

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

WYDZIAŁ MECHANICZNY TECHNOLOGICZNY



PRACA DOKTORSKA

mgr inż. Wojciech Gamon

*WYBÓR I ZASTOSOWANIE NOWEJ METODY
ZWIĘKSZAJĄCEJ TRWAŁOŚĆ TARCZ ZDERZAKÓW
KOLEJOWYCH*

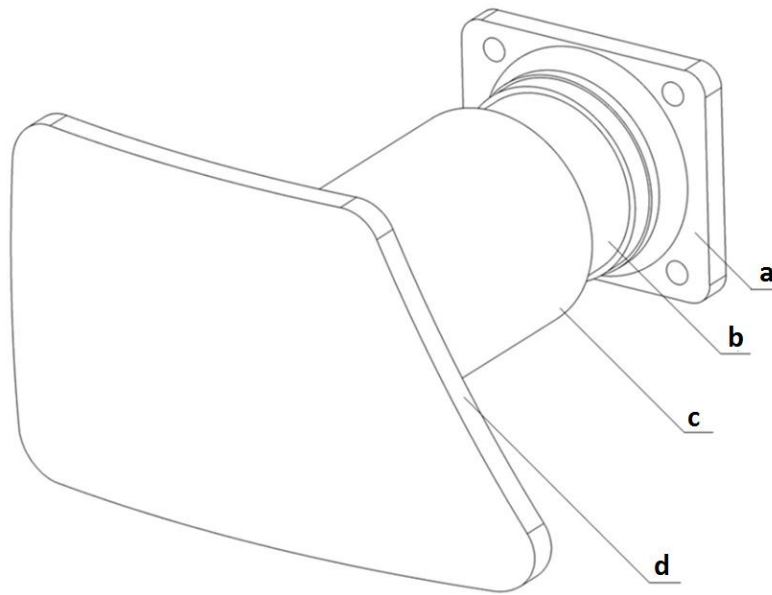
Promotor: Prof. dr hab. inż. Marek Sitarz

Spis treści

1. WSTĘP	3
1.1 Charakterystyka i podział zderzaków kolejowych	5
1.2 Tarcze zderzakowe.....	24
2. ZUŻYCIE ORAZ TRWAŁOŚĆ TARCZ ZDERZAKÓW KOLEJOWYCH	31
3. CEL I TEZA PRACY	36
4. BADANIA WSTĘPNE	38
5. DOBÓR MATERIAŁU NA POWŁOKĘ TARCZY ZDERZAKOWEJ ORAZ SPOSOBU JEJ NAKŁADANIA.....	45
6. BADANIA METALOGRAFICZNE POWŁOKI	51
6.1 Metodyka badań metalograficznych	51
6.2 Wyniki badań metalograficznych oraz ich analiza	52
6.3 Badanie twardości.....	64
7. BADANIA STANOWISKOWE ZUŻYCIA ŚCIERNEGO PRÓBEK	69
7.1 Metodyka badań.....	69
7.2 Badania wytrzymałościowe z wykorzystaniem MES	73
7.3 Pomiar temperatury.....	79
7.4 Wyniki badań zużycia ściernego	80
7.5 Analiza zużycia powierzchni próbek	92
8. BADANIA EKSPLOATACYJNE.....	95
8.1 Wybór i przygotowanie obiektów do badań	95
8.2 Metodyka oraz przebieg badań	96
8.3 Wyniki pomiarów	98
9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE	103
10. LITERATURA	106

1. WSTĘP

Zderzaki kolejowe są elementami pozostającymi w kontakcie pomiędzy dwoma pojazdami szynowymi, mającymi wpływ na dynamikę ich jazdy, niebędącymi jednocześnie elementami sprzęgającymi pojazdy. Ich konstrukcje, niezależnie od rodzaju transportu szynowego, w którym są wykorzystywane (transport pasażerski, towarowy) są do siebie bardzo podobne i składają się z tych samych elementów [35]. Są to odpowiednio: płyta zderzakowa (Rys. 1a), służąca do zamocowania zderzaka do czołownicy pojazdu szynowego, w której znajdują się otwory o ściśle określonej średnicy i usytuowaniu [30], [52]–[54], tuleja zderzakowa (Rys. 1b) o cylindrycznym kształcie, współosiowo ułożona z pochwą zderzakową (Rys. 1c) (przy czym rozróżnia się zarówno konstrukcje, w których tuleja połączona jest z płytą jak i zderzaki, w których pochwa łączy się z płytą) oraz tarcza zderzakowa (Rys. 1d), która jest elementem współpracującym z sąsiednim zderzakiem.



Rys. 1 Zderzak kolejowy (a-płyta, b-tuleja, c-pochwa, d-tarcza)

Wewnątrz tulei zderzakowej (lub pochwy – zależnie od konstrukcji) znajduje się element odpowiedzialny za tłumienie energii powstającej wskutek działania siły ściskającej na zderzak. W starszych konstrukcjach zderzaków były to sprężyny ślimakowe. W nieco nowszych rozwiązaniach stosowano sprężyny pierścieniowe (w systemie Uerdingena) pozwalające na wytłumienie energii o znacznie większej wartości. W obecnie stosowanych zderzakach za absorpcję energii odpowiadają często elementy gumowe lub wykonane

z elastomerów (zarówno w formie stałej jak i płynnej), które pozwalają na wytłumienie energii o bardzo dużej wartości (ok. 70 kJ), będące jednocześnie jednymi z najdroższych typów amortyzatorów stosowanych w urządzeniach zderzakowych [36], [103]. W niektórych konstrukcjach zderzaków, szczególnie w pojazdach wykorzystywanych do transportu materiałów niebezpiecznych, stosowane są również dodatkowe elementy, które pozwalają na rozproszenie dodatkowej ilości energii wskutek plastycznego odkształcenia zderzaka lub jego elementów [74], [76], [98]–[100]. Zderzaki, poprzez tarcze zderzakowe o ściśle określonych wymiarach zgodnie z wymogami normatywnymi [30], [52]–[54], przekazują siły działające na pojazdy podczas eksploatacji. W zdecydowanej większości są to siły wzdłużne, powstające w wyniku nabiegania na siebie wagonów podczas jazdy oraz hamowania, a także siły poziome i pionowe, działające na tarcze w wyniku pokonywania przez pojazdy łuków [37], [50], [61], [64], [95], [103]. W efekcie ruchów tarcz zderzakowych wynikających z dynamiki jazdy oraz nierówności toru, tarcze zderzakowe podlegają nieustannemu zużyciu wskutek wzajemnego tarcia o siebie. Zużycie to prowadzi do stopniowego zaniku normatywnej krzywizny (wypukłości) tarczy (o promieniu 2750 mm i 1500 mm zależnie od skoku zderzaka), wskutek czego ulega ona spłaszczeniu Rys. 2, co z czasem może spowodować wystąpienie negatywnych konsekwencji dla bezpieczeństwa współpracy dwóch tarcz, zwłaszcza w przypadku pokonywania łuków o niewielkim promieniu.



Rys. 2 Spłaszczenie tarczy zderzakowej wskutek zużycia ściernego

W celu przeciwdziałania temu zjawisku stosuje się rozwiązanie polegające na okresowym nakładaniu środka smarnego (smar grafitowany) na współpracującą powierzchnię tarczy zderzakowej [25], [26], [47], [114]. Rozwiązanie to posiada jednak wiele wad, wśród których najważniejsze to: konieczność przeprowadzania okresowej obsługi obejmującej smarowanie trących elementów oraz niebezpieczeństwo dla pracowników wynikające z tego typu działań, negatywny wpływ na środowisko naturalne, możliwość przedostania się środka smarnego na główki szyn lub na elementy cierne układów hamulcowych. W wyniku zużycia ściernego tarczy zderzakowej, po osiągnięciu przez nią granicznego spłaszczenia [25], [26] tarczę należy wymienić na nową lub zregenerować poprzez napawanie, które jest procesem kosztownym i długotrwałym ze względu na ilość materiału, który należy uzupełnić oraz obróbkę, którą należy wykonać [72], [77]. W związku z powyższym, przewoźnicy kolejowi eksploatujący wagony kolejowe oraz lokomotywy wyposażone w tradycyjne zderzaki poszukują nowych rozwiązań, mogących ograniczyć zużycie ściernego tarczy, wydłużając tym samym czas jej bezobsługowej eksploatacji.

1.1 Charakterystyka i podział zderzaków kolejowych

Zderzaki kolejowe (Rys. 3) stosowane w pojazdach szynowych pozbawionych sprzęgu samoczynnego umożliwiającego rozpraszanie energii są jednym z podstawowych elementów wpływających na dynamikę i bezpieczeństwo poruszającego się składu [35], [37], [103]. Tarcze zderzakowe, pozostające ze sobą w kontakcie w sąsiednich pojazdach, przekazują wzdłużne, pionowe i poprzeczne siły działające na poruszający się skład, powstające wskutek poruszania się wagonów i lokomotyw (hamowanie i nabieganie na siebie pojazdów) [78], [96] oraz wywołane geometrią toru (łuki, wychłapy itp.).



Rys. 3 Zderzak kolejowy

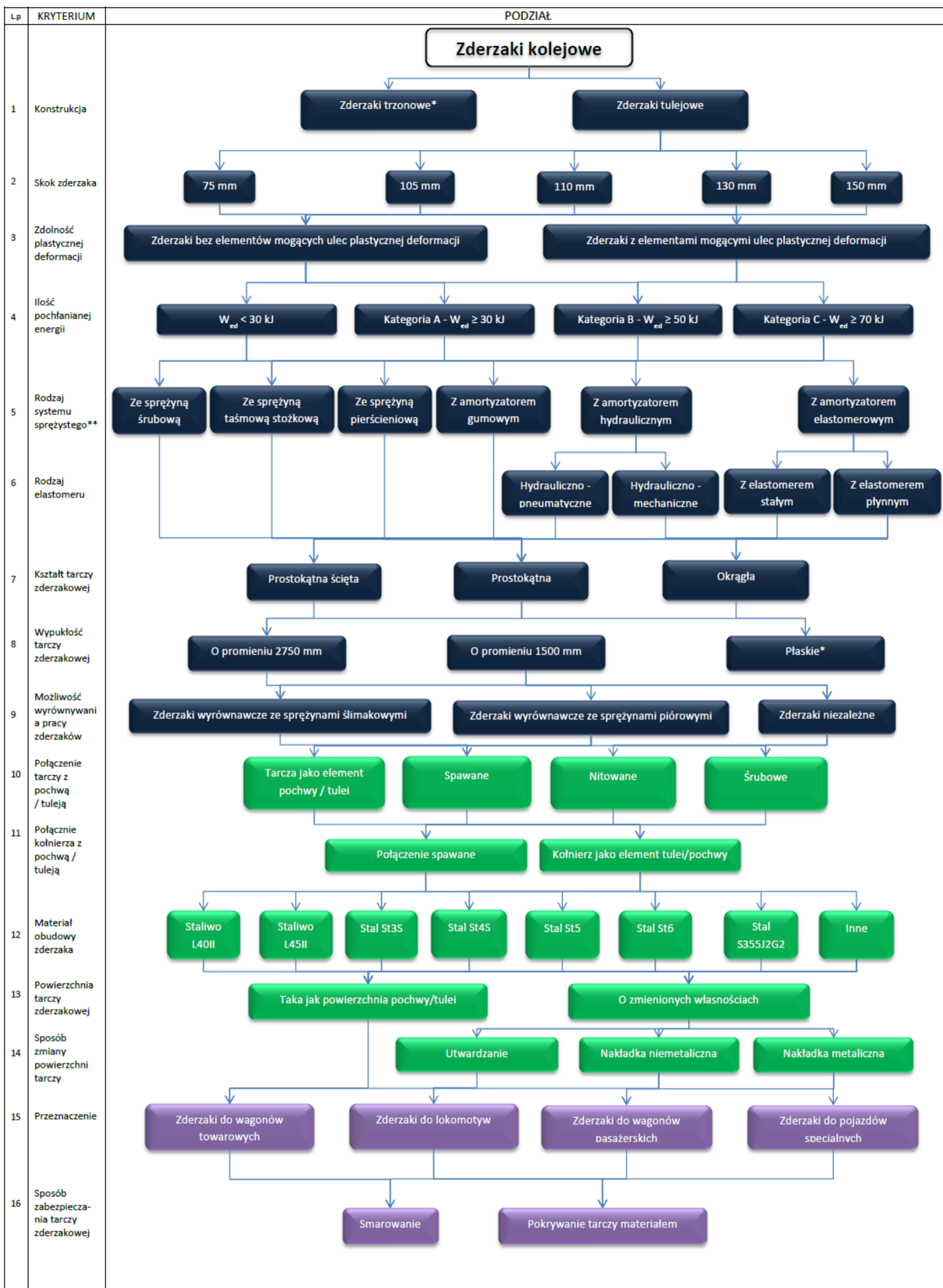
Ze względu na konstrukcję zderzaków i występowanie w nich elementów, mających za zadanie tłumienie powstających wskutek ruchu pojazdów energii, zapewniają one spokojny bieg składu, łagodne pokonywanie łuków oraz niwelują dynamiczne wymuszenia podczas hamowania. Dzięki takiemu rozwiązaniu możliwe jest zwiększenie bezpieczeństwa przewożonych ludzi i towarów oraz konstrukcji pojazdów, a w przypadku pojazdów przystosowanych do ruchu pasażerskiego umożliwiają one znaczną poprawę komfortu jazdy, ze względu na brak szarpnięć oraz zderzeń wagonów podczas ich rozpędzania lub hamowania.

Pomimo szeregu rozwiązań opracowanych na przestrzeni lat, zasadnicza konstrukcja zderzaka kolejowego pozostaje w zasadzie niezmienna. Niemal każdy eksploatowany obecnie zderzak kolejowy składa się z 5 podstawowych elementów. Są to:

- płyta zderzakowa;
- pochwa zderzakowa;
- tuleja zderzakowa;
- tarcza zderzakowa;
- element amortyzujący.

Niezależnie od rodzaju konstrukcji, materiałów użytych do wytworzenia zderzaka czy jego przeznaczenia, cztery elementy zderzaków (tarcza, tuleja, pochwa i płyta) pozostają w zasadzie niezmiennie. Największe różnice w konstrukcjach zderzaków zaobserwować można w części amortyzującej, której zadaniem jest tłumienie energii powstającej wskutek poruszania się pojazdów. Poszczególne konstrukcje zderzaków, ze względu na sposób pochłaniania przez nie energii (sprężyny konwencjonalne, hydrauliczne, elastomerowe itd.) omówione zostaną w dalszej części pracy. Po analizie literaturowej dotyczącej zderzaków kolejowych, wyciągnąć można wniosek, że w pracy [103] autorzy zaproponowali podział zderzaków kolejowych obejmujący bardzo dużą liczbę kryteriów. Podział ten, w postaci schematu blokowego, przedstawiono na Rys. 4.

