Wrocław: Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, 2008.

- 26 MUCHA, K. *Ścierność skał w aspekcie prognozowania zużycia noży kombajnowych*. Praca doktorska, Akademia Górniczo Hutnicza 2019.
- 27 BURAKOWSKI, T. *Rozważania o synergizmie w inżynierii powierzchni*. Radom: Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, 2004.
- 28 LOPEZ-ORTEGA, A.; BAYÓN, R.; ARANA, J.L.; ARREDONDO, A.; IGARTUA, A. *Influence of temperature on the corrosion and tribocorrosion behaviour of High-Strength Low-Alloy steels used in offshore applications*. Tribology International, 2018, t. 121, s. 341–352.
- 29 VAZQUEZ-HERNANDEZ, A. O.; ELLWANGER, G. B.; SAGRILO, L. V. S. *Reliability-based comparative study for mooring lines design criteria*. Applied Ocean Research, 2006, t. 28, nr 6, s. 398–406.
- 30 LÓPEZ, A.; BAYÓN, R.; PAGANO, F.; IGARTUA, A.; ARREDONDO, A.; ARANA, J.L.; GONZÁLEZ, J.J.; *Tribocorrosion behaviour of mooring high strength low alloy steels in synthetic seawater*. Wear, 2015, t. 338, s. 1–10.
- 31 LÓPEZ-ORTEGA, A.; BAYÓN, R.; ARANA, J. L. *Evaluation of protective coatings for offshore applications*. Corrosion and tribocorrosion behavior in synthetic seawater. Surface and Coatings Technology, 2018, t. 349, s. 1083–1097.
- 32 MINDIVAN, F.; YILDIRIM, M.; BAYINDIR, F.; MINDIVAN, H. *Corrosion and tribocorrosion behavior of cast and machine milled Co-Cr alloys for biomedical applications*. Acta Physica Polonica A, 2016, t. 129, nr 4, s. 701–704.
- 33 MISCHLER, S. *Triboelectrochemical techniques and interpretation methods in tribocorrosion: A comparative evaluation*. Tribology International, 2008, t. 41, nr 7, s. 573–583.
- 34 WATSON, S.W.; FRIEDERSDORF, F.J.; MADSEN, B.W.; CRAMER, S.D. *Methods of measuring wear-corrosion synergism*. Wear, 1995, t. 181, s. 476–484.
- 35 JEMMELY, P.; MISCHLER, S.; LANDOLT, D. *Electrochemical modeling of passivation phenomena in tribocorrosion*. Wear, 2000, t. 237, nr 1, s. 63–76.
- 36 CAO, S.; MISCHLER, S. *Modeling tribocorrosion of passive metals – A review*. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2018, t. 22, nr 4, s. 127–141.
- 37 PONTIAUX, P.; WENGER, F.; CELIS, J.-P. *Tribocorrosion: material behavior under combined conditions of corrosion and mechanical loading*. Corrosion resistance.: InTech, 2012, s. 81–106.
- 38 STACK, M. M. *Mapping tribo-corrosion processes in dry and in aqueous conditions: some new directions for the new millennium*. Tribology International, 2002, t. 35, nr 10, s. 681–689.

