Politechnika Wrocławska

Wydział Geoinżynierii Górnictwa i Geologii

PRACA DYPLOMOWA

Określenie tempa rozprzestrzeniania się korozji w rdzeniach typu ST z wykorzystaniem systemu Diagbelt

Autor
Wojciech Cwek
Opiekun
dr inż. Ryszard Błażej

Słowa kluczowe
Taśma przenośnikowa
Diagnostyka magnetyczna
System diagnostyczny
Uszkodzenia taśm
Korozja

krótkie streszczenie

W niniejszej pracy magisterskiej zostały przeanalizowane i opracowane wyniki badań diagnostycznych, które przeprowadzono w celu wykrycia oraz określenia tempa rozprzestrzeniania się korozji w rdzeniach typu ST z wykorzystywaniem magnetycznego systemu diagnostycznego.

Spis treści

1. Wstęp ... 3
2. Cel i zakres pracy ... 4
3. Przenośniki taśmowe ... 4
3.1. Taśmy przenośnikowe ... 5
3.2. Taśmy ST ... 7
3.3. Uszkodzenia taśm przenośnikowych ... 8
3.4. Wpływ uszkodzeń taśmy na jej wytrzymałość ... 11
4. Korozja ... 12
4.1. Czynniki przyspieszające korozję ... 13
5. System diagnostyczny Diagbelt ... 16
5.1. Moduł wizyjny ... 16
5.2. Moduł magnetyczny ... 16
5.3. Moduł prognozujący ... 21
5.4. Moduł przecięć wzdłużnych ... 21
5.5. Moduł bezpieczeństwa ... 22
6. Stanowisko badawcze ... 22
6.1. Identyfikacja uszkodzeń oraz dokładność pomiaru ... 24
6.2. Pomiary wzorcowe ... 26
7. Metodologia badań ... 31
8. Wyniki badań ... 35
9. Analiza wyników badań ... 42
10. Wnioski ... 55
11. Spis rysunków ... 56
12. Spis tabel ... 58
13. Bibliografia ... 58

1. Wstęp

Zarówno w górnictwie podziemnym jak i odkrywkowym na szeroką skalę są wykorzystywane przenośniki taśmowe będące mechanicznymi środkami transportu, które charakteryzują się ciągłym ruchem oraz ograniczonym zasięgiem [1].

Przenośniki taśmowe są bardzo częstym rozwiązaniem wykorzystywanym przez przedsiębiorców górniczych ze względu na następujące przesłanki [6]:

- stosunkowa wysoka wydajność przy jednocześnie małych kosztach,
- możliwość dostosowywania trasy przenośnika taśmowego do ukształtowania powierzchni terenu,
- mała czasochłonność kontroli oraz obsługi,
- lekka konstrukcja nośna,
- niewielkie zużycie elementów ruchomych przenośnika taśmowego, co skutkuje małymi nakładami przeznaczonymi na utrzymanie przenośnika w stanie użytkowym.

Transport taśmowy nie jest pozbawiony wad, jednakże nie są one na tyle istotne, aby zniechęcić przedsiębiorców od ich użytkowania. Tymi wadami są [6]:

- wysoki koszt najmniej trwałego elementu przenośnika – taśmy,
- od elementów przenośnika taśmowego wymaga się niezawodności i dużej elastyczności,
- ciężki montaż oraz demontaż,
- wysokie koszty inwestycyjne.

Powyższy bilans wad i zalet transportu taśmowego przemawia za tym, ażeby tam, gdzie jest to możliwe korzystać z tego rozwiązania. Transport z wykorzystaniem przenośników taśmowych jest stosowany w przemyśle wydobywczym, elektrowniach, jak i w przemyśle spożywczym czy budowniczym. W Polsce transport taśmowy odgrywa największą rolę w kopalniach węgla brunatnego, kamiennego oraz rud metali. Ich łączna długość we wszystkich kopalniach składa się na setki kilometrów.

Taśma przenośnikowa jest najdroższą częścią przenośnika taśmowego, stanowi ona bowiem od 50% do 60% kosztów przenośnika [7]. Przedsiębiorcy dążą do tego, aby jak najszybciej i jak najefektywniej wykrywać uszkodzenia tego elementu w celu uniknięcia strat spowodowanych postojami awaryjnymi. Nawet krótki i niezaplanowany przestój w pracy przenośnika skutkuje ogromnymi stratami dla przedsiębiorcy, wywołany nie tylko naprawą lub wymianą taśmy, lecz również wstrzymaniem produkcji na czas naprawy. W celu określenia użyteczności taśmy poddaje się ją badaniom. Najbardziej popularne są badania standardowe, które są wykonywane przy zakupie oraz przed regeneracją. Drugim typem badaniem jest badanie diagnostyczne. Na świecie, jak i również w Polsce, wykorzystuje się rozwiązania do ciągłego monitorowania taśm przenośnikowych w celu wczesnego wykrycia niepożądanych uszkodzeń lub zainterweniowania zanim dojdzie do uszkodzenia. Zainstalowanie systemu diagnostycznego monitorującego stan taśmy w zakładach górniczych umożliwia redukcję ilości przerw w pracy przenośnika wywołanych awarią lub potrzebami sprawdzania stanu taśmy. Inwestycja w system diagnostyczny przynosi niewątpliwie korzyści ekonomiczne. Pozwala w wielu przypadkach wykluczyć konieczność zakupu nowych elementów przenośnika taśmowego oraz wpływa w dużym stopniu na wydłużenie czasu eksploatacji taśm.

Możliwości wykorzystania inteligentnego systemu do badania i diagnozowania taśm [14]:

- przewidywanie czasu pracy przenośnika taśmowego,
- wykrywanie uszkodzeń konstrukcji taśmy,
- detekcja rozcięć wzdłużnych,
- oszacowanie stanu technicznego taśmy,
- inspekcja bezpieczeństwa eksploatacji taśmy.

2. Cel i zakres pracy

Celem niniejszej pracy jest identyfikacja w obrazie sygnału zmiany pola magnetycznego uszkodzeń wywołanych korozją w rdzeniach taśm ST. Aby to osiągnąć przeprowadziłem badania diagnostyczne z wykorzystaniem modułu magnetycznego Diagbelt składającego się z osprzętu Beltguard firmy Beltscan Pty Ltd oraz programu Belt Analysis na próbce taśmy z odsłoniętą i skorodowaną linką ST. Dotychczas z wykorzystaniem systemu Diagbelt możliwe jest identyfikowanie następujących miejsc na trasie przenośnika: połączenie taśmy ST, wyrwanie taśmy wraz z linką stalową, przerwanie linki stalowej, przecięcia wzdłużne oraz przerwanie drutów linki stalowej, uszkodzenia okładek nośnych, uszkodzenia obrzeży. Dodatkowo moduł predykcji jest w stanie przewidzieć czas pracy jaki pozostał taśmie do momentu jej zużycia, natomiast moduł bezpieczeństwa wykrywa strefy taśmy, które mają obniżoną wytrzymałość [3].

W pracy przeprowadziłem przegląd literatury dotyczącej charakterystyki taśm ST, uszkodzenia jakie powstają podczas ich użytkowania oraz ich wpływy na wytrzymałość i omówiłem proces korozji. Dokonałem również opisu bezinwazyjnego systemu diagnostycznego Diagbelt. System Diagbelt został opracowany w ramach projektu „Inteligentny system do automatycznego badania i ciągłej diagnozy stanu taśm przenośnikowych" pod kierownictwem dr. inż. Ryszarda Błażeja. Dokonałem pomiarów diagnostycznych taśmy ST w celu wykrycia uszkodzeń wywołanych korozją oraz wykonałem analizę przeprowadzonych badań. Wyniki niniejszej pracy mogą przysłużyć się do dalszych badań nad skutecznością detekcji uszkodzeń rdzeni typu ST w taśmach przenośnikowych.

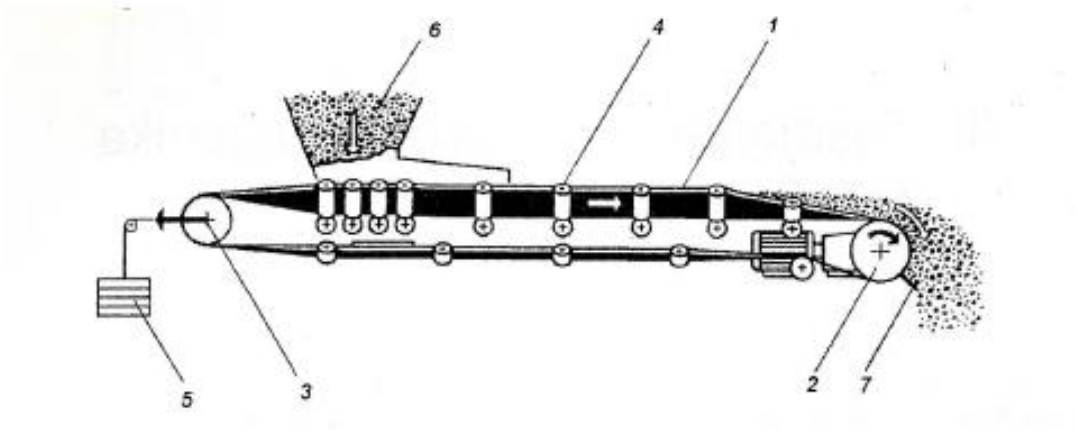
3. Przenośniki taśmowe

Przenośniki taśmowe są wykorzystywane do transportu urobku lekkiego jak i ciężkiego oraz materiałów sypkich i drobnoziarnistych. Urobek może być transportowany na trzy sposoby w zależności od konstrukcji przenośnika: na powierzchni jednej taśmy, wewnątrz taśmy zamkniętej, między dwiema taśmami. W przemyśle górniczym zazwyczaj używane są przenośniki taśmowe z taśmą nieckową [6].

Konstrukcja przenośnika taśmowego składa się z wielu elementów i zespołów, takich jak (rys. 1) [7]:

- Trasa – jest to zespół powtarzalnych elementów, których zadaniem jest wytyczenie trasy przenośnika oraz podtrzymywanie krążników.
- Taśma – przewija się przez bęben zrzutowy oraz zwrotny a następnie zmienia kierunek biegu.
- Bęben napędowy zrzutowy – taśma jest nawinięta na bęben zrzutowy, który jednocześnie wprawia w ruch taśmę wykorzystując sprzężenie cierne. W tym miejscu również jest zrzucany urobek.

- Bęben zwrotny – w tym rejonie jest podawany urobek na taśmę.
- Mechanizm napinania – zadaniem tego elementu jest utrzymywanie taśmy w odpowiednim napięciu i utrzymaniu w dopuszczalnych granicach zwisów taśmy między krążnikami
- Kosz zasypowy – jest to element, który odpowiada za odpowiednie układanie się urobku na taśmie.
- Taśma – jest elementem transportującym i podtrzymującym urobek.
- Zestawy krążników – ich rolą jest podtrzymywanie oraz prowadzenie taśmy wzdłuż trasy przenośnika. Wyróżniamy krążniki dolne, nośne i nadawowe.
- Urządzenia czyszczące – podczas transportu taśma może być oblepiana przez urobek. W celu odseparowania zanieczyszczeń od taśmy montuje się urządzenia czyszczące.

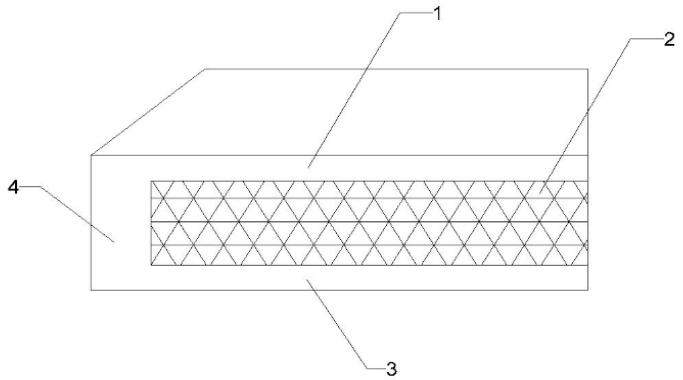


Rys. 1. Schemat konstrukcji przenośnika taśmowego; 1 - taśma, 2 – bęben zrzutowy, 3 – bęben zwrotny, 4 – zestaw krążników, 5 – mechanizm napinania, 6 – kosz zasypowy, 7 – urządzenia czyszczące [7]

Miejsce pracy oraz warunki pracy determinują konstrukcję przenośnika taśmowego. Wymagania jakie są stawiane przenośnikom taśmowym pracującym w kopalniach odkrywkowych i podziemnych są bardzo różne. Czynniki jakie są zmienne dla tych dwóch środowisk to: temperatura otoczenia, wymogi bezpieczeństwa pracy i zagrożenia pożarowego. Dąży się więc do tego, aby projektować konstrukcje przenośników, które byłyby uniwersalne dla każdego środowiska. Jest to umożliwione dzięki blokowej konstrukcji elementów przenośników taśmowych, które można składać ze sobą w wielu różnych zestawieniach i tym samym dostosowywać konstrukcje do wymaganych potrzeb [6].

3.1. Taśmy przenośnikowe

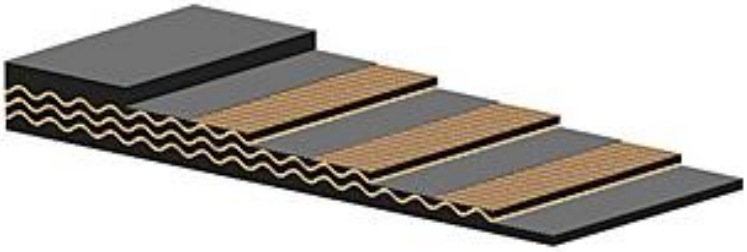
Taśma przenośnikowa zbudowana jest z rdzenia, okładek oraz obrzeży (rys.2). Rdzeń ma za zadanie przenosić siły wzdłużne niezbędne do pokonywania oporów ruchu. Okładki oraz obrzeża ochraniają rdzeń przed uszkodzeniami oraz wpływami czynników atmosferycznych, chemicznych i biologicznych [7].



Rys. 2. Konstrukcja taśmy przenośnikowej; 1 – okładka nośna, 2 – rdzeń taśmy, 3 – okładka bieżna, 4 - obrzeże

W celu zapewnienia najefektywniejszej i niezawodnej pracy przenośnika taśmowego, taśma przenośnika powinna posiadać odpowiednią wytrzymałość na rozciąganie w kierunku wzdłużnym oraz poprzecznym. Wymagane jest to ze względu na to, ażeby taśma przejmowała w sposób bezawaryjny obciążenia przekazywane przez spadający urobek. Oprócz tego taśma powinna posiadać odpowiednią elastyczność w kierunku poprzecznym, co umożliwi taśmie układanie się w nieckę. Dodatkowo taśma powinna charakteryzować się wystarczającą odpornością na przebijanie, przecinanie, ścieranie oraz odporność na czynniki atmosferyczne, ażeby posiadała jak najdłuższą żywotność. Ponadto powierzchnia nośna taśmy powinna posiadać jak najmniejszą przyczepność, natomiast druga strona taśmy powinna mieć jak najwyższy współczynnik tarcia, ażeby jak najefektywniej wykorzystać zjawisko sprzężenia ciernego [6].

Najogólniejszym podziałem taśm przenośnikowych jest podział ze względu na budowę rdzenia. Wyróżniamy taśmy z rdzeniem tekstylnym (rys. 3) oraz z rdzeniem stalowym (rys. 4). Taśmy tekstylne z rdzeniem wykonanym z poliamidu (P), poliestru (E), bawełny (B), włókna celulozowego (Z) czy z jedwabiu wiskozowego (R) nie są w stanie przenosić tak dużych obciążeń jak taśmy z rdzeniem ST. Wyjątkiem jest aramid, który jest organicznym włóknem syntetycznym. Charakteryzuje się podobną wytrzymałością oraz giętkością co linki stalowe Rdzeń aramidowy w przeciwieństwie do linek ST nie koroduje i umożliwia budowanie cieńszej taśmy, co przekłada się na jej niższą wagę (rys. 4). Dodatkowo taśmy aramidowe przekładają się na bezpieczeństwo pracy, ze względu na fakt, że aramid nie przewodzi prądu ani nie iskrzy. Największym mankamentem taśm z rdzeniem aramidowym jest ich wytrzymałość na połączeniach, która jest zdecydowanie mniejsza od wytrzymałości nominalnej taśmy. W dalszej części pracy skupiono się na taśmach z rdzeniem stalowym [7,5].



Rys. 3. Taśma tekstylna wieloprzekładkowa

Rys. 4. Grubość taśmy aramidowej i z linkami ST [5]

3.2. Taśmy ST

Taśma z rdzeniem ST zbudowana jest zwulkanizowanych linek stalowych ułożonych paralelnie względem osi głównej taśmy (rys. 5). Linki w rdzeniu są ułożone na przemian prawoskrętnie oraz lewoskrętnie. Wytrzymałość całej taśmy jest zależna od wytrzymałość i podziału linek stalowych rdzenia taśmy. W taśmach ST rdzeń stanowią zazwyczaj linki siedmiosplotowe, zdecydowanie rzadziej wykorzystuje się linki o mniejszej ilości splotów. Splotki wykonuje się z siedmiu, dwunastu bądź dziewiętnastu drutów [6].

W taśmach ST do uzyskania oczekiwanych własności stosuje się dwa różne gatunki gumy. Guma, która bezpośrednio otacza linki stalowe jest wytwarzana z materiału charakteryzującym się wysoką wytrzymałością na rozrywanie i ścinanie oraz mającą bardzo dobre właściwości adhezyjne w stosunku do linek ST. Zewnętrzna konstrukcja taśmy, która jest równocześnie okładką i obrzeżem taśmy, wykonywana jest z materiałów o wysokiej wytrzymałości na ścieranie i odpornością na przebicia [7].

Taśmy ST charakteryzują się dużą wytrzymałością poprzeczną, która zapewniona jest w głównej mierze przez samą gumę. Dzięki temu są one wykorzystywane przy transporcie brył o dużych rozmiarach i ostrych krawędziach. Aby dodatkowo wzmocnić konstrukcję taśmy rdzeń taśmy zabudowuje się prostopadłymi do osi taśmy linkami stalowymi bądź kordem poliamidowym Dodatkowo taśmy takie mają bardzo dobrą elastyczność w kierunku poprzecznym, dzięki czemu można ustawić kąt niecki taśmy na 60-70˚ [7].

Taśma ST względem taśm z rdzeniem tekstylnym charakteryzuje się stosunkowo niższymi kosztami konserwacji, napraw i regeneracji. Dodatkowa taśma ST posiada wyższą wytrzymałość na rozciąganie, jej wydłużenia trwałe są zdecydowanie krótsze i jest trwalsza w eksploatacji. Kolejną bardzo ważną zaletą jest fakt, że złącza taśm ST mają zbliżoną wytrzymałość na rozciąganie do nominalnej wytrzymałości taśmy na rozciąganie. Ponadto z łatwością można ułożyć taśmę w pożądaną nieckę, ażeby transportowany urobek nie

przesypywał się poza granice taśmy. Taśmy ST nie ulegają rozwarstwieniu w przeciwieństwie do taśm z rdzeniem tekstylnym, ponieważ przenikająca woda do rdzenia może przenosić się tylko wzdłuż linek. Jednakże taśmy z rdzeniem ST są zdecydowanie cięższe od taśm z rdzeniem tekstylnym, co wymaga włożenia większego wysiłku przy ich transporcie, montażu czy demontażu [7].

Rys. 5. Konstrukcja taśmy z linkami ST

3.3. Uszkodzenia taśm przenośnikowych

Praktycznie niemożliwe jest dokładne określenie trwałości taśmy, ponieważ wpływa na nią bardzo dużo czynników. Spowodowane jest to tym, iż taśma łatwo ulega uszkodzeniom znacznym, jak np. przecięciu wzdłużnym, który ma istotny wpływ na okres jej eksploatacji. Na podstawie wieloletnich badań dokonano analizy przyczyn zużycia taśmy, które podzielono na dwie grupy [7]:

1) Uszkodzenia punktowe, które występują na dostatecznie krótkim odcinku taśmy.
2) Uszkodzenia liniowe, które mogą występować na całej długości taśmy.

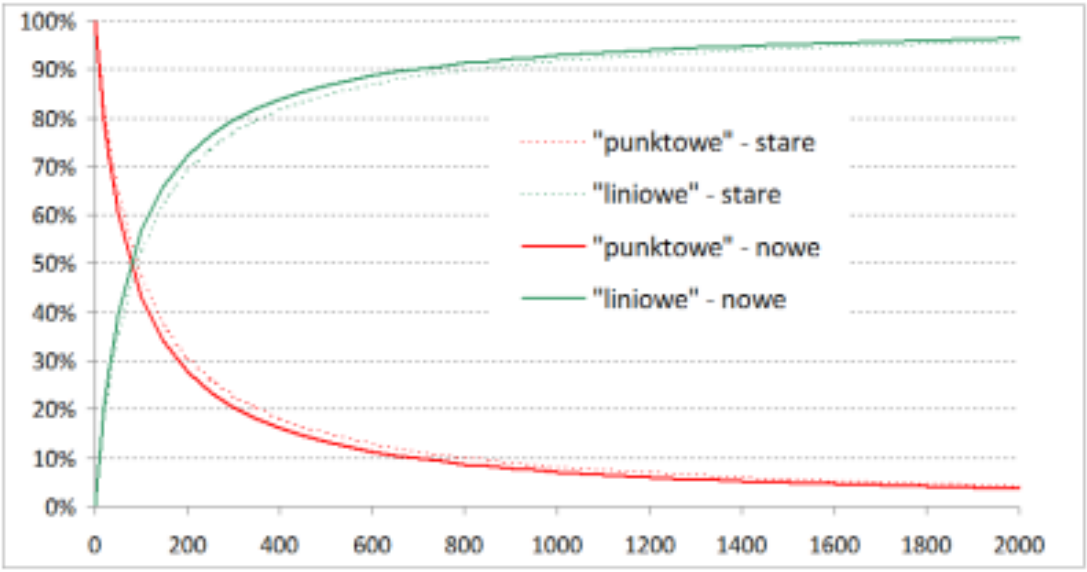
Obie grupy uszkodzeń zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Najczęściej występujące przyczyny zużycia taśmy przenośnikowej [6]

Rodzaj uszkodzenia	Skutek	Przyczyna	Rodzaj grupy uszkodzeń
Starzenie okładki (rys. 7)	Utrata własności wytrzymałościowych okładek	Działanie światła, agresywnych związków chemicznych, temperatury	Liniowe
Korozja chemiczna lub biologiczna rdzenia taśmy	Utrata własności wytrzymałościowych rdzenia	Działanie agresywnych związków chemicznych drobnoustrojów	Punktowe i liniowe
Ścieranie okładki nośnej	Zmniejszenie odporności na przebicie, odsłonięcie rdzenia	Przyspieszenie urobku, tarcie urządzeń czyszczących, poślizg na płaszczach krążników dolnych, tarcie o ograniczenia boczne	Punktowe i liniowe
Ścieranie okładki bieżnej	Odsłonięcie rdzenia	Poślizg na płaszczach krążników górnych, poślizg sprężysty na bębnach, poślizg miejscowy na bębnach z zanieczyszczonym płaszczem	Punktowe i liniowe
Ścieranie obrzeży	Odsłonięcie rdzenia, zmniejszenie szerokości taśmy	Tarcie o konstrukcję nośną na skutek zbiegania taśmy z osi przenośnika	Liniowe

Przebicie okładki nośnej (rys.8)	Ubytek okładki, odsłonięcie rdzenia, przebicie taśmy na wylot, osłabienie rdzenia	Urobek spadający na taśmę, urobek przyspieszany na taśmie do prędkości taśmy, urobek przy przejściu przez zestawy krążnikowe nośne	Punktowe i liniowe
Przebicie okładki bieżnej	Odsłonięcie rdzenia, uszkodzenie rdzenia, przebicie taśmy na wylot, osłabienie rdzenia	Wprowadzenie między taśmę a bęben brył urobku lub narzędzi, nabieganie taśmy na bęben z zanieczyszczonym płaszczem	Punktowe
Zerwanie części okładki, przekładek lub wyrwanie z taśmy linek (rys. 11 i rys. 12)	Uszkodzenie okładki, odsłonięcie rdzenia, uszkodzenie rdzenia	Zaczepienie przez elementy stałe o występujące poza powierzchnią okładki części taśmy w wyniku wcześniejszego miejscowego uszkodzenia jej	Punktowe
Rozwarstwienie przekładek	Utrata własności wytrzymałościowych rdzenia	Wadliwe wykonanie taśmy, za duży kąt niecki, zbyt mała średnica bębna, wdarcie się wody między przekładki przez nie usunięte uszkodzenia taśmy	Punktowe
Odspojenie linek od gumy rdzenia, przecięcie okładki przez linki (rys. 9)	Obniżenie wytrzymałości poprzecznej taśmy, możliwość powstania dalszych uszkodzeń	Wadliwe wykonanie taśmy, nadmierne naprężenie styczne	Punktowe
Przecięcie taśmy (rys. 10)	Powstanie szczeliny wzdłużnej	Zablokowanie się w urządzeniu przesypowym sztywnego przedmiotu opierającego się o taśmę ostrą krawędzią	Punktowe
Wyrywanie z taśmy elementów złącza mechanicznego	Obniżenie wytrzymałości taśmy w złączu	Odkształcenia plastyczne elementów złącza na skutek przeciążenia, miejscowe uszkodzenia rdzenia taśmy w miejscu łączenia	Punktowe
Zmęczeniowe uszkodzenie złącza klejonego	Obniżenie wytrzymałości złącza	Wadliwie wykonanie złącza, zbyt małe średnice bębnów, przekroczenie dopuszczalnej liczby obciążeń	Punktowe

Udział uszkodzeń punktowych i liniowych w procesie zużycia taśmy przenośnikowej przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Udział uszkodzeń punktowych i liniowych w procesie zużycia taśmy przenośnikowej [6]

Niektóre z wymienionych uszkodzeń zostały przedstawione na poniższych zdjęciach:

Rys. 8. Przebicie taśmy przenośnikowej [13]

Rys. 7. Starzenie się okładki [13]

Rys. 10. Przecięta taśma przenośnikowa [13]

Rys. 9. Odspojenie linek od gumy [13]

Rys. 11. Odsłonięta linka ST [13]

Rys. 12. Wyrwane obrzeże taśmy [13]

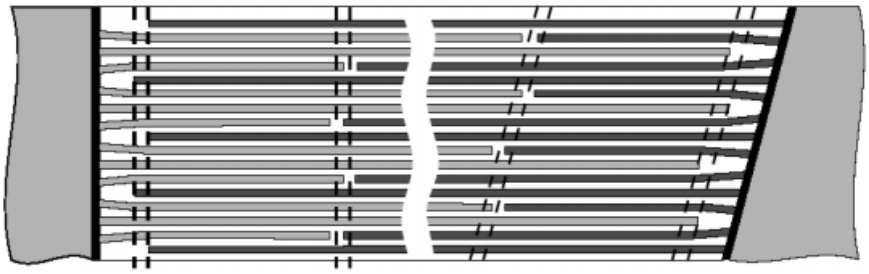
Warte podkreślenia jest to, iż na trzynaście typowych uszkodzeń taśmy, dziesięć dotyczy osłabienia wytrzymałości rdzenia bądź jego odsłonięcia. Wyżej wymienione uszkodzenia powstają podczas eksploatacji taśmy. W kontekście diagnozowania magnetycznego skorodowanej linki ST jest to bardzo istotne, ponieważ aby doszło do procesu korozji niezbędne jest to, ażeby linka ST została odsłonięta bądź odspojona od gumy taśmy ST i miała kontakt z środowiskiem zewnętrznym.