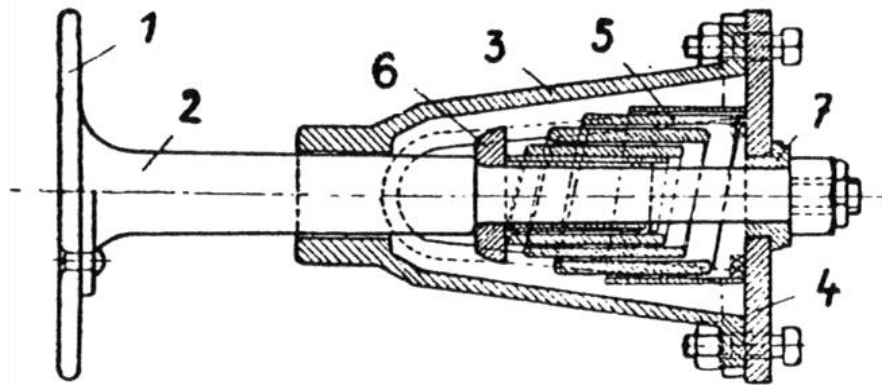
Pierwszymi zderzakami eksploatowanymi na świecie i w Polsce przed II wojną światową, były zderzaki trzonowe, zwane również koszowymi [36], [95]. Konstrukcja tego typu zderzaka przedstawiona została na Rys. 5.



*Obecnie praktycznie niespotykane
 ** W zderzakach kolejowych często stosuje się kilka rodzajów systemów sprężystych, w związku z czym charakterystyka zderzaka stanowi składową charakterystykę poszczególnych systemów

Dotyczy konstrukcji
 Dotyczy wytwarzania
 Dotyczy eksploatacji

Rys. 4 Podział zderzaków kolejowych [103]

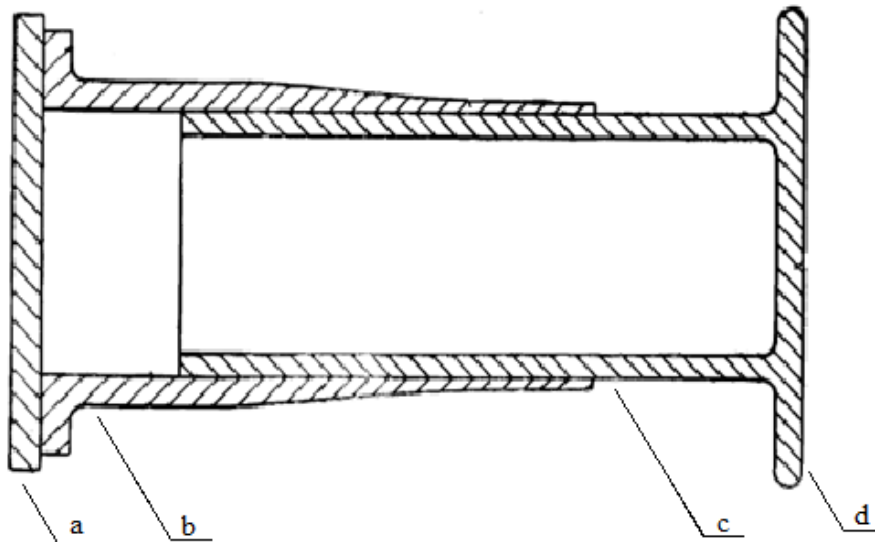


Rys. 5 Zderzak trzonowy [95]

(1-tarcza, 2-trzon, 3-pochwa, 4-podkładka, 5-sprężyna, 6-krążek nadsprężynowy, 7-tuleja prowadna)

Zderzak taki składał się z wypukłej lub płaskiej tarczy (1) przymocowanej do trzonu zderzakowego [2] zazwyczaj poprzez przynitowanie, którego drugi koniec nagwintowywano w celu zabezpieczenia przed wypadaniem i możliwości regulacji wstępnego napięcia sprężyny. Koniec ten przechodził przez czołownicę pojazdu, na której zderzak był zamontowany. Pochwa zderzakowa (3) posiadała konstrukcję otwartą (posiadającą w zależności od wariantu dwie lub cztery łapy), która umożliwiała rewizję elementu sprężystego bez konieczności demontażu jakiegokolwiek elementu. Pochwa przymocowana była do czołownicy pojazdu z wykorzystaniem podkładki zderzakowej (4). Elementem amortyzującym w tego typu zderzakach była najczęściej sprężyna taśmowa stożkowa (5) umiejscowiona pomiędzy podkładką (4) a krążkiem nadsprężynowym (6). Sprężyna taka wykonywana była ze zwiniętego na gorąco płaskownika, w którym pozostawiano niewielkie luzy pomiędzy poszczególnymi zwojami. Konstrukcja ta umożliwiała swobodną amortyzację w przypadku działania sił ściskających o niewielkich wartościach, pozwalając jednocześnie na wystąpienie tarcia pomiędzy zwojami w przypadku wystąpienia dużego nacisku, powodującego zwiększone ugięcie sprężyny. Siła tarcia, powstająca wskutek kontaktu zwojów, umożliwiała wytlumienie energii tym większej, im większemu ugięciu poddawana została sprężyna. Największą zaletą wynikającą z zastosowania tego typu systemu amortyzacji była jednocześnie jego największą wadą, ponieważ zderzaki ze sprężynami taśmowymi stożkowymi bardzo często ulegały zakleszczeniu, w przypadku zadziałania dużej siły, na przykład podczas zderzeń

w czasie rozrządów. Ostatnim elementem opisywanego zderzaka była tuleja prowadna (7) umiejscowiona w podkładce zderzakowej (4). Pomimo zalet tego typu konstrukcji, zwłaszcza jej prostoty i możliwości stwierdzenia uszkodzenia elementów zderzaka bez konieczności jego demontażu, obecnie praktycznie nie spotyka się zderzaków koszowych. Spowodowane jest to przede wszystkim trzonowym typem budowy zderzaka, który nierzadko nie wytrzymał gwałtownie działających sił o dużej wartości (np. podczas nabiegnięcia na siebie wagonów przy zerwaniu sprzęgu), powodujących wygięcie trzonu i jednocześnie uniemożliwienie jakiegokolwiek dalszej eksploatacji. W związku z powyższym zderzaki tego typu zostały zastąpione przez zderzaki o konstrukcji tulejowej (Rys. 6), które w użytkowaniu spotyka się do dzisiaj.



Rys. 6 Schematyczna budowa zderzaka tulejowego

Główną różnicą pomiędzy zderzakami o konstrukcji tulejowej a trzonowymi jest zastąpienie trzonu tuleją o znacznie większej wytrzymałości i odporności na wyboczenie. Konstrukcje tulejowe użytkowane są obecnie niemal na wszystkich kolejach świata. Posiadają one jednakową budowę zewnętrzną składającą się z płyty (a), pochwy (b), tulei (c) i tarczy (d). Na przestrzeni lat opracowano wiele różnych rodzajów elementów amortyzujących znajdujących się wewnątrz tulei (bądź pochwy, zależnie od konstrukcji) zdolnych rozpraszać duże ilości energii. Najczęściej spotykane systemy amortyzujące wykorzystywane w zderzakach kolejowych zostaną omówione w dalszej części opracowania. Aktualnie obowiązująca norma [30] oraz karty UIC [52]–[54] określają bardzo dokładnie własności

wytrzymałościowe, którymi powinny się charakteryzować elementy konstrukcyjne zderzaków kolejowych. W dokumentach tych nie określono materiałów, z których powinny być wykonane elementy pochwy i tulei oraz nie opisano zasad ich wytwarzania. W praktyce spotyka się tuleje i pochwy powstałe w procesie wyciskania na gorąco [14], [71], [101] bądź spawane zgodnie z normą [94]. Szczegółowo przedstawione zostały natomiast wymagania dotyczące maksymalnych sił, przyłożonych w różnych punktach zderzaka, które musi przenieść jego konstrukcja. Uznaje się, że zderzak pomyślnie przejdzie testy wytrzymałościowe, jeżeli po zaniku wszystkich sił wyszczególnionych w normie będzie dalej w stanie prawidłowo funkcjonować, a wymiary głównych jego elementów nie ulegną zmianie o więcej niż 0,2%. W normie przedstawiono tabele z wartościami konkretnych sił, rysunki obrazujące miejsce ich przyłożenia oraz zamieszczono aneks zawierający wytyczne dotyczące metod obciążania zderzaka dla poszczególnych sił. Zgodnie z powyższym, zderzak o skoku 105 mm i 150 mm musi być w stanie przenieść siłę o wartości większej lub równej 2,5 MN przyłożonej w środkowym punkcie jego tarczy [30], [35], [52]–[54]. W przypadku zderzaków o skoku 110 mm analogiczna siła charakteryzuje się wartością 1,25 MN, czyli wartością dwukrotnie mniejszą. Siły o mniejszej wartości, tj. 500 kN dla skoku 105 mm i 150 mm oraz 300 kN dla skoku 110 mm, zderzak musi być w stanie przenieść poprzez tarczę w punkcie usytuowanym na skraju tarczy zderzakowej. Należy mieć na uwadze, że siła ta nie działa wzdłuż prostej równoległej do osi zderzaka, a wzdłuż promienia krzywizny tarczy zderzakowej. Zderzak poddaje się również testom z siłami działającymi na jego pochwę i tuleję, sprawdzając czy elementy te są w stanie przenieść wymagane obciążenia [30], [35], [52]–[54].

Zewnętrzne siły, które musi przenieść konstrukcja zderzaka są tylko jednym z wielu wymogów zależnych od jego skoku, co czyni go najważniejszym kryterium podziału zderzaków kolejowych. Aktualnie w eksploatacji spotyka się przede wszystkim zderzaki o skoku (czyli o zakresie ruchu tulei względem pochwy w kierunku podłużnym) 105 mm, 110 mm oraz 150 mm. Rzadkość stanowią zderzaki o skoku 75 mm oraz 130 mm, niemniej dopuszczalne jest stosowanie ich na czołownicach pojazdów. Skok zderzaka determinowany jest przez rodzaj pojazdu, dla którego zderzak jest przeznaczony. Zderzaki o skoku 75 mm i 105 mm stosowane są w wagonach towarowych, przy czym konstrukcje o mniejszym skoku są bardzo rzadko spotykane ze względu na ich znacznie mniejszą zdolność do pochłaniania energii. Powszechnie stosowane były dawniej, gdy masy poruszających się składów i ich prędkości były mniejsze, co z kolei przekładało się na znacznie mniejszą

energię konieczną do wytlumienia. Zderzaki o skoku 110 mm najczęściej spotykane są w wagonach pasażerskich, natomiast zderzaki „długoskokowe” (130 mm i 150 mm) najczęściej użytkowane są na pojazdach przeznaczonych do przewozu materiałów niebezpiecznych. Wynika to z faktu, że zderzak o tak dużym skoku ma możliwość wytlumienia znacznie większej energii ze względu na dłuższą drogę poruszania się tulei wewnątrz pochwy. Zderzaki stosowane w wagonach do przewozu materiałów niebezpiecznych oraz w lokomotywach wyposażone są czasami w rozwiązania pozwalające na wytlumienie znacznie większych energii, niż pozwala na to zamontowany w nich element amortyzujący. Zderzaki takie wyposażone zostają w różnego rodzaju systemy bądź rozwiązania konstrukcyjne, umożliwiające plastyczną deformację ich elementów. W momencie wyczerpania nominalnego skoku zderzaka i zetknięcia się elementów pochwy i tulei, w przypadku dalszego działania siły ściskającej na zderzak, następuje deformacja elementów zderzaka, pozwalająca na pochłonięcie znacznych ilości energii. W praktyce spotyka się wiele rozwiązań umożliwiających tłumienie energii pochodzącej ze zderzeń pojazdów. Stosuje się dodatkowe segmenty energochłonne, umieszczone za czołownicą pojazdu, ulegające deformacji w skutek zderzenia [75], [76], [100] czy też elementy montowane na pochwie/tulei zderzakowej, pozwalające pochłonąć dodatkową energię w trakcie zderzenia wskutek deformacji [70], [108]. Przykład urządzenia zainstalowanego za czołownicą pojazdu, wymontowanego z pojazdu po zderzeniu przedstawiono na Rys. 7.



Rys. 7 Zdeformowany element konstrukcyjny pojazdu odpowiedzialny za pochłanianie energii zderzenia

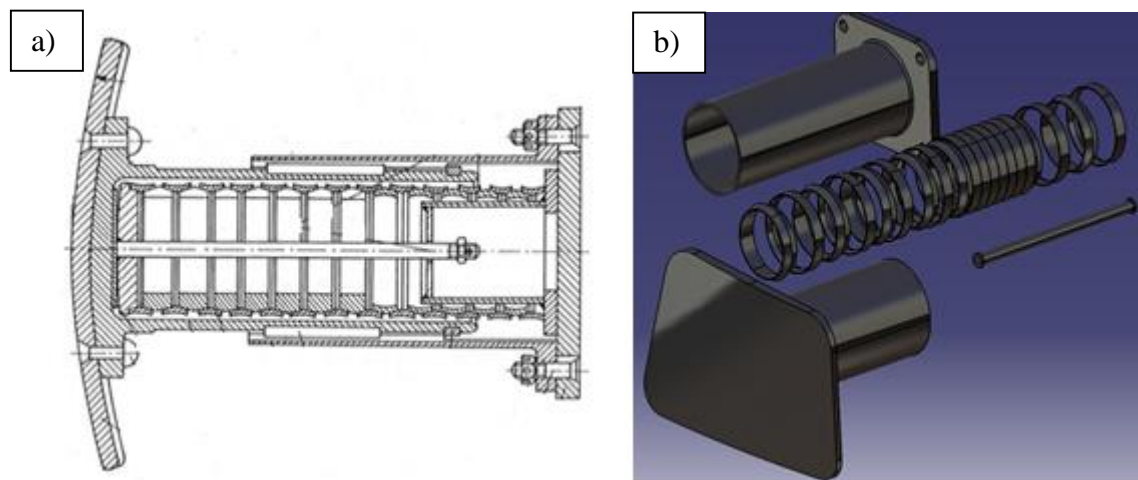
Oprócz rozwiązań polegających na dodawaniu elementów mogących rozproszyć nadmiar energii w skutek deformacji, występują również rozwiązania polegające na zmianie istniejących elementów zderzaka tak, aby mogły one zostać poddane skrawaniu wskutek zderzenia lub aby mogły zostać zdeformowane w sposób kontrolowany. Jedną z metod uzyskiwania kontrolowanej deformacji, jest odpowiednie nacięcie pochwy i tulei zderzaka, w taki sposób, aby w wyniku zderzenia pęknięcie propagowało wzdłuż wyznaczonych kierunków [82]. W projektowaniu elementów i rozwiązań umożliwiających rozpraszanie nadmiernych ilości energii wskutek zderzeń pojazdów szynowych ogromną rolę odgrywają komputerowe systemy bazujące na metodzie elementów skończonych [99], [113], [119].