- 39 DALMAU, A.; RICHARD, C.; IGUAL-MUÑOZ, A. *Degradation mechanisms in martensitic stainless steels: Wear, corrosion and tribocorrosion appraisal*. Tribology International, 2018, t. 121, s. 167–179.
- 40 GHANBARZADEH, A.; SALEHI, F.M.; BRYANT, M.; NEVILLE, A.; *A new asperity-scale mechanistic model of tribocorrosive wear: synergistic effects of mechanical wear and corrosion*. Journal of Tribology, 2019, t. 141, nr 2.
- 41 FALLAHNEZHAD, K.; FEYZI, M.; GHADIRINEJAD, K.; HASHEMI, R.; TAYLOR, M.; *Finite element based simulation of tribocorrosion at the head-neck junction of hip implants*. Tribology International, 2022, t. 165.
- 42 YIN, S.; LI, D. Y. *A new phenomenon observed in determining the wear-corrosion synergy during a corrosive sliding wear test*. Tribology Letters, 2008, t. 29, nr 1, s. 45–52.
- 43 STACHOWIAK, A.; TYCZEWSKI, P.; ZWIERZYCKI, W. *The application of wear maps for analyzing the results of research into tribocorrosion*. Wear, 2016, t. 352, s. 146–154.
- 44 MUNOZ, A. I.; ESPALLARGAS, N.; MISCHLER, S. *Tribocorrosion*. Cham: Springer International Publishing, 2020.
- 45 WANG, X. Y.; LI, D. Y. *Investigation of the synergism of wear and corrosion using an electrochemical scratch technique*. Tribology Letters, 2001, t. 11, nr 2, s. 117–120.
- 46 CELIS, J.-P.; PONTIAUX, P. *Testing tribocorrosion of passivating materials supporting research and industrial innovation*. Leeds: Maney Publishing, 2011.
- 47 KIRCHGAßNER, M.; BADISCH, E.; FRANEK, F. *Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact*. Wear, 2008, t. 265, nr 5–6, s. 772–779.
- 48 SAHA, G.; VALTONEN, K.; SAASTAMOINEN, A.; PEURA, P.; KUOKKALA, V.T. *Impact-abrasive and abrasive wear behavior of low carbon steels with a range of hardness-toughness properties*. Wear, 2020, t. 450, s. 203263.
- 49 WIDDER, L.; VARGA, M.; ADAM, K.; KUTTNER, A. *Development of impact energy distribution of various abrasives during cyclic impact/abrasion testing*. Solid State Phenomena, 2017, t. 267, s. 234–242.
- 50 KENNEDY, D.M.; HELALI, M.; HASHMI, M.S.J. *Dynamic abrasion resistance of coatings applied to engineering materials*. Surface and Coatings Technology, 1994, t. 68, s. 477–481.
- 51 RATIA, V.; VALTONEN, K.; KUOKKALA, V.-T. *Impact-abrasion wear of wear-resistant steels at perpendicular and tilted angles*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2013, t. 227, nr 8, s. 868–877.

- 52 TEERI, T.; KUOKKALA, VT.; SIITONEN, P.; KIVIKYTÖ-REPONEN, P.; LIIMATAINEN, J. *Impact wear in mineral crushing. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Engineering*, 2006, t. 12, nr 4, s. 408–418.
- 53 RATIA, V.; VALTONEN, K.; KEMPPAINEN, A.; KUOKKALA, V.T. *High-stress abrasion and impact-abrasion testing of wear resistant steels*. Tribology Online, 2012, t. 8, nr 2, s. 152–161.
- 54 CHINTHA, A. R.; VALTONEN, K.; KUOKKALA, V.T.; KUNDU, S.; PEET, M.J.; BHADESHIA, H.; *Role of fracture toughness in impact-abrasion wear*. Wear, 2019, t. 428, s. 430–437.
- 55 WIECZOREK, A.N. *Operation-oriented studies on wear properties of surface-hardened alloy cast steels used in mining in the conditions of the combined action of dynamic forces and an abrasive material*. Archives of Metallurgy and Materials, 2017,
- 56 SUNDSTRÖM, A.; RENDÓN, J.; OLSSON, M. *Wear behaviour of some low alloyed steels under combined impact/abrasion contact conditions*. Wear, 2001, t. 250, nr 1–12, s. 744–754.
- 57 WILSON, R.D.; HAWK, J.A. *Impeller wear impact-abrasive wear test*. Wear, 1999, t. 225, s. 1248–1257.
- 58 PN-G-46701:1997. *Łańcuchy ogniwowe górnicze*. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 1997.
- 59 ISO 610:1990. *High-tensile steel chains (round link) for chain conveyors and coal ploughs*. Genewa: International Organization for Standardization, 1990.
- 60 DIN 22252. *Rundstahlketten für Stetigförderer und Gewinnungsanlagen im Bergbau*. Berlin: Deutsches Institut für Normung.
- 61 SUCHOŃ, J. *Górnice przenośniki zgrzeblowe: budowa i zastosowanie*. Gliwice: Instytut Techniki Górniczej KOMAG, 2012.
- 62 WHOLESale RIGGING PRODUCTS – Materiały katalogowe i informacyjne.
- 63 FASING S.A. – Materiały katalogowe i informacyjne.
- 64 MIĘDZYNARODOWE TARGI GÓRNICTWA, PRZEMYSŁU ENERGETYCZNEGO I HUTNICZEGO KATOWICE. *Łańcuchy ogniwowe górnicze płaskie wysokowytrzymałe SOLID PROFILE FASING 50x146/174-116*. Katowice; 2019.
- 65 CATERPILLAR INC – Materiały katalogowe i informacyjne.
- 66 ANTONIAK, J.; LUTYŃSKI, A.; PASCHEDAG, U. *Inteligentny system napędowy CST dla ścianowych przenośników zgrzeblowych dużej mocy*. Maszyny Górnicze, 2000, t. 18, s. 22–28.
- 67 RFM RYFAMA – Materiały katalogowe i informacyjne.
- 68 VOEST-ALPINE – Materiały katalogowe i informacyjne.