Taśmy z linkami ST są bardzo podatne na przecięcia wzdłużne w wyniku zaklinowania się elementu metalowego lub ostrokrawędzistego na trasie taśmy. Takie uszkodzenia są trudno wykrywalne ze względu na fakt, że w taśmach ST w wykonaniu standardowym znajduje się tylko guma i proces przecięcia nie emituje dużego hałasu ani nie jest zauważalny wyraźny wzrost oporów ruchu. Aby temu zapobiec konstrukcje rdzenia zabudowuje się przekładkami ochronnymi bądź kordem, co znacznie zwiększa opór przecinania i może skutkować wyłączeniem napędu. Efektywniejszym rozwiązaniem jest zabudowanie w okładce metalowego przewodu na całej długości taśmy połączonego z dwoma cewkami znajdującymi się po obu stronach obrzeży. Nadajnik znajdujący się obok taśmy emituje sygnał, który jest odbierany przez odbiornik. Przecięcie pętli powoduje nieprzesłanie sygnału i tym samym wyłączenie napędu przenośnika. Uszkodzenia przecięcia powodują bardzo duże straty, ponieważ niezatrzymanie taśmy w odpowiednim momencie może spowodować bardzo rozległe i kosztowne uszkodzenia [7].

3.4. Wpływ uszkodzeń taśmy na jej wytrzymałość

Na obniżenie wytrzymałości rdzenia przy obciążeniach dynamicznych i statycznych mają wpływ wszelakie jego uszkodzenia. Dodatkowo najsłabszym ogniwem w całej długości taśmy jest jej połączenie. Od jakości połączenia zależy bezawaryjna praca przenośnika. Jeśli wykonane połączenie jest słabej jakości, wówczas może dojść do tego, iż linki obu końców taśm nie będą przenosić równomiernie obciążeń. Skutkuje to obniżeniem sumarycznych obciążeń, przy których nastąpiłoby zerwanie taśmy [6].

Łączenie dwóch końców taśm ST polega na zwulkanizowaniu nowego odcinka taśmy, wewnątrz której linki obu taśm zachodzą między siebie (rys.13).



Rys. 13. Kształt połączenia taśm z linkami ST [11]

Dotychczasowe teoretyczne badania rozkładu obciążeń w złączach taśmy z linkami ST zostały wykonane przez Oehmena. Zaproponował on model taśmy, której guma składa się z materiału silnie odkształconego Money-Rivligna o kinematycznych warunkach ubocznych, które wynikają z bytności znacznie sztywniejszego rdzenia stalowego. Dodatkowo założył, że linki ST są materiałem sprężystym, wydłużalnym i łatwo zginającym. Na podstawie wykonanych badań ustalił, że nieuszkodzona linka sąsiadująca z przeciętą linką musi przejąć siłę 1,3 – 1,6 większą od średniej siły obciążającej linki w badanym przekroju [7].

W wypadku uszkodzenia warstwy zewnętrznej taśmy ST dochodzi do odsłonięcia rdzenia. Wówczas linka ST jest narażona na negatywny wpływ tlenu, wilgoci, wody, solanki, roztworów chemicznych i temperatury. Skutki oddziaływań wspomnianych czynników są przedstawione w tabeli 2 i tabeli 3.

Tabela 2. Oddziaływanie wody i wilgoci na rdzeń ST [6]

Materiał rdzenia	**Woda**				
	Skurcz, %	**Wchłanianie wody, %**	**Zmiana wytrzymałości, %**	**Zmiana wydłużenia, %**	**Długotrwałe oddziaływanie wody**
Linka stalowa	0	0	0	0	Korozja

Tabela 3. Oddziaływanie roztworów chemicznych i temperatury na rdzeń ST [6]

Materiał rdzenia	**Kwas**	**Zasada**	**Roztwór organiczny**	**Utrata wytrzymałości przy długotrwałym oddziaływaniu temperatury**
Linka stalowa	Nieodporny	Odporny	Odporny	Utrata przyczepności gumy do linek

4. Korozja

Proces stopniowego rozpadu struktury materiału wywołany kontaktem z czynnikami środowiska zewnętrznego nazywamy korozją. Termin ten jest ściśle kojarzony zwłaszcza z metalami, jednakże procesowi niszczenia ulegają również inne materiały. W zależności od typu przewodności elektrycznej na granicy faz materiału i środowiska oraz typem środowiska

wyróżniamy różne mechanizmy powstawania korozji. W materiałach charakteryzujących się wysoką przewodnością zachodzi głównie korozja elektrochemiczna, natomiast w materiałach o niskiej przewodności lub w przypadku jej braku zachodzi korozja chemiczna bądź fizykochemiczna [16].

Stal jako materiał konstrukcyjny rdzenia taśm ST, jest szczególnie narażona na proces korozji elektrochemicznej. Dzieje się tak dlatego, że żelazo będące składnikiem stali reaguje z wodą tworząc wodorotlenki i tlenki żelaza. Wynika to z faktu, iż żelazo jak prawie każdy inny metal ma niższy potencjał od wodoru. Dodatkowo żelazo łatwo reaguje z tlenem atmosferycznym, co przyspiesza proces korozji, czyli wyżeraniem powierzchni żelaza i pojawiania się w jej miejscu rdzy. Proces ten ma fatalne skutki dla parametrów wytrzymałościowych stali, gdyż wraz z postępem korozji ilość stali maleje [16].

Proces, w którym metal bądź stop metalu będzie w kontakcie z środowiskiem będącym elektrolitem nazywamy korozją elektrochemiczną. Już sama woda bez dużej ilości składników nieorganicznych pojawiająca się na powierzchni stali rozpuszcza elektrolity znajdujące się na jej powierzchni i w ten sposób przyspiesza proces korozji. Gdy dochodzi do kontaktu metalu z elektrolitem, wówczas wytwarzają się mikroogniwa korozyjne, przez które przepływa prąd. Generalnie proces korozji elektrochemicznej można zdefiniować jako anodowe utlenianie oraz katodowa redukcja metalu. Degradacja metalu występuje szczególnie w strefie anodowej. Anoda jest to strefa, w której metal oddaje elektrony walencyjne, a następnie przechodzi w postaci jonów do elektrolitu. Natomiast w katodzie elektrony przemieszczające się z obszaru anodowego łączą się z jonami lub atomami, które mają właściwości przyłączania elektronów. Mechanizm korozji elektrochemicznej w obecności depolaryzatorów (tlenu), czyli czynnika przyspieszającego korozję został przedstawiony w poniższym równaniu [12]:

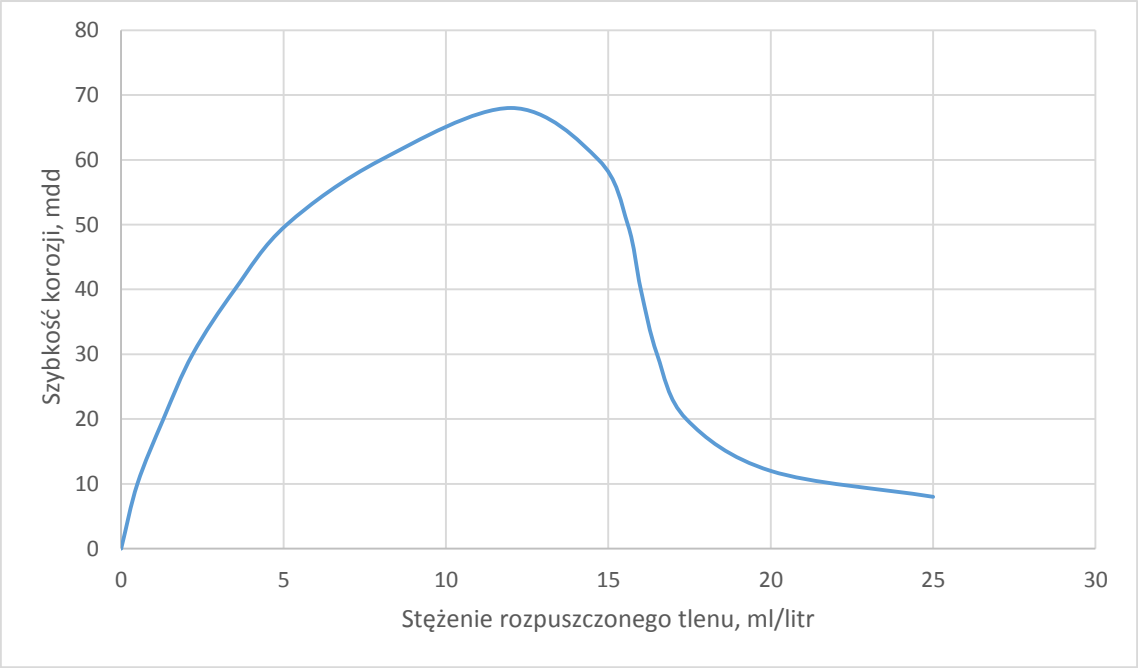
Anoda: $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$ (4.1)

Katoda: $O_2 + H_2O + 4e- \rightarrow 4OH^{-}$ (4.2)

Sumarycznie: $2Fe + O_2 + 2H_2O \rightarrow 2Fe^{2+} + 4OH^{-} \rightarrow 2Fe(OH)_2$ (4.3)

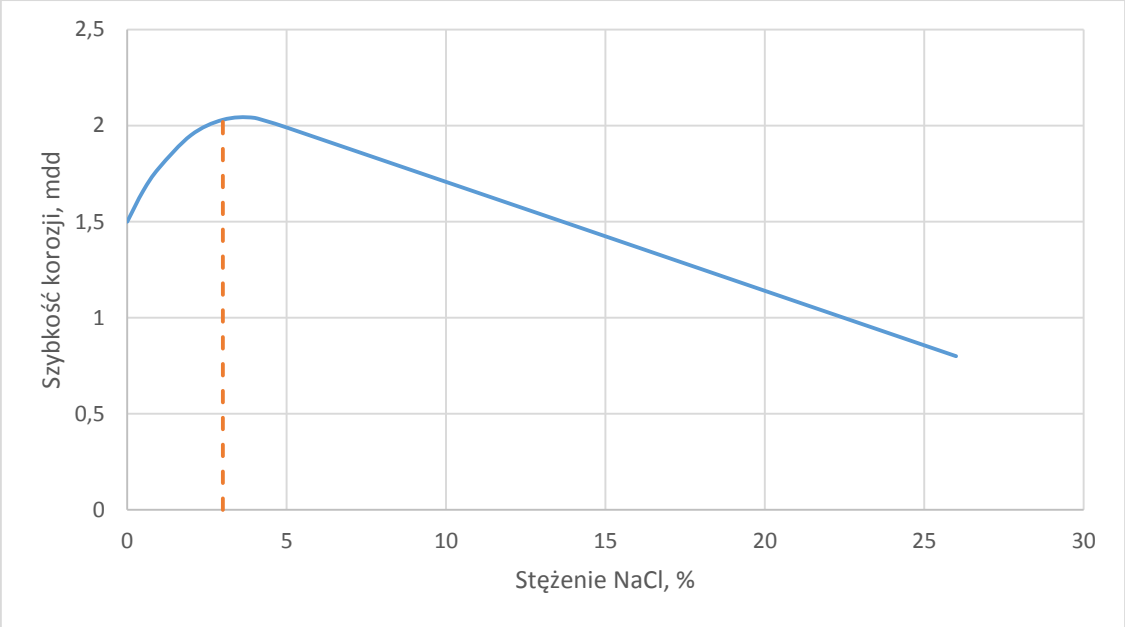
4.1. Czynniki przyspieszające korozję

Pierwszym podstawowym elementem mającym wpływ na tempo powstawania korozji jest rodzaj materiału. Istnieją różne rodzaje stali o różnym składzie i od niego zależy jak ten proces będzie przebiegać. Stale nierdzewne są odporne na korozję i na kwasy, jednakże są o wiele droższe. Kolejnym czynnikiem jest stężenie tlenu. Tempo korozji w zależności od stężenia tlenu zostało przedstawione na rys 14. Szybkość korozji rośnie przy małych stężeniach, a następnie przy dużych maleje z powodu pasywacji, czyli powstaniem na powierzchni metalu szczelnej warstwy tlenków mających za zadanie ochronę przed dalszym utlenianiem [12].



Rys. 14. Tempo rozprzestrzeniania się korozji w zależności od stężenia tlenu [12]

Następnym czynnikiem jest przewodnictwo elektrolitu na powierzchni stali. Zależność ta została przedstawiona na rys. 15.

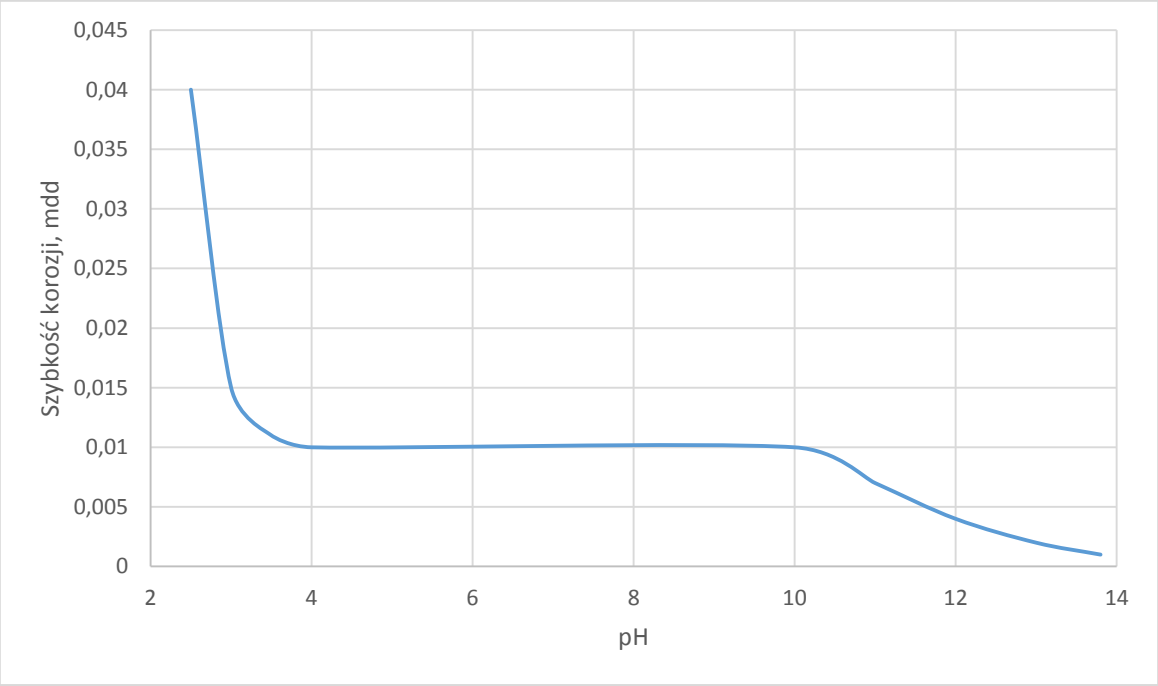


Rys. 15. Tempo rozprzestrzeniania się korozji w zależności od stężenia soli [12]

Początkowo tempo rozprzestrzeniania rośnie tak samo jak w przypadku stężenia tlenu, jednakże następnie liniowo opada ze względu na to, że tlen trudno się rozpuszcza przy większych stężeniach soli. Linią przerywaną zaznaczono stężenie wody morskiej i jest to stężenie, które najkorzystniej działa na tempo korozji.

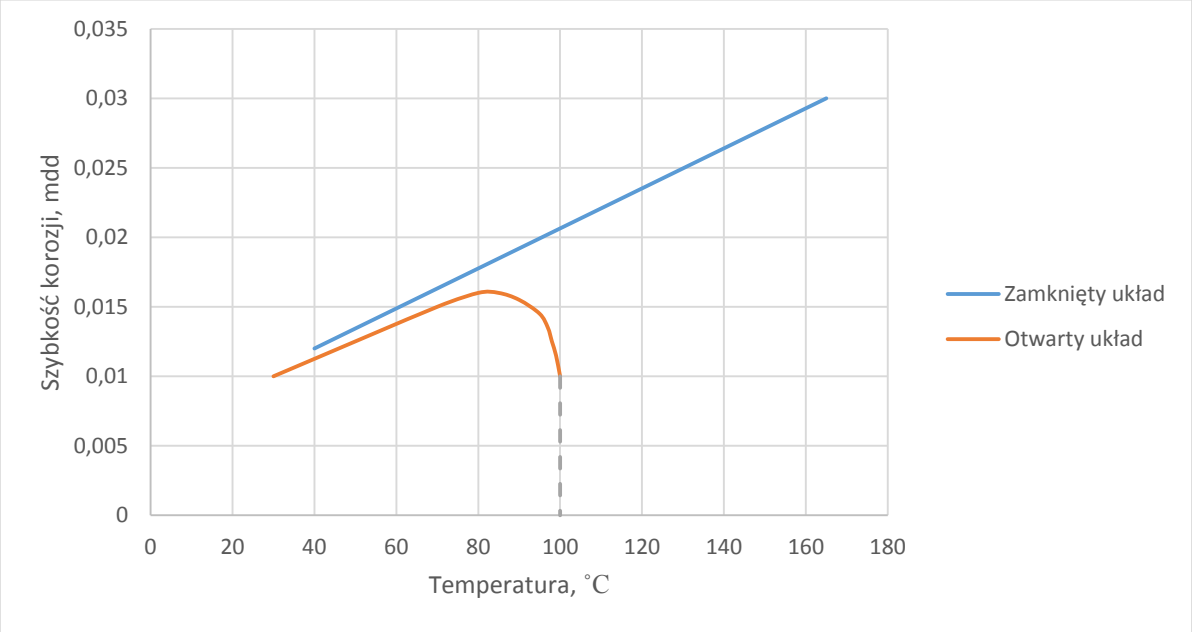
Środowisko pH ma również wpływ na korozję. Tempo korozji w zależności od pH przedstawiono na rys. 16. Z wykresu wynika, że roztwory zasadowe nie mają praktycznie

wpływu na tempo korozji. Natomiast środowisko kwaśne (>4 pH) powoduje bardzo duży wzrost tempa powstawania korozji.



Rys. 16. Tempo rozprzestrzeniania się korozji w zależności od kwasowości środowiska [12]

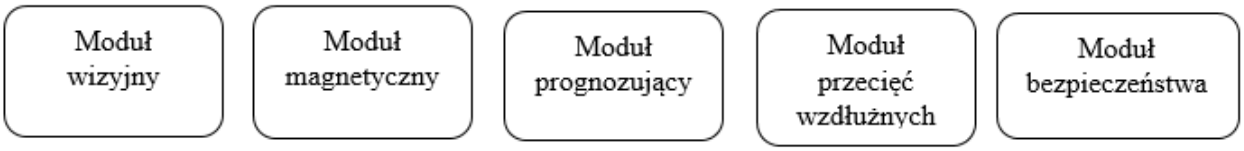
Temperatura ma wpływ na szybkość reakcji, jednakże znaczenie ma tutaj również w jakim układzie zachodzi korozja. Jeżeli jest to układ otwarty, czyli tlen ma możliwość swobodnego wydostawania się z wody, wówczas krzywa szybkości korozji osiąga maksimum a następnie opada. W przypadku zamkniętego układu funkcja szybkości korozji jest liniowa. Zostało to przedstawione na rys. 17.



Rys. 17. Tempo rozprzestrzeniania się korozji w zależności od temperatury [12]

5. System diagnostyczny Diagbelt

Diagbelt jest to inteligentny system do diagnostyki taśm oraz komputerowego wspomagania zarządzaniem taśmami. System został opracowany w Zakładzie Systemów Maszynowych na Wydziale Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej pod kierownictwem dr inż. Ryszarda Błażeja. Zaletą systemu jest to, iż jest w stanie uczyć się i adaptować do nowych warunków pracy w wyniku czego poprawia swoją efektywność i skuteczność działania. Zadaniami systemu Diagbelt jest akwizycja danych pomiarowych, następnie dane są przetwarzane i poddawane analizie. Na ich podstawie wykrywane są uszkodzenia, które system inteligentnie interpretuje zwracając informację o stanie taśmy i o ewentualnej naprawie. System składa się z pięciu modułów, które zaprezentowano na rys 18.



Rys. 18. Modułowa struktura systemu Diagbelt.

5.1. Moduł wizyjny

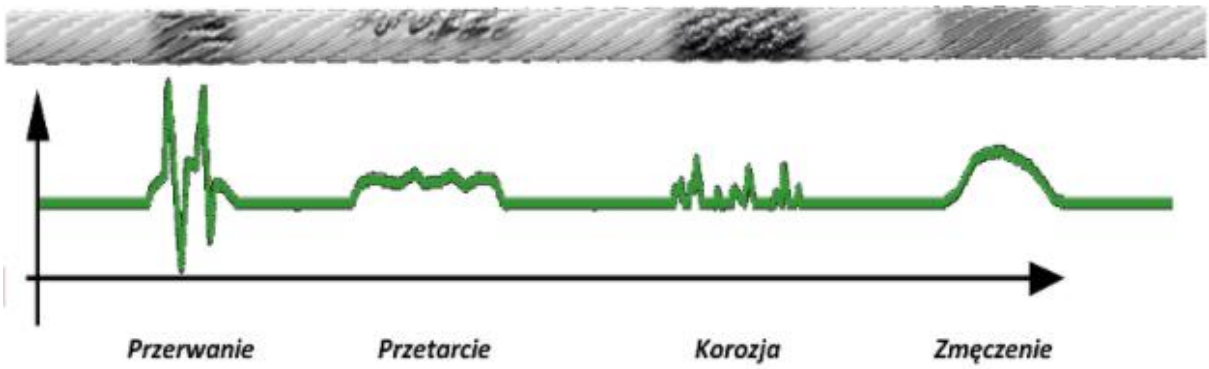
Moduł wizyjny składa się z kamery liniowej, która jest w stanie wykonywać zdjęcia wysokiej jakości. Rola modułu jest związana z rejestracją obrazu a następnie na jego podstawie wykrywa się segmenty taśmy i wyodrębnia się strefy z uszkodzeniami. Uszkodzenia są wykrywane i analizowane z wykorzystaniem odpowiednich algorytmów. System został dostosowany do pracy z rzeczywistymi przenośnikami transportowymi z taśmą o szerokości do 2400 mm. Moduł wizyjny jest w stanie zapobiegać bardzo kosztownym uszkodzeniom, czyli przecięciom wzdłużnym lub wyrwaniu obrzeży. Stanowisko pracy zostało przedstawione na rys. 19 [14].

Rys. 19. Kamera liniowa do rejestracji obrazu na stanowisku pracy [14]

5.2. Moduł magnetyczny

Zadaniem modułu magnetycznego jest monitorowanie stanu rdzenia taśmy ST. W metodzie tej magnesuje się linki w stałym polu magnetycznym w celu zarejestrowania sygnału

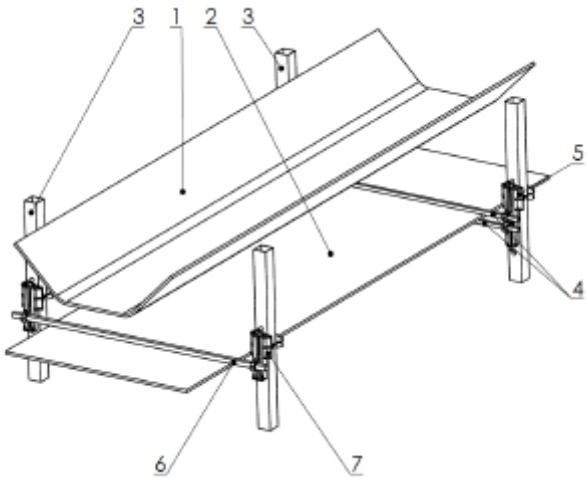
elektrycznego generowanego przez zmianę pola magnetycznego. Może być ona spowodowana przez uszkodzenia linek lub obecność uszkodzeń. To w jaki sposób są ułożone linki, ich obecność czy ich brak ma wpływ na sygnał. Na rys. 20 przedstawiono charakterystykę sygnału w zależności od rodzaju uszkodzenia linki.