Najczęściej stosowane w eksploatacji zderzaki, ze względu na mnogość wagonów towarowych użytkowanych na świecie, posiadają skok o wartości 105 mm. Zderzaki te, jako jedyne dzielone są w dokumentach normatywnych wg dodatkowego kryterium – wartości pochłanianej energii. Zgodnie z [30], [52] wśród zderzaków o skoku 105 mm wyróżnić można trzy kategorie, określające zdolność zderzaka do pochłaniania energii dynamicznej. Są to odpowiednio:

- Kategoria A – dla zderzaków zdolnych pochłonąć co najmniej 32 kJ energii;
- Kategoria B – dla zderzaków zdolnych pochłonąć co najmniej 50 kJ energii;
- Kategoria C – dla zderzaków zdolnych pochłonąć co najmniej 70 kJ energii;

przy czym zdolność zderzaka do pochłaniania energii wynika z jego charakterystyki, która zależy bezpośrednio od zamontowanego w nim systemu amortyzującego. Jednym z pierwszych systemów sprężystych montowanych w zderzakach kolejowych (zarówno trzonowych jak i tulejowych) była sprężyna taśmowa stożkowa, zdolna do pochłaniania relatywnie niewielkich ilości energii (poprzez tarcie pomiędzy kolejnymi zwojami) oraz niepozbawiona wad, z których najpoważniejszą okazywała się skłonność do zakleszczania się sprężyny w wyniku działania dynamicznych sił o dużej wartości. Wraz ze wzrostem prędkości poruszania się pojazdów szynowych oraz ich masy, konieczne stało się stosowanie innych rodzajów amortyzacji, bardziej odpowiednich do zastosowań kolejowych. Jednym z takich rozwiązań, które nie przyjęło się na świecie do powszechnego stosowania, był zderzak kolejowy wyposażony w dwie współosiowo ułożone sprężyny śrubowe [115]. Zderzak ten został zaprojektowany w taki sposób, aby sprężyna o mniejszej średnicy i jednocześnie mniejszej sztywności, pracowała w każdym zakresie obciążeń (nawet przy działaniu sił ściskających o bardzo małej wartości), natomiast sprężyna sztywniejsza,

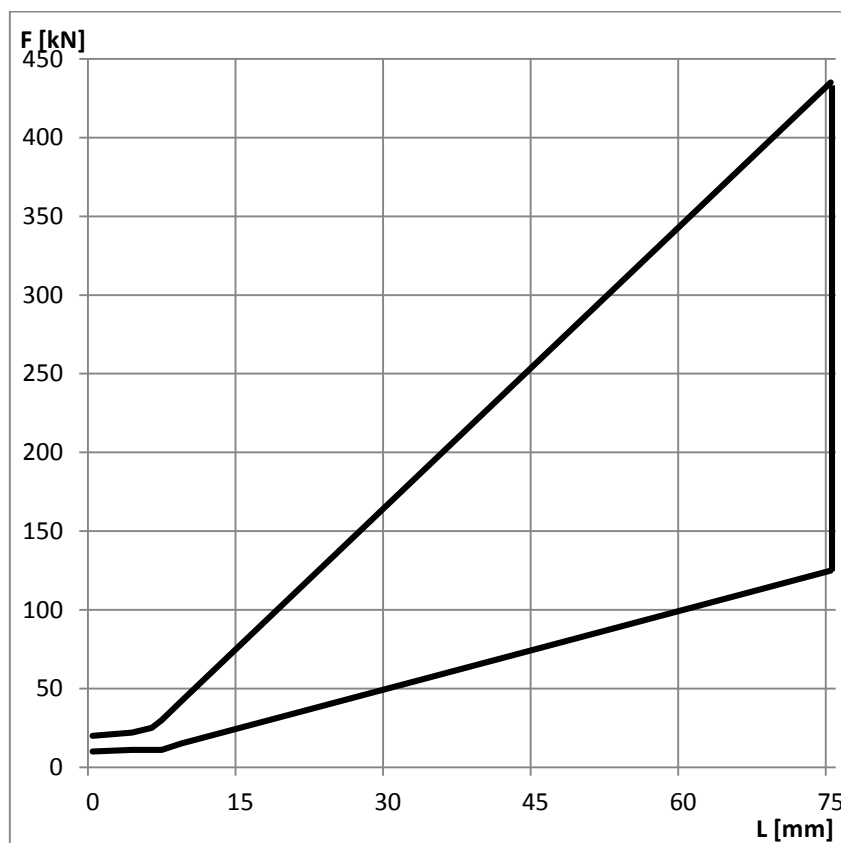
włączała się do pracy jedynie przy zadziałaniu dużych co do wartości sił. Rozwiązanie takie było optymalne dla zastosowań kolejowych, w których przez większość czasu zderzak nie musi wykazywać się dużą sztywnością (pokonywanie łuków, nabieganie na siebie wagonów podczas jazdy), ma jednak możliwość przyjęcia większych energii. Główną wadą tego typu zderzaka oraz powodem, dla którego nie znalazł on powszechnego zastosowania na świecie, był brak możliwości tłumienia energii, co w skrajnych przypadkach powodować mogło nawet zrywanie sprzęgów w momencie oddawania przez sprężynę całej zmagazynowanej w niej energii w bardzo krótkim czasie. Rozwiązaniem wykorzystującym konwencjonalne sprężyny, które znalazło szerokie zastosowanie w transporcie kolejowym całego świata, był zderzak ze sprężyną pierścieniową (Uerdingena). Zderzaki takie produkowane są do dzisiaj i obok zderzaków z pierścieniami gumowymi oraz elastomerami są najczęściej spotykanymi w użytkowaniu konstrukcjami. Zderzak wyposażony w tego typu sprężynę posiada ogromną zaletę polegającą na możliwości tłumienia znacznych ilości energii. Składa się on (Rys. 8), oprócz standardowej tulei, pochwy, tarczy i płyty, z naprzemiennie ułożonych współosiowo pierścieni wewnętrznych i zewnętrznych.



Rys. 8 Schematyczny przekrój zderzaka pierścieniowego oraz jego model 3D

W trakcie pracy zderzaka, pierścienie wewnętrzne są ściskane, a zewnętrzne rozciągane. Ponieważ pierścienie posiadają powierzchnie stożkowe, podczas działania siły i nachodzenia na siebie pierścieni, powierzchnie te zaczynają o siebie trzeć tłumiąc część energii pochłanianej przez zderzak. Z tego względu, po zaniku siły ściskającej, zderzak wraca do swojego początkowego położenia z odpowiednio mniejszą siłą. Zazwyczaj w zderzakach kolejowych wyposażonych w sprężynę pierścieniową kilka pierwszych zwoi

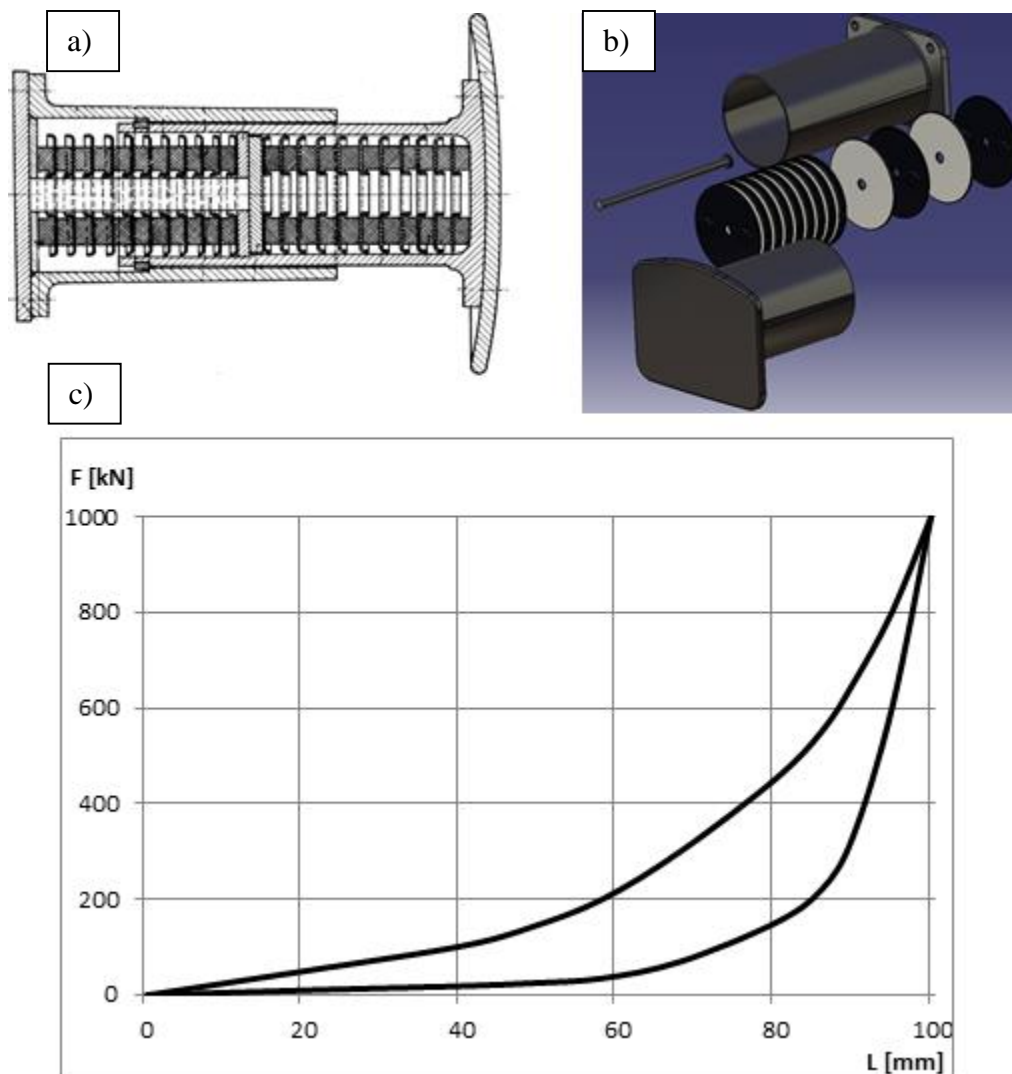
(czasem również kilka ostatnich) zostaje rozciętych w taki sposób, aby działały one w zakresie szybkich obciążeń dynamicznych o stosunkowo niewielkiej wartości. Nacięcia takie pozwalają zmniejszyć sztywność zderzaka, minimalizując siłę potrzebną do jego zadziałania. Zderzaki tego typu uważane są za konstrukcje sprawdzone i cenione w eksploatacji [21], ale ich główną wadą jest wysoki koszt wytworzenia pierścieni, które są wykonane w sposób bardzo dokładny, z zachowaniem odpowiednich tolerancji [35]. Przykład charakterystyki statycznej tego typu zderzaka o skoku 75 mm przedstawiono na Rys. 9.



Rys. 9 Charakterystyka statyczna zderzaka ze sprężyną pierścieniową [36]

Na podstawie tej charakterystyki (Rys. 9) można zaobserwować, że sprężyna pierścieniowa zachowuje się w sposób dalece odmienny od klasycznej sprężyny śrubowej. Dwie krzywe obrazujące odpowiednio obciążanie i odciążanie sprężyny oraz pole figury zawarte pomiędzy nimi wskazują, że zderzak ten jest w stanie pochłaniać część energii. Jak wynika z wykresu, ilość wytraconej energii jest zależna od siły przyłożonej do tarczy zderzakowej i rośnie wraz z nią. Energia ta zamieniana zostaje w zderzaku na ciepło, powstałe wskutek tarcia o siebie powierzchni stożkowych wewnętrznych i zewnętrznych pierścieni. Badania eksperymentalne potwierdzają takie zachowanie tego typu zderzaka [22], [79]. Innym,

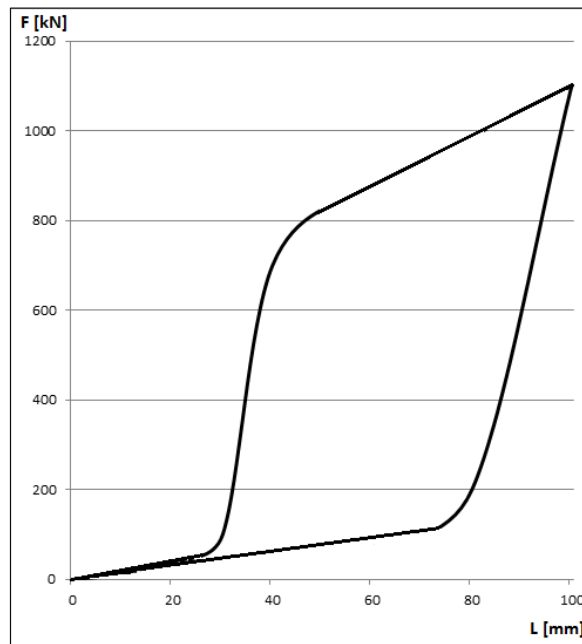
powszechnie wykorzystywanym typem zderzaka, jest zderzak wyposażony w amortyzator składający się z gumowych pierścieni oraz stalowych przekładek pomiędzy nimi [89]. Zderzak taki wykorzystuje właściwości gumy do pochłaniania energii generowanej wskutek wciskania tulei w pochwę zderzakową. Ze względu na relatywnie niewielką cenę i łatwość wytworzenia, zderzaki z tym typem amortyzatora są bardzo powszechnie używane na kolejach całego świata, zwłaszcza w wagonach towarowych. Co więcej, ze względu na łatwość sterowania parametrami gumy poprzez zmianę jej składu chemicznego, możliwe jest zaprojektowanie elementów zderzaka w taki sposób, aby jak najlepiej nadawały się do zastosowań kolejowych. Przykład tego typu zderzaka przedstawiono na Rys. 10.



Rys. 10 Schematyczny przekrój zderzaka gumowego, jego model 3D oraz charakterystyka statyczna [36]

W praktyce spotyka się bardzo wiele różnych konstrukcji wykorzystujących współosiowo ułożone gumowe przekładki zdolne absorbować część energii. Posiadają one różną geometrię, skład chemiczny, różnią się również ilością zastosowanych elementów. We wszystkich jednak pomiędzy gumowymi elementami występują przekładki (najczęściej wykonane ze stali) eliminujące tarcie mogące wystąpić na granicy dwóch gumowych elementów. Zależnie od typu zderzaka, jego kategorii itp. jego charakterystyka może być bardzo różna. Uniwersalny kształt charakterystyki statycznej zderzaka gumowego, przedstawiony został na Rys. 10. Zaobserwować można, że w przeciwieństwie do sprężyny pierścieniowej, charakterystyka zderzaka wyposażonego w gumowe przekładki jest zdecydowanie bardziej wygładzona. Obciążanie i odciążanie amortyzatora zachodzi płynniej, co przekłada się na spokojniejszą pracę zderzaka, a co za tym idzie spokojniejszy bieg pociągu. Fakt ten oraz niewielki koszt wytworzenia tego typu zderzaka, uczynił go jedną z najpopularniejszych eksploatowanych na świecie konstrukcji. Nie jest ona jednakże pozbawiona wad, wśród których najistotniejsze to starzenie się gumy oraz zmiana jej parametrów pod wpływem temperatury. Kolejnym krokiem w projektowaniu zderzaków kolejowych, który był rozwinięciem zderzaka gumowego, było zastosowanie elastomerów jako elementów amortyzujących. W eksploatacji spotkać można zderzaki kolejowe wyposażone w dwa rodzaje amortyzatorów elastomerowych. Są to elastomery płynne i stałe, przy czym zdarza się łączenie obu tych typów w jednej konstrukcji. Zderzaki z tym typem amortyzacji są najdroższymi z produkowanych, jednakże ze względu na parametry i zachowanie się tego materiału są one optymalne do zastosowań kolejowych. Zderzaki z elastomerami stałymi są podobne w konstrukcji do zderzaków gumowych oraz posiadają podobne własności, posiadają jednak lepsze parametry przy tłumieniu dynamicznie działających sił o dużej wartości. W przypadku elastomerów płynnych wykorzystuje się fakt dużej lepkości tych substancji, pozwalającej na wytłumienie znacznych ilości energii. Zderzaki wyposażone w ten typ amortyzacji posiadają zazwyczaj wewnątrz tulei specjalnie zaprojektowany element o walcowym kształcie, działający jak amortyzator hydrauliczny. Ze względu na lepkość elastomeru, przetłoczenie go przez precyzyjnie dobrane kanaliki o niewielkich rozmiarach pozwala na absorpcję dużych ilości energii. Ponadto, często stosuje się w tego typu zderzakach elastomery, których właściwości (zwłaszcza związane z pochłanianiem energii) zależą od prędkości ściskania [34]. Zderzaki elastomerowe nierzadko wyposażone są w dwa współosiowo ułożone elementy amortyzujące, z których jeden (najczęściej sprężyna talerzowa lub śrubowa) działa w zakresie niewielkich odkształceń (do ok. 20 mm skoku), drugi natomiast (elastomer płynny) rozpoczyna pracę po

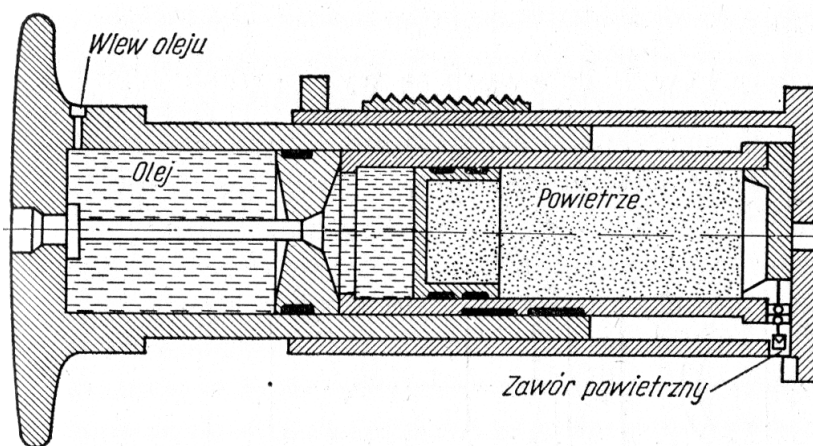
przekroczeniu tej wartości. Charakterystyka tego typu zderzaka (Rys. 11) jest bardzo specyficzna i jednocześnie sprzyja zastosowaniu w kolejnictwie.