- 69 KOMATSU – Materiały katalogowe i informacyjne.
- 70 TILGNER – Materiały katalogowe i informacyjne.
- 71 WAFIOS AG – Materiały katalogowe i informacyjne.
- 72 EFD Induction Inc. – Materiały katalogowe i informacyjne.
- 73 Magnum-Pro – Materiały katalogowe i informacyjne.
- 74 PN-EN 45501:2015-05. *Zagadnienia metrologiczne wag nieautomatycznych*. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2015.
- 75 Global 3D – Materiały katalogowe i informacyjne.
- 76 DOLIPSKI, M.; CHELUSZKA, P.; SOBOTA, P. *Pomiary obciążeń dynamicznych ścianowego przenośnika zgrzeblowego w warunkach eksploatacyjnych*. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 2012, 50.2: 13-19.
- 77 DOLIPSKI, M.; REMIORZ, E.; SOBOTA, P. *Determination of dynamic loads of sprocket drum teeth and seats by means of a mathematical model of the longwall conveyor*. Archives of Mining Sciences, 2012, t. 57, nr 4.
- 78 REN, W.J.; WANG, L.; MAO, Q.H.; JIANG, S.B.; HUANG, S. *Coupling properties of chain drive system under various and eccentric loads*. International Journal of Simulation and Modelling, 2020, t. 19, nr 4, s. 643–654.
- 79 SUCHOŃ, J.; DRWIĘGA, A.; GAŚIOR, S. *Analiza obciążeń dynamicznych przenośników zgrzeblowych na podstawie badań w warunkach eksploatacyjnych*. Maszyny Górnicze, 2008, t. 26, s. 26–31.
- 80 ITG KOMAG. Dokumentacja techniczna W20.270. Gliwice: Instytut Techniki Górniczej KOMAG, niepublikowana.
- 81 WÓJCICKI, M.; WIECZOREK, A. N.; NIEŚPIAŁOWSKI, K. *Identification of dynamic forces in the chain during the steady operation of a rescue scraper conveyor*. Mining Machines, 2023, t. 41, nr 2, s. 119–131.
- 82 Hottinger Messtechnik – Materiały katalogowe i informacyjne.
- 83 TOKARCZYK, J.; WÓJCICKI, M.; WIECZOREK, A. N. *Impact of load on the contact surface of cooperating chain links of scraper conveyors*. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport, 2025, t. 128.
- 84 Opta-Tech – Materiały katalogowe i informacyjne.
- 85 PN-EN 12502-3:2006. *Ochrona materiałów metalowych przed korozją – Wytyczne do oceny ryzyka wystąpienia korozji w systemach rozprzeczania i magazynowania wody – Część 3: Czynniki oddziałujące na materiały żelazne cynkowane zanurzeniowo*. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2006.
- 86 PN-EN ISO 10304-1:2009+AC:2012. *Jakość wody – Oznaczanie rozpuszczonych anionów za pomocą chromatografii jonowej – Część 1: Oznaczanie bromków*,