Rys. 20. Charakterystyka sygnału w zależności od uszkodzenia

W celu wykrycia zmian pola magnetycznego wykorzystuje się mobilny system wysokiej rozdzielczości Belt Guard, który został zaprojektowany przez australijską firmę Beltscan Pty Limited. System składa się z dwóch magnesów, głowicy pomiarowej, tachometru i z urządzenia do akwizycji danych (czarna walizka) (rys.21). Do analizy odbieranych danych zostało napisane oprogramowanie Diagbelt, które zainstalowane jest na komputerze przenośnym. Wszystkie elementy mocuje się na konstrukcji przenośnika na specjalnych chwytakach w odpowiedniej kolejności. Pierwsze powinny być zamontowane listwy magnesu, które namagnesują rdzeń ST, natomiast za nią montuje się głowice pomiarową (rys. 22) [8].

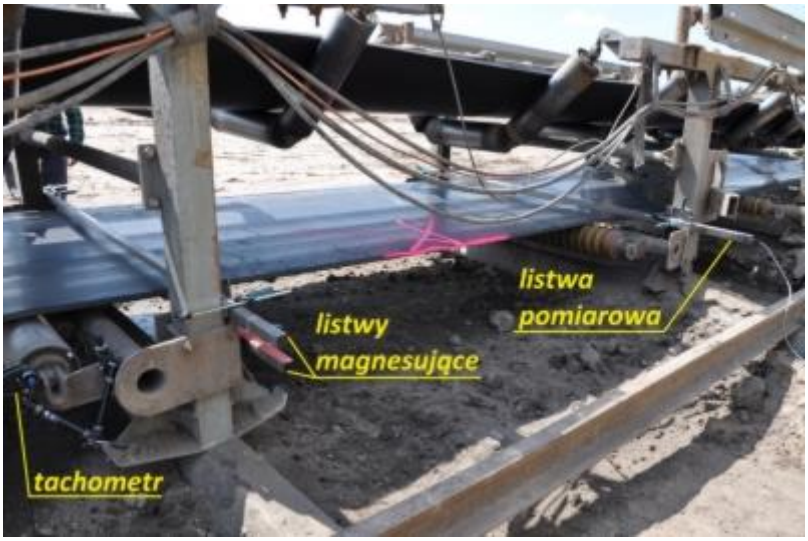
Rys. 21. Urządzenia modułu magnetycznego [14]



Rys. 22. Konstrukcja układu pomiarowego; 1 - cięgno górne, 2 - cięgno dolne; 3 - konstrukcja trasy przenośnika, 4 - głowice magnesujące, 5,7 - uchwyty; 6 - głowica pomiarowa [9]

Głowica pomiarowa składa się ze 112 cewek pomiarowych ulokowanych co 25 mm i ma długość 3,2 m. Cewki mają budowę dwubiegunową (biegun dodatni i biegun ujemny) w wyniku czego możliwe jest przeprowadzanie pomiarów dwubiegunowych. Głowica powinna się znajdować w odległości 20-50 mm od taśmy (rys. 22). Ważne jest, żeby przy przejściu pierwszej pętli obserwować dokładnie czy na powierzchni taśmy nie znajduje się

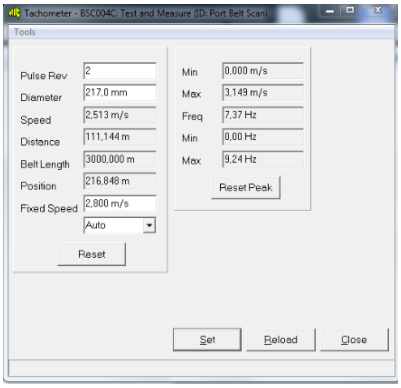
element, który mógłby uszkodzić głowicę. Magneśnice są dwoma listwami, które montuje się nad i pod cięgnem taśmy przed głowicą pomiarową. Obie listwy powinny się znajdować w odległości około 50-75 mm od cięgna taśmy zwróconymi czerwonymi powierzchniami ku sobie (rys. 23) [8].



Rys. 23. Prawidłowo zamontowane elementy systemu Diagbelt [14]

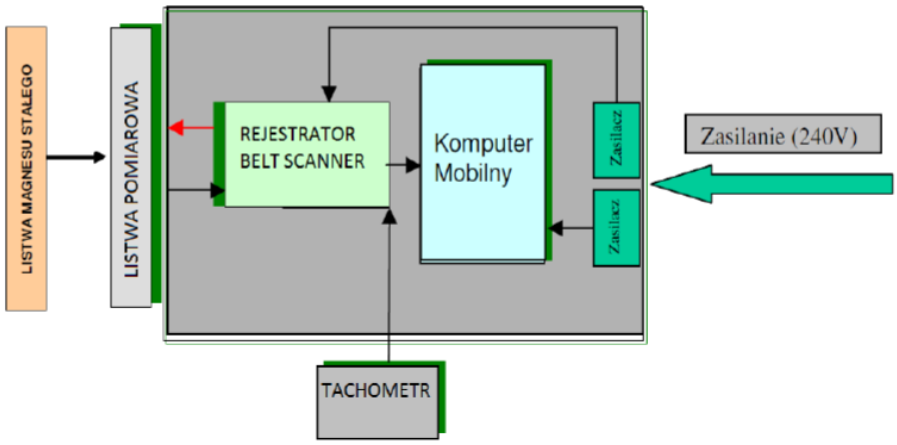
Prędkości taśmy określa się na podstawie zamontowanego tachometru. Jest on zbudowany z cewki i magnesu stałego, który montuje się na obrotowej części krążnika (rys. 25). W wyniku ruchu obrotowego cewka rejestruje impulsy generowane przez magnes. W programie wpisuje się średnicę krążnika, na którym zamontowany jest magnes a następnie określana jest prędkość taśmy (rys. 24).

Rys. 25. Tachometr oraz magnes [9[



Rys. 24. Okno analizujące prędkość taśmy oraz przebyty dystans

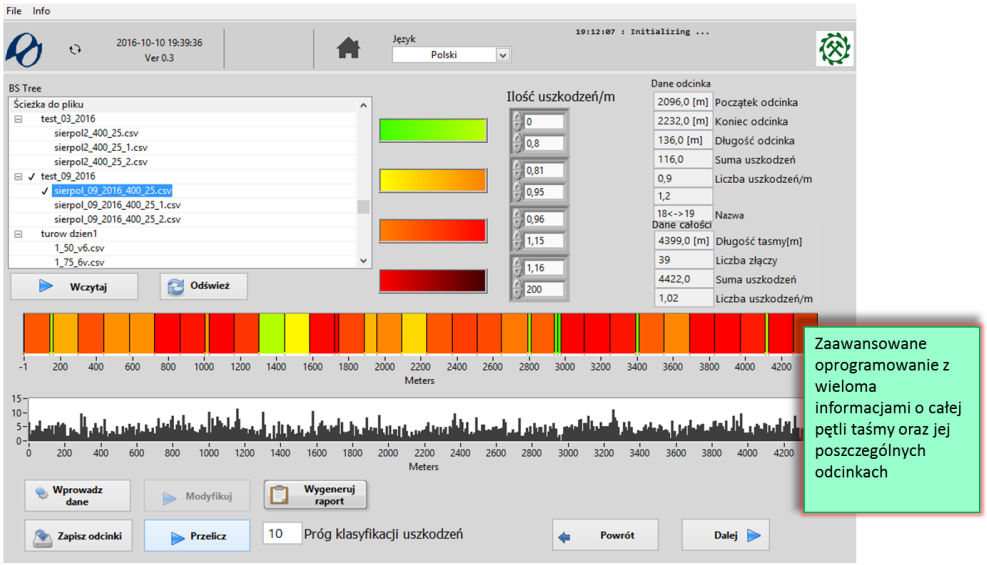
Schemat budowy systemu został przedstawiony na rys. 26. Zanim sygnał zostanie wyświetlony na ekranie komputera przenośnego zostaje on wzmocniony, następnie gromadzi się go w rejestrze przesuwnym i wysyła do rejestratora. Operator na komputerze mobilnym jest w stanie regulować czułość cewek oraz częstość pomiaru. System może być zarówno wykorzystywany w górnictwie podziemnym jak i odkrywkowym [2,3].



Rys. 26. Schemat budowy systemu pomiarowego BeltGuard

Sygnał po dotarciu do komputera zostaje przetworzony i przedstawiony w przystępnym sposób dla użytkownika. W centralnej części okna aplikacji znajduje się rozwinięta pętla taśmy podzielona na strefy, którym program nadaje odpowiedni kolor (rys. 27). Informuje on o ilości uszkodzeń znajdujących się na 1 mb odcinka taśmy. Na podstawie doświadczenia ustawiono pięć stanów taśmy [14]:

- Niewykazujący zużycia,
- Zużyta w stopniu lekkim,
- Zużyta w stopniu średnim,
- Wymagająca naprawy,
- Wymagająca wymiany.

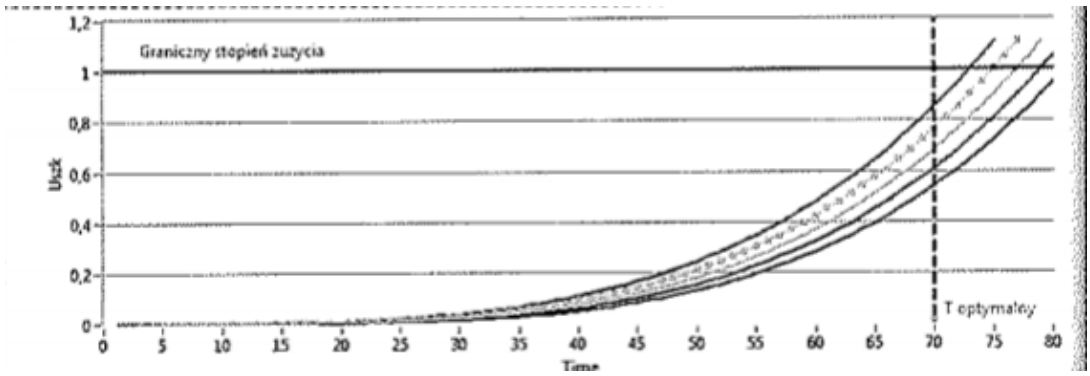


Rys. 27. Propozycja inwentaryzacji stanu technicznego odcinków taśmy przenośnikowej

Jest to bardzo duże ułatwienie dla użytkownika system. Jest on w stanie na swoim stanowisku pracy bez wizualnych oględzin taśmy stwierdzić w jakim stanie są poszczególne odcinki taśmy i zdecydować o dalszych krokach.

5.3. Moduł prognozujący

Moduł wizyjny jest w stanie zarejestrować i wyznaczyć miejsca, gdzie są uszkodzone okładki. Są to strefy mające dostęp do powietrza jak i wody, które mogą penetrować rdzeń. Te miejsca szczególnie są narażone na wystąpienie uszkodzeń w postaci korozji bądź utraty przyczepności do gumy. Badania wykonane w przeszłości udowodniły, że uszkodzenia okładek wiążą się z uszkodzeniami rdzeni, których zakres jest o wiele większy aniżeli wizualne ślady uszkodzeń okładek. Zatem moduł wizyjny jest w stanie wyznaczyć miejsce uszkodzenia okładek, jednakże nie jest w stanie określić stanu rdzenia. Rola modułu prognozującego polega na tym, ażeby rejestrować stan uszkodzeń tych samych odcinków taśmy w różnych odstępach czasu i śledzić tempo narastania uszkodzeń taśmy. Stwierdzono, że wraz z upływem czasu ilość uszkodzeń rośnie zgodnie z funkcją potęgową. Na podstawie danych program wykreśla krzywą gęstości uszkodzeń (rys.28), która pozwala określić czy dana strefa taśmy zużywa się podobnie jak inne strefy. Co najważniejsze możliwe jest wskazanie przypuszczalnego terminu osiągnięcia przez taśmę statusu wymagającego naprawy bądź wymiany. Ten moduł jest bardzo przydatny dla użytkownika, ponieważ jest on w stanie stwierdzić jaki został czas do wykonania postoju w celu przeprowadzenia naprawy lub wymiany taśmy. Moduł powinien być dostosowywany indywidualnie do każdego przenośnika w zależności od gospodarki taśm w kopalni oraz znaczenia przenośnika. Dodatkowo przy wyznaczaniu progów przydatności powinno się również wziąć pod uwagę typ taśmy i jej zróżnicowaną wytrzymałość [2,3,14].



Rys. 28. Krzywa gęstości uszkodzeń

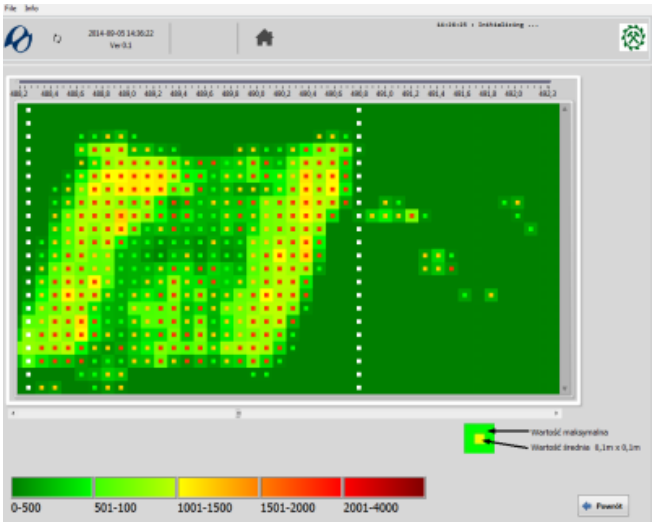
5.4. Moduł przecięć wzdłużnych

Moduł przecięć wzdłużnych na podstawie obrazu z modułu wizyjnego oraz informacji z czujników mechatronicznych informuje o wystąpieniu przecięć wzdłużnych oraz zapobiega on kosztownym naprawom lub wymianom. W przypadku rozcięcia w czasie normalnej pracy przenośnika, gdy na stronie nośnej taśmy znajduje się urobek, dochodzi wówczas do powiększenia szerokości taśmy. W momencie, gdy na taśmie nie znajduje się urobek taśma ulega zwężeniu. Aby system działał prawidłowo należy ustalić progi, po przekroczeniu których system będzie reagował. Jest to związane z faktem, że pełna taśma ma inna szerokość niż pusta. Jeżeli system wykryje jeden ze wspomnianych przypadków przenośnik taśmowy

zostaje natychmiastowo zatrzymany, ażeby długość rozcięcia była jak najkrótsza. Oprócz tego system jest w stanie informować o zbieganiu taśmy oraz o uszkodzeniach taśmy [2,3,14].

5.5. Moduł bezpieczeństwa

Według standardowej normy (DIN 22101) współczynnik bezpieczeństwa taśmy (BSF) dobiera się na podstawie wymaganej wytrzymałości taśmy na rozciąganie w kierunku wzdłużnym. Jeśli chodzi o taśmy ST to współczynnik BSF określa się poprzez wyznaczenie wartości maksymalnej siły napięcia taśmy w ruchu ustalonym, spadku wytrzymałości w złączach i oceny nadwyżki siły napięcia w stanach nieustalonych i spowodowanej oporami skupionymi i warunkami eksploatacyjnymi. W przypadku przenośników z linkami ST o długich trasach i wysokich wydajnościach ten współczynnik się nie sprawdza, ponieważ nadaje taśmą większą wydajność, aniżeli posiadają. Moduł bezpieczeństwa w inteligentnym systemie do diagnostyki taśm przenośnikowych jest w stanie wyznaczyć eksploatacyjny współczynnik bezpieczeństwa taśm (OBSF). Wskaźnik ten pokazuje jak duże naprężenia może taśma ST przenieść z uszkodzonymi linkami w ruchu ustalony i nieustalonym. Moduł funkcjonuje dzięki możliwościom programu QNK-TT. Wyznacza on indywidualne rozkłady naprężeń oraz bada wytrzymałość osłabionych przecięciami taśm za pomocą metody elementów skończonych MES. Współczynnik OBSF znajduje zastosowanie w przenośnikach taśmowych z linkami ST o długich jak i krótkich trasach oraz dużej wydajności, gdzie dodatkowo wykorzystywane są innowacyjne systemy do diagnostyki taśm [2,3,14].



Rys. 29. Stan zarejestrowanego odcinka taśmy [14]

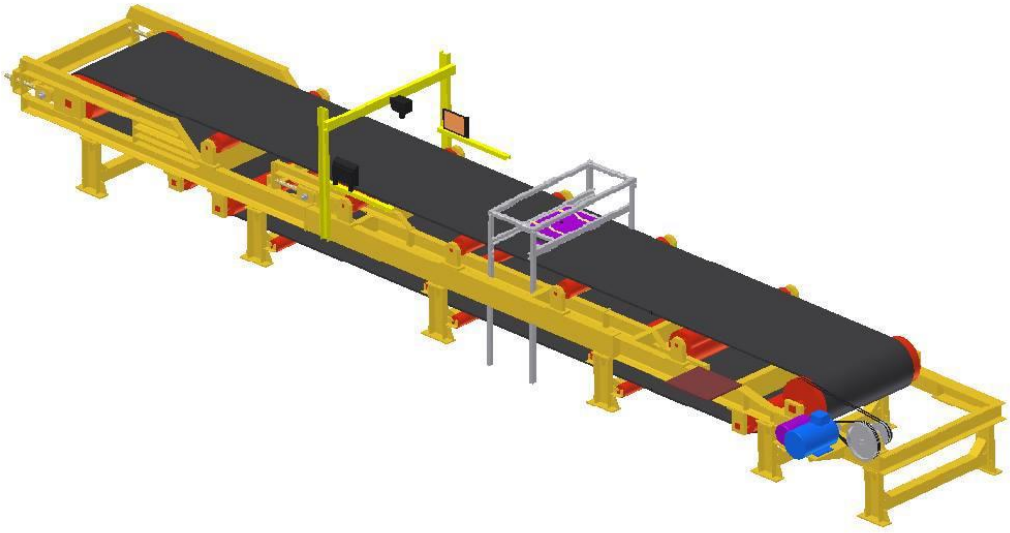
Na rys. 29 przedstawiono obraz stanu technicznego taśmy. Jak bardzo taśma jest uszkodzona jest przedstawione w niewidocznej kwadratowej siatce. Kolor odpowiada uśrednionemu stopniu uszkodzenia, natomiast kolor punktu informuje nas o wartości maksymalnej jaka została zarejestrowana.

6. Stanowisko badawcze

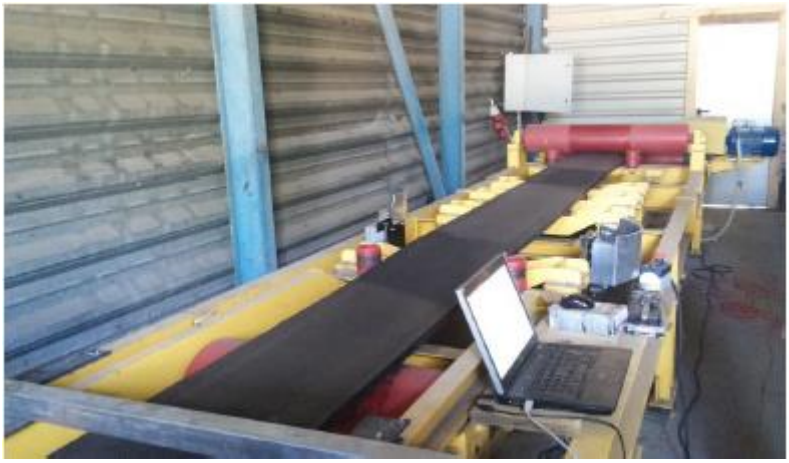
Stanowisko badawcze na którym przeprowadziłem badania zostało skonstruowane i zbudowane w Instytucie Górnictwa Politechniki Wrocławskiej. Znajduje się ono przy budynku L1 Politechniki Wrocławskiej. Stanowisko Składa się z identycznych elementów jakie posiadają przenośniki stosowane w przemyśle. Pracę przeprowadziłem na

zamontowanej taśmie ST 1600 o szerokości 400 mm oraz długości 17 m opasanej na bębnach zwrotnym i napędowy o średnicy 400 mm. Średnica linek rdzenia taśmy wynosi 5,2 mm. Dzięki zainstalowanemu urządzeniu zmieniającemu prąd zmienny na prąd stały, tj. falownik typu SJ100, istnieje możliwość regulowania prędkości posuwu taśmy w zakresie od 0 do 7,5 m/s. Stanowisko to jest przystosowane do tego, aby opracowywać i testować metody oceny stanu taśm przenośnikowych. Schemat stanowiska został przedstawiony na rys. 30 natomiast to jak wygląda w rzeczywistości zostało przedstawione na rys. 31. Wymiary stanowiska są następujące:

- Długość całkowita – 9900 mm
- Szerokość – 1370 mm
- Wysokość – 1002 mm



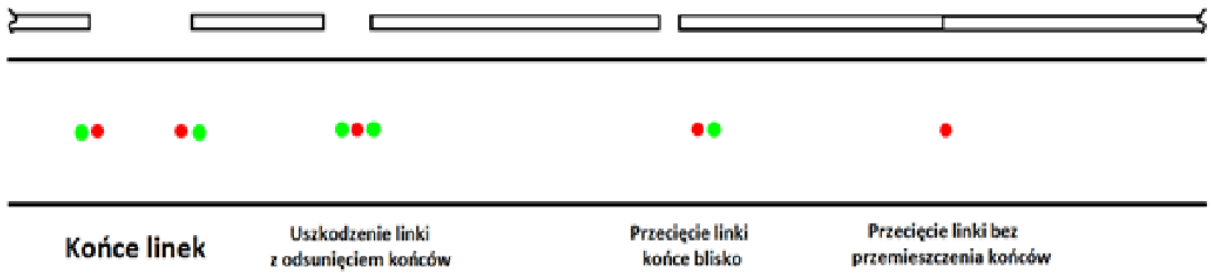
Rys. 30. Schemat stanowiska badawczego [9]



Rys. 31. Stanowisko pomiarowe [9]

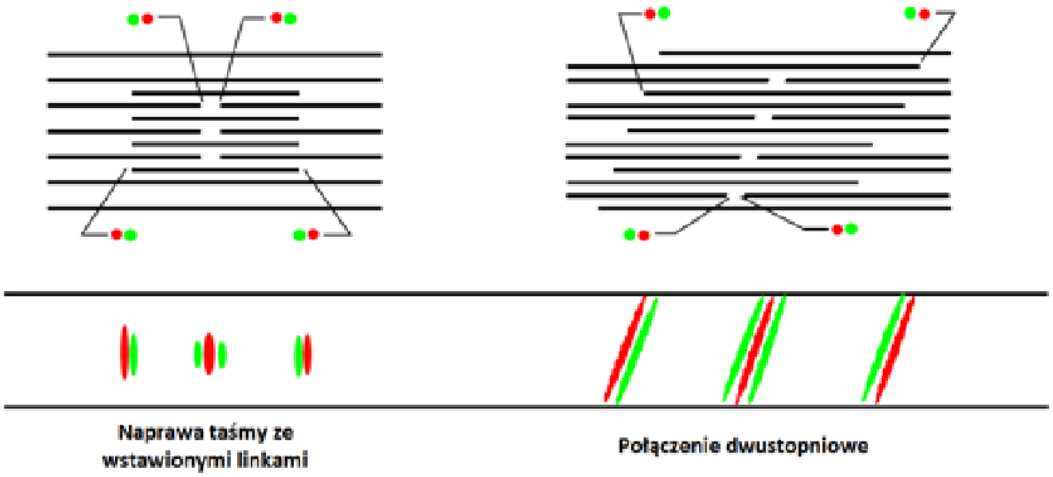
6.1. Identyfikacja uszkodzeń oraz dokładność pomiaru

Moduł magnetyczny monitoruje stan taśmy z linkami ST na podstawie odbieranych sygnałów zmian pola magnetycznego. Taśma jest namagnesowywana za pomocą magneśnicy, która zostaję przytwierdzona do konstrukcji przenośnika przed głowicą pomiarową. Bez tego elementu nie byłoby możliwe rejestrowanie sygnału magnetycznego w systemie. Na poniższych rysunkach (rys. 32) zostały ukazane uszkodzenia identyfikowane przez system.



Rys. 32. Uszkodzenia linek oraz zmiana pola magnetycznego nimi wywołana

Na zielono został zaznaczony sygnał negatywny (minus), natomiast na czerwono sygnał pozytywny (plus). Na rys. 33 ukazano w jaki sposób system identyfikuje połączenia taśm oraz naprawione strefy taśmy ze wstawionymi linkami stalowymi.



Rys. 33. Sygnał zmiany pola magnetycznego w strefie naprawionej taśmy oraz w strefie połączenia dwustopniowego

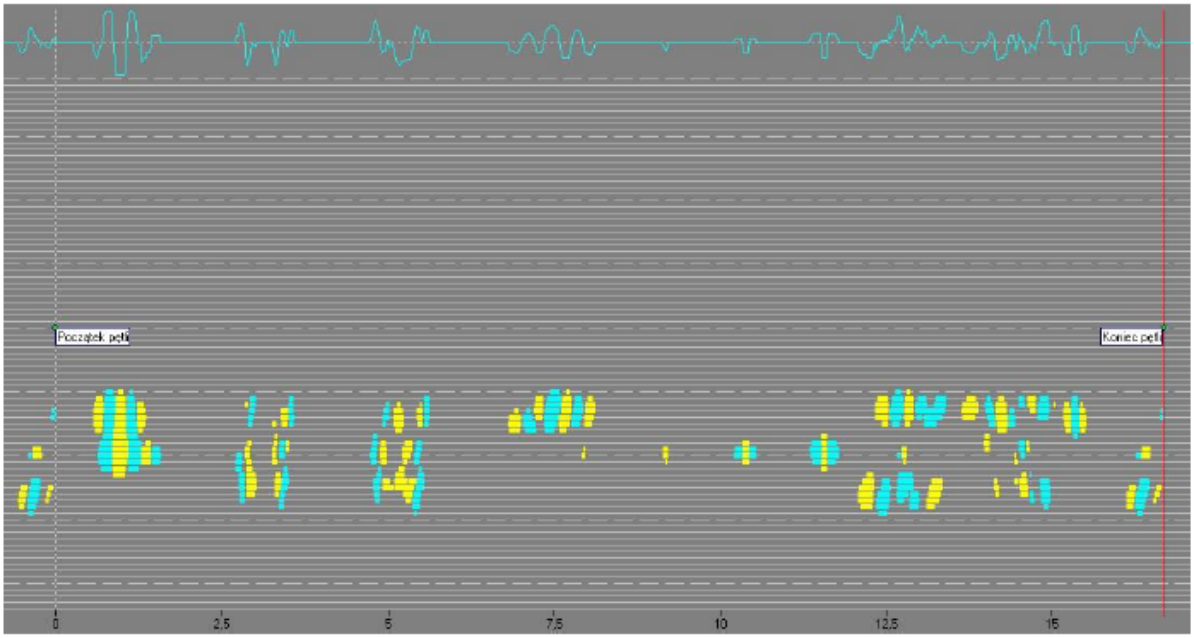
Dokładność pomiaru zależy od:

- prędkości taśmy,
- falowania taśmy i drgania podczas ruchu,
- stopnia namagnesowania linek ST,
- odległości głowicy pomiarowej od taśmy,
- ustawienia czułości głowicy pomiarowej.