Rys. 11 Charakterystyka statyczna zderzaka elastomerowego [36]

Pierwszy z elementów amortyzujących (sprężyna konwencjonalna) działa w zakresie niewielkich odkształceń i posiada relatywnie niewielką sztywność. Niewielka siła działająca na zderzak powoduje jego ugięcie i szybkie wyczerpanie skoku. Dopiero w drugiej fazie, po przekroczeniu granicznej wartości (ok. 20 mm) do pracy włącza się amortyzator elastomerowy. Rozwiązanie takie jest optymalne dla zastosowań w transporcie kolejowym, ze względu na fakt, że zdecydowana większość ugięć tulei zderzakowej względem pochwy, zawarta jest w początkowej fazie skoku zderzaka, co udowodnione zostało poprzez badania przeprowadzone w ramach niniejszej pracy i opisane w dalszej jej części. Czasami w eksploatacji spotkać można jeszcze jeden typ zderzaka kolejowego, jednakże ze względu na bardzo wysoki koszt jego produkcji oraz późniejszego utrzymania, jest to konstrukcja rzadko montowana na pojazdach. Są to zderzaki hydrauliczne, wykorzystujące do tłumienia energii amortyzatory hydrauliczne wypełnione cieczą (najczęściej olejem) o odpowiedniej lepkości. Zderzaki te wyposażane są również w inne rodzaje sprężyn, w związku z czym w eksploatacji najczęściej można spotkać dwa typy zderzaków hydraulicznych: hydrauliczno-mechaniczne oraz hydrauliczno-pneumatyczne. W przypadku tych pierwszych, w początkowej fazie ściskania zderzaka za jego sprężystość odpowiada klasyczna sprężyna (najczęściej śrubowa lub talerzowa). W drugim przypadku,

dotychczasowym amortyzatorem jest amortyzator pneumatyczny, który wykorzystuje zjawisko ściśliwości powietrza. Zaletą tego typu zderzaków jest możliwość bardzo precyzyjnego sterowania charakterystyką zderzaka poprzez regulowanie liczby i rozmiarów otworów, przez które ciecz będzie przepływać w trakcie pracy zderzaka. Największą wadą tego rozwiązania i jednocześnie powodem rzadkości jego występowania jest ogromna precyzja wykonania jego elementów, niezbędna w celu zachowania szczelności zderzaka, zwłaszcza w jego hydrauliczno-pneumatycznej wersji (Rys. 12).



Rys. 12 Zderzak hydrauliczno-pneumatyczny [36]

Mnogość opisów patentowych dotyczących konstrukcji zderzaków kolejowych oraz różnych rozwiązań w nich zastosowanych [31], [86]–[88], [90], [115] udowadnia, że zderzaki kolejowe są elementami pojazdów szynowych, których rozwój następuje w sposób gwałtowny i w dalszym ciągu opracowywane są konstrukcje, mogące pochłonąć coraz więcej energii i lepiej reagować na wymuszenia powstałe wskutek poruszania się składu pociągu. Istnieje wiele rozwiązań pozwalających na amortyzowanie zderzeń pojazdów w trakcie eksploatacji, jednak praktycznie wszystkie z nich bazują na systemach opisanych w niniejszej pracy, bardzo często stanowiąc kombinację kilku różnych elementów amortyzujących łączonych w jedną konstrukcję. Niezależnie od systemu sprężystego wykorzystywanego w zderzaku kolejowym istnieją konkretne wymagania normatywne, które musi on spełnić, aby został dopuszczony do eksploatacji zgodnie z [30]. W [30], [52]–[54] określono bardzo dokładne charakterystyki, zarówno statyczne jak i dynamiczne, które musi spełnić zderzak kolejowy. Zgodnie z nimi, zderzaki dzielone są na cztery kategorie, w zależności od skoku, który posiadają. W aneksie zawartym w [30] opisano również dokładne warunki w jakich badanie charakterystyki statycznej zderzaków powinno być przeprowadzane. Zgodnie z nimi, zderzaki powinny być badane po złożeniu w całość, przy

czym konstrukcje wyposażone w elementy gumowe lub elastomerowe, powinny być przebadane co najmniej 72 godziny po złożeniu. Test polega na przeprowadzeniu trzech cykli ściskania zderzaka, aż do wyczerpania jego skoku, z prędkością przesuwu tulei względem pochwy wynoszącą od 0,01 m/s do 0,05 m/s. Mierzonymi w badaniu wartościami są ugięcie zderzaka oraz siła ściskająca. Na podstawie tych dwóch wartości tworzony jest wykres zależności skoku zderzaka od siły ściskającej, będący wynikiem testu i nazywany charakterystyką statyczną zderzaka. Na podstawie wykresu wyznacza się również energię zmagazynowaną i energię pochłoniętą przez zderzak. Zgodnie z wytycznymi, zderzaki o określonym skoku muszą charakteryzować się odpowiednim ugięciem w zależności od przyłożonej siły oraz jednocześnie odpowiednią zdolnością do magazynowania i rozpraszania energii. Wartości te przedstawiono w Tab. 1 opracowanej na podstawie [30].

Tab. 1 Wymagania dotyczące charakterystyki statycznej zderzaków kolejowych

Skok zderzaka	Zderzak o skoku 105 mm	Zderzak o skoku 110 mm ze sprężyną konwencjonalną	Zderzak o skoku 110 mm ze sprężyną hydrodynamiczną lub hydrostatyczną	Zderzak o skoku 150 mm
Początkowy skok	10 kN – 50 kN	7,5 kN – 20 kN	7,5 kN – 50 kN	15 kN – 90 kN
Po 25 mm	30 kN – 130 kN	10 kN – 40 kN	-	60 kN – 130 kN
Po 50 mm	-	-	60 kN – 200 kN	-
Po 60 mm	100 kN – 400 kN	50 kN – 150 kN	-	100 kN – 220 kN
Po 100 mm	350 kN – 1000 kN	-	-	150 kN – 390 kN
Po 105 mm	-	300 kN – 1000 kN	≤ 600 kN	-
Po 125 mm	-	-	-	200 kN – 520 kN
Po 145 mm	-	-	-	350 kN – 880 kN
Zmagazynowana energia dla siły nie przekraczającej 1 000 kN	≥ 12,5 kJ	≥ 10 kJ	-	-
Zmagazynowana energia dla siły ≤ 880 kN	-	-	-	≥ 18 kJ
Zmagazynowana energia dla siły ≤ 600 kN	-	-	≥ 12 kJ	-
Pochłonięta energia odpowiadająca energii zmagazynowanej	≥ 0,5 energii zmagazynowanej	≥ 0,5 energii zmagazynowanej	≥ 0,5 energii zmagazynowanej	≥ 0,5 energii zmagazynowanej

Oprócz uzyskiwania charakterystyk statycznych, zderzaki poddaje się również badaniom pozwalającym sprawdzić ich zachowanie w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. W tym celu analizuje się ich charakterystyki dynamiczne poprzez zamontowanie badanych konstrukcji na pojazdach o odpowiednich parametrach i zderzaniu ich według ściśle określonych warunków. Badania te pozwalają sprawdzić, czy analizowana konstrukcja jest

w stanie spełnić określone wymagania co do przeciążeń i pochłaniania energii, dobrane w taki sposób, aby zapewnić bezpieczeństwo przewożonych ludzi i towarów. W [30] wyszczególniono kilka procedur testowych, zależnie od skoku zderzaka i jego kategorii (dotyczy zderzaków o skoku 105 mm), w trakcie których mierzone są następujące wielkości:

- prędkość zderzenia;
- siła ściskająca;
- skok zderzaka;
- przyspieszenie.

Badania przeprowadzane są z wykorzystaniem standardowego czteroosiowego wagonu wózkowego oraz dwuosiowego wagonu bezwózkowego, zgodnych z [55]. Sprecyzowana została również metodyka pomiaru opisująca m.in. sposób mierzenia poszczególnych wartości, umiejscowienie przyrządów pomiarowych czy temperaturę w której badania powinny być przeprowadzane. Program badań dla zderzaków o skoku 105 mm obejmuje pięć procedur testowych, z których trzy pierwsze są obowiązkowe, jako opracowane w celu zagwarantowania bezpieczeństwa ludzi i towarów, dwie ostatnie natomiast nie są wymagane, przy czym zaleca się ich przeprowadzenie w przypadku testowania zderzaka wyposażonego w nowy typ elementu amortyzującego. Testy polegają na zderzaniu ze sobą wagonów wyposażonych w badane zderzaki (dla trzech pierwszych procedur testowych). W zależności od procedury, zderzane są ze sobą różne typy wagonów (wózkowy czteroosiowy i bezwózkowy dwuosiowy) o różnych masach (20 t, 40 t, 80 t, 90 t). Dwie ostatnie procedury testowe polegają na zderzaniu ze sobą wagonów, z których jeden wyposażony jest w testowane zderzaki, natomiast drugi posiada konstrukcje aktualnie wykorzystywane w transporcie kolejowym. Zderzenia przeprowadza się z odpowiednimi, wyszczególnionymi w normie prędkościami, a mierzone wartości (przyspieszenie, skok zderzaka, pochłonięta energia) powinny zawierać się we wskazanych przedziałach. W przypadku zderzaków o skoku 150 mm badania charakterystyki dynamicznej są bardzo zbliżone. W tym przypadku również występuje pięć procedur pomiarowych, przy czym każda z nich jest obowiązkowa do przeprowadzenia. W przypadku testów tego typu zderzaków nie wykorzystuje się również dwuosiowych wagonów bezwózkowych, a zderzeniom podlegają jedynie czteroosiowe wagony wózkowe, różniące się od siebie masami. Wagony w zależności od procedury, zderzane są ze sobą z różnymi prędkościami. Uzyskane w trakcie poszczególnych procedur testowych wartości porównuje się z założonymi wartościami przyspieszenia i siły, co pozwala na stwierdzenie, czy zderzak

spełnia wymagania normy. W przypadku zderzaków o skoku 110 mm stosuje się najkrótszą procedurę testową, polegającą na zderzeniu ze sobą 80-tonowego wózkowego wagonu czteroosiowego wyposażonego w zderzaki kategorii A z gumowym elementem amortyzującym oraz wagonu pasażerskiego (o masie ok. 45 ton) wyposażonego w badane zderzaki. Norma przewiduje określone wartości prędkości, siły ściskającej, zarejestrowanego skoku, zmagazynowanej energii oraz pochłoniętej energii, które należy uzyskać, zależnie od typu badanego zderzaka (wyposażony w sprężynę konwencjonalną lub hydrauliczną). W celu spełnienia restrykcyjnych wymagań normatywnych odnośnie charakterystyk statycznych i dynamicznych zderzaków kolejowych, bardzo często stosuje się programy komputerowe wspomagające projektowanie i umożliwiające symulację pracy różnych konstrukcji zderzaków [23] oraz dynamiki całego pociągu i jej wpływu na działanie zderzaków [19]. Istnieją również aplikacje stworzone wyłącznie do takich celów [27]. Praktyczne procedury przeprowadzania badań charakterystyk statycznych i dynamicznych zderzaków na obiektach rzeczywistych przedstawione zostały m.in. w [20], [109], [110].

Kolejnym obowiązkowym badaniem, któremu muszą być poddane zderzaki zgodnie z [30] jest test wytrzymałościowy. Przeprowadzany jest on w celu potwierdzenia koniecznej wytrzymałości zderzaka w zakresie ruchów o niewielkim skoku, występujących przy hamowaniu i pokonywaniu łuków. Zgodnie z badaniami wstępnymi, przeprowadzonymi w ramach niniejszej pracy, ruchy takie stanowią zdecydowaną większość jakichkolwiek przemieszczeń tulei zderzaka względem pochwy. Badanie wytrzymałościowe polega na przeprowadzeniu 10000 cykli ściskania i rozprężania systemu sprężystego pomiędzy wartościami ($H_1-0,25a$) oraz ($H_1-0,6a$), gdzie:

H_1 – długość systemu elastycznego bez działania jakiegokolwiek siły ściskającej [mm]

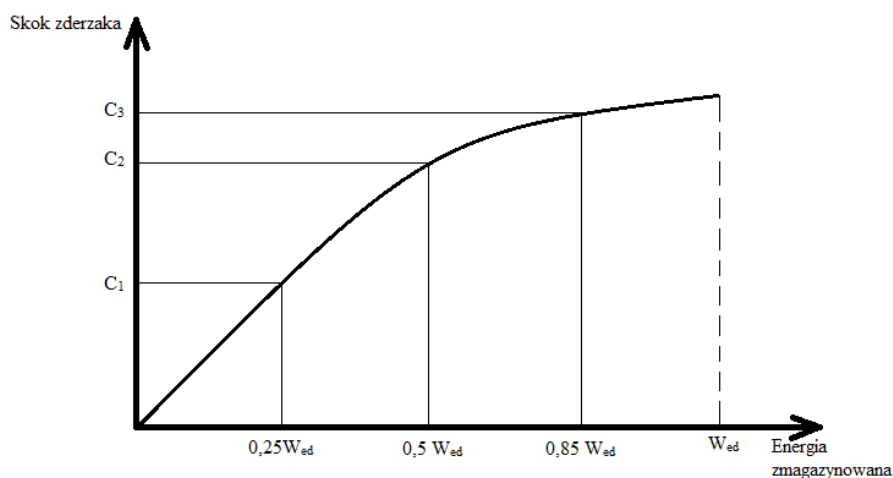
a – skok zderzaka [mm].