- chlorków, fluorków, azotanów, azotynów, fosforanów i siarczanów*. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2009.
- 87 PN-EN ISO 7980:2002. *Jakość wody – Oznaczanie wapnia i magnezu – Metoda atomowej spektrometrii absorpcyjnej*. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2002.
- 88 PN-EN ISO 9963-1:2001+Ap1:2004. *Jakość wody – Oznaczanie zasadowości – Część 1: Oznaczanie zasadowości ogólnej i złożonej*. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2001.
- 89 GAMRY – Materiały katalogowe i informacyjne.
- 90 AntonPaar – Materiały katalogowe i informacyjne.
- 91 MAHR – Materiały katalogowe i informacyjne.
- 92 ThermoFisher Scientific – Materiały katalogowe i informacyjne.
- 93 OptoTom – Materiały katalogowe i informacyjne.
- 94 Spectro – Materiały katalogowe i informacyjne.
- 95 Future-Tech CORP – Materiały katalogowe i informacyjne.
- 96 PN-EN 10027-2. *Systemy oznaczania stali – Część 2: System numeracji stali*. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny.
- 97 PN-72/H-84030. *Stale stopowe konstrukcyjne. Gatunki i wymagania*. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 1972.
- 98 BN-1071-05:1975. *Wody kopalniane – Oznaczenie szybkości korozji i klasyfikacja agresywności korozyjnej względem stali węglowych konstrukcyjnych zwykłej jakości*. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 1975.
- 99 PATER, Z.; SAMOŁYK, G. *Podstawy technologii obróbki plastycznej metali*. Lublin: Politechnika Lubelska, 2013.
- 100 STACHOWIAK, G.; BATCHELOR, A. W. *Engineering tribology*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2025.
- 101 ANAEE, R. A. M.; ABDULMAJEED, M. H. *Tribocorrosion*. Advances in tribology.; Hindawi, 2016.
- 102 BATCHELOR, A. W.; LAM, L. N.; CHANDRASEKARAN, M. *Materials degradation and its control by surface engineering*. Singapore: World Scientific, 2011.
- 103 FISCHER, A.; MISCHLER, S. *Tribocorrosion: fundamentals, materials and applications*. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, t. 39, nr 15, s. E01.
- 104 LANDOLT, D. *Electrochemical and materials aspects of tribocorrosion systems*. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, t. 39, nr 15, s. 3121.
- 105 LANDOLT, D.; MISCHLER, S. (red.). *Tribocorrosion of passive metals and coatings*. Amsterdam: Elsevier, 2011.

- 106 MATHEW, M.T.; SRINIVASA PAI, P.; POURZAL, R.; FISCHER, A.; WIMMER, M.A. *Significance of tribocorrosion in biomedical applications: overview and current status*. Advances in Tribology, 2009, t. 2009, nr 1, s. 250986.
- 107 MISCHLER, S.; DEBAUD, S.; LANDOLT, D. *Wear-accelerated corrosion of passive metals in tribocorrosion systems*. Journal of the Electrochemical Society, 1998, t. 145, nr 3, s. 750.
- 108 NADOLNY, K.; SELECH, J. *Ocena składowych zużycia procesów tribologicznych w środowisku ścierno-korozyjnym*. Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering, 2007, t. 52, nr 2, s. 5–15.
- 109 STACHOWIAK, A. *Problemy modelowania zużywania tribokorozyjnego w układach ślizgowych*. Radom: Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji–PIB, 2012.
- 110 STACHOWIAK, A.; ZWIERZYCKI, W. *Tribocorrosion modeling of stainless steel in a sliding pair of pin-on-plate type*. Tribology International, 2011, t. 44, nr 10, s. 1216–1224.
- 111 STACHOWIAK, A.; ZWIERZYCKI, W. *Uogólniony model zużywania tribokorozyjnego*. Tribologia, 2014, z. 2, s. 147–154.
- 112 STACHOWIAK, A.; ZWIERZYCKI, W. *Verification of computational model for corrosive and mechanical wear*. Maintenance and Reliability, 2009, t. 44, nr 4, s. 28–36.
- 113 TYCZEWSKI, P. *Złożone warunki zużycia mechaniczno-ścierno-korozyjnego, występujące w cukrowniach*. MOTROL, 2009, t. 11c, s. 191–198.
- 114 TYCZEWSKI, P. *Złożone warunki zużycia mechaniczno-ścierno-korozyjnego*. Problemy Eksploatacji, 2010, nr 1, s. 63–70.
- 115 TYCZEWSKI, P. *Modele interpretacyjne mechanizmu zużycia ścierno-korozyjnego*. Rozprawa doktorska. Poznań: Politechnika Poznańska, 2002.
- 116 TYCZEWSKI, P.; NADOLNY, K. *Analysis of mechanical-abrasive-corrosive wear in sugar factories*. Inżynieria Rolnicza, 2007, nr 5(93), s. 409–414.