Aby zredukować wpływ falowania oraz drgania taśmy montuje się listwę pomiarową nad krążnikiem, gdzie falowanie nie występuje a drgania występują w mniejszym stopniu, aniżeli w innych rejonach taśmy.

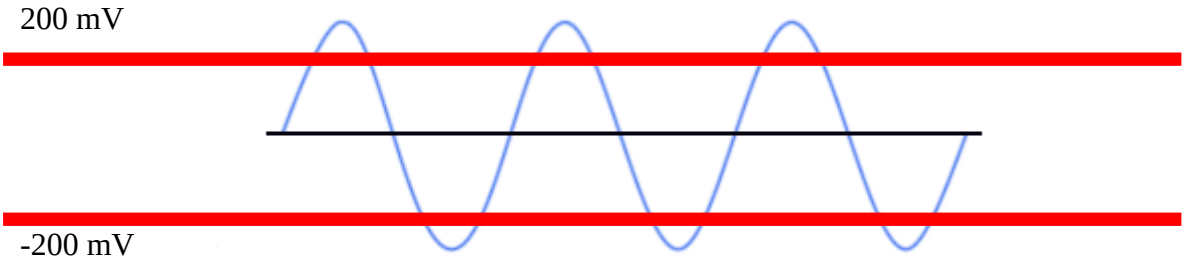
Jeżeli chodzi o prędkość, to jest ona proporcjonalna do mocy sygnału. System rejestruje zmianę pola magnetycznego jaka następuje w jednostce czasu. Pole magnetyczne jest stałe, co wynika z tej samej odległości głowicy od taśmy i stałego namagnesowania linek. Jeżeli prędkość taśmy dwukrotnie wzrośnie wówczas dochodzi do zmiany pola w dwukrotnie mniejszym czasie.

Stopień namagnesowania na linkę ST ma duże znaczenie dla jakości sygnału. Aby nie zbierać niekompletnych informacji na temat uszkodzeń, należy wykonać dwa bądź trzy pełne obiegi taśmy przez magnes, a następnie zacząć wykonywać pomiary. Najlepiej jest to zobrazowane na rys. 34, gdzie sygnał był rejestrowany na nienamagnesowanym rdzeniu. W porównaniu z obrazem sygnału pochodzącego z namagnesowanych linek ten sygnał jest niekompletny rys. 46.



Rys. 34. Identyfikacja uszkodzeń na nienamagnesowanej taśmie, ustawienia: odległość 20 mm, prędkość 2 m/s, czułość 500 mV [9]

Podczas wykonywania pomiarów ustawia się próg wykrywalności zmiany pola magnetycznego w linkach ST. W wyniku tego przeprowadza się selekcje odbieranych danych. Proces ten nosi nazwę binaryzacji sygnału analogowego. Tym samym tworzy się sygnał cyfrowy, który zajmuje o wiele mniej miejsca niż sygnał analogowy. Sygnał zmiany pola magnetycznego znajdujący się powyżej progu wykrywalności jest zapisywany jako 1, natomiast sygnał pod progiem zapisywany jest jako 0 i nie jest przetwarzany.



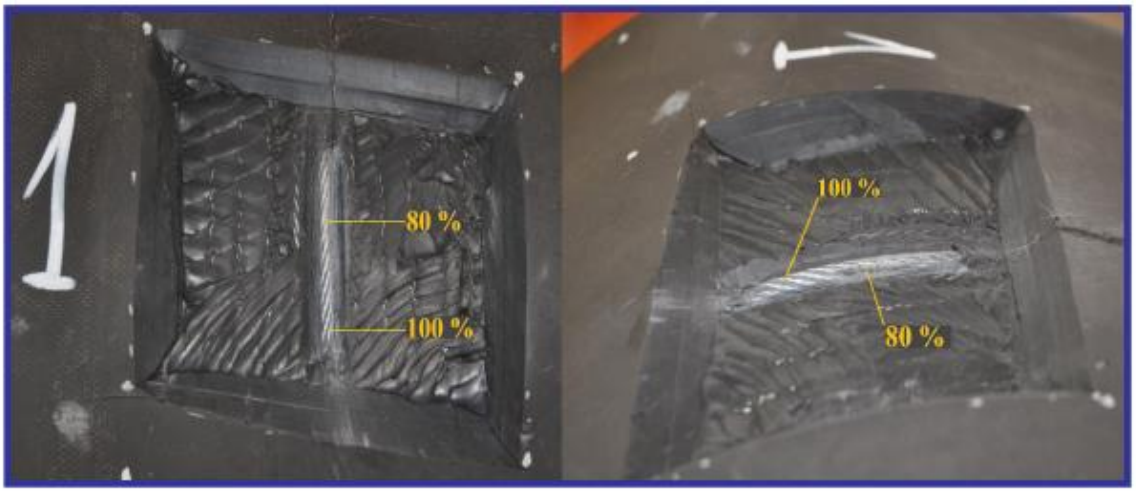
Rys. 35. Sygnał zmiany pola magnetycznego wraz z nałożonym filtrem

Kolorem niebieskim został zaznaczony sygnał, który w rzeczywistości nigdy nie będzie miał kształtu idealnej sinusoidy. Kolorem czerwonym został zaznaczony naniesiony próg czułości o wartości 200 mV.

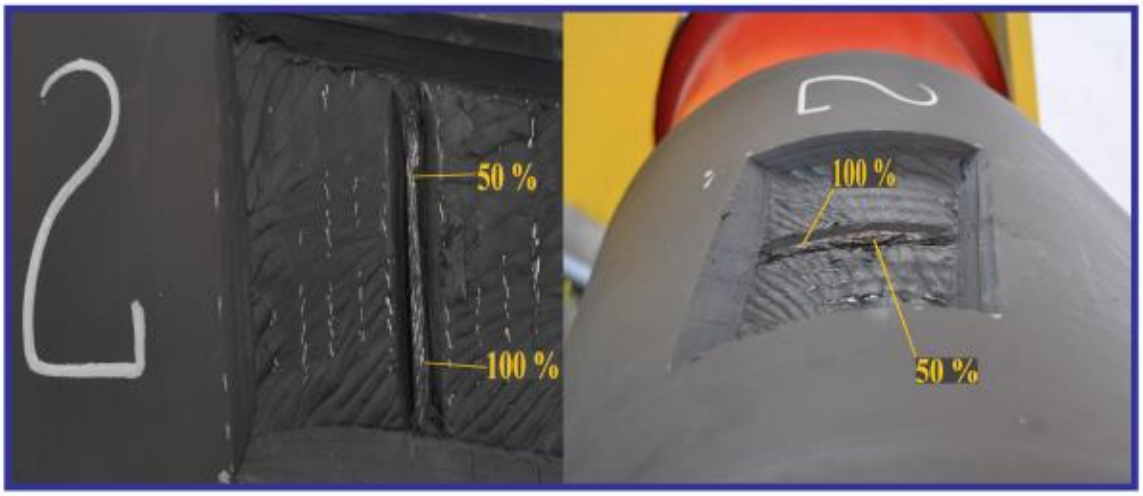
6.2. Pomiary wzorcowe

Na potrzeby naukowe na badane taśmie uszkodzono rdzeń taśmy w kilku miejscach [4,9]. W tym rozdziale przedstawiono te uszkodzenia oraz w jaki sposób system Diagbelt zidentyfikował te uszkodzenia. Schemat rozmieszczenia uszkodzeń zostały ukazane na rys. 46. Wykonano uszkodzenia:

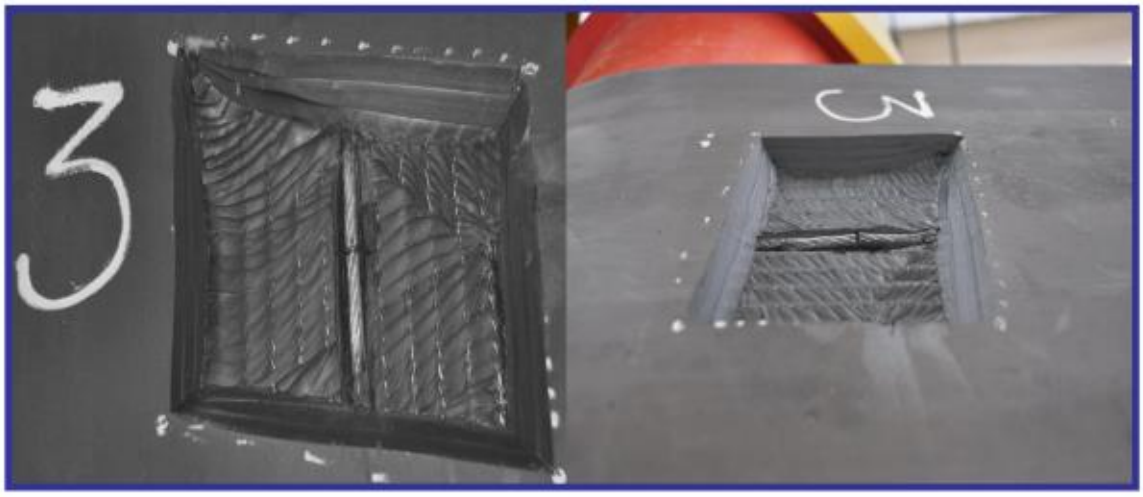
1. Częściowe uszkodzenie jednej linki rdzenia (20% ubytku przekroju poprzecznego linki) (rys. 36),
2. Częściowe uszkodzenie jednej linki rdzenia (50% ubytku przekroju poprzecznego linki) (rys. 37),
3. Przecięcie jednej linki (rys. 38),
4. Przecięcie trzech linek w kierunku poprzecznym (rys. 39),
5. Przecięcie sześciu linek w kierunku poprzecznym (rys. 40),
6. Usunięcie linki na odległości 20 mm (rys. 41),
7. Usunięcie linki na odległości 100 mm (rys. 42),
8. Usunięcie trzech linek na odległości 100 mm (rys. 43).



Rys. 36. Częściowe uszkodzenie jednej linki rdzenia (20% ubytku przekroju poprzecznego linki) [4]

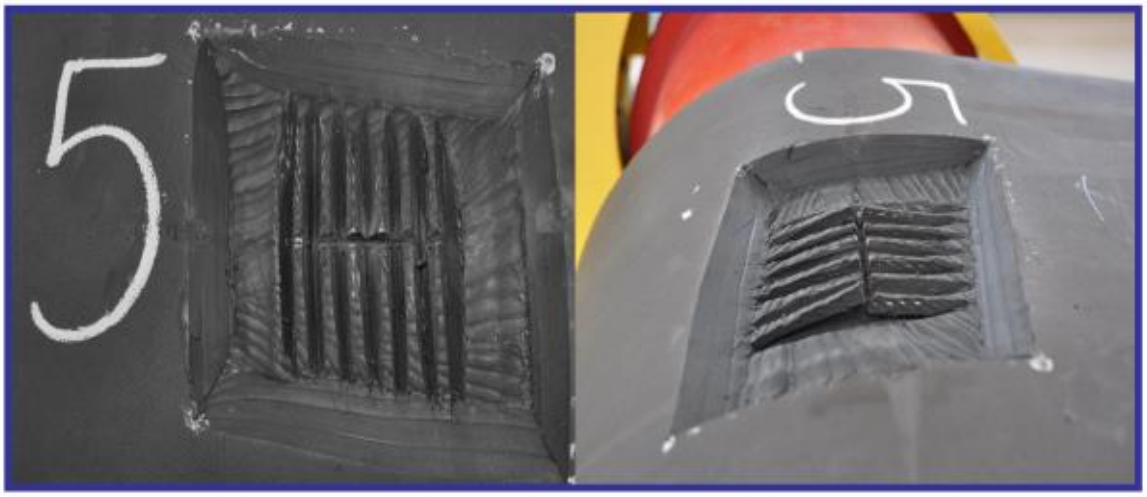


Rys. 37. Częściowe uszkodzenie jednej linki rdzenia (50% ubytku przekroju poprzecznego linki) [4]

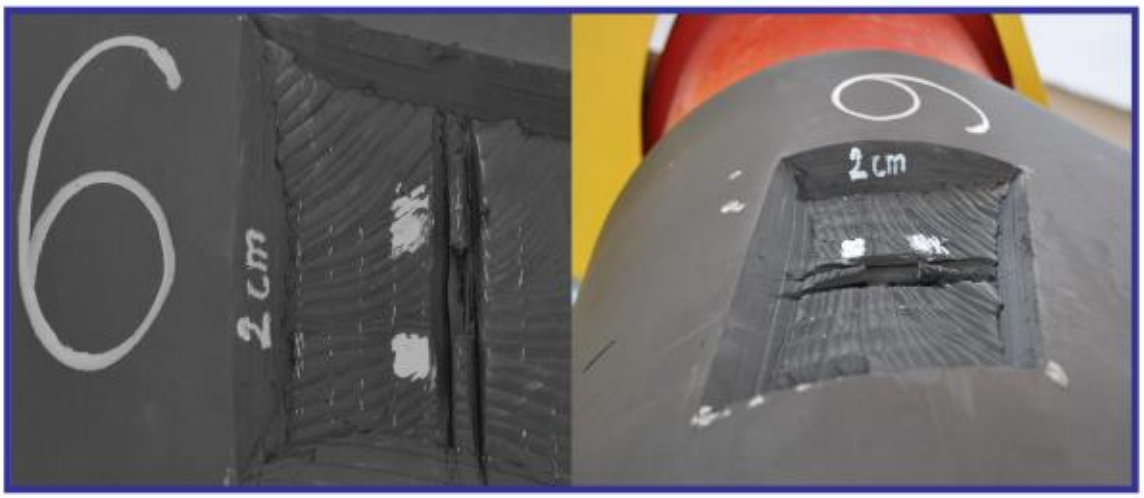


Rys. 38. Przecięcie jednej linki [4]

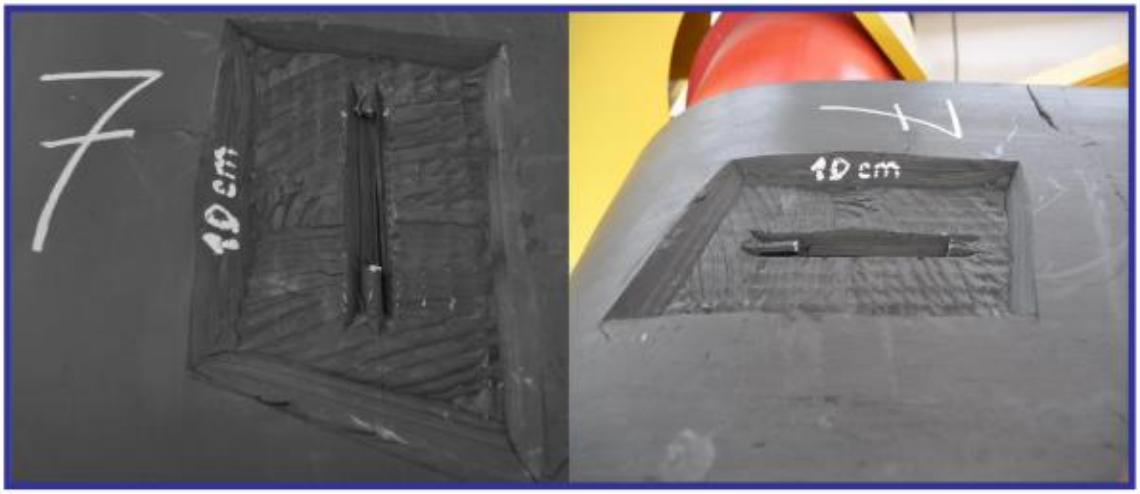
Rys. 39. Przecięcie trzech linek w kierunku poprzecznym [4]



Rys. 40. Przecięcie sześciu linek w kierunku poprzecznym [4]



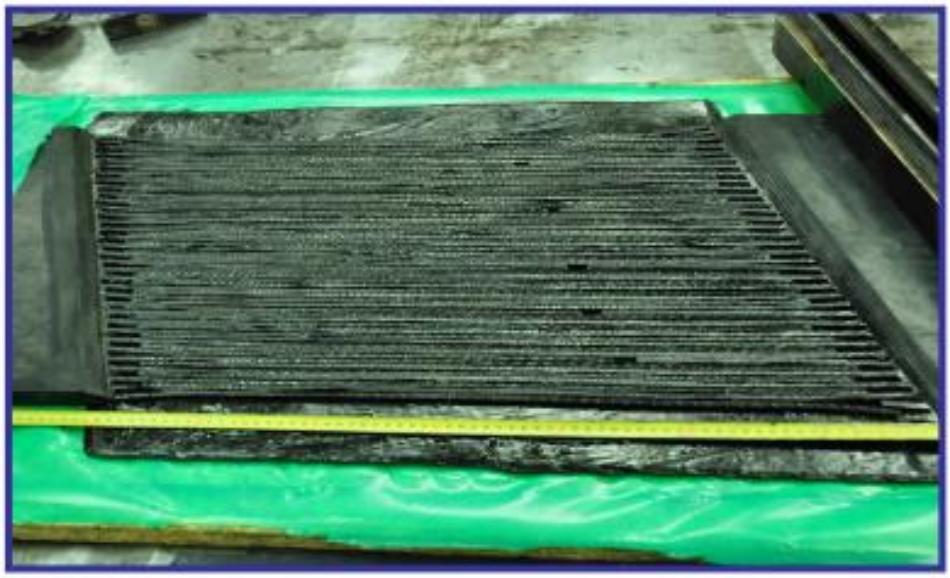
Rys. 41. Usunięcie linki na odległości 20 mm [4]



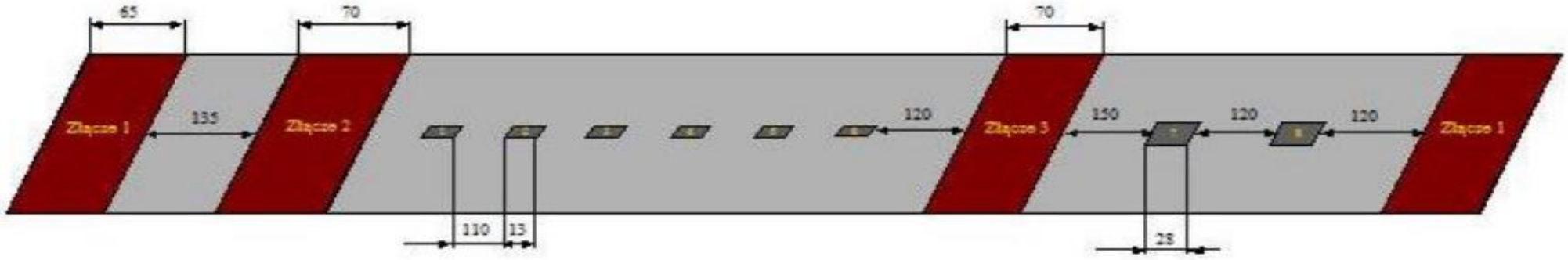
Rys. 42. Usunięcie linki na odległości 100 mm [4]

Rys. 43. Usunięcie trzech linek na odległości 100 mm [4]

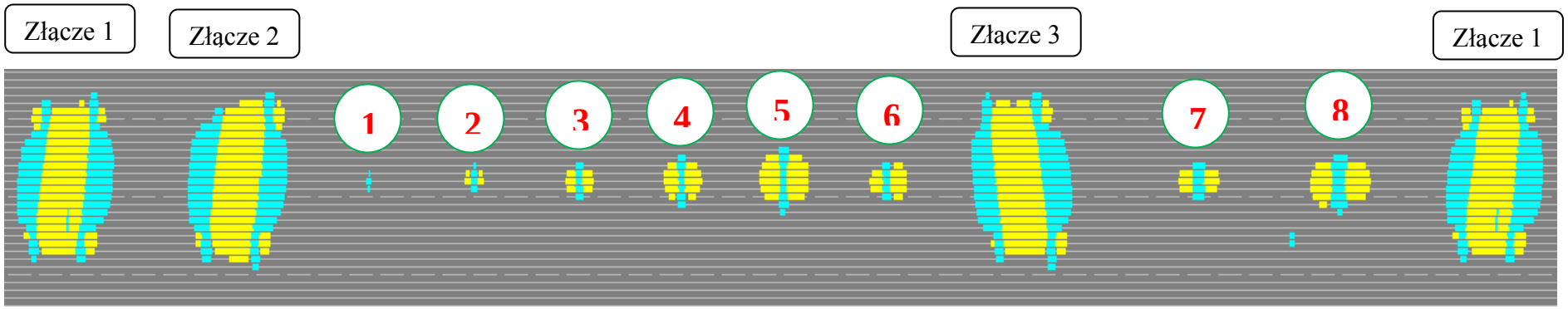
Zainstalowana taśma na przenośniku ma wykonane trzy złącza. Dwa z nich wykonane są na długości 700 mm natomiast jedno na długości 650 mm. Jedno ze złączy zostało przedstawione na rys. 44. Natomiast to jak złącze oraz uszkodzenia są identyfikowane przez system diagnostyczny zostało przedstawione na rys. 46. Sygnał został sczytany dla progu 150 mV przy prędkości taśmy 2,5 m/s, natomiast listwa magnetyczna znajdowała się 35 mm od rdzenia taśmy



Rys. 44. Schemat wykonanego połączenia [4]



Rys. 45. Schemat rozmieszczeń wykonanych uszkodzeń [4]



Rys. 46. Sygnał magnetyczny jednej pętli taśmy

7. Metodologia badań

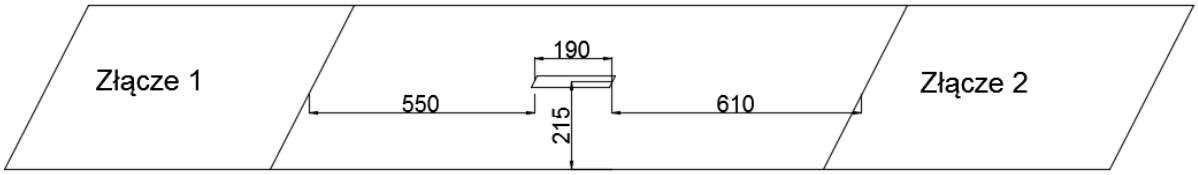
Metoda badań jaka została przyjęta polegała na wykonaniu następujących kroków:

1) Przygotowanie taśmy do badań poprzez odsłonięcie jednej linki taśmy ST,
2) Aplikacja roztworów przyspieszających korozję na odsłoniętą linkę
3) Dodawanie roztworu na powierzchnie linki w przypadku wyparowania poprzedniego zalewu,
4) Monitorowanie tempa powstawania korozji na powierzchni linki,
5) Wykonanie pomiarów przed wyszczotkowanie linki z rdzy oraz po wyszczotkowaniu

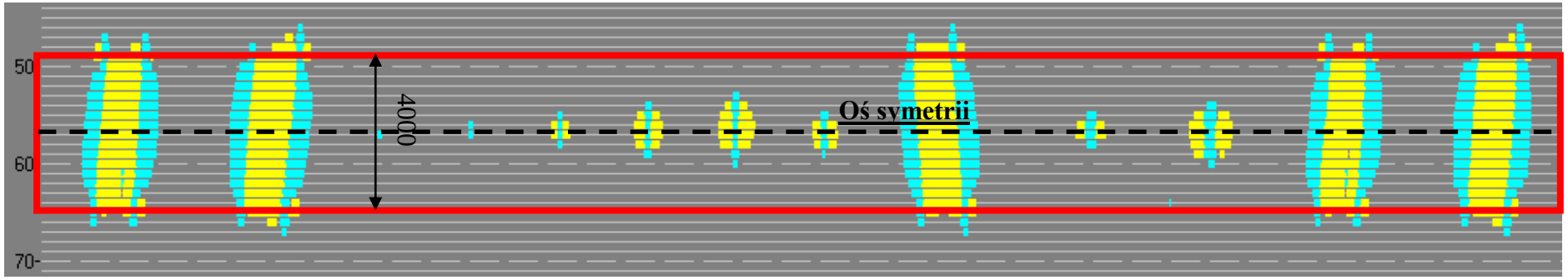
Linka została odsłonięta poprzez wycięcie gumy, która ją otaczała na odcinku ok. 120 mm (rys. 47).