Powodem, dla którego każdy cykl rozpoczyna się dla lekko ściśniętego zderzaka, są przepisy związane z eksploatacją pojazdów kolejowych, które mówią, że wagony wyposażone w klasyczny sprzęg śrubowy powinny być ze sobą sprzęgane w taki sposób, aby zderzaki podlegały lekkiemu, wstępnemu ściśnięciu. Pozwala to na unikanie uderzeń występujących pomiędzy tarczami zderzakowymi oraz minimalizuje ryzyko zakleszczenia się jednej tarczy za drugą podczas pokonywania łuków o niewielkim promieniu. Wynikiem badania jest charakterystyka statyczna zderzaka po przeprowadzeniu 10000 cykli. Zderzak uznaje się za

spełniający wymagania, jeżeli rozbieżności pomiędzy nominalną charakterystyką statyczną a tą otrzymaną po przeprowadzeniu testu nie przekroczą:

- $\pm 20\%$ dla siły;
- $\pm 10\%$ dla skoku;
- $\pm 20\%$ dla energii zmagazynowanej i energii pochłoniętej.

Badania przeprowadzane dla zderzaków, wyposażonych w systemy sprężyste hydrauliczne lub hydrodynamiczne, podlegają ponadto innej, dodatkowej procedurze testowej. Zgodnie z nią, w zależności od przeznaczenia zderzaka stosuje się dodatkowy program cyklicznych obciążeń. Dla zderzaków przeznaczonych do wagonów towarowych procedura przewiduje wykonanie 13200 cykli ściskania i rozprężania w trzech różnych zakresach skoku. Badania przeprowadza się na samym systemie sprężystym (niezabudowanym w zderzaku) zamontowanym w prasie umożliwiającej pionowe prowadzenie systemu podczas cykli. Przed wykonaniem właściwego badania należy uzyskać charakterystykę statyczną zderzaka (wg procedury opisanej wcześniej), która po wykonaniu testu będzie referencyjna w stosunku do otrzymanej po badaniu. Zakłada się, że system sprężysty spełnia wymagania, gdy wartość energii możliwej do zmagazynowania przez system będzie wynosiła co najmniej 80% wartości energii przed testem. W celu wyznaczenia skoków zderzaka, które będą wykorzystywane podczas 13200 cykli, niezbędne jest przeprowadzenie testów (opisanych wcześniej) dotyczących dynamicznych charakterystyk zderzaków. Na podstawie tych badań możliwe jest uzyskanie zależności pomiędzy skokiem zderzaka a wartościami magazynowanej przez niego energii. Przykład takiej zależności, opracowanej na podstawie [30] przedstawiono na Rys. 13.



Rys. 13 Zależność skoku zderzaka od wartości zmagazynowanej energii

gdzie:

W_{ed} – maksymalna wartość energii, którą może zmagazynować zderzak [kJ];

C – skok zderzaka [mm].

Po uzyskaniu wartości C_1 , C_2 i C_3 możliwe jest przeprowadzenie właściwych testów. Polegają one na przeprowadzeniu trzech sekwencji 4400 cykli, odpowiednio 3000 cykli ściskania i rozprężania do skoku C_1 , 1200 cykli dla skoku C_2 oraz 200 cykli dla skoku C_3 . Zakłada się, że każdy z cykli składa się z kompresji, dekompresji oraz przerwy, przy czym czas wykonania cyklu zależy od wartości skoku zderzaka i dla skoku C_1 wynosi 60 sekund, dla C_2 90 sekund, natomiast dla C_3 120 sekund. Po wykonaniu całej procedury testowej, zderzak pozostawia się na 24 godziny, po czym przechodzi się do wykonania badania charakterystyki statycznej, która porównywana jest z charakterystyką wyjściową, co stanowi cel badania. Badania dla zderzaków tego typu przeznaczonych do wagonów pasażerskich cechują się znacznie bardziej czasochłonną procedurą. Procedura ta ma odpowiadać eksploatacji zderzaka na dystansie około miliona kilometrów. Składa się ona z trzech badań. Pierwsze z nich polega na wykonaniu 15 zderzeń pomiędzy wagonem pasażerskim, wyposażonym w badane zderzaki, ważącym 45 ton a wagonem towarowym, ważącym 80 ton, z prędkością 10 km/h. Kolejnym i jednocześnie najbardziej czasochłonnym badaniem, jest test cyklicznych obciążeń zderzaka. W zależności od podtypu zderzaka (hydrodynamiczny lub hydrostatyczny) poddaje się go odpowiednio cyklom obciążeń opisanych poniżej:

Dla zderzaków hydrodynamicznych:

- 16000 cykli ściskania i rozprężania w zakresie skoku 10 mm;
- 6000 cykli ściskania i rozprężania w zakresie skoku 30 mm;
- 800 cykli ściskania i rozprężania w zakresie skoku 50 mm;
- 30 cykli ściskania i rozprężania w zakresie skoku 75 mm.

Dla zderzaków hydrostatycznych:

- 27000 cykli ściskania i rozprężania w zakresie skoku 15 mm;
- 3000 cykli ściskania i rozprężania w zakresie skoku 45 mm;
- 450 cykli ściskania i rozprężania w zakresie skoku 55 mm;
- 10 cykli ściskania i rozprężania w zakresie skoku 75 mm.

Wszystkie sekwencje badawcze powinny zostać powtórzone 30 razy. Co istotne, jak można zauważyć, badanie skupia się przede wszystkim na sprawdzeniu niezawodności i poprawności działania zderzaka w zakresie niewielkich obciążeń (niewielki skok), które jak potwierdziły badania przeprowadzone w ramach niniejszej pracy, stanowią najliczniejszą grupę wymuszeń działających na zderzak w trakcie jego normalnej eksploatacji. Po przeprowadzeniu czasochłonnej procedury testowej należy powtórzyć pierwsze badanie, tj. wykonać 15 kontrolowanych zderzeń pomiędzy takimi samymi pojazdami. Kolejnym krokiem jest sprawdzenie czy konstrukcja zderzaka nie uległa jakimkolwiek uszkodzeniu oraz czy jego własności nie uległy drastycznym zmianom. Zakłada się, że zderzak pomyślnie przejdzie testy, jeżeli różnice pomiędzy jego wyjściową charakterystyką statyczną i dynamiczną, a uzyskanymi charakterystykami po przeprowadzeniu badania, nie przekroczą:

- $\pm 20\%$ dla siły;
- $\pm 10\%$ dla skoku;
- $\pm 20\%$ dla energii zmagazynowanej i energii pochłoniętej.

System sprężysty nie jest jedynym elementem zderzaka, który przed jego dopuszczeniem do eksploatacji powinien zostać poddany badaniom. Również obudowa (tarcza, tuleja, pochwa, płyta) podlega różnego rodzaju testom i musi spełnić określone wymagania. Żaden element obudowy zderzaka nie może posiadać jakichkolwiek pęknięć, ubytków czy innych widocznych defektów, które w jakikolwiek sposób mogłyby wpłynąć na jego użytkowanie i parametry. Ponadto, elementy obudowy zderzaka powinny zostać poddane badaniom defektoskopowym zgodnie z [29]. Dopuszczalne jest spawanie elementów konstrukcji zderzaka, przy czym zaleca się, aby proces ten był zgodny z [29].

1.2 Tarcze zderzakowe

Tarcza zderzakowa, będąca jedynym elementem zderzaka kolejowego mającym kontakt z elementami innego pojazdu kolejowego w trakcie eksploatacji, jest najbardziej newralgicznym, z punktu widzenia bezpieczeństwa, podzespołem zderzaka kolejowego. Co więcej, wskutek kontaktu tarcz dwóch sąsiednich pojazdów w trakcie ich użytkowania, ulegają one zużyciu ściernemu, co sprawia, że są jednym z najczęściej wymienianych elementów zderzaka i jednocześnie najczęściej obsługiwanym podzespołem w trakcie przerw w użytkowaniu pojazdu. Dzieje się tak, ze względu na konieczność okresowego

smarowania powierzchni zewnętrznej tarczy zderzakowej smarem, minimalizującym zużycie powstające na skutek tarcia o siebie tarcz, zwłaszcza podczas pokonywania łuków. W związku z wyjątkowo istotną rolą, jaką pełnią tarcze zderzakowe przy pokonywaniu przez pojazdy łuków toru, ich wymiary i krzywizny są niezwykle ważnymi parametrami, pozwalającymi zachować bezpieczeństwo i właściwą dynamikę pojazdów podczas ruchu. Z tego względu [30], [52]–[54] określają precyzyjne wymogi odnośnie wymiarów tarczy zderzakowej, którymi musi się ona charakteryzować. Zakłada się, że tarcza zderzakowa powinna mieć wysokość 340 mm tj. powinna wystawać odpowiednio po 170 mm powyżej i poniżej osi wzdłużnej tulei zderzakowej. Z punktu widzenia bezpieczeństwa ruchu pojazdów najistotniejsza jest jednak szerokość tarczy zderzakowej, ponieważ od tego wymiaru zależy ewentualna możliwość zakleszczenia się ze sobą tarcz sąsiednich pojazdów zderzakowych podczas pokonywania łuków. Wymiar szerokości tarczy zderzakowej zależy ściśle od wymiarów i rodzaju pojazdu, na którym zderzak jest zamontowany.

Jeżeli za wartość Δ przyjmiemy parametr określający wymaganą szerokość tarczy zderzakowej, to zgodnie z zależnością podaną w [30], szerokość tarczy powinna wynosić odpowiednio:

- 450 mm, gdy $\Delta \leq 400$;
- 550 mm, gdy $400 \leq \Delta \leq 550$.

Parametr Δ zależy od rodzaju i wymiarów pojazdu, na którym zderzak jest zamontowany i wyznacza się go na podstawie zależności:

$$\frac{\Delta_1}{2} = 30k + 130 \quad (1)$$

gdy $F \leq 150$ i $(a + n_t) \leq 15000$

lub

$$\frac{\Delta_2}{2} = F + 30k - 20 \quad (2)$$

gdy $F \geq 150$ i $n_t \geq 3000$;

lub

$$\frac{\Delta_3}{2} = \frac{\Delta_1}{2} + \frac{(a+n_t-15000)^2}{300000\left(\frac{a}{n_t}-4\right)} = \frac{\Delta_2}{2} + \frac{(3000-n_t)^2\left(\frac{a}{n_t}+1\right)}{60000\left(\frac{a}{n_t}-4\right)} \quad (3)$$

gdy $(a + n_t) > 15000$ i $n_t < 3000$

gdzie:

$$F = \frac{an_t + n_t^2}{300000} \quad (4)$$

$$k = \frac{n_t + a}{a} \text{ dla pojazdów bez napędnych wózków} \quad (5)$$

$$k = \frac{2n_t + a}{a} \text{ dla innych pojazdów} \quad (6)$$

gdzie:

a – dystans (w mm) pomiędzy skrajnymi osiami lub czopami skrętu w rozważanym pojeździe;

n_t – odległość (w mm) pomiędzy powierzchnią zewnętrzną tarczy zderzakowej, a końcową skrajną osią lub czopem skrętu.

Oprócz szerokości tarcz zderzakowych również ich wypukłość wpływa na bezpieczeństwo poruszającego się taboru. Przed latami sześćdziesiątymi XX wieku [95] dopuszczalne było stosowanie w eksploatacji płaskich tarcz zderzakowych. W miarę zwiększania prędkości poruszających się składów oraz ich mas, co ma fundamentalny wpływ na dynamikę pojazdu, zaczęto stosować wyłącznie tarcze wypukłe, o promieniu krzywizny 1500 mm. Obecnie, zgodnie z [30], [52]–[54] krzywizna o takim promieniu dopuszczalna jest jedynie w zderzakach o skoku 110 mm, w pozostałych należy natomiast stosować tarcze o promieniu krzywizny wynoszącym 2750 mm. Wypukłość tarczy zderzakowej jest jednym z najistotniejszych parametrów zderzaka kolejowego. Tarcze są elementem współpracującym pomiędzy sobą w trakcie użytkowania i ulegają nieustannemu zużyciu ściernemu. Zgodnie z Dokumentacją Systemu Utrzymania poddawane są okresowym pomiarom, sprawdzającym poziom ich spłaszczenia. Częstotliwość pomiarów oraz dopuszczalne zużycie tarczy zależy od konkretnej, zazwyczaj zatwierdzonej przez Prezesa Urzędu Transportu Kolejowego, Dokumentacji Systemu Utrzymania. Przykładowo, dokumentacja największego towarowego przewoźnika kolejowego w Polsce – PKP Cargo S.A., dotycząca najliczniejszej grupy wagonów tj. węglarek budowy normalnej serii E zakłada, że pomiar zużycia tarczy zderzakowej powinien być wykonywany podczas każdego przeglądu poziomu 3, 4 i 5 [25]. Dopuszczalne zużycie wskazane w [25] wynosi 5 mm dla tarcz o kształcie prostokątnym oraz 7 mm dla tarcz o kształcie okrągłym. Pomiar dokonywany jest zazwyczaj z wykorzystaniem specjalnie do tego celu zaprojektowanych przyrządów, przedstawionych na Rys. 14 i Rys. 15.



Rys. 14 Przyrząd pomiarowy do sprawdzenia spłaszczenia tarczy zderzakowej



Rys. 15 Przyrządy pomiarowe do urządzeń ciągowych i zderzakowych. Na czerwono zaznaczono przyrząd do pomiaru spłaszczenia tarczy zderzaka

Ponadto, dokumentacja zaleca smarowanie sferycznej, współpracującej części tarczy zderzakowej smarem grafitowanym zgodnym z [92] przy każdej wykonywanej naprawie, co najmniej raz na 3 miesiące. Oznacza to konieczność bardzo częstej obsługi tego elementu pojazdu kolejowego, która ze względu na charakter wykonywanej czynności (konieczność operowania pomiędzy czołownicami pojazdów) jest bardzo niebezpieczna. Ponadto, w celu przesmarowania tarcz zderzaków kolejowych konieczne jest rozsprzęgnięcie pojazdów, co jest procesem czasochłonnym i wymagającym zaangażowania dodatkowych środków

(lokomotywa z obsadą). Stosowanie smarów w celu zminimalizowania tarcia występującego na styku dwóch tarcz posiada także inne wady. Przede wszystkim smar grafitowany może mieć niekorzystny wpływ na środowisko naturalne i powodować skażenia gruntów oraz wód [112]. Ponadto, w trakcie jego aplikacji albo podczas użytkowania pojazdów, możliwe jest przedostanie się środka smarnego do węzłów tarcia, które powinny być go pozbawione (wstawka hamulcowa – koło kolejowe, koło kolejowe – szyna kolejowa). Co więcej, smar taki nie zabezpiecza tarczy zderzakowej przed procesem korozji (Rys. 16), która może mieć znaczący wpływ na szybkość i rodzaj występującego zużycia.