STRESZCZENIE

M. WÓJCICKI

IDENTYFIKACJA SYNERGIZMU ODDZIAŁYWANIA CZYNNIKÓW ŚRODOWISKA KOPALNIANEGO W ASPEKTCIE OGRANICZENIA ZUŻYCIA OGNIW ŁAŃCUCHOWYCH PRZENOŚNIKÓW ZGRZEBŁOWYCH

Efektywność procesu produkcyjnego stanowi kluczowy czynnik determinujący opłacalność ekonomiczną działań operacyjnych przedsiębiorstw. Przykładem branży, w której środowisko pracy ma zasadnicze znaczenie, jest górnictwo surowców mineralnych. W przypadku górnictwa podziemnego, zarówno przy eksploatacji ścianowej, jak i korytarzowej, poziom wydajności w dużej mierze zależy od zastosowanych środków transportu bliskiego, w tym przenośników zgrzeblowych. Urządzenia te charakteryzują się odpornością na trudne warunki górnicze i mogą być wykorzystywane w najbardziej wymagających środowiskach. Mimo to, poszczególne ich komponenty i zespoły narażone są na przyspieszone zużycie, co może ograniczać ich zdolność do pełnienia funkcji transportowych. Szczególną uwagę zwrócić należy na górnicze łańcuchy ogniowe, które stanowią zasadniczy element napędu ciągłego przenośników zgrzeblowych.

Celem naukowym pracy była identyfikacja synergizmu oddziaływania czynników środowiska kopalnianego w aspekcie ograniczenia zużycia ogniów łańcuchowych przenośników zgrzeblowych. W pracy przyjęto tezę:

Łączne oddziaływanie ścierniwa i zmiennych sił dynamicznych w otoczeniu czynników korozyjnych, jak i też bez nich, skutkuje dodatkowym efektem interakcyjnym w trakcie procesu zużycia wieloczynnikowego ogniów łańcuchowych.

Pierwszy rozdział pracy wprowadza w tematykę wpływu środowiska górniczego – m.in. wody, ścierniwa i obciążeń dynamicznych – na degradację ogniów łańcuchowych stosowanych w przenośnikach zgrzeblowych.

Rozdział drugi stanowi uzasadnienie realizacji badań. Zwrócono uwagę na ciągle aktualne problemy związane z eksploatacją napędów łańcuchowych oraz możliwość występowania zjawiska synergii w kontekście zużycia elementów maszyn, polegającego na wzmocnieniu efektu w wyniku współdziałania wielu czynników. Wskazano, że synergistyczne oddziaływania mogą znacząco skracać trwałość węzłów roboczych, a ich właściwe poznanie sprzyja projektowaniu bardziej odpornych technicznie przenośników, dostosowanych do specyficznych warunków środowiskowych. Podkreślono również, że pomimo istotności zjawiska synergii w eksploatacji przenośników zgrzeblowych, literatura naukowa nie

prezentuje badań identyfikujących ten proces w odniesieniu do górniczych łańcuchów ogniowych.