Rys. 47. Długość odsłoniętej linki

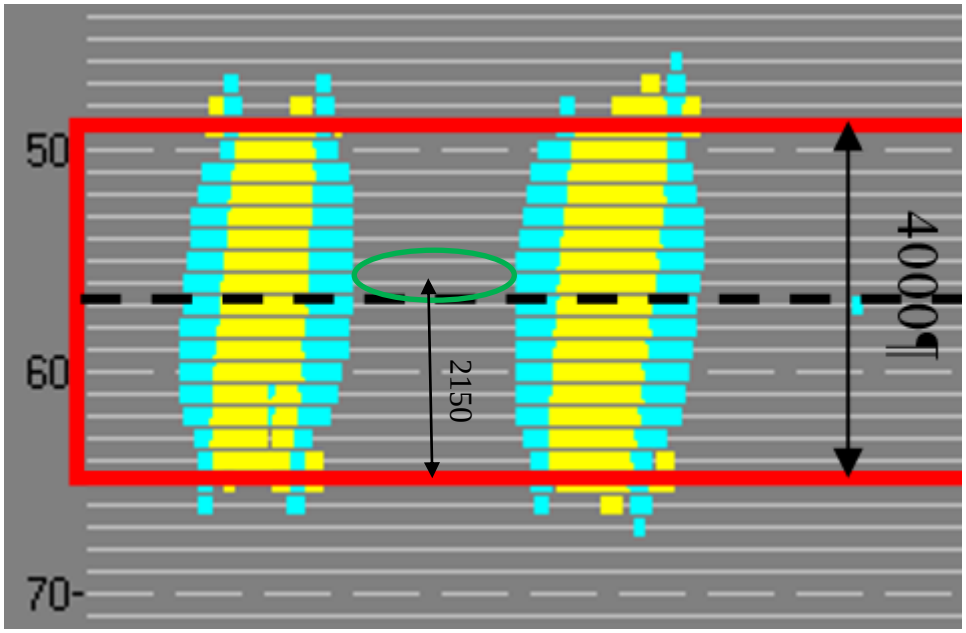
Wycięcie gumy zostało wykonane pomiędzy złączami 1 i 2, tak jak to zostało ukazane na schemacie (rys. 48)



Rys. 48. Miejsce odsłonięcia linki



Rys. 49. Jedna pętla taśmy wraz z zaznaczoną osią symetrii oraz granicami taśmy



Rys. 50. Miejsce, gdzie system powinien wykryć skorodowaną linkę

Obrys taśmy na obrazie sygnału zmiany pola magnetycznego oraz oś symetrii taśmy zostały ukazane na rys. 49. Wyznaczono go na podstawie szerokości taśmy oraz odległości cewek od siebie. Sygnał wykracza poza granice taśmy, ponieważ cewki głowicy pomiarowej znajdujące się poza obrysem taśmy wychwytują jeszcze sygnał z linek ST znajdujących się na obrzeżach taśmy. Pomiar został wykonany dla czułości 600 mV, przy prędkości 2,5 m/s w odległości 20 mm od taśmy. Natomiast na rys. 48 oznaczono miejsce, gdzie system powinien wykryć uszkodzenie. Na rys. 50 przedstawiono miejsce, gdzie system powinien wykryć uszkodzenie spowodowane korozją.

Kolejnym krokiem było zalewanie uszkodzenia roztworami mającymi przyspieszyć proces korozji. W tym celu wykorzystano trzy roztwory:

1) Kwas solny o stężeniu 30%,
2) Solankę o stężeniu 3%,
3) Roztwór siarczanu miedzi $CuSO_4 * 5H_2O$ o stężeniu 3,5%.

Wybór pierwszego czynnika był nienajlepszy, co zostało potwierdzone podczas wykonywania badań. Ma to związek z tym, iż roztwory na bazie kwasu solnego są wykorzystywane do trawienia metali (w tym stali). Jest to proces, który polega na usuwaniu produktów korozji z powierzchni metalu a nie wywoływaniu korozji [15]. Kwas solny w wyniku reakcji mógł co najwyżej spowodować lekkie ubytki metalu, jednak na podstawie sygnału trudno to udowodnić, ze względu na to, iż sygnał był rejestrowany z bardzo dużą czułością na granicy błędu pomiarowego.

Kolejnym roztworem była solanka o stężeniu 3%, czyli zbliżonym do stężenia soli w wodzie morskiej. Tworząc ten roztwór kierowałem się tym, iż solanka o stężeniu 3% wpływa najkorzystniej na rozwój korozji [12].

Ostatnim roztworem był roztwór siarczanu miedzi. W momencie zetknięcia się żelaza i miedzi, które są metalami o różnej szlachetności, w obecności elektrolitu dochodzi do powstania ogniwa. W tym ogniwie żelazo ma niższy potencjał, a zatem jest anodą, natomiast miedź jako metal o wyższym potencjale jest katodą. Żelazo ulega utlenieniu, natomiast za pośrednictwem miedzi elektrony żelaza będą przekazywane jonom będącym w roztworze [15]. Do stworzenia roztworu wykorzystano siarczan miedzi $CuSO_4 * 5H_2O$ o masie molowej 249,49 g/mol.W celu wyznaczenia stężenia procentowego roztworu wykonano niezbędne obliczenia, których wyniki zostały przedstawione w tabeli 4.

$$n = \frac{m_s}{M} \tag{7.4}$$

$$c_m = \frac{n}{V_r} \tag{7.5}$$

$$c_m = \frac{c_p * d_r}{100\% * M} \tag{7.6}$$

gdzie:

m_s – masa substancji rozpuszczonej [g]
n – liczba moli [mol]

M – masa molowa [g/mol]
c_m – stężenie molowe [mol/dm^3]
V_r – objętość roztworu [dm^3]
c_p – stężenie procentowe [%]
d_r – gęstość roztworu [g/dm^3]

Tabela 4. Obliczone stężenie procentowe roztworu siarczanu miedzi

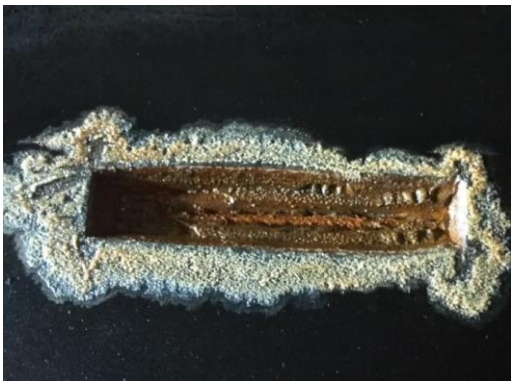
Masa molowa	249,49	g/mol
Masa substancji	7	g
Liczba moli	0,028057	mol
Objętość wody	0,2	dm^3
Stężenie molowe	0,140286	mol/dm^3
Gęstość wody	1000	g/dm^3
Stężenie procentowe	3,5	%

Wykonano pięć pomiarów. Między tymi pomiarami monitorowano stan linki i aplikowano wspomniane roztwory na odsłoniętą linkę. Daty pomiarów zostały przedstawione w tabeli 5. Oprócz tego zmierzono średnie temperatur z ostatniego tygodnia poprzedzającego badanie.

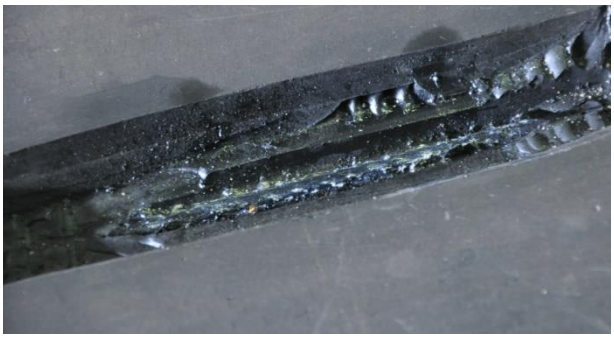
Tabela 5. Daty pomiarów

Data	**Roztwór**	**Ilość kąpieli**	**Średnia temp. [˚C]**
19.10.2016 r.	Kwas solny	1	10
16.11.2016 r.	Solanka	3	4
01.03.2017 r.	Solanka	3	7
17.05.2017 r	Solanka	4	17
07.06. 2017 r.	Roztwór siarczanu miedzi	1	25

Pomiary wykonano dla dwóch stanów linek: przed wyczyszczeniem uszkodzenia z produktów rdzy oraz po wyczyszczeniu (rys. 52 i rys. 51). Składniki korozji, które składają się m.in. z atomów żelaza mają wpływ na sygnał magnetyczny, zatem należało ustalić jak duży on jest. Uszkodzenie wyczyszczono za pomocą drucianej szczotki oraz wody.



Rys. 52. Przed wyszczotkowaniem



Rys. 51. Po wyszczotkowaniu

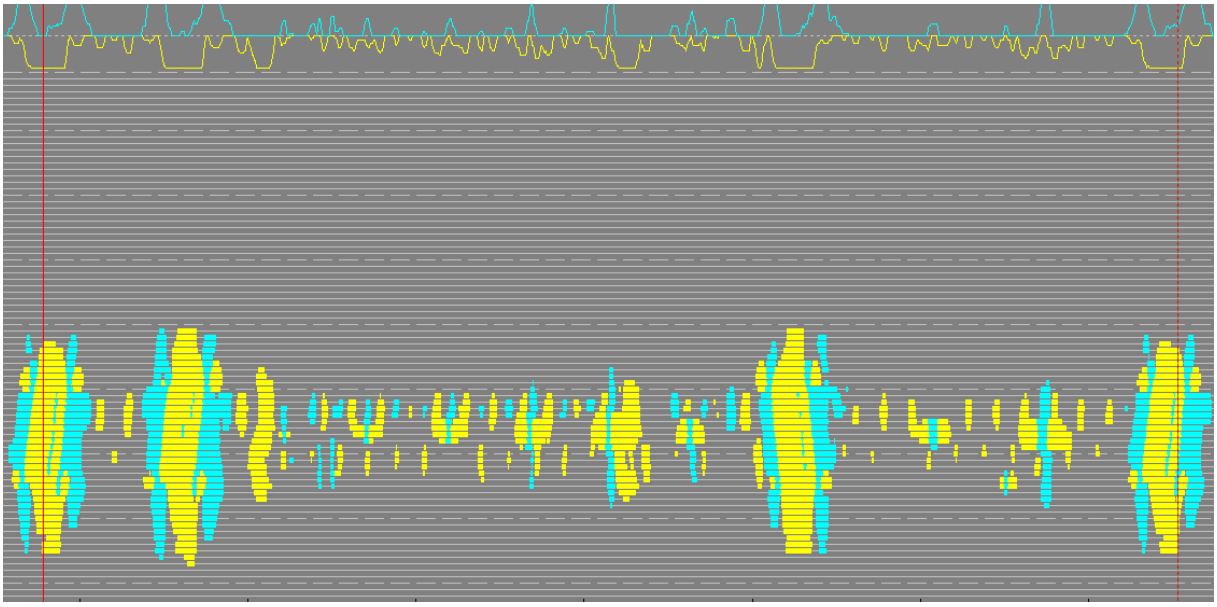
Pomiary wykonano przy następujących ustawieniach:

- Prędkość taśmy – 2,5 m/s
- Odległość głowicy od linki – 20 mm
- Początkowa czułość – 50 mV

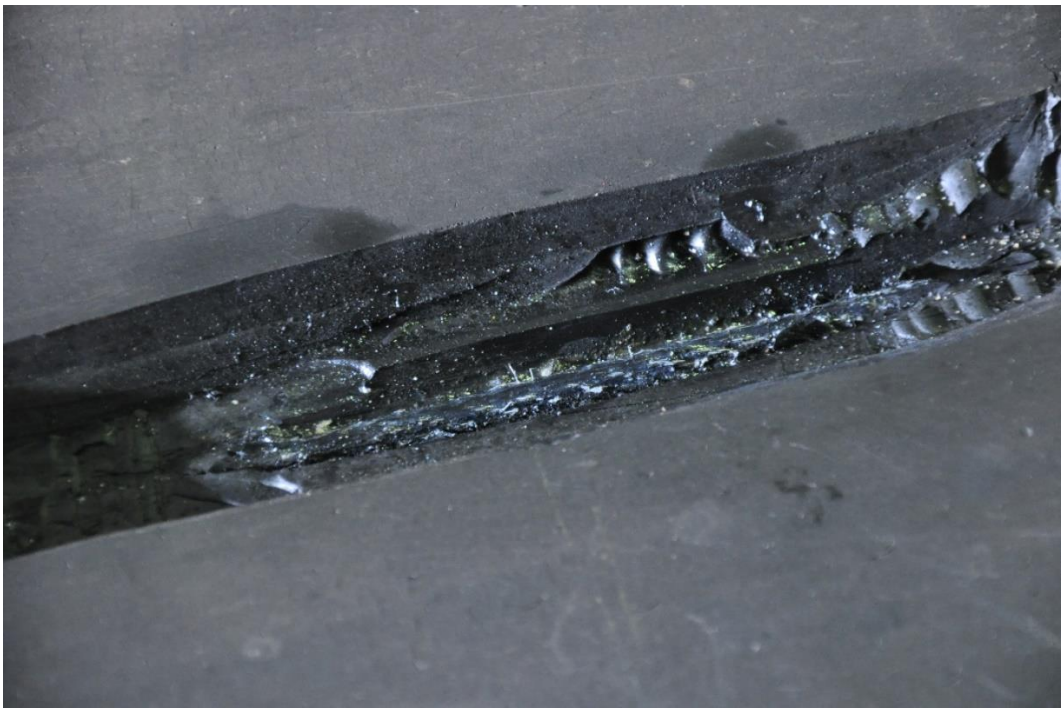
W przypadku czułości zaczęto od bardzo wysokiej czułości – 50 mV – a następnie starano się wykryć moment, kiedy system przestanie wykrywać uszkodzenie. Prędkość oraz odległość od linki pozostała stała.

8. Wyniki badań

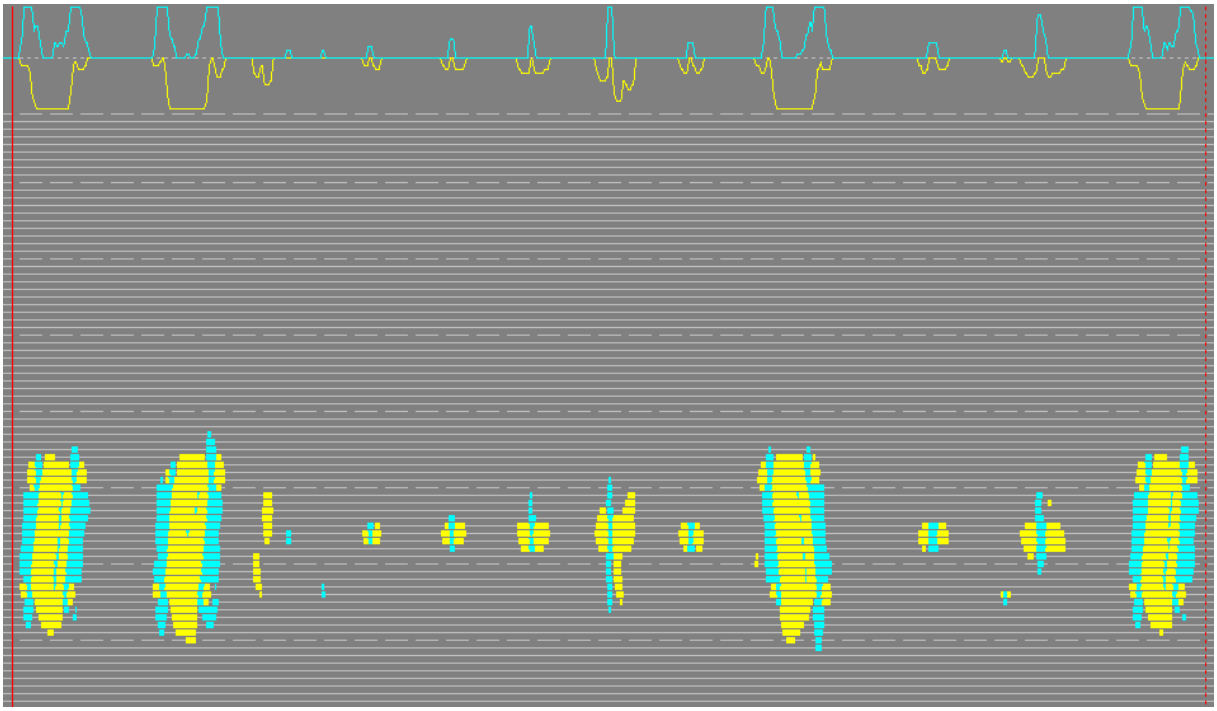
Wyniki badań przedstawiono w formie tabelarycznej (tabela 6) oraz zdjęcia wybranych sygnałów (rys. 53, rys. 55, rys. 57, rys. 59, rys. 61) oraz uszkodzenia (rys.54, rys. 56, rys. 58, rys. 60, rys. 62).