Rys. 16 Skorodowane powierzchnie zewnętrzne tarcz zderzakowych

Największą jednak wadą, wynikającą z wykorzystywania smaru jako medium mającego za zadanie zmniejszać współczynnik tarcia występujący pomiędzy dwoma współpracującymi tarczami zderzaków kolejowych, jest konieczność okresowej jego aplikacji. Bardzo łatwo bowiem dopuścić do sytuacji, w której ilość smaru na tarczach będzie niewystarczająca, co z kolei doprowadzi do bardzo przyspieszonego zużycia ściernego tarcz, a nierzadko również do ich uszkodzenia (Rys. 17). Badania stanowiskowe wykonywane na maszynie Amslera, wykonane w ramach niniejszej pracy, obrazują zależność prędkości zużywania się próbek stalowych (dla stali wykorzystywanej w konstrukcji zderzaków kolejowych) od zastosowanego środka smarnego. Zgodnie z nimi, próbka niepokryta żadnym środkiem smarnym zużywa się kilkakrotnie szybciej niż próbka smarowana.



Rys. 17 Uszkodzona powierzchnia zewnętrzna tarczy zderzakowej

Dokumenty normatywne nie wskazują materiału, z którego wykonana może być tarcza zderzakowa. W [30], [52]–[54] znaleźć można jedynie informacje na temat wymaganej twardości tarcz wykonanych ze stali, która nie może być mniejsza niż 160 HV30, oraz dotyczące chropowatości powierzchni. Zakłada się, że chropowatość R_z nie może przekraczać wartości 25. Co ważne, to wymaganie dotyczy jedynie tarcz wykonanych ze stali. Pomimo faktu, że w dokumentach normatywnych nie wskazano dopuszczalnych materiałów na tarcze zderzakowe założono, że zastosowany materiał musi być kompatybilny z obecnie stosowanymi. W aneksie do [30] utworzono spis aktualnie wykorzystywanych materiałów na tarcze zderzakowe. Wg niego są to:

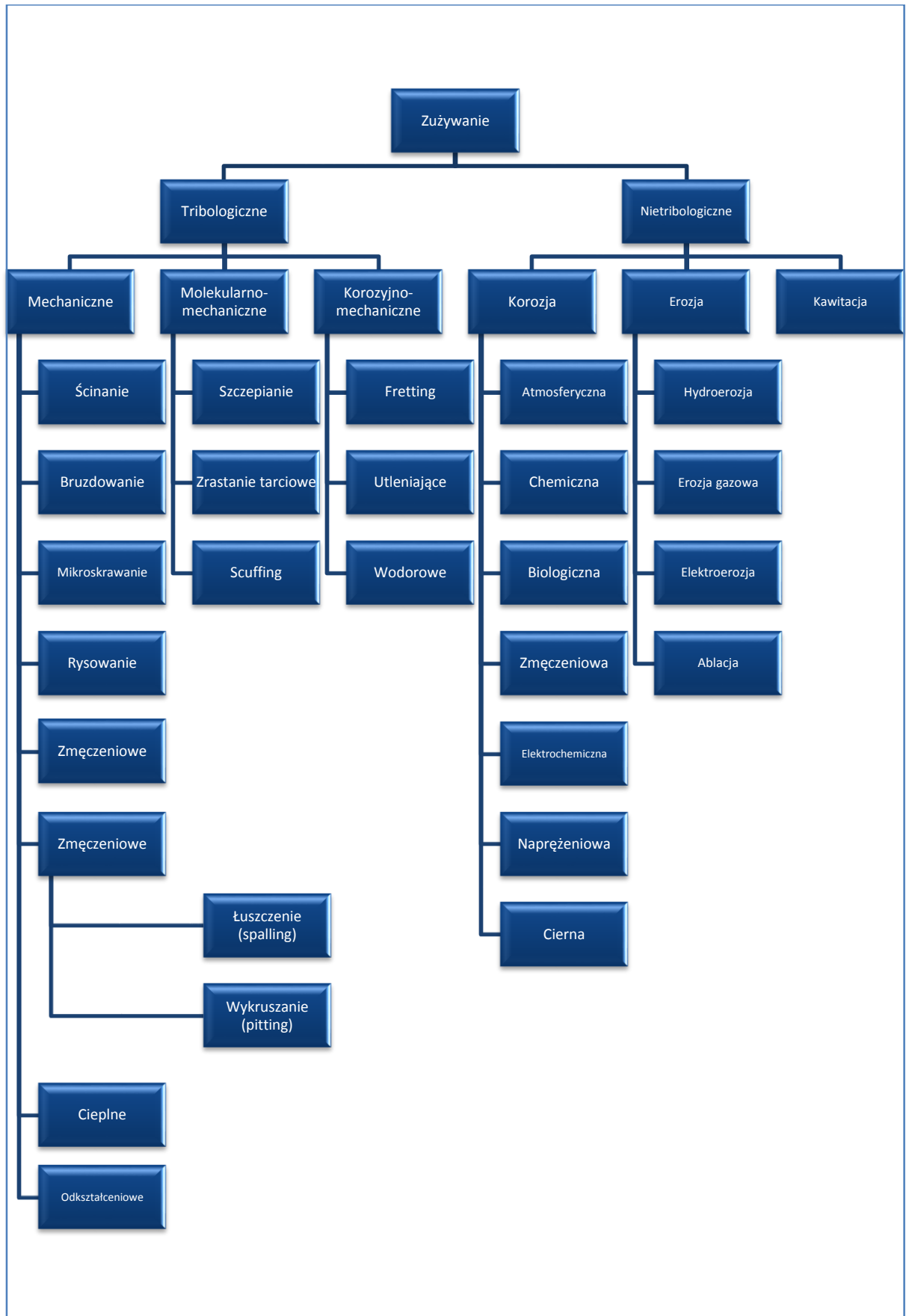
- S355J2+N;
- EN-GJS-600-3;
- GS-52;
- Cf 35;
- G25CrMo4V;
- 34Cr4V;
- Oilamid™;
- Nylatron™;
- E300-520M;

- L35GSM;
- 35SG.

Oprócz spisu materiałów obecnie wykorzystywanych na tarcze zderzakowe w aneksie znajdują się również propozycje programów badań, które mogą być stosowane w celu dopuszczenia tarczy zderzakowej do eksploatacji. Co ważne, aneks ten jest określony mianem „informacyjnego”, a zawartych w nim informacji nie należy traktować jako obowiązkowych. Zgodnie z nimi, nowa tarcza zderzakowa powinna zostać poddana kilku próbom, określającym: jej ogólną przydatność i możliwość stosowania, chropowatość jej powierzchni, zgodność z materiałami innych tarcz, odporność na zużycie ścierne, odporność zderzeniową, wytrzymałość i bezpieczeństwo w trakcie użytkowania. Zgodnie z tymi badaniami, tarcza powinna zostać poddana eksploatacji obserwowanej przez okres co najmniej jednego roku. Z badań tych powinien zostać sporządzony odpowiedni raport, dokumentujący m.in. przeprowadzenie testów twardości i chropowatości, testów zgodności z innymi materiałami tarcz, testów odporności na zużycie ścierne itd. Badania zużycia ściernego przeprowadza się poprzez przesuw zetkniętych ze sobą tarcz zderzakowych względem siebie, w zakresie ± 50 mm. Należy przeprowadzić trzy cykle po 1000 przesuwów, odpowiednio dla sił ściskających działających na tarcze o wartości: 100 kN, 150 kN i 250 kN bez wymiany tarcz pomiędzy cyklami. Co ciekawe, nie założono żadnych wartości granicznych, których przekroczenie dyskwalifikowałoby tarczę zderzakową. Jedynym warunkiem, który należy spełnić, jest niepojawienie się złuszczeń, pęknięć czy rozwarstwień. W aneksie opisano również badanie odporności na uderzenia, które przeprowadzić należy poprzez zderzenie ze sobą dwóch pojazdów o masach odpowiednio 90 ton i 80 ton, z prędkością 12 km/h, wyposażonych w zderzaki kategorii A, z badanymi tarczami. Tutaj również jedynym warunkiem, który należy spełnić jest brak jakichkolwiek defektów na powierzchni tarczy po przeprowadzeniu badania. Ostatnią grupą badań opisanych w aneksie są te mające wpływ na bezpieczeństwo poruszającego się taboru pasażerskiego. Zgodnie z nimi, poprzez badania eksploatacyjne lub symulacje komputerowe, należy zbadać poprzeczne przemieszczenia zderzaka w trakcie użytkowania oraz siły pojawiające się w obszarze kontaktu koło-szyna. W przypadku wagonów pasażerskich należy jedynie sprawdzić wartości pojawiających się sił wzdłużnych podczas najeżdżania na siebie wagonów i porównać je do wartości sił przy wykorzystaniu konwencjonalnych tarcz zderzakowych.

2. ZUŻYCIE ORAZ TRWAŁOŚĆ TARCZ ZDERZAKÓW KOLEJOWYCH

Zużywanie się maszyn i ich elementów stanowi jeden z głównych problemów eksploatacji. Problem ten jest wielowymiarowy ze względu na niekorzystny wpływ zużycia na bezpieczeństwo, niezawodność, środowisko naturalne czy ekonomiczne uwarunkowania eksploatacji. W związku z powyższym, jednym z głównych zadań stojących przed inżynierami zajmującymi się zagadnieniami tribologicznymi jest opracowanie metod zwiększających ich trwałość. Ze względu na mnogość rodzajów procesów zużycia (Rys. 18) [6], [9], [15], [16], [18], [38], [43], [48], [65], [91], [106] nie jest to zadanie proste. Co więcej, nierzadko materiały, technologie czy sposoby wytwarzania zwiększające odporność na jakiś rodzaj zużycia mogą powodować drastyczne obniżenie odporności na inny jego rodzaj. Ponadto mechanizmy zużywania się wzajemnie ze sobą oddziałują i mogą potęgować się wzajemnie bądź znosić. Przykładowo korozja chemiczna najczęściej spowoduje wzrost zużycia ściernego ze względu na znaczne pogorszenie się parametrów warstwy wierzchniej elementów będących w kontakcie. Dodatkowo należy również zdawać sobie sprawę z parametrów zewnętrznych mających wpływ na procesy zużywania się materiałów. Zmienne takie jak temperatura, wilgotność, ciśnienie itp. również mogą mieć znaczący wpływ na zużycie. Przykładem może być współpraca dwóch pozostających ze sobą w kontakcie elementów podczas opadów deszczu. Swoiste smarowanie zapewnione przez opady atmosferyczne w sposób zauważalny może ograniczyć zużycie ściernie. W praktyce sytuację taką spotkać można przy współpracy nakładki ślizgowej pantografu pojazdu trakcyjnego z przewodem jezdny sieci trakcyjnej. Ze względu na złożoność przedstawionych mechanizmów zużycia, aspekty zwiększania trwałości są zagadnieniami bardzo skomplikowanymi. Rozwój techniki zmusza jednak konstruktorów i inżynierów do szukania rozwiązań umożliwiających dłuższą, bezpieczniejszą, tańszą i bardziej przyjazną środowisku naturalnemu eksploatację maszyn i ich elementów. Jedną z dziedzin techniki szczególnie narażoną na niedogodności związane ze zużywaniami się elementów jest transport, w tym w szczególności transport szynowy. W związku z ciągłym zwiększaniem prędkości pojazdów oraz masy przewożonych towarów, a także ze względu na ciągłe zwiększanie rewersów obsługowych z przyczyn ekonomicznych, zagadnienia trwałości elementów pojazdów szynowych oraz infrastruktury kolejowej są niezwykle ważnym problemem współczesnej techniki.



Rys. 18 Podział rodzajów zużycia

Potwierdzeniem tego faktu są liczne publikacje naukowe poświęcone zagadnieniom zużycia, zwiększania trwałości oraz niezawodności pojazdów szynowych i ich elementów [3], [4], [10], [13], [83], [84]. Warty podkreślenia jest jednak fakt, że autorzy tego typu badań i publikacji skupiają się praktycznie zawsze jedynie na elementach biegowych pojazdu (zestaw kołowy, koło kolejowe, szyna, wstawka hamulcowa), ewentualnie na elementach odbieraków prądu [4], [70], [72], [73], [90], [107]. Należy zauważyć, że nie są one jedynymi zużywającymi się w pojazdach szynowych elementami, co więcej, zuzywaniu ulegają również inne mogące mieć bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo, jak na przykład zderzaki kolejowe czy urządzenia ciąglowe. W związku z powyższym zagadnienia zwiększania trwałości należy rozpatrywać szerzej oraz podejmować próby stosowania metod obecnie znanych i wykorzystywanych, w obszarach, które do tej pory nie były poddawane głębszym analizom.

W technice występuje wiele metod zwiększania trwałości elementów, które oparte są na zwiększaniu ich odporności na zużycie tribologiczne i nietribologiczne. Najczęstszymi sposobami zwiększania trwałości są metody oparte na minimalizacji zużycia ściernego (poprzez zmianę parametrów warstwy wierzchniej lub nałożenie powłok o odpowiednich właściwościach) oraz zwiększania odporności na korozję. Nierzadko trwałość tę uzyskuje się w wyniku przeprowadzenia jednego procesu technologicznego. Najczęstszymi metodami wykorzystywanymi w tym celu są metody spawalnicze takie jak napawanie i natryskiwanie powłok, tak, aby cechowały się pożądanymi własnościami tribologicznymi. W zagadnieniach tych wykorzystuje się również metody laserowe. Oprócz metod spawalniczych stosuje się również galwanizację, klejenie oraz obróbkę mechaniczną. Coraz częściej, również w transporcie, dostrzegalny jest potencjał w wykorzystywaniu różnego rodzaju materiałów kompozytowych [105], [116], które cechują się korzystnymi własnościami z eksploatacyjnego punktu widzenia, w tym również w zakresie tarcia i zużycia. W zakresie metod bazujących na natryskiwaniu cieplnym stosuje się przede wszystkim technologie oparte na natryskiwaniu płomieniowym, natryskiwaniu z zastosowaniem łuku elektrycznego oraz z zastosowaniem łuku plazmowego [44]. Ponadto w zakresie natryskiwania cieplnego wskazuje się dodatkowo na metody naddźwiękowe, próżniowe i detonacyjne [1]. Natryskiwanie cieplne polega na stopieniu bądź nadtopieniu materiału napawanego podawanego w postaci proszku, pręta lub drutu, który następnie zostaje rozpylony na napawaną powierzchnię i łączy się z nią w sposób mechaniczny lub adhezyjny. W początkowej fazie stosowania tej metody była ona wykorzystywana głównie

do wykonywania powłok antykorozyjnych. Dopiero później zaczęto dostrzegać możliwość tworzenia powłok natryskiwanych cieplnie, cechujących się również korzystnymi własnościami z tribologicznego punktu widzenia. Główną cechą metod mechanicznych i adhezyjnych, jednocześnie odróżniającą je od napawania, jest brak przetopienia materiału podłoża.

Metody bazujące na napawaniu wymuszają konieczność przetopienia materiału podłoża, dzięki czemu podczas tego procesu występuje warstwa materiału podłoża, warstwa przejściowa będąca mieszaniną materiału podłoża i materiału napawanego oraz warstwa napoiu. W praktyce spotyka się bardzo wiele metod napawania różniących się między sobą przede wszystkim sposobem topienia materiału podłoża oraz materiału napawanego. Do głównych metod napawania należy zaliczyć:

- napawanie gazowe;
- napawanie elektrodami otulonymi;
- napawanie metodą TIG;
- napawanie laserowe;
- napawanie plazmowe;
- napawanie łukiem krytym;
- napawanie wybuchowe;
- napawanie tarciove.