Rozdział trzeci określa cel, problem oraz hipotezę badawczą, a także definiuje zakres pracy.

Rozdział czwarty przedstawia budowę łańcuchów ogniowych wykorzystywanych w górnictwie, ich metody wytwarzania i eksploatacji oraz zakres zastosowań.

W rozdziale piątym omówiono przyjętą metodologię badań oraz wykorzystane metody pomiarowe w badaniach laboratoryjnych i stanowiskowych. Zaprezentowano również zaprojektowane stanowisko badawcze, służące do analiz synergizmu procesu zużycia ogni łańcuchowych.

Szósty rozdział zawiera opis przeprowadzonych badań, w tym dobór warunków eksperymentalnych, parametrów współpracy ogni oraz materiałów środowiskowych przyspieszających procesy degradacyjne przegubów.

Rozdział siódmy przedstawia wyniki badań laboratoryjnych, obejmujące m.in. badania szybkości korozji wód kopalnianych i ich mieszanin ze ścierniwem oraz badania tribologiczne ścierniw w wodzie demineralizowanej. Ich celem było wytypowanie materiałów decydujących o zużyciu ogni w dalszych badaniach stanowiskowych.

Rozdział ósmy opisuje badania stanowiskowe zużycia ogni w przegubach pod wpływem skojarzenia czynników degradacyjnych. Zawiera opis badań, wyniki, szczegółową analizę form zużycia ogni (SEM, EDS, metalografia, pomiary twardości i bezpośrednie obserwacje ogni) oraz analizę produktów zużycia.

W rozdziale dziewiątym przedstawiono opracowane modele wieloczynnikowego zużywania się łańcuchów przenośnikowych w środowisku górniczym, uwzględniające trzy możliwe typy warunków eksploatacyjnych przenośników zgrzeblowych.

Rozdział dziesiąty podsumowuje całość pracy, prezentując wnioski wynikające z przeprowadzonych badań oraz wskazując dalsze kierunki badań, wynikające z przeprowadzonych eksperymentów. Naukowy wymiar pracy polegał przede wszystkim na określeniu synergicznego oddziaływania różnych czynników środowiska kopalnianego w procesie zużywania się ogni. Analiza przeprowadzonych testów stanowiskowych pozwoliła stwierdzić, że synergizm stanowi najczęściej występujące zjawisko interakcyjne w trakcie degradacji ogni łańcuchowych w przegubie, a jego intensywność i obecność są ściśle uwarunkowane charakterem oraz rodzajem zestawionych czynników środowiskowych. Wyniki badań dowiodły, iż sam dobór parametrów tych czynników odgrywa decydującą rolę w tempie zużywania się przegubów ogni łańcuchowych. W każdym przypadku potwierdzono również, że zmiana konfiguracji lub dołączenie kolejnych czynników degradacyjnych wpływa na całkowity poziom zużycia przegubu, działając w sposób interakcyjny. Potwierdzeniem efektu interakcyjnego okazało się wykazanie, że składowa wynikająca ze wspólnego działania

czynnika dynamicznego i ściernego w danej grupie środowiskowej różni się od sumy efektów, jakie oba te czynniki wywierają oddzielnie. Fakt ten umożliwia uznanie, że przyjęta hipoteza badawcza znalazła potwierdzenie.

Praca, poza swoim naukowym charakterem, ukierunkowana była również na osiągnięcie celu praktycznego, związanego z wdrożeniowym aspektem doktoratu. Rezultatem użytecznym badań stało się opracowanie koncepcji oraz założeń technicznych pełnoskalowego stanowiska badawczego, które pozwala prowadzić testy zużyciowe na łańcuchach o różnych rozmiarach zgodnie z normą PN-G-46701:1997.