Rys. 53. Pomiar 1, czułość 50 mV

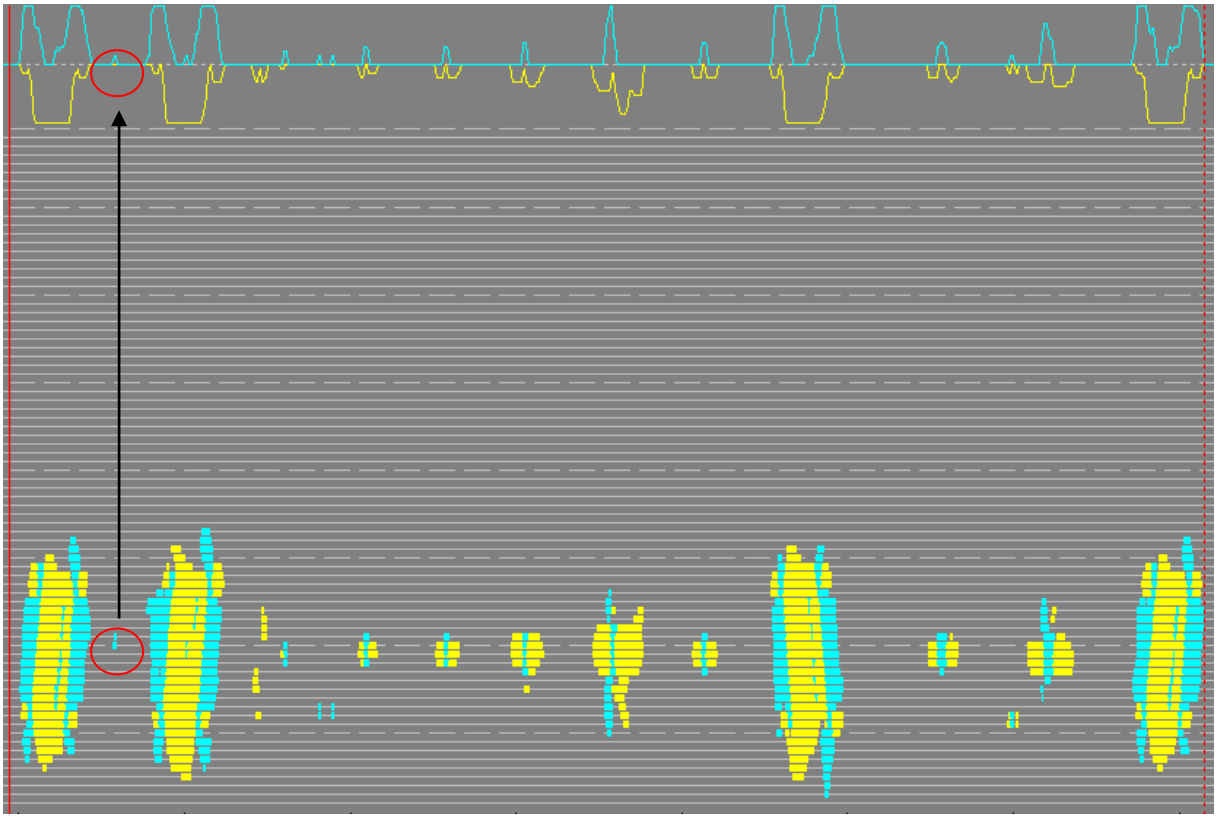


Rys. 54. Zdjęcie uszkodzenia po pierwszym pomiarze



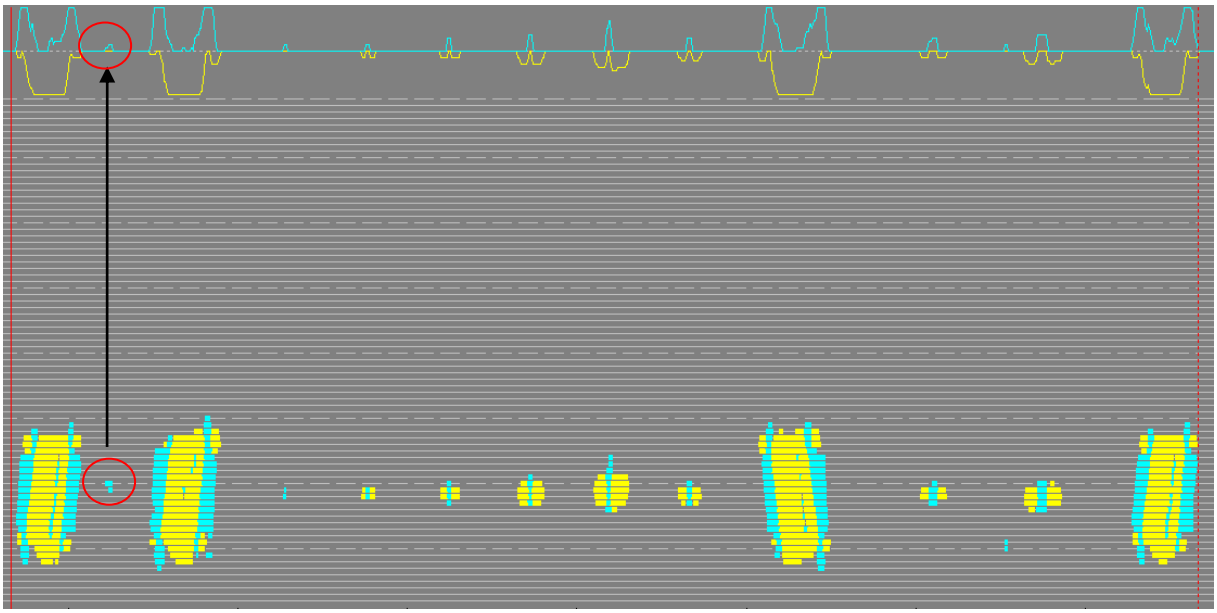
Rys. 55. Pomiar 2, czułość 100 mV

Rys. 56. Pomiar drugi

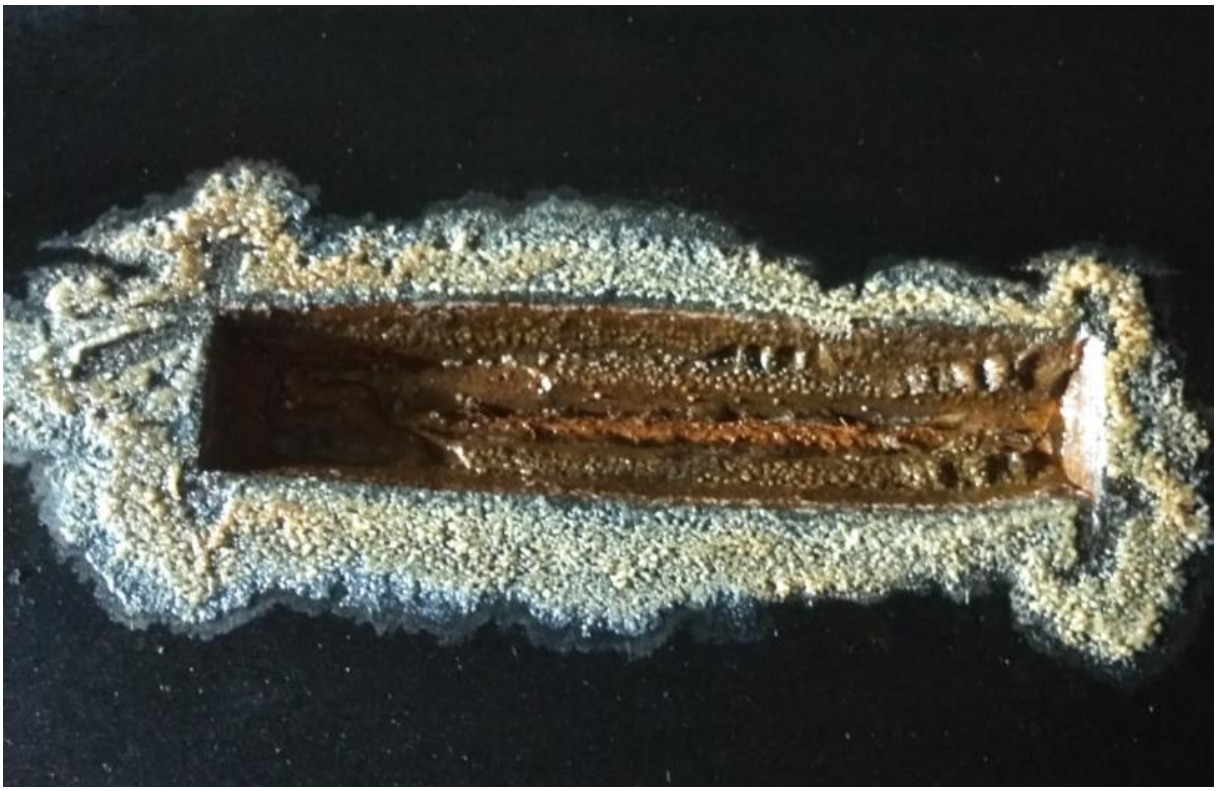


Rys. 57. Pomiar 3 czułość 100 mV

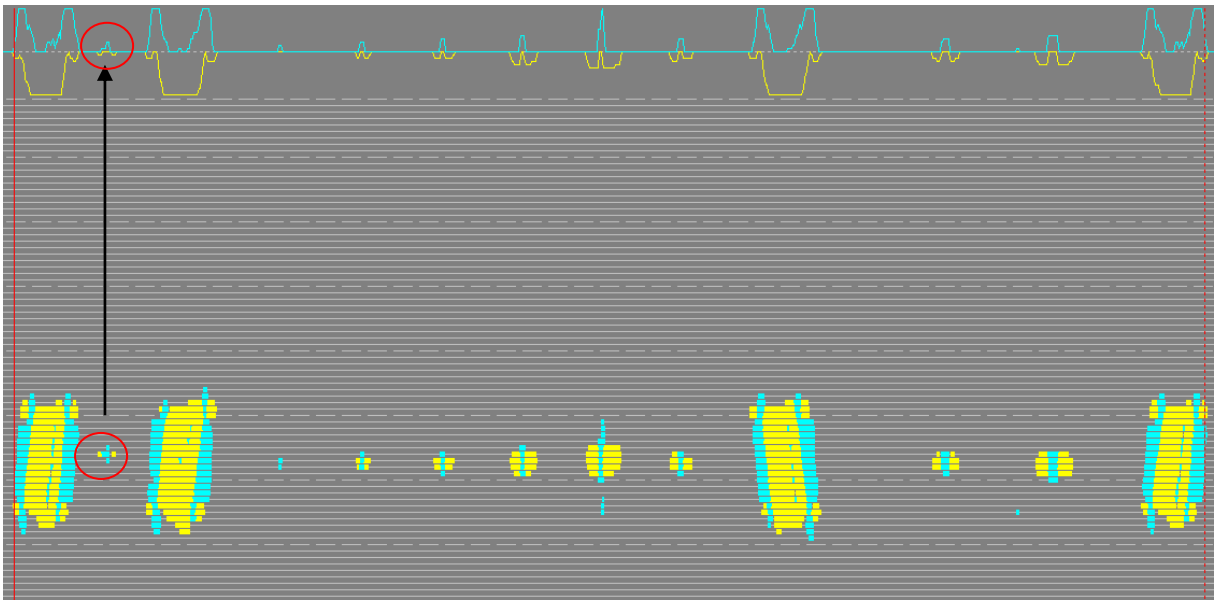
Rys. 58. Trzeci pomiar



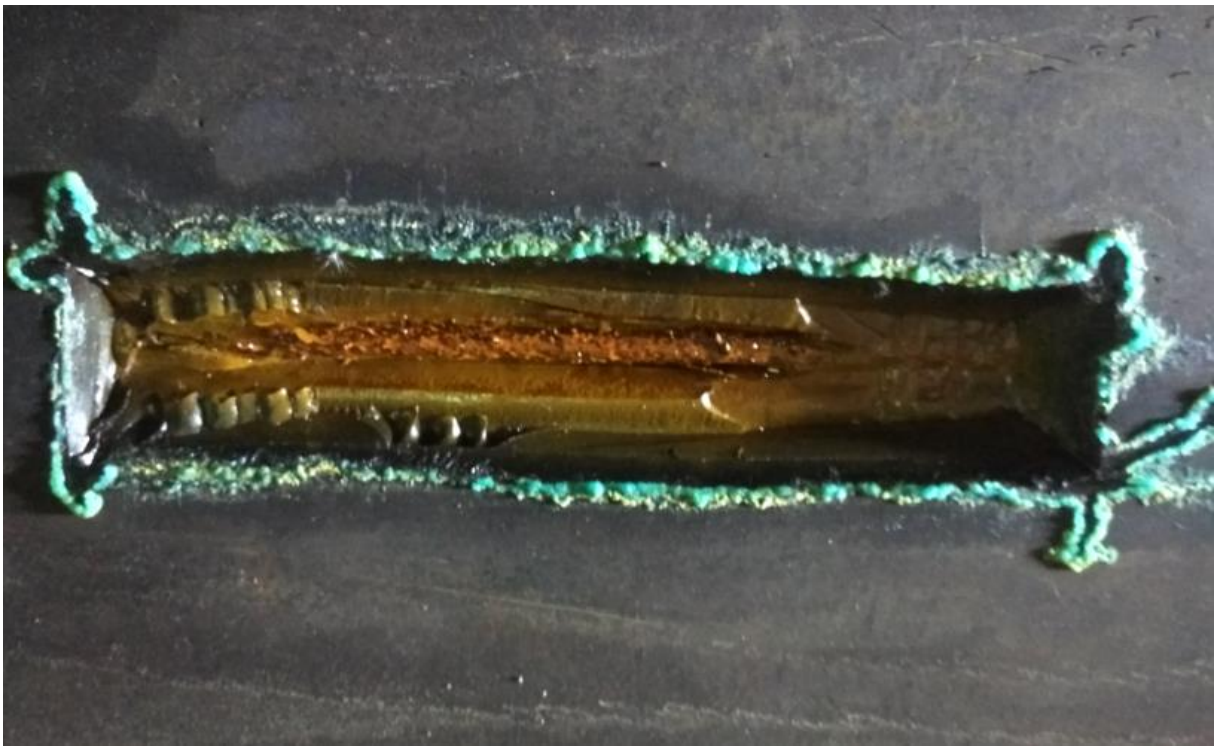
Rys. 59. Pomiar 4, czułość 170 mV



Rys. 60. Czwarty pomiar



Rys. 61. Sygnał piątego pomiaru czułość 170 mV



Rys. 62. Piąty pomiar

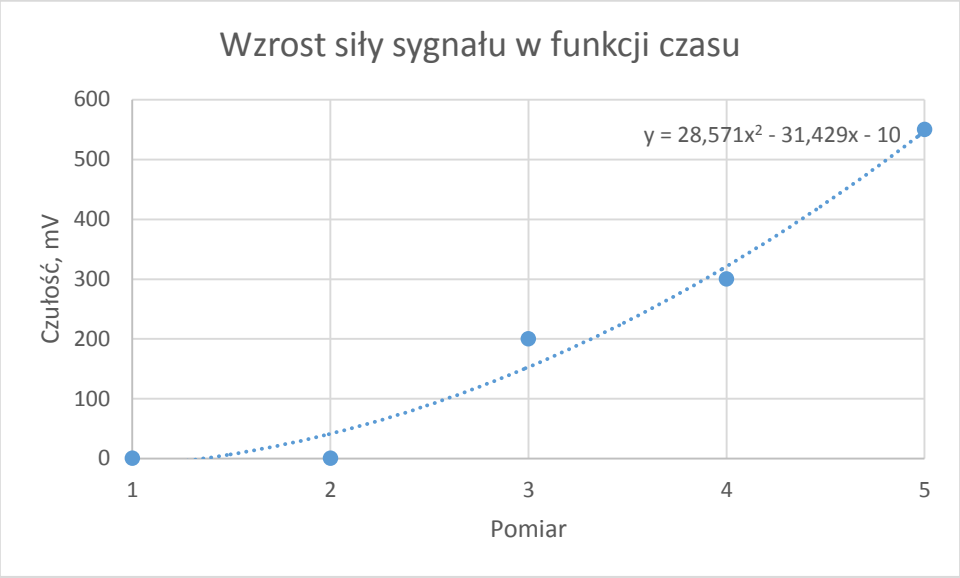
W tabeli 6. przedstawiono wyniki badań. Dla każdego pomiaru wykonano od 4 do 10 pętli, a następnie zmierzono długości sygnałów i powierzchni sygnałów.

Tabela 6. Wyniki badań

			Przed wyszczotkowaniem				Przed wyszczotkowaniu			
Pomiar	Roztwór	Data	Czułość [mV]	Długość sygnału [cm]	Pole powierzchni sygnału pozytywnego i negatywnego [cm^2]	Pole powierzchni sygnału pozytywnego [cm^2]	Czułość [mV]	Długość sygnału [cm]	Pole powierzchni sygnału pozytywnego i negatywnego [cm^2]	Pole powierzchni sygnału pozytywnego [cm^2]
1.	Kwas solny	19.10.2016	50	-	-	-	-	-	-	-
			75	-	-	-	-	-	-	-
			80	-	-	-	-	-	-	-
			90	-	-	-	-	-	-	-
2.	Solanka	16.11.2016	50	-	-	-	-	-	-	-
			75	-	-	-	-	-	-	-
			80	-	-	-	-	-	-	-
			90	-	-	-	-	-	-	-
3.	Solanka	01.03.2017	90	8	-	20	90	8	-	20
			100	8	-	20	100	8	-	20
			130	8	-	20	130	1	-	2,5
			150	1	-	2,5	150	1	-	2,5
			170	1	-	2,5	170	-	-	-
			200	-	-	-	200	-	-	-
4.	Solanka	17.05.2017	170	10	-	25	170	17	14,2	42,5
			180	5	-	12,5	200	5	-	12,5
			200	5	-	12,5	250	4	-	10
			300	-	-	-	300	-	-	-
5.	Siarczan miedzi	07.06.2017	170	23	19,2	57,5	170	30	25	75
			250	15	12,5	37,5	250	18	15	45
			350	4	-	10	350	6	-	15
			450	4	-	10	450	6	-	15
			550	-	-	-	550	-	-	-

9. Analiza wyników badań

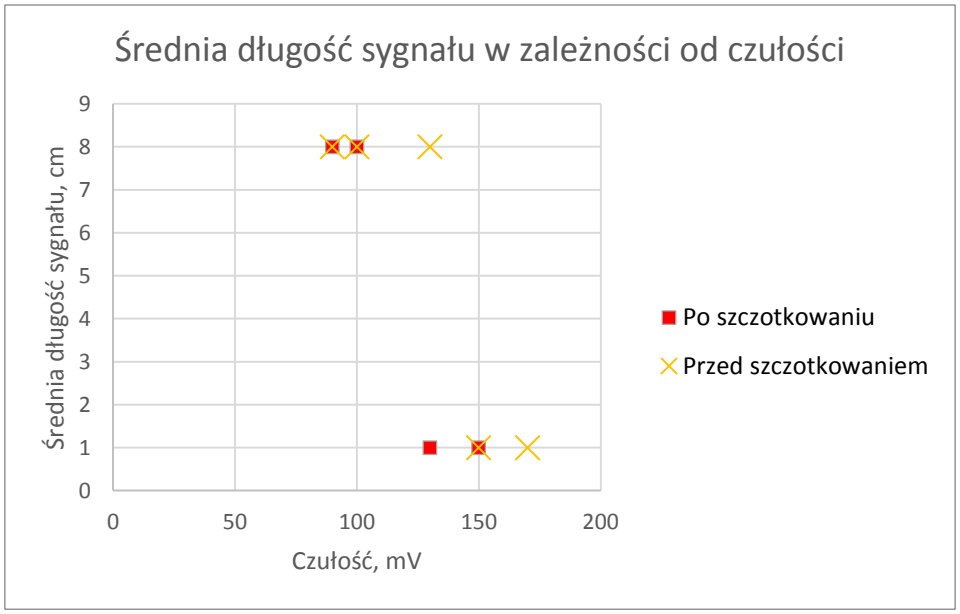
W poniższy rozdziale przeanalizowano wyniki badań i przedstawiono je na wykresach. Przeprowadzone badania dały satysfakcjonujące wyniki. Pierwsze dwa badania nie wykryły uszkodzenia nawet przy zastosowaniu wysokiej czułości. Po wykonaniu trzeciego pomiaru uzyskano efekty na granicy błędu przy zastosowaniu wysokiej czułości. Ostatnie dwa badania ukazały w pełni, że rdza zaczyna postępować i można było to uszkodzenie zidentyfikować na obrazie sygnału zmiany pola magnetycznego przy mniejszej czułości.



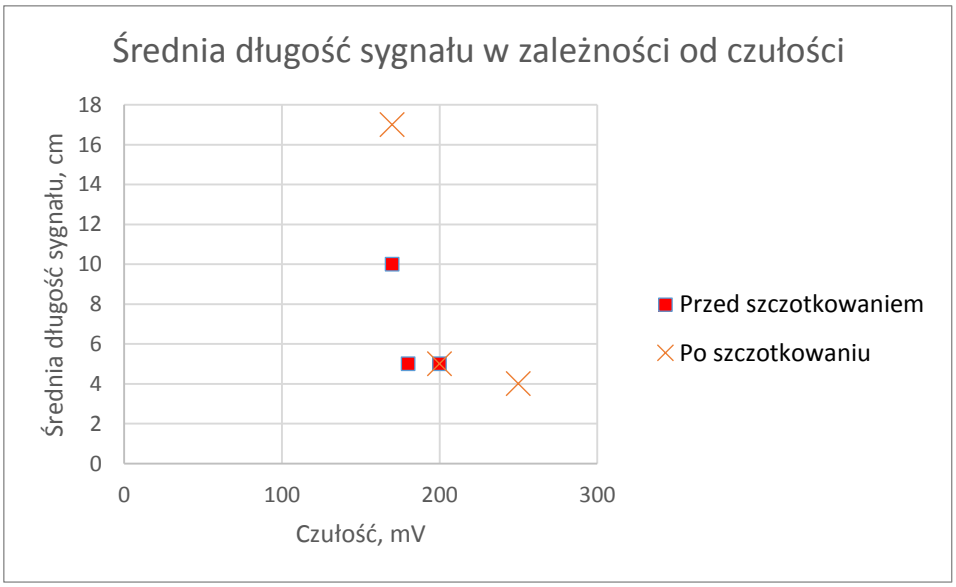
Rys. 63. Wzrost siły sygnału w funkcji czasu

Na rys. 63 przedstawiono wykres wzrostu siły sygnału w funkcji czasu. Pierwsze dwa pomiary nie wykryły uszkodzenia, natomiast ostatni pomiar wykrywał uszkodzenia przy czułości 550 mV, czyli moc sygnału wzrosła o 55 000%. Na podstawie tego wyniku można stwierdzić, że w lince doszło do ubytku stali. Zastosowanie siarczanu miedzi okazało się najskuteczniejszym rozwiązaniem a w połączeniu z wysoką temperaturą spowodowało w mniej niż miesiąc znaczny postęp korozji. Pozwoliło to wykryć uszkodzenie przy znacznie niższym poziomie czułości. Zmniejszono czułości wykrywania uszkodzeń o 250 mV (spadek o 80%) w porównaniu do poprzedniego pomiaru. Wyznaczono wielomianową linię trendu. Dwa z trzech punktów (punkty pierwszego i drugiego nie wzięto pod uwagę) znajdują się nad nią, więc można przypuszczać, że po okresie letnim (duża temperatura) i po dalszym aplikowaniu roztworów na uszkodzenie moc sygnału będzie rosnąć.

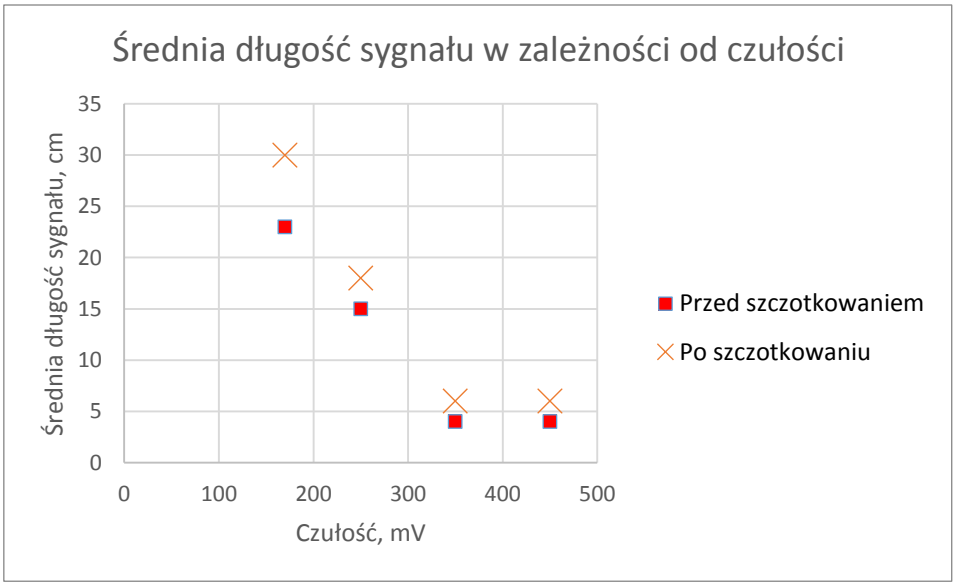
Na poniższych wykresach przedstawiono zależności średniej długości sygnału od czułości pomiaru (rys. 64, rys. 65., rys. 66) oraz zależności średniej powierzchni sygnału od czułości pomiaru (rys. 67, rys. 68, rys. 69). Średnia długość sygnału wyniosła 10 mm przy czułości 170 mV dla trzeciego badania, natomiast dla ostatniego badania średnia długość sygnału wyniosła 230 mm (wzrost o 2 300%) przy czułości 170 mV dla uszkodzenia przed wyszczotkowaniem, natomiast dla uszkodzenia po wyszczotkowaniu 300 mm (wzrost o 3 000%). W przypadku średniej powierzchni sygnału to wyniosła ona ok. 2,5 cm^2 dla trzeciego pomiaru przy czułości 170 mV, natomiast dla piątego przed szczotkowaniem 57,5 cm^2 (wzrost o 2 300%) a po szczotkowaniu 75 cm^2 (wzrost o 3 000%).



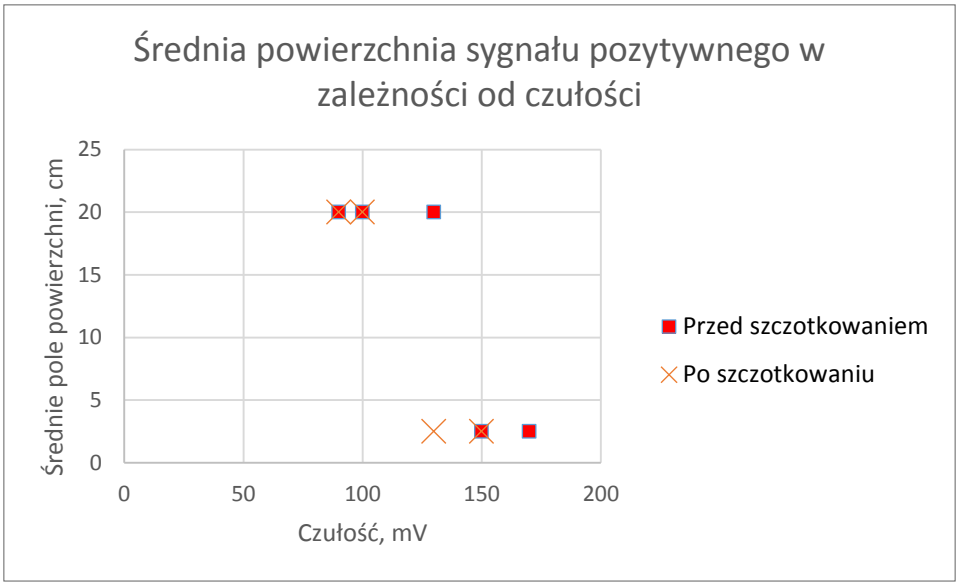
Rys. 64. Średnia długość sygnału w zależności od czułości pomiaru dla trzeciego pomiaru



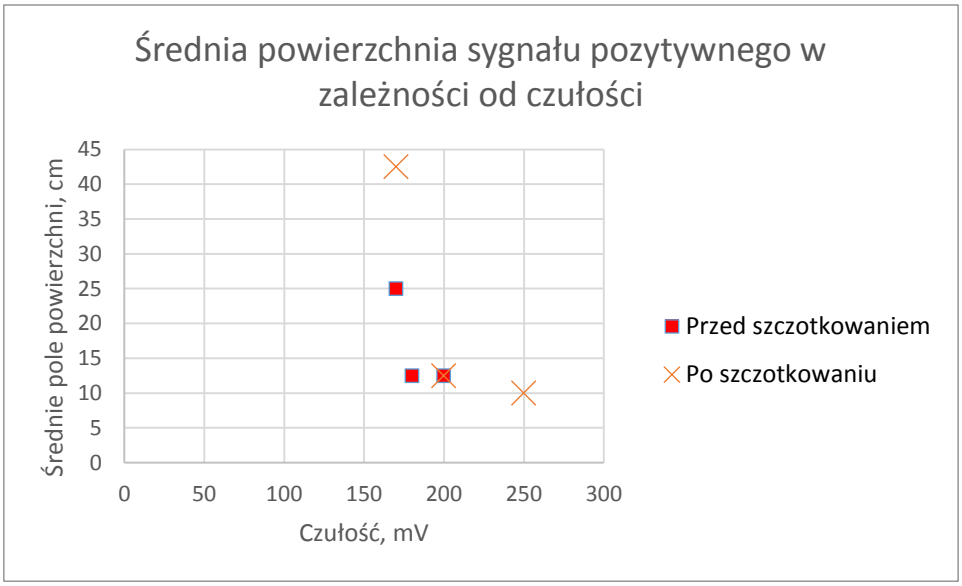
Rys. 65. Średnia długość sygnału w zależności od czułości pomiaru dla czwartego pomiaru



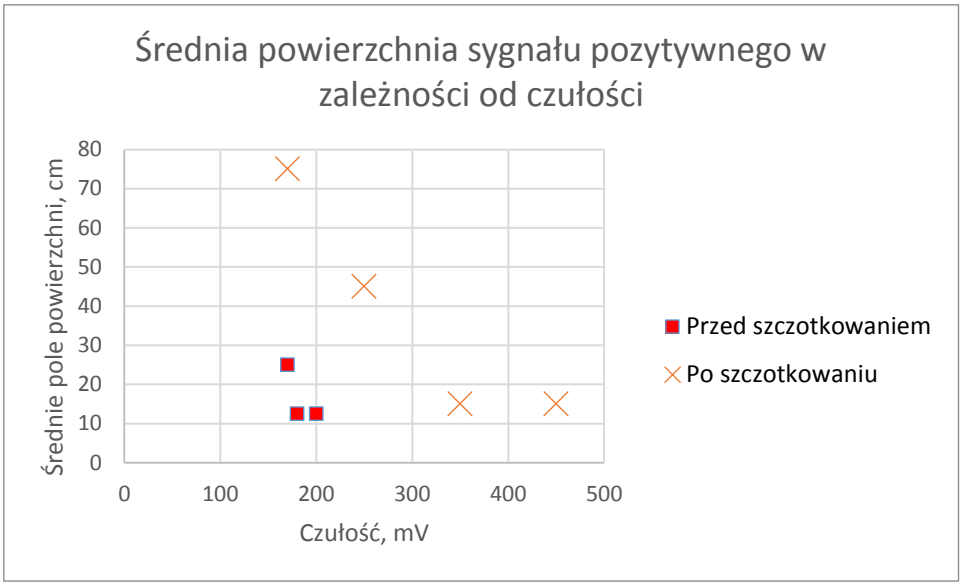
Rys. 66. Średnia długość sygnału w zależności od czułości pomiaru dla piątego pomiaru



Rys. 67. Średnia powierzchnia sygnału pozytywnego w zależności od czułości pomiaru dla trzeciego pomiaru



Rys. 68. Średnia powierzchnia sygnału pozytywnego w zależności od czułości pomiaru dla czwartego pomiaru



Rys. 69. Średnia powierzchnia sygnału pozytywnego w zależności od czułości pomiaru dla piątego pomiaru

Następnie przeanalizowano wpływ szczotkowania na moc sygnału. Przy pierwszym pomiarze, który wykrył uszkodzenie nie wykryto żadnego wpływu lub wpływ był bardzo mały na odbierany sygnał. Dopiero w sygnale czwartym i piątym uwidacznia się różnica. Produkty korozji mają pewną pojemność magnetyczną, jednak nie jest ona na tyle duża, żeby mieć istotny wpływ na moc sygnału zmiany pola. Po szczotkowaniu długość sygnału była w obu przypadkach dłuższa, aniżeli przed szczotkowaniem przy zastosowaniu tej samej czułości. Wynika to z faktu, że szczotka mająca bardzo sztywne druty podczas czyszczenia dodatkowo uszkadzała skorodowane splecione druty linki.

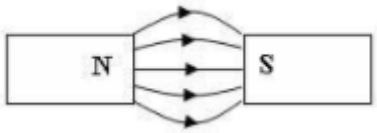
Następnie zbadano siłę pole magnetyczne występującego wokół namagnesowanej linki w celu sprawdzenia czy odsłoniętą linka jest równomiernie korodowana. Aby tego dokonać wykorzystano teslomierz cyfrowy HGS – 10A firmy Enes (rys. 70). Urządzenie funkcjonuje w oparciu o działanie zjawiska Halla. Polega ono na tym, że przepływający prąd w przewodniku znajdujący się w polu magnetycznym jest proporcjonalny do wartości indukcji pola magnetycznego oraz natężenia prądu. Napięcie prądu wyznacza się poprzez:

$$U_H = R_{HI} * I * B_0 \tag{9.7}$$

gdzie:
R_{HI} – stała Halla,
I – natężenie prądu,
B_0 – wartość indukcji magnetycznej

Rys. 70. Teslomierz HGS – 10A [9]

W przypadku przerwania linki na obu jej końcach powstają przeciwne bieguny (N i S). Pomiędzy końcami dwóch linek dochodzi do przenoszenia elektronów z bieguna północnego do bieguna południowego i w wyniku tego zjawisko powstaje pole magnetyczne (rys. 71). Aby sprawdzić tą teorię zmierzono takie pole dla uszkodzenia nr 4 (przecięcie trzech linek w kierunku poprzecznym) przykładając sondę prostopadle do długości linki. Wartość pola magnetycznego wyniosła 40 mT. W tabeli 7 przedstawiona rozkład pola magnetycznego na odsłoniętej lince. Pomiar wykonano co 150 mm wzdłuż linki przykładając sondę prostopadle do linki.