Metody napawania stosowane są przede wszystkim do regeneracji elementów, jednakże znajdują one również bardzo częste zastosowanie przy wytwarzaniu powłok, cechujących się pożądanymi własnościami wytrzymałościowymi, tribologicznymi itd. Ze względu na specyfikę metod opartych na napawaniu, która zbliżona jest do specyfiki metod spawania, w praktyce można spotkać wiele problemów związanych z koniecznością przetopienia warstwy podłoża i jej połączenia z materiałem napawanym. Jednakże ze względu na dostępność metod, niewielki koszt procesu oraz trwałość napawanych powłok, napawanie jest powszechnie stosowanym sposobem regeneracji warstw wierzchnich.

Metodami zmiany parametrów powierzchni (w tym zwiększania jej trwałości) niewymagającymi deponowania dodatkowego materiału, są metody oparte na technikach laserowych i elektronowych. Umożliwiają one zmianę parametrów warstw wierzchnich poprzez wykorzystanie wiązki laserowej lub elektronowej, która ze względu na bardzo dużą

energię może powodować pożądane zmiany w materiale podłoża, takie jak hartowanie, odpuszczanie, szkliwienie czy utwardzanie [1], [17].

Jeszcze inną metodą zwiększania trwałości warstw wierzchnich poprzez pokrywanie ich powłokami o korzystnych właściwościach, jest metoda bazująca na galwanizacji [1]. Ze względu na wykorzystanie zjawiska elektrolizy możliwe jest wytworzenie powłok metalicznych na powierzchniach materiału poddanego procesowi, która może się odznaczać zupełnie innymi właściwościami niż materiał podłoża. Metoda ta jest bardzo często wykorzystywana ze względu na sposób prowadzenia procesu galwanizacji, który jest prosty do kontrolowania, bezpieczny, tani oraz relatywnie bezobsługowy.

3. CEL I TEZA PRACY

Zużycie ściernie tarcz zderzakowych oraz ich uszkodzenia są dużym problemem eksploatacyjnym oraz w skrajnych przypadkach mogą powodować znaczne pogorszenie bezpieczeństwa przewożonych ludzi i towarów. Obecnie stosowana metoda, polegająca na okresowym pokrywaniu środkiem smarnym współpracujących powierzchni tarcz, jest rozwiązaniem niedoskonałym, a jego największą i praktycznie jedyną zaletą jest niewielki koszt samego środka i jego aplikacji. W związku z powyższym, wskazany jest dobór i zastosowanie innej metody mogącej zminimalizować zużycie tarcz zderzakowych, która byłaby pozbawiona wad metody stosowanej obecnie. Metoda taka powinna być realizowana przez produkującego bądź naprawiającego zderzak kolejowy w taki sposób, aby eksploatujący nie był zobowiązany do dokonywania obsługi technicznej mającej na celu poprawę trwałości tarcz zderzaków. Dokonana w przeglądzie literatury analiza stanu zagadnienia wskazuje na zasadność przyjęcia następujących założeń w odniesieniu do podjętego tematu pracy:

- Obecnie stosowane rozwiązanie ograniczające zużycie tarcz jest rozwiązaniem niedoskonałym i wskazane jest jego zastąpienie.
- Zwiększenie trwałości tarcz zderzaków kolejowych jest celowe ze względów ekonomicznych, eksploatacyjnych i bezpieczeństwa.
- Wskazane jest zastąpienie obecnie stosowanej metody inną, pozbawioną głównych wad stosowanej obecnie.
- Proces minimalizacji zużycia tarcz zderzakowych powinien być realizowany na etapie wytwarzania, a nie na etapie eksploatacji zderzaka kolejowego.

Na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej oraz przytoczonych założeń, możliwe jest sformułowanie następującej tezy:

Nalóżenie trwałej powłoki o korzystnych własnościach tribologicznych na tarcze zderzakowe jest możliwe i wskazane oraz pozwoli na zwiększenie ich odporności na zużycie ściernie.

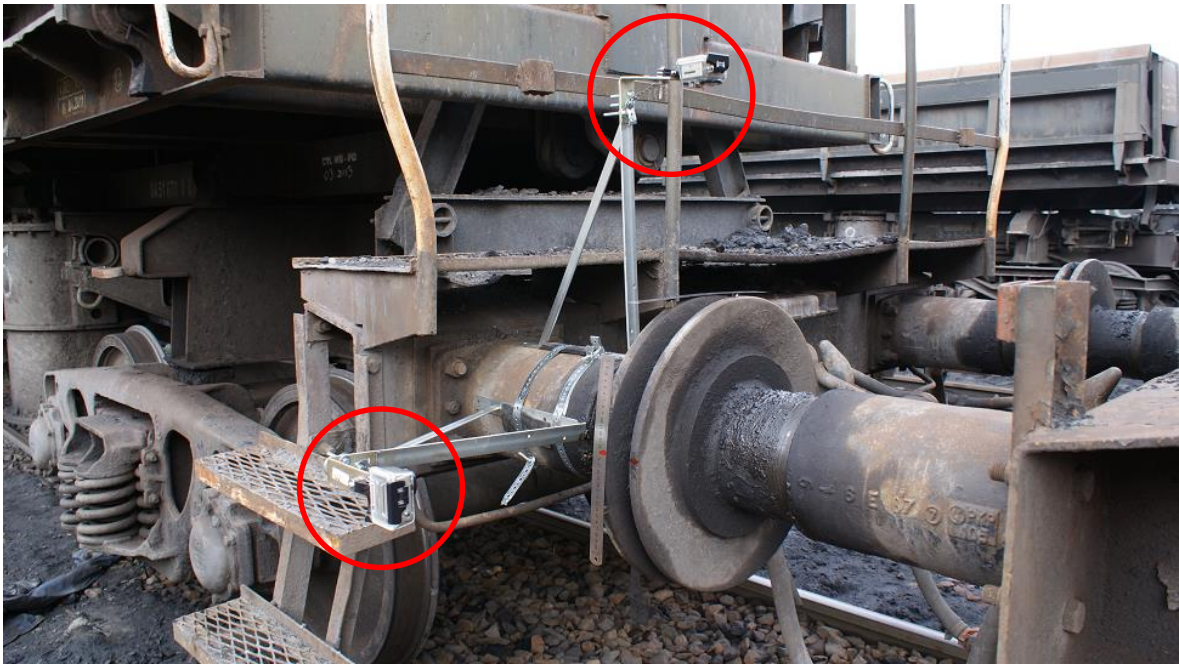
Dla udowodnienia tezy przedstawionej w niniejszej pracy przyjęto następujący jej zakres:

- Przeprowadzenie badań wstępnych umożliwiających określenie sposobu i charakteru współpracy tarcz zderzaków kolejowych w trakcie ich użytkowania.

- Przeprowadzenie badań metalograficznych struktury analizowanych powłok nałożonych na materiał rodzimy.
- Przeprowadzenie badań z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych (MES) w celu określenia parametrów badań stanowiskowych zużycia ściernego.
- Przeprowadzenie badań stanowiskowych zużycia ściernego na próbkach w celu określenia charakteru zużycia analizowanych powłok oraz porównanie ich z metodą stosowaną obecnie.
- Przeprowadzenie badań eksploatacyjnych powłok naniesionych na powierzchnię tarczy zderzakowej w celu pomiaru ich zużycia w warunkach rzeczywistych i odniesienie tych wartości do standardowych tarcz.

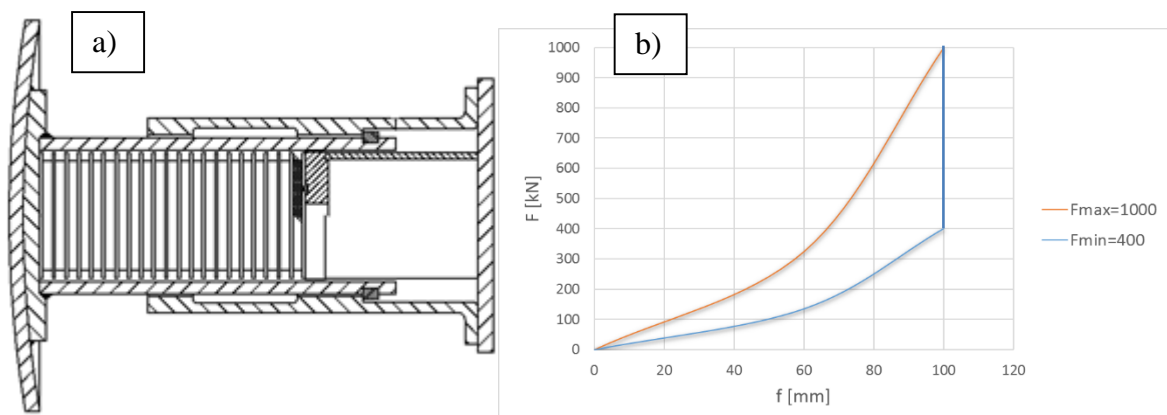
4. BADANIA WSTĘPNE

W celu określenia zakresu współpracy dwóch tarcz zderzakowych w trakcie normalnego użytkowania, niezbędne było przeprowadzenie badań wstępnych. Badania te pozwoliły na określenie zakresu ruchu tarcz w płaszczyźnie poziomej i pionowej, strefy kontaktu tarcz w trakcie eksploatacji czy sił wzdłużnych działających na zderzaki. Wartości te były największe w charakterystycznych momentach użytkowania, tj. podczas pokonywania łuków oraz nabiegania na siebie wagonów w czasie hamowania. W związku z tym, analizę przeprowadzano przede wszystkim dla tych szczególnych sytuacji. Informacje pozyskane w trakcie badań wstępnych były niezbędne w celu określenia rzeczywistych warunków współpracy tarcz zderzakowych, co z kolei pozwoliło na zasymulowanie warunków rzeczywistych w kolejnym etapie badań tj. badań stanowiskowych przeprowadzonych na próbkach. Informacje te to przede wszystkim wartości sił działających na zderzak, co w połączeniu ze znajomością geometrii tarcz pozwoliło na określenie wartości naprężeń kontaktowych występujących na styku dwóch wycinków sfer. Wartości te były w dalszym etapie badań niezbędne do określenia siły dociskającej próbkę do przeciwpróbki w trakcie badań stanowiskowych. Badania wstępne pozwoliły również określić prędkość przesuwu tarcz względem siebie, którą należało w badaniach stanowiskowych odnieść do prędkości przesuwu próbki względem przeciwpróbki. Co więcej, badania wstępne umożliwiły zaobserwowanie i obliczenie rzeczywistej powierzchni kontaktu dwóch tarcz, czyli strefy ich współpracy, co było niezbędną informacją w ostatnim etapie badań, tj. badań eksploatacyjnych, podczas których analizowaną powłokę zabezpieczającą naniesiono już na odpowiednio dużą powierzchnię zewnętrzną tarczy zderzakowej. Pomiary przemieszczeń tarcz zderzaków kolejowych, przeprowadzono rejestrując obraz ich współpracy podczas eksploatacji. W tym celu, na jednym z dwóch pozostających w kontakcie zderzaków sąsiednich pojazdów kolejowych, zamontowano kamery GoPro pozwalające na rejestrację obrazu o rozdzielczości 1920x1080p z prędkością 30 klatek na sekundę. Kamery, których sposób umieszczenia na zderzaku przedstawiony został na Rys. 19, pozwalały na obserwację przemieszczeń tarczy zderzaka kolejowego zarówno w płaszczyźnie poziomej jak i pionowej.



Rys. 19 Sposób umiejscowienia kamer na zderzaku kolejowym

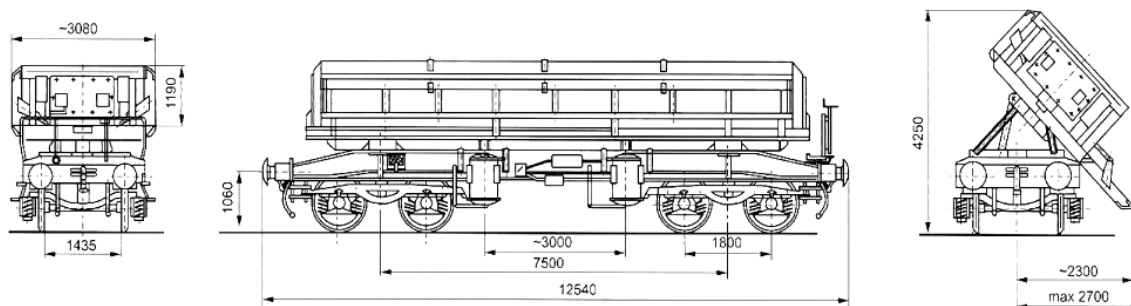
Kamery zamontowano na zderzaku o skoku 105 mm, wyposażonym w amortyzator składający się z pierścieni gumowych z przekładkami stalowymi, którego przekrój i charakterystyka statyczna przedstawiona została na Rys. 20.



Rys. 20 Przekrój oraz charakterystyka statyczna badanych zderzaków

Sąsiedni zderzak, który współpracował z wyposażonym w kamery, posiadał takie same parametry. Do analizy wybrano zderzaki przeznaczone do wagonów towarowych ze względu na największą liczbę pojazdów tego typu będących obecnie w eksploatacji oraz ze względu na możliwie najtrudniejsze warunki, w których są one użytkowane (duże zanieczyszczenie powierzchni tarcz materiałami sypkimi transportowanymi przez wagony). Do badań wybrano konstrukcje, których tarcze cechowały się możliwie najmniejszym

zużyciem, mieszczącym się w przedziałach dopuszczonych przez Dokumentację Systemu Utrzymania. Badane zderzaki zamontowane zostały na próżnych, samowyładowczych wagonach towarowych typu 418V (Rys. 21), o masie własnej równej 27680 kg. Rejestrację prowadzono na niezelektryfikowanym odcinku linii kolejowej kategorii drugorzędnej o 5 klasie technicznej torów i długości ok. 15 km. Badania prowadzono na terenie kopalni piasku, a wybrany wagon przeznaczony do przewozu materiałów sypkich (żwir, tłuczeń, piasek, ziemia) eksploatowany był zgodnie z przeznaczeniem. Warunki te zostały dobrane w celu przeanalizowania pracy zderzaków w możliwie najbardziej niesprzyjających warunkach (wysokie zużycie torowiska, duże zanieczyszczenie smarowanych powierzchni tarcz zderzakowych). Ostatni etap badań, tj. badania eksploatacyjne, prowadzone były na tym samym typie wagonów oraz w tych samych warunkach.