ABSTRACT

M. WÓJCICKI: IDENTIFICATION OF THE SYNERGISTIC EFFECTS OF MINING ENVIRONMENTAL FACTORS IN REDUCING THE WEAR OF CHAIN LINKS IN ARMoured CONVEYORS

The efficiency of the production process constitutes a key factor determining the economic viability of operational activities in enterprises. An illustrative example of an industry where the working environment plays a crucial role is mineral resource mining. In underground mining, both in longwall and room-and-pillar operations, productivity largely depends on the applied means of local transport, including armoured conveyors. These devices are characterized by high resistance to harsh mining conditions and are suitable for use in the most demanding environments. Nevertheless, individual components and assemblies are subject to accelerated wear, which may limit their ability to perform transport functions. Particular attention should be given to mining chain links, which constitute the primary component of the traction drive in armoured conveyors.

The scientific objective of this study was to identify the synergistic effects of mining environmental factors in the context of reducing the wear of chain links in armoured conveyors. The study adopted the following hypothesis:

The combined influence of abrasive particles and variable dynamic forces, both in the presence and absence of corrosive factors, results in an additional interaction effect during the multifactorial wear process of chain links.

The first chapter introduces the topic of the influence of the mining environment—such as water, abrasive particles, and dynamic loads—on the degradation of chain links used in armoured conveyors.

The second chapter discusses the rationale for conducting the research. It highlights the ongoing challenges associated with the operation of chain drives and the potential occurrence of synergistic phenomena in machine component wear, where the combined effect of multiple factors exceeds the sum of their individual impacts. It is noted that such synergistic interactions can significantly shorten the service life of working components, and understanding them can support the design of more technically durable armoured conveyors adapted to specific environmental conditions. It is further emphasized that, despite the importance of synergistic effects in the operation of armoured conveyors, the scientific literature lacks studies that identify this process in the context of mining chain links.

The third chapter defines the research aim, problem, and hypothesis, as well as the scope of the study. Chapter four presents the construction of chain links used in mining, their manufacturing and operational techniques, and the scope of their applications.

Chapter five describes the adopted research methodology and the measurement methods used in both laboratory and field studies. The chapter also presents a custom-designed experimental setup dedicated to the analysis of the synergistic wear process of chain links.

Chapter six details the conducted experiments, including the selection of experimental conditions, link interaction parameters, and environmental materials that accelerate joint degradation processes.

Chapter seven presents the results of laboratory studies, including measurements of corrosion rates in mine waters and their mixtures with abrasive particles, as well as tribological tests of abrasives in demineralized water. The aim was to identify materials that determine chain link wear for subsequent field experiments.

Chapter eight describes the field studies on link wear in joints under the combined influence of degradation factors. This chapter includes a description of the experiments, results, a detailed analysis of wear forms (SEM, EDS, metallography, hardness profiles, and direct observations of chain links), and an analysis of wear products.

Chapter nine presents developed models of multifactorial wear of chain links in mining environments, considering three possible operational conditions of armoured conveyors.

Finally, chapter ten summarizes the study, presenting conclusions drawn from the conducted research and indicating further research directions based on the experimental results obtained. The scientific dimension of the work consisted primarily in determining the synergistic effects of various factors of the mining environment in the process of chain link wear. The analysis of the conducted stand tests revealed that synergism is the most frequently occurring interaction phenomenon during the degradation of chain links in the joint, and its intensity and occurrence are strictly conditioned by the nature and type of the combined environmental factors. The research results proved that the very selection of the parameters of these factors plays a decisive role in the rate of wear of chain link joints. In every case, it was also confirmed that changing the configuration or adding further degradation factors affects the overall level of joint wear through interaction. Confirmation of the interaction effect was the demonstration that the component resulting from the combined action of dynamic and abrasive factors within a given environmental group differs from the sum of the effects exerted by these two factors separately. This fact makes it possible to conclude that the adopted research hypothesis has been confirmed.

In addition to its scientific nature, the work was also oriented toward achieving a practical goal related to the implementation aspect of the doctoral project. The utilitarian result of the research was the development of a concept and technical assumptions for a full-scale test stand, which makes it possible to conduct wear tests on chains of various sizes in accordance with the PN-G-46701:1997 standard.