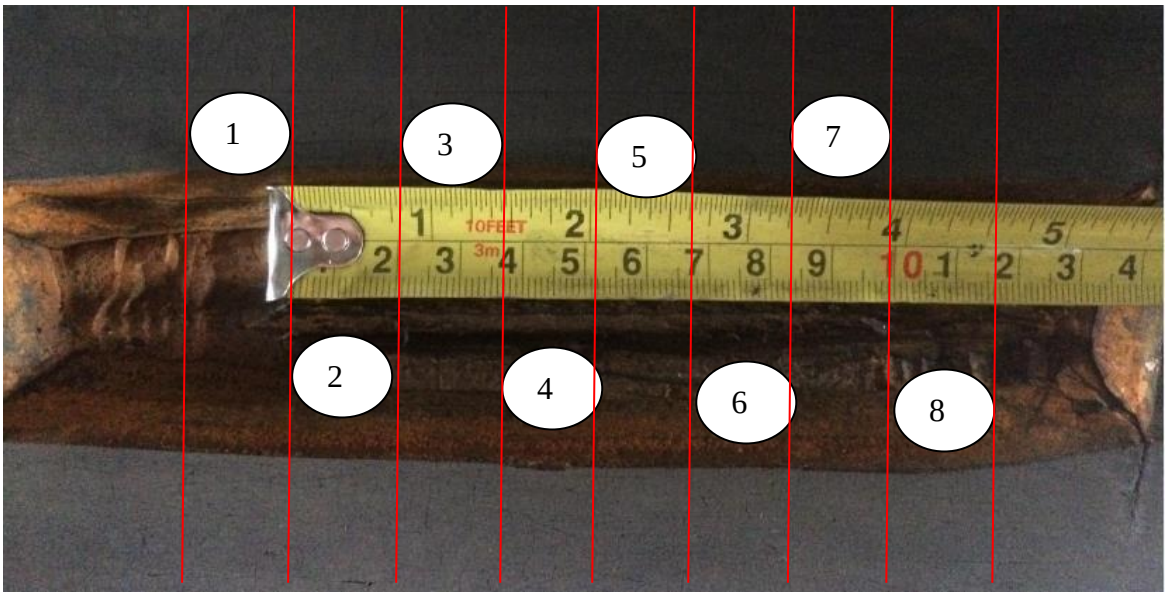


Rys. 71. Kierunek przepływania elektronów pomiędzy dwoma biegunami

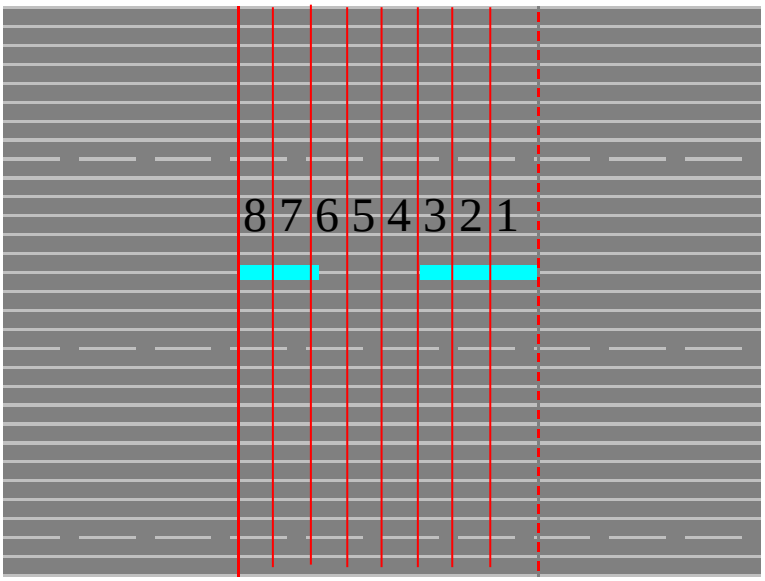
Tabela 7. Rozkład pola magnetycznego na odsłoniętej lince

	Pole magnetyczne [mT]		
Pozycja	Pomiar 1	Pomiar 2	Średnia
1	0,8	0,5	0,65
2	1,5	1,3	1,4
3	1,3	1	1,15
4	1,6	1,1	1,35
5	0,6	0,4	0,5
6	0,9	0,7	0,8
7	2,2	1,8	2
8	1,6	1,9	1,75

Na rys. 64 przedstawiono miejsca, gdzie było mierzone pole magnetyczne, natomiast na rys. 65 ukazano sygnał z piątego pomiaru (czułość 300 mV) o długości 110 mm, więc jest on zbliżony do długości odsłoniętej linki. Na sygnale zaznaczono strefy, gdzie zmierzono pole magnetyczne.



Rys. 72. Miejsca, gdzie mierzono pole magnetyczne



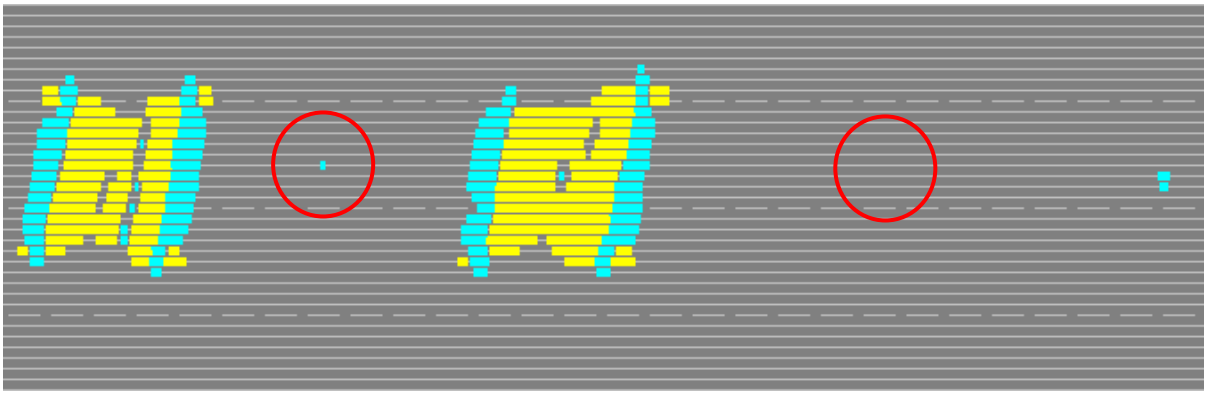
Rys. 73. Sygnał z piątego pomiaru, czułość 300 mV

Na podstawie powyższych wyników wywnioskowano, że rdza nie osadza się na lince równomiernie. Wartości pola magnetycznego na całej długości są różne. Strefy od 1 do 4 oraz od 6 od 8 mają największą wartość pola magnetycznego, toteż te miejsca są wykrywane przez system. Przerwa pomiędzy sygnałami to strefy od 4 do 6 i w tych miejsca wartość pola magnetycznego jest najmniejsza. Różnica sił pola magnetycznego wynikają z faktu, że linka jest zbudowana z plecionych ze sobą drutów, które w wyniku procesu korozji są przerywane pojedynczo.

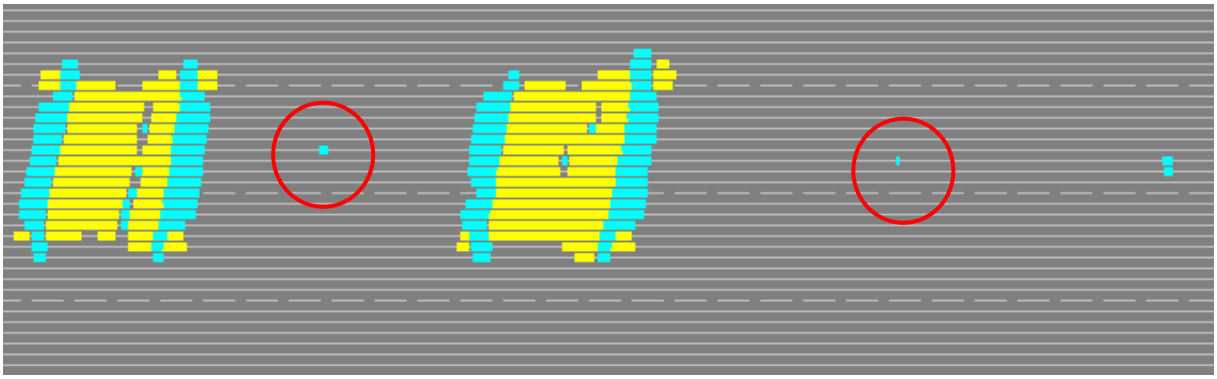
Po przeprowadzeniu dwóch pierwszych pomiarów nie wykryto uszkodzenia w miejscu odsłonięcia linki. Wynika to z faktu, że pierwszym wykorzystanym roztworem był kwas solny, który nie był najlepszym rozwiązaniem. Podczas drugiego pomiaru również nie wykryto uszkodzenia, pomimo zastosowania bardzo wysokiej czułości i solanki. Jest to związane z niską temperaturą powietrza (średnia temperatura 4 ˚C), która nie sprzyja rozwojowi korozji. Dopiero za trzecim razem udało się wykryć uszkodzenie w obrazie sygnału, lecz system wykrył je przy bardzo dużej czułości (90 mV). Przestał je wykrywać przy niewiele mniejszej czułości (170 mV). Te wyniki oscylują w granicach błędu pomiarowego, więc można je uznać za mało dokładne. Trzeci pomiar został wykonany po 4 miesiącach od wykonania drugiego pomiaru. Był to okres zimowy, więc niska temperatura wpływała niekorzystnie na rozwój korozji. Dodatkowo w niskiej temperaturze roztwór solanki zamarzał, więc jej działanie przyspieszające proces korozji było ograniczone. Kolejny pomiar przyniósł już wyraźniejsze efekty. Sygnał przestał być wykrywany przy czułości sygnału 300 mV. Temperatury w tym okresie były już dodatnie, więc roztwór mógł swobodnie reagować ze stalą. Dopiero na podstawie ostatniego pomiaru można stwierdzić, że stali w lince zaczęła ubywać, ponieważ sygnał przestał być wykrywalny przy czułości 550 mV. W tym okresie temperatura była już wysoka (średnio ponad 20 ˚C) co sprzyja rozwojowi korozji. Dodatkowym katalizatorem procesu był roztwór siarczanu miedzi. Można stwierdzić, że w tym momencie doszło do ubytku ponad 20% stali w przekroju poprzecznym linki, ponieważ przy tej samej czułości sygnału uszkodzenie nr 1, czyli częściowe uszkodzenie

jednej linki rdzenia (20% ubytku przekroju poprzecznego linki), nie zostało już wykryte przez program. Jest to widoczne na rys. 74 oraz rys. 75.

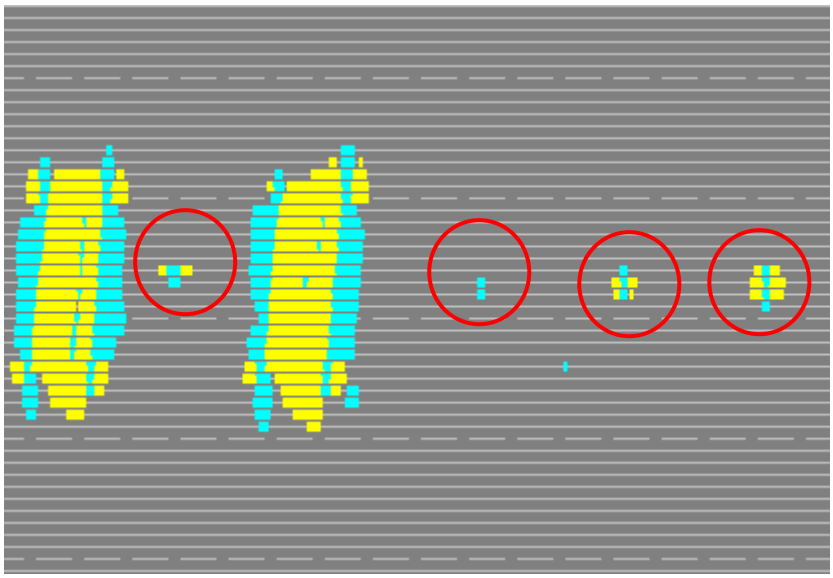
Stwierdzono, że na obrazie sygnału zmiany pola magnetycznego uszkodzenie spowodowane korozją wygląda podobnie jak uszkodzenie z częściowym przerwaniem linki bez jej przesunięcia. Porównano uszkodzenie nr 1 (20% ubytek stali w przekroju poprzecznym linki), uszkodzenie nr 2 (50% ubytek stali w przekroju poprzecznym), uszkodzenie nr 3 (przecięcie całej linki) oraz uszkodzenie wywołane korozją (rys. 74, rys. 75, rys. 76, rys. 77, rys. 78). W uszkodzeniu nr 2 (50% ubytek stali w przekroju poprzecznym) występuje dwubiegunowość na obrazie sygnału przy ustawionej małej czułości. W przypadku uszkodzenia nr 1 (20% ubytek stali w przekroju poprzecznym) nawet przy ustawieniu wysokiej czułości system nie wykrywa dwubiegunowego sygnału. W przypadku uszkodzenia nr 3 to jest ono wykrywalne przy każdej czułości. Jeżeli chodzi o uszkodzenie wywołane korozją to dwubiegunowość pojawia się przy wysokiej czułości pomiaru i zanika przy ustawieniu mniejszej czułości. To dowodzi ponownie, że uszkodzenie wywołane korozją jest poważniejsze, niż przecięcie linki w 20% w przekroju poprzecznym. Przy mniejszej czułości sygnał ma charakter dwubiegunowy w miejscach, gdzie linka jest przecięta i przerwana w pewnym stopniu. Przy większej czułości sygnał ma charakter dwubiegunowy tylko w przypadku całkowitego przecięcia linki. Dodatkowo można przypuścić, że wraz z rozwojem korozji dwubiegunowość sygnału będzie coraz wyraźniejsza i będzie wykrywalna przy mniejszej czułości. Korozja będzie uszkadzała linkę w jej coraz głębszych warstwach w wyniku czego uszkodzone linki będą się od siebie oddalać.



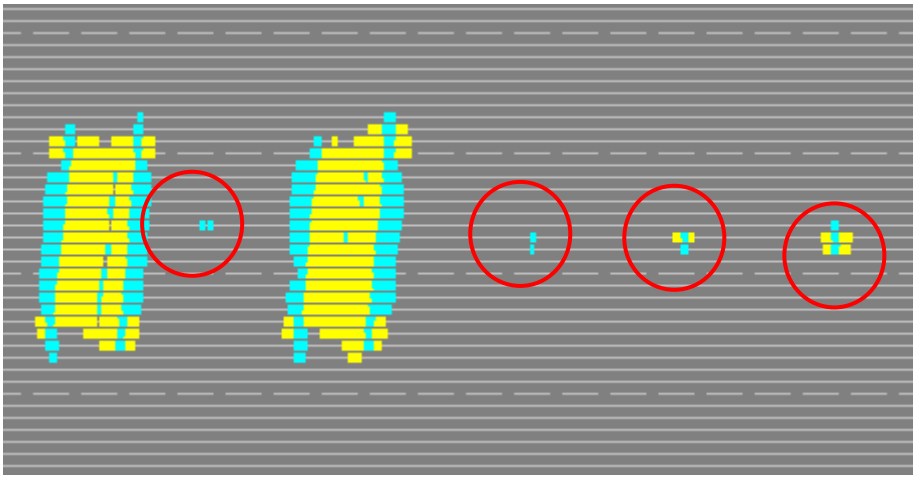
Rys. 74. Piąty pomiar, czułości 550 mV po szczotkowaniu



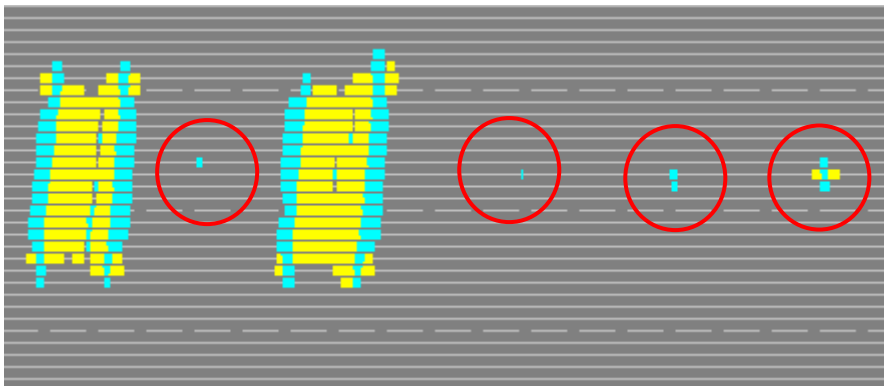
Rys. 75. Piąty pomiar, czułość 400 mV po szczotkowaniu



Rys. 76. Pomiar piąty, czułość 140 mV.

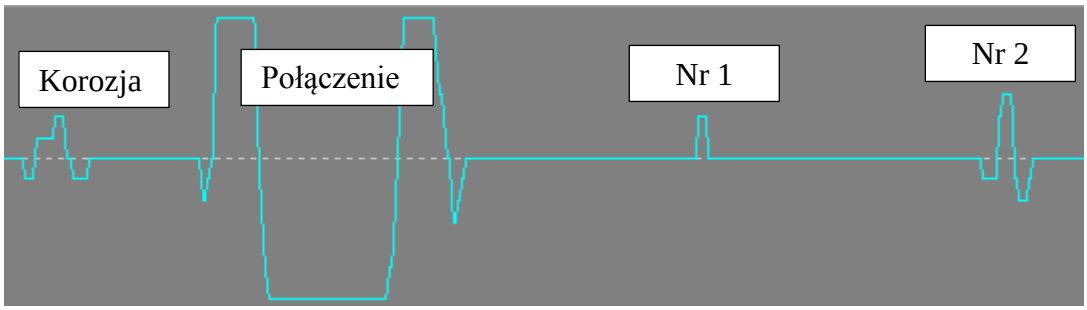


Rys. 77. Piąty pomiar, czułość 250 mV



Rys. 78. Piąty pomiar, czułość 400 mV

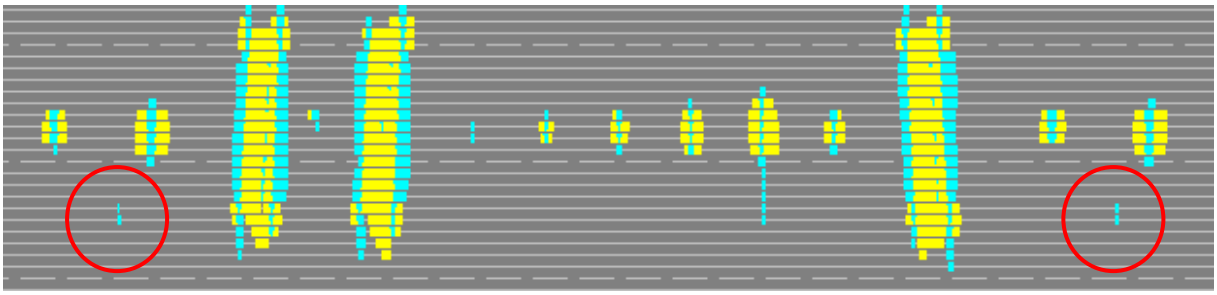
Przy wysokiej czułości (200 mV) zmiana pola magnetycznego wywołana korozją jest bardziej nieregularna (stopniowe przechodzenie do maksimum i minimum), niż przecięcia linek (natychmiastowe przechodzenie do maksimum i minimum). W przypadku sygnału o mniejszej czułości, zmiana pola magnetycznego wywołana korozją przypomina już zmiany wywołane przez przecięcie linek (rys 79, rys. 80).



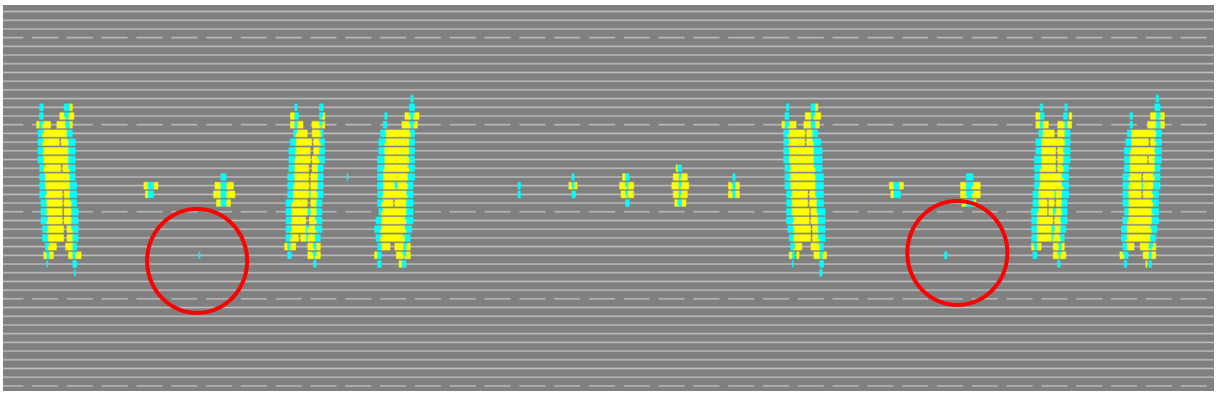
Rys. 79. Piąty pomiar, czułość 200 mV

Rys. 80. Piąty pomiar, czułość 400 mV

Pomiędzy uszkodzeniem nr 7 i nr 8 na obrazie sygnału widoczna jest zmiana pola magnetycznego (rys. 81 i rys. 82). Można przypuszczać, że w tym miejscu może dochodzić do korozji rdzenia. Zmiana pola magnetycznego jest bardzo podobna do przypadku, w którym korozja została wywołana celowo.



Rys. 81. Piąty pomiar, czułość 150 mV

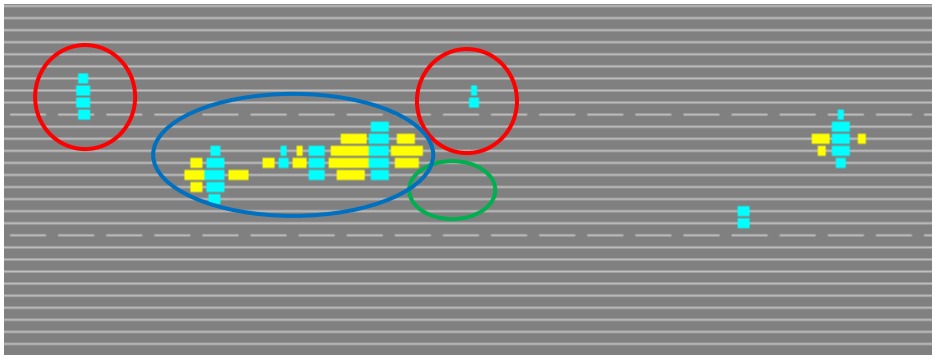


Rys. 82. Piąty pomiar, czułość 500 mV

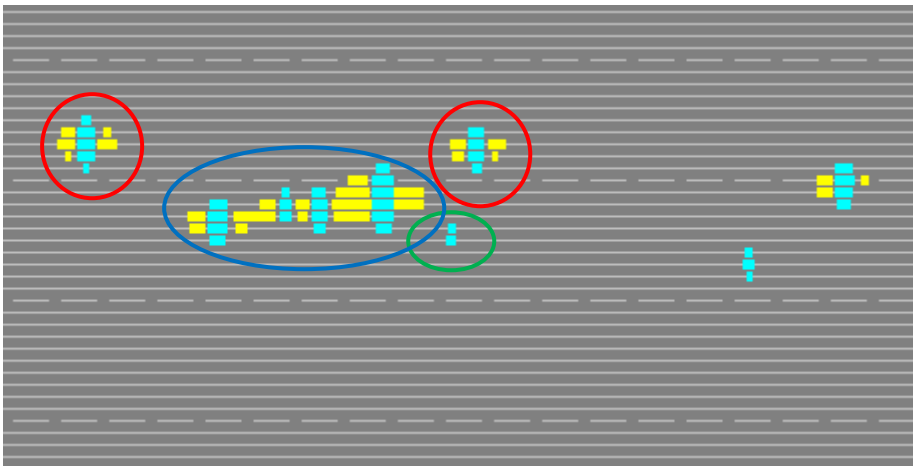
Dokonano analizy sygnału zmiany pola magnetycznego taśmy pracującej jednej z kopalń podziemnych. Porównano dwa obrazy sygnałów w tych samych miejscach. Pierwszy pochodzi z marca 2016 roku, natomiast drugi z września 2016 roku. Oba zostały wykonane

przy czułości 400 mV. Wybrano trzy strefy taśm, na których doszło do powstania nowych uszkodzeń, bądź powiększenia strefy uszkodzonej.

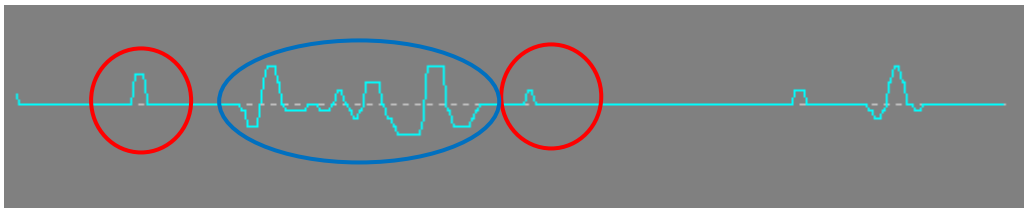
Pierwszy odcinek:



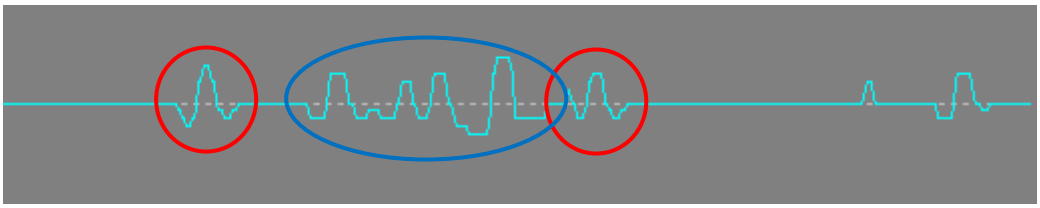
Rys. 83. Pomiar z kopalni Polkowice - Sieroszowice, marzec 2016



Rys. 84. Pomiar z kopalni Polkowice - Sieroszowice, wrzesień 2016

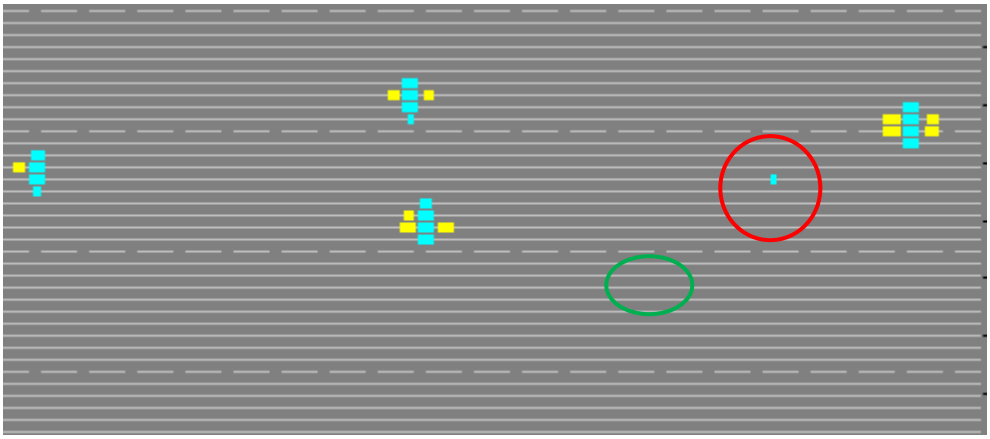


Rys. 85. Zmiana pola magnetycznego, marzec 2016

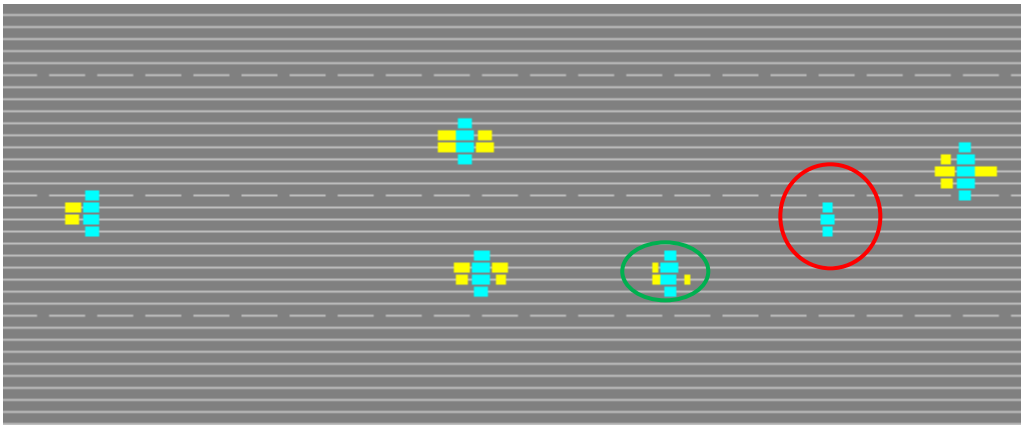


Rys. 86. Zmiana pola magnetycznego, wrzesień 2016

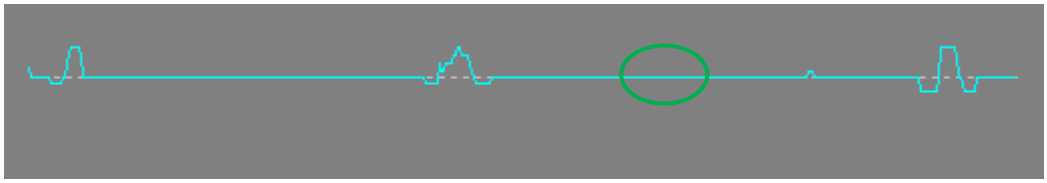
Drugi odcinek:



Rys. 87. Pomiar z kopalni Polkowice - Sieroszowice, marzec 2016



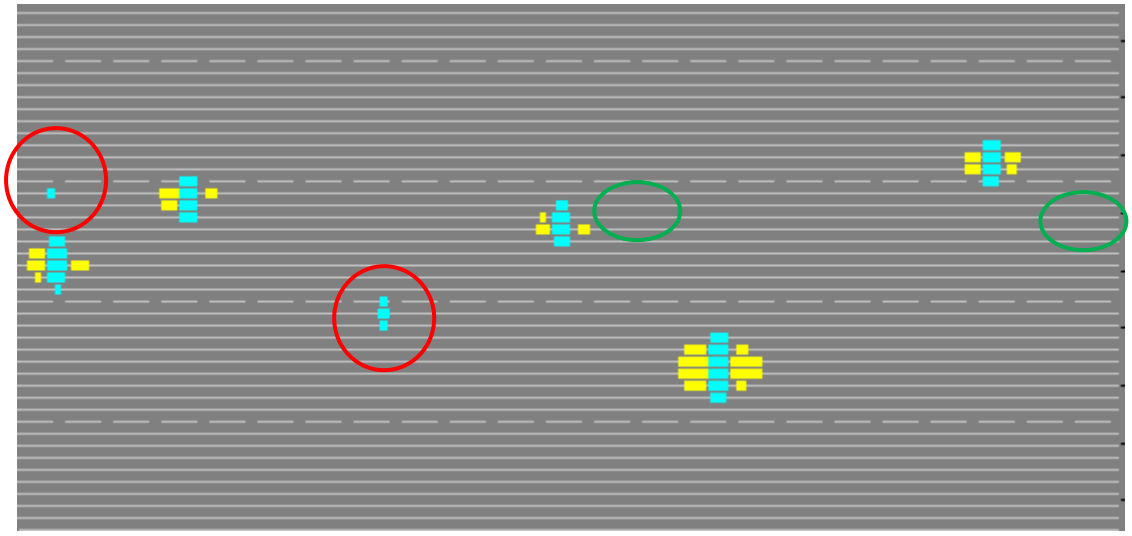
Rys. 88. Pomiar z kopalni Polkowice - Sieroszowice, wrzesień 2016



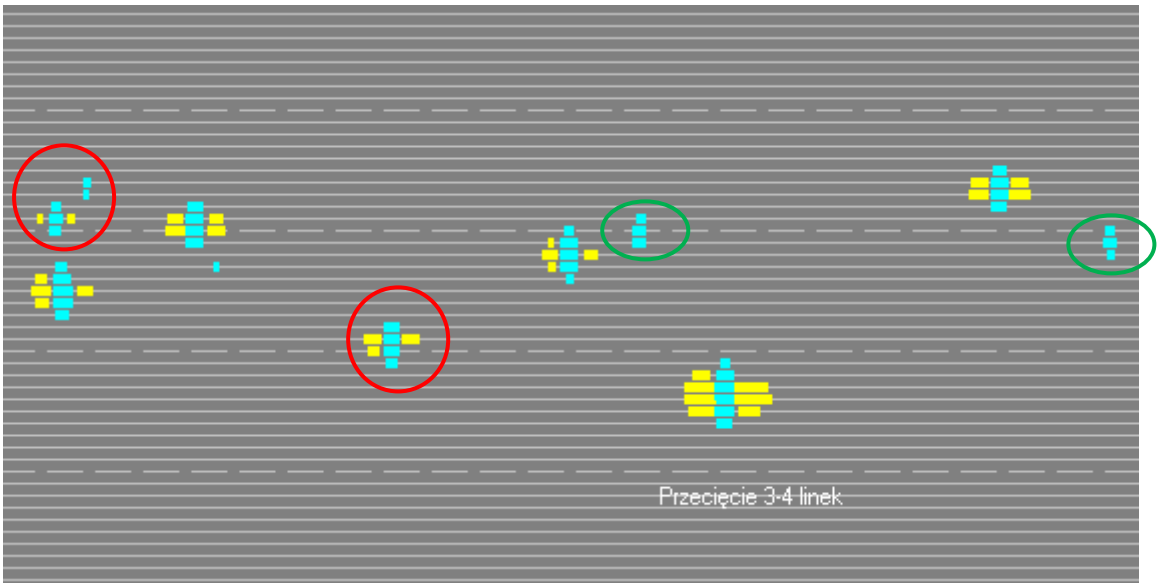
Rys. 89. Zmiana pola magnetycznego, marzec 2016

Rys. 90. Zmiana pola magnetycznego, wrzesień 2016

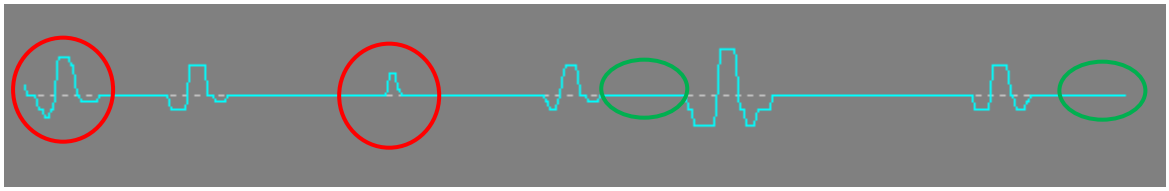
Trzeci odcinek:



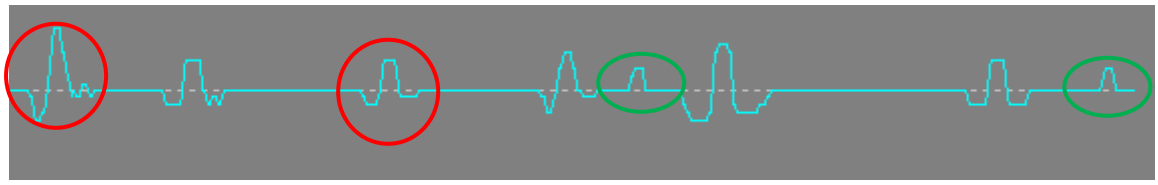
Rys. 91. Pomiar z kopalni Polkowice - Sieroszowice, marzec 2016



Rys. 92. Pomiar z kopalni Polkowice - Sieroszowice, wrzesień 2016



Rys. 93. Zmiana pola magnetycznego, marzec 2016



Rys. 94. Zmiana pola magnetycznego, marzec 2016

Na obrazach sygnałów (rys. 83, rys. 84, rys. 85, rys. 86, rys. 87, rys. 88, rys. 89, rys. 90, rys. 91, rys. 92, rys. 93, rys. 94) zaznaczono czerwonymi okręgami miejsca, gdzie system wykrywał uszkodzenie (sygnał jednobiegunowy) w marcu, a we wrześniu w tych miejscach sygnał miał charakter dwubiegunowy. Można przypuścić, że te miejsca w marcu były już skorodowane lub uszkodzone a po półrocznym użytkowaniu rdzeń uległ dalszemu uszkodzeniu co spowodowało odsunięcie od siebie linek. Zielonymi okręgami oznaczono miejsca, gdzie w marcu system nie wykrywał uszkodzenia, natomiast we wrześniu te uszkodzenia się pojawiły na obrazie sygnału. Na podstawie rys. 87 i rys. 88 można stwierdzić, że w miejscu oznaczonym zielonym okręgiem doszło do natychmiastowego uszkodzenia linki i odsunięcia jej końców od siebie prawdopodobnie z powodu spadającego urobku. Uszkodzenie te na sygnale zmiany pola magnetycznego przypomina uszkodzenia wywołane poprzez celowe przecięcie całych linek, które zostały ukazane w rozdziale 6. W marcu w oznaczonym miejscu na rys. 87 system nie wykrywał uszkodzenia, jednak we wrześniu uszkodzenie zostało wykryte a sygnał miał charakter dwubiegunowy (rys. 88). Na rys. 83 i 84 niebieskim okręgiem oznaczono miejsce, gdzie jest skupisko uszkodzeń. Prawdopodobnie w tym miejscu doszło do uszkodzenia linek a następnie do rozwoju korozji. Świadczy o tym powiększenie się powierzchni sygnału dwubiegunowego na przestrzeni 6 miesięcy użytkowania oraz stopniowe osiąganie maksimum i minimum w sygnale zmiany pola magnetycznego. Podsumowując, jeżeli w obrazie sygnału zmiany pola magnetycznego pojawi się pozytywny sygnał to bardzo prawdopodobne, że w tym miejscu zaczyna się rozprzestrzeniać korozja. Korozja w rdzeniach ST w początkowym stadium objawia się w sygnale zmiany pola magnetycznego jak uszkodzenie linki bez przesunięcia jej końców, jednak w przypadku jej postępu sygnał zaczyna mieć charakter dwubiegunowy w zależności od czułości pomiaru. Wówczas dochodzi do stopniowego odsuwania się obu końców linki. W przypadku, gdy dojdzie do natychmiastowego uszkodzenia linki wraz odsunięciem jej końców od siebie to zmiana pola magnetycznego będzie miała charakter dwubiegunowy.

10.Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań na stanowisku testowym wyciągnięto następujące wnioski:

1. Z przeprowadzonych badań i analizy można jednoznacznie stwierdzić, że uszkodzenia korozyjne są wykrywalne na obrazie sygnału zmiany pola magnetycznego.
2. W ciągu ośmiomiesięcznych badań z wykorzystaniem roztworów przyspieszających proces korozji doszło do ubytku ponad 20% stali w przekroju poprzecznym linki.
3. Korozja linki ST w obrazie sygnału zmiany pola magnetycznego w programie Belt Analysis wygląda jak uszkodzenie linki bez przemieszczenia jej końców, ponieważ powstaje głównie sygnał pozytywny. Proces korozji uszkadza i przerywa każdy drut linki z osobna bez przemieszczania całej linki. Gdy linka będzie ulegała dalszej korozji istnieje prawdopodobieństwa odsunięcia się od siebie obu końców i ukazania się dwubiegunowego sygnału w obrazie sygnału zmiany pola magnetycznego.
4. Przy wysokiej czułości zmiana pola magnetycznego w miejscu korozji rdzenia sygnał osiąga minimum i maksimum stopniowo. W przypadku przecięcia sygnał natychmiastowo osiąga maksimum i minimum.
5. Na podstawie obrazu sygnału zmiany pola magnetycznego pochodzącego z warunków eksploatacyjnych z jednej kopalń podziemnych stwierdzono, że w miejscach

wystąpienia pozytywnego sygnału może rozprzestrzeniać się korozją. Te miejsca powinny być poddane szczególnej obserwacji. W przypadku, gdy system wykryje sygnał dwubiegunowy w miejscu, gdzie wcześniej nie było żadnej zmiany pola magnetycznego to bardzo prawdopodobne, że doszło do natychmiastowego uszkodzenia rdzenia.

6. Najbardziej narażone na proces korozji są taśmy wykorzystywane do transportu urobku, w którym znajdują się chlorki (sól) lub minerały miedzi, które w połączeniu z wodą tworzą elektrolity, które w kontakcie ze linkami ST przyspieszają proces korozji.
7. Rdzenie taśm ST pracujących w wysokich temperaturach są bardziej narażone na korozję, aniżeli taśmy pracujące w chłodnych warunkach.
8. Dla uzyskania miarodajnych wyników badania powinny być przeprowadzone na szerszej populacji próbek w dłuższym okresie czasu w celu skuteczniejszego określenia skorodowanego rdzenia w warunkach eksploatacyjnych z wykorzystaniem inteligentnego systemu diagnostycznego.

11. Spis rysunków

Rys. 1. Schemat konstrukcji przenośnika taśmowego; 1 - taśma, 2 – bęben zrzutowy, 3 – bęben zwrotny, 4 – zestaw krążników, 5 – mechanizm napinania, 6 – kosz zasypowy, 7 – urządzenia czyszczące [7] 5
Rys. 2. Konstrukcja taśmy przenośnikowej; 1 – okładka nośna, 2 – rdzeń taśmy, 3 – okładka bieżna, 4 - obrzeże 6
Rys. 3. Taśma tekstylna wieloprzekładkowa 6
Rys. 4. Grubość taśmy aramidowej i z linkami ST [5] 7
Rys. 5. Konstrukcja taśmy z linkami ST 8
Rys. 6. Udział uszkodzeń punktowych i liniowych w procesie zużycia taśmy przenośnikowej [6] 9
Rys. 7. Starzenie się okładki [13] 10
Rys. 8. Przebicie taśmy przenośnikowej [13] 10
Rys. 9. Odspojenie linek od gumy [13] 10
Rys. 10. Przecięta taśma przenośnikowa [13] 10
Rys. 11. Odsłonięta linka ST [13] 10
Rys. 12. Wyrwane obrzeże taśmy [13] 11
Rys. 13. Kształt połączenia taśm z linkami ST [11] 12
Rys. 14. Tempo rozprzestrzeniania się korozji w zależności od stężenia tlenu [12] 14
Rys. 15. Tempo rozprzestrzeniania się korozji w zależności od stężenia soli [12] 14
Rys. 16. Tempo rozprzestrzeniania się korozji w zależności od kwasowości środowiska [12] 15
Rys. 17. Tempo rozprzestrzeniania się korozji w zależności od temperatury [12] 15
Rys. 18. Modułowa struktura systemu Diagbelt. 16
Rys. 19. Kamera liniowa do rejestracji obrazu na stanowisku pracy [14] 16
Rys. 20. Charakterystyka sygnału w zależności od uszkodzenia 17
Rys. 21. Urządzenia modułu magnetycznego [14] 18
Rys. 22. Konstrukcja układu pomiarowego; 1 - cięgno górne, 2 - cięgno dolne; 3 - konstrukcja trasy przenośnika, 4 - głowice magnesujące, 5,7 - uchwyty; 6 - głowica pomiarowa [9] 18
Rys. 23. Prawidłowo zamontowane elementy systemu Diagbelt [14] 19
Rys. 24. Okno analizujące prędkość taśmy oraz przebyty dystans 19

Rys. 25. Tachometr oraz magnes [9[... 19
Rys. 26. Schemat budowy systemu pomiarowego BeltGuard ... 20
Rys. 27. Propozycja inwentaryzacji stanu technicznego odcinków taśmy przenośnikowej ... 20
Rys. 28. Krzywa gęstości uszkodzeń ... 21
Rys. 29. Stan zarejestrowanego odcinka taśmy [14] ... 22
Rys. 30. Schemat stanowiska badawczego [9] ... 23
Rys. 31. Stanowisko pomiarowe [9] ... 23
Rys. 32. Uszkodzenia linek oraz zmiana pola magnetycznego nimi wywołana ... 24
Rys. 33. Sygnał zmiany pola magnetycznego w strefie naprawionej taśmy oraz w strefie połączenia dwustopniowego ... 24
Rys. 34. Identyfikacja uszkodzeń na nienamagnesowanej taśmie, ustawienia: odległość 20 mm, prędkość 2 m/s, czułość 500 mV [9] ... 25
Rys. 35. Sygnał zmiany pola magnetycznego wraz z nałożonym filtrem ... 26
Rys. 36. Częściowe uszkodzenie jednej linki rdzenia (20% ubytku przekroju poprzecznego linki) [4] ... 26
Rys. 37. Częściowe uszkodzenie jednej linki rdzenia (50% ubytku przekroju poprzecznego linki) [4] ... 27
Rys. 38. Przecięcie jednej linki [4] ... 27
Rys. 39. Przecięcie trzech linek w kierunku poprzecznym [4] ... 27
Rys. 40. Przecięcie sześciu linek w kierunku poprzecznym [4] ... 28
Rys. 41. Usunięcie linki na odległości 20 mm [4] ... 28
Rys. 42. Usunięcie linki na odległości 100 mm [4] ... 28
Rys. 43. Usunięcie trzech linek na odległości 100 mm [4] ... 29
Rys. 44. Schemat wykonanego połączenia [4] ... 29
Rys. 45. Schemat rozmieszczeń wykonanych uszkodzeń [4] ... 30
Rys. 46. Sygnał magnetyczny jednej pętli taśmy ... 30
Rys. 47. Długość odsłoniętej linki ... 31
Rys. 48. Miejsce odsłonięcia linki ... 31
Rys. 49. Jedna pętla taśmy wraz z zaznaczoną osią symetrii oraz granicami taśmy ... 32
Rys. 50. Miejsce, gdzie system powinien wykryć skorodowaną linkę ... 32
Rys. 51. Po wyszczotkowaniu ... 35
Rys. 52. Przed wyszczotkowaniem ... 35
Rys. 53. Pomiar 1, czułość 50 mV ... 35
Rys. 54. Zdjęcie uszkodzenia po pierwszym pomiarze ... 36
Rys. 55. Pomiar 2, czułość 100 mV ... 36
Rys. 56. Pomiar drugi ... 37
Rys. 57. Pomiar 3 czułość 100 mV ... 37
Rys. 58. Trzeci pomiar ... 38
Rys. 59. Pomiar 4, czułość 170 mV ... 38
Rys. 60. Czwarty pomiar ... 39
Rys. 61. Sygnał piątego pomiaru czułość 170 mV ... 39
Rys. 62. Piąty pomiar ... 40
Rys. 63. Wzrost siły sygnału w funkcji czasu ... 42
Rys. 64. Średnia długość sygnału w zależności od czułości pomiaru dla trzeciego pomiaru ... 43
Rys. 65. Średnia długość sygnału w zależności od czułości pomiaru dla czwartego pomiaru 43
Rys. 66. Średnia długość sygnału w zależności od czułości pomiaru dla piątego pomiaru ... 44

Rys. 67. Średnia powierzchnia sygnału pozytywnego w zależności od czułości pomiaru dla trzeciego pomiaru 44
Rys. 68. Średnia powierzchnia sygnału pozytywnego w zależności od czułości pomiaru dla czwartego pomiaru 45
Rys. 69. Średnia powierzchnia sygnału pozytywnego w zależności od czułości pomiaru dla piątego pomiaru 45
Rys. 70. Teslomierz HGS – 10A [9] 46
Rys. 71. Kierunek przepływania elektronów pomiędzy dwoma biegunami 46
Rys. 72. Miejsca, gdzie mierzono pole magnetyczne 47
Rys. 73. Sygnał z piątego pomiaru, czułość 300 mV 48
Rys. 74. Piąty pomiar, czułości 550 mV po szczotkowaniu 49
Rys. 75. Piąty pomiar, czułość 400 mV po szczotkowaniu 49
Rys. 76. Pomiar piąty, czułość 140 mV. 50
Rys. 77. Piąty pomiar, czułość 250 mV 50
Rys. 78. Piąty pomiar, czułość 400 mV 50
Rys. 79. Piąty pomiar, czułość 200 mV 51
Rys. 80. Piąty pomiar, czułość 400 mV 51
Rys. 81. Piąty pomiar, czułość 150 mV 51
Rys. 82. Piąty pomiar, czułość 500 mV 51
Rys. 83. Pomiar z kopalni Polkowice - Sieroszowice, marzec 2016 52
Rys. 84. Pomiar z kopalni Polkowice - Sieroszowice, wrzesień 2016 52
Rys. 85. Zmiana pola magnetycznego, marzec 2016 52
Rys. 86. Zmiana pola magnetycznego, wrzesień 2016 52
Rys. 87. Pomiar z kopalni Polkowice - Sieroszowice, marzec 2016 53
Rys. 88. Pomiar z kopalni Polkowice - Sieroszowice, wrzesień 2016 53
Rys. 89. Zmiana pola magnetycznego, marzec 2016 53
Rys. 90. Zmiana pola magnetycznego, wrzesień 2016 53
Rys. 91. Pomiar z kopalni Polkowice - Sieroszowice, marzec 2016 54
Rys. 92. Pomiar z kopalni Polkowice - Sieroszowice, wrzesień 2016 54
Rys. 93. Zmiana pola magnetycznego, marzec 2016 54
Rys. 94. Zmiana pola magnetycznego, marzec 2016 54

12. Spis tabel

Tabela 1. Najczęściej występujące przyczyny zużycia taśmy przenośnikowej [6] 8
Tabela 2. Oddziaływanie wody i wilgoci na rdzeń ST [6] 12
Tabela 3. Oddziaływanie roztworów chemicznych i temperatury na rdzeń ST [6] 12
Tabela 4. Obliczone stężenie procentowe roztworu siarczanu miedzi 34
Tabela 5. Daty pomiarów 34
Tabela 6. Wyniki badań 41
Tabela 7. Rozkład pola magnetycznego na odsłoniętej lince 47

13. Bibliografia

[1] Antoniak J.: Przenośniki taśmowe w górnictwie podziemnym i odkrywkowym, Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2010;

[2] Błażej R., Chęciński S., Jurdziak L., Witt A., ABCDE diagnozy taśm, Surowce i maszyny budowlane, 2014, nr 4-5, s. 26-29;

[3] Błażej R., Hardygóra M., Jurdziak L., Zimroz R., Kawalec W., Inteligentny system diagnostyki taśm przenośnikowych – budowa i działanie, XXIII Międzynarodowe Sympozjum Wisła, 2015, s. 53-69;

[4] Domański A., Wykorzystanie urządzeń diagnostycznych (NDT) do kontroli i oceny, jakości wykonywanych napraw i połączeń taśm przenośnikowych (na przykładzie PGE G I EK oddział KWB Turów), Politechnika Wrocławska;

[5] Gancarek D.: Badania taśmy aramidowej pod kątem oceny jej odporności na uszkodzenia eksploatacyjne, Wrocław, Politechnika Wrocławska, 2015, praca inżynierska (niepublikowana);

[6] Hardygóra M.,: Żur T., Przenośniki taśmowe w górnictwie, Katowice, „Śląsk" Sp. z o.o., 1996;

[7] Hardygóra M., i inni: Taśmy przenośnikowe, Warszawa, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1999;

[8] Instrukcja stosowania systemu Belt Guard;

[9] Kochański M., Identyfikacja początku pętli taśmy na potrzeby magnetycznego systemu diagnostyki rdzenia taśm, Wrocław, Politechnika Wrocławska;

[10] Kozłowski T., Ocena stanu technicznego połączeń taśm przenośnikowych z linkami stalowymi na podstawie analizy sygnałów magnetycznych, Wrocław, Politechnika Wrocławska, 2016 r.

[11] Maluch T., Opracowanie metody ciągłej analizy stanu technicznego taśm przenośnikowych z linkami stalowymi, Kraków, Akademia Górniczo – Hutnicza, 2011

[12] Strona internetowa: http://biomist.pl/chemia/korozja-metali-i-ochrona-przed-nia-cz-i-2/3786;

[13] Strona internetowa: http://www.conveyorbeltguide.com/ (online:13.06.2017);

[14] Strona internetowa: http://diagbelt.pwr.edu.pl/index.php/pl/ (online: 13.06.2017);

[15] Strona internetowa: http://galwanizernie.pl/procesy-galwaniczne/trawienie-metali/ (online: 13.06.2017)

[16] Surowska B., Wybrane zagadnienia z korozji i ochrony przed korozją, Lublin, Politechnika Lubelska, 2002;