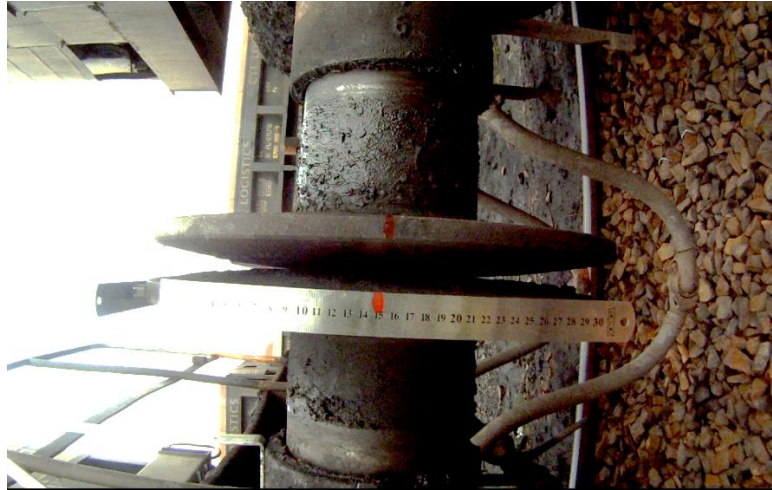


Rys. 21 Czteroosiowy wagon samowyładowczy Dumpcar typu 418 [107]

Na Rys. 22 i Rys. 23 przedstawiono widok z dwóch kamer zamontowanych na badanym zderzaku, pozwalających na rejestrację obrazu pracy tarcz zderzakowych w płaszczyźnie pionowej i poziomej.



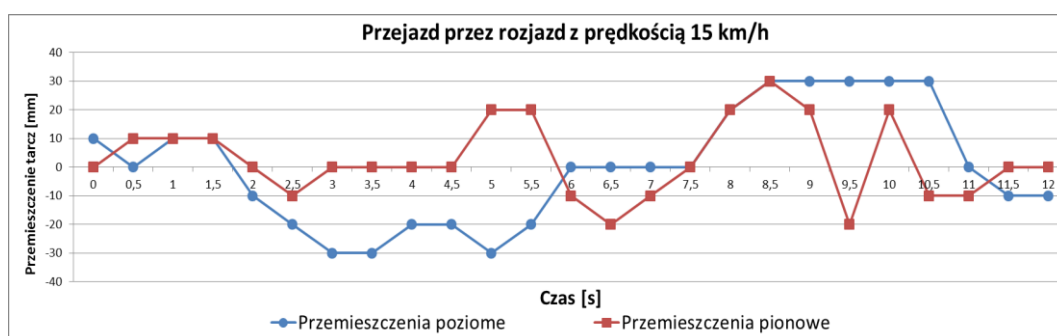
Rys. 22 Widok z kamery umieszczonej nad zderzakiem



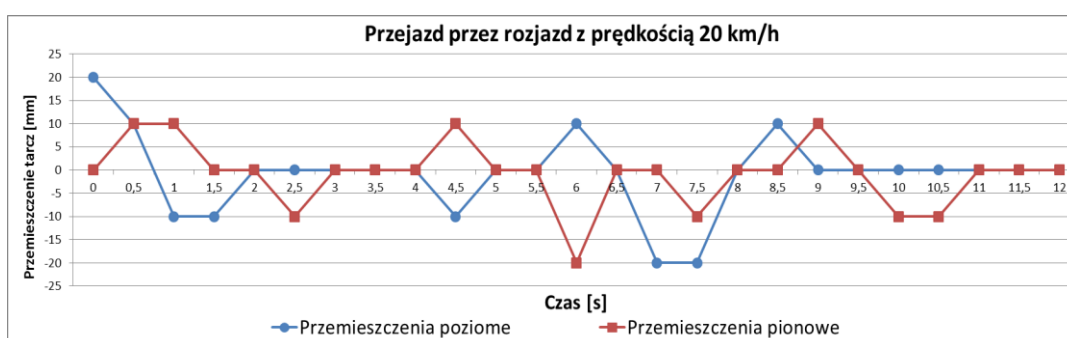
Rys. 23 Widok z kamery umieszczonej z boku zderzaka

Podczas badań zarejestrowano ok. 66 minut filmu obrazującego współpracę zderzaków na każdej z użytych do tego celu kamer, co odpowiadało liczbie ok. 118800 klatek dla jednej kamery. Analizie przemieszczeń tarcz poddano wybrane etapy rejestracji, dla których przemieszczenia były największe. W pierwszej kolejności analizie poddano zarejestrowane przemieszczenia tarcz zderzakowych względem siebie zarówno w płaszczyźnie pionowej jak i poziomej, podczas pokonywania przez tabor rozjazdów z trzema różnymi prędkościami. Były to odpowiednio 15 km/h (jeden przejazd), 20 km/h (dwa przejazdy) oraz 25 km/h (trzy przejazdy). W kolejnym etapie analizy sprawdzono zakres ruchu tulei zderzakowej względem pochwy, co (z wykorzystaniem charakterystyki zderzaka) pozwoliło na wyznaczenie sił wzdłużnych działających na tabor będący w ruchu. W tym przypadku przeanalizowano zarejestrowane fragmenty filmu, w których skok był największy, tj. podczas hamowania, gdzie występowało zjawisko nabiegania na siebie wagonów. Wagony wyposażone w zderzaki poddawane badaniom poruszały się z niewielką prędkością, która eliminowała występowanie nagłych, silnych uderzeń tarcz zderzaków kolejowych o siebie. Zgodnie z normą [30] charakterystykę dynamiczną zderzaka otrzymuje się w wyniku zderzania ze sobą wagonów testowych. W analizowanym przypadku współpraca zderzaków nie generowała tego typu uderzeń, a jedynie powolne „wciskanie” tulei w pochwę wywołane nabieganiem na siebie wagonów podczas jazdy. W związku z powyższym otrzymane wartości przemieszczeń odnoszono do charakterystyki statycznej zderzaka (Rys. 20). Wyniki analiz przemieszczeń (poziomych i pionowych) tarcz, przedstawiono na Rys. 24, Rys. 25, Rys. 26, Rys. 27, Rys. 28 i Rys. 29. Wartości dodatnie dla przemieszczeń poziomych oznaczają wychylenia tarczy w kierunku oddalania się od osi toru, a wartości

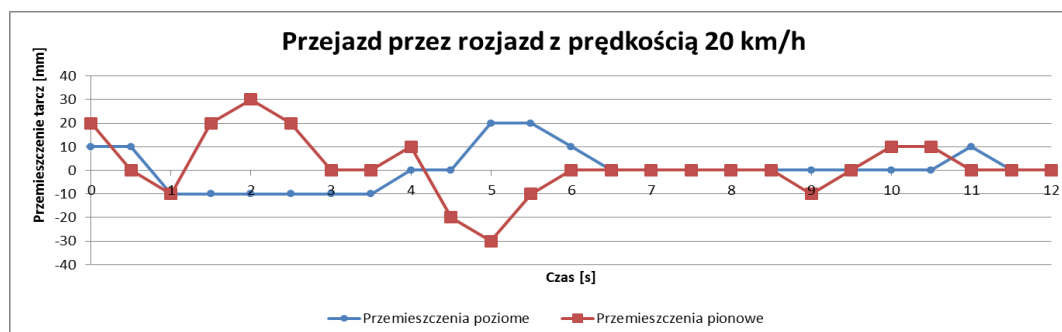
dotąd dla przemieszczeń pionowych oznaczają wychylenia tarczy w kierunku oddalania się od główki szyny. Pierwsze wartości (czas = 0 s.) przedstawione na wykresach odpowiadają wychyleniom na ok. 3 sekundy przed znalezieniem się tarczy zderzaka nad krzyżownicą rozjazdu. Analizie poddano 12 sekund zarejestrowanego filmu dla każdego przejazdu wagonów przez rozjazd, przy czym wartości wychyleń mierzono co pół sekundy. Na Rys. 24 przedstawiono wychylenia tarczy w kierunku poziomym i w kierunku pionowym dla prędkości 15 km/h, na Rys. 25 i Rys. 26 dla prędkości 20 km/h oraz na Rys. 27, Rys. 28 i Rys. 29 dla prędkości 25 km/h



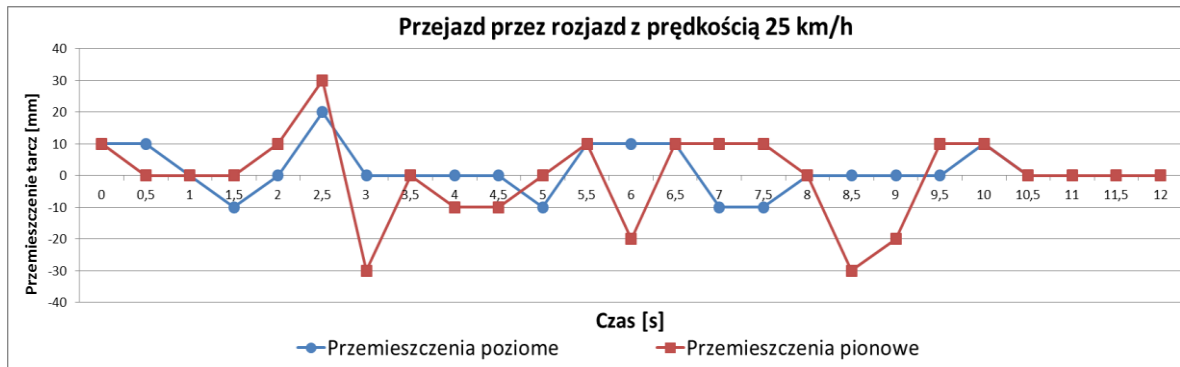
Rys. 24 Przemieszczenia tarcz przy prędkości 15 km/h



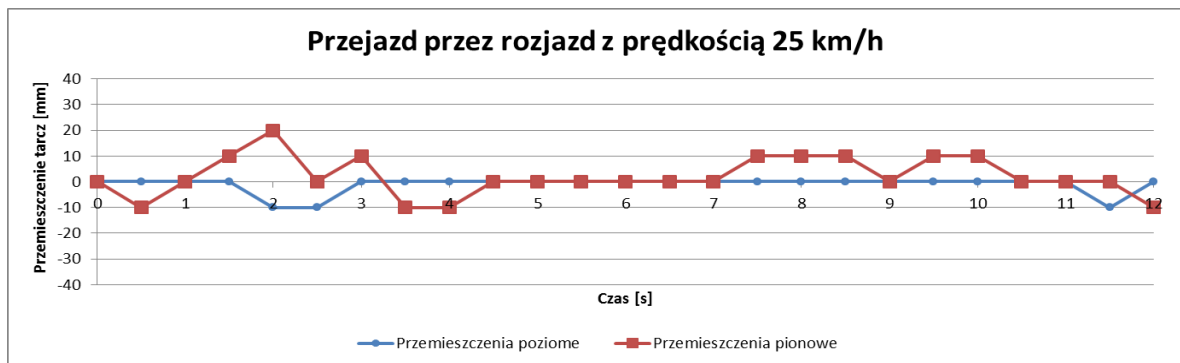
Rys. 25 Przemieszczenia tarcz przy prędkości 20 km/h (pierwszy pomiar)



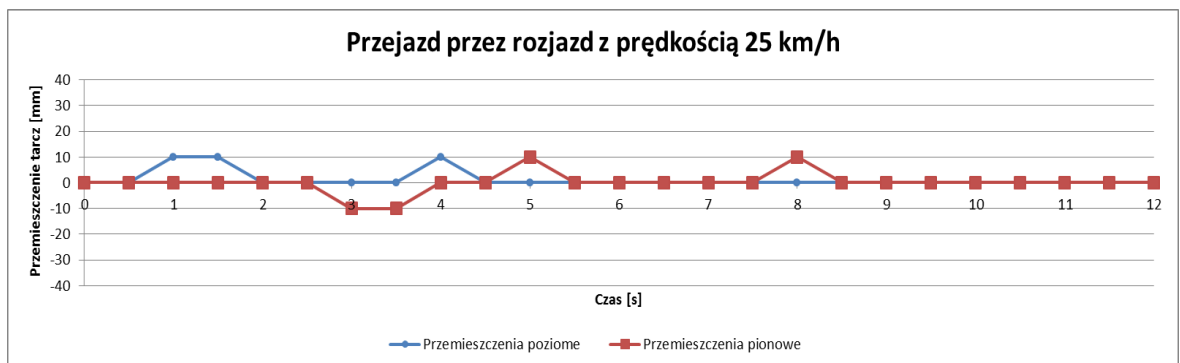
Rys. 26 Przemieszczenia tarcz przy prędkości 20 km/h (drugi pomiar)



Rys. 27 Przemieszczenia tarcz przy prędkości 25 km/h (pierwszy pomiar)



Rys. 28 Przemieszczenia tarcz przy prędkości 25 km/h (drugi pomiar)



Rys. 29 Przemieszczenia tarcz przy prędkości 25 km/h (trzeci pomiar)

Z Rys. 24 - Rys. 29 wynika, że maksymalne przemieszczenie (poziome i pionowe) tarcz zderzakowych względem siebie nie przekroczyło 30 mm niezależnie od prędkości i kierunku wychylenia tarczy. Pozwala to przypuszczać, że największemu zużyciu wskutek tarcia o siebie powierzchni zewnętrznych tarcz zderzakowych podlega centralna część tarczy o kształcie koła i średnicy ok. 60 mm. Należy mieć jednak na uwadze, że wraz ze zwiększeniem zużycia się tarcz zderzakowych obszar ten ulega powiększaniu, niwelując krzywiznę o normatywnym promieniu. Zaobserwowano również, że zakresy przemieszczenia tarcz są do siebie podobne niezależnie od prędkości pokonywania rozjazdu,

co sugeruje, że dla przyjętych warunków, prędkość pojazdów nie była najistotniejszym parametrem mającym wpływ na wielkość przemieszczeń tarcz zderzakowych względem siebie. Na podstawie analizy zarejestrowanego materiału filmowego, dla przedstawionych warunków (próżne wagony typu 418V, o masie własnej równej 27680 kg, poruszające się z prędkością maksymalną ok. 40 km/h) można było zaobserwować, że zakres ruchu wzdłużnego tulei wewnątrz pochwy zderzakowej nie przekroczył 50 mm, a przez zdecydowaną większość czasu mieścił się w granicach 0 – 30 mm. Odnosząc powyższe wartości do charakterystyki statycznej badanego zderzaka można stwierdzić, że siły wzdłużne działające na zderzak w opisywanych warunkach nie przekroczyły wartości maksymalnej na poziomie ok. 250 kN, a w zdecydowanej większości przypadków mieściły się w zakresie od 0 kN do 150 kN. Na podstawie przeprowadzonych badań możliwe było również wyznaczenie prędkości poruszania się tarcz zderzakowych względem siebie. Po przeanalizowania fragmentów filmu, na których zarejestrowano najgwałtowniejsze i najbardziej dynamiczne wymuszenia (przejazd przez rozjazdy analizowany wcześniej) wyznaczono maksymalną wartość prędkości poruszania się tarcz zderzakowych (ok. 1,2 m/s) oraz jej średnią wartość (ok. 0,34 m/s) dla przemieszczeń pionowych oraz maksymalną wartość prędkości (ok. 0,8 m/s) i jej średnią (ok. 0,21 m/s) dla przemieszczeń poziomych.

5. DOBÓR MATERIAŁU NA POWŁOKĘ TARCZY ZDERZAKOWEJ ORAZ SPOSOBU JEJ NAKŁADANIA

Przed przystąpieniem do dalszego etapu badań, konieczne było wybranie metody pozwalającej na optymalne pokrycie powłoką zabezpieczającą tarczy zderzaka oraz dobór parametrów samej powłoki. Po dokonaniu przeglądu literatury [1], [2], [44], [56], [57] oraz w wyniku praktycznej analizy metod stosowanych obecnie w celu pokrywania elementów maszyn powłokami z innych materiałów, jako metodę pokrycia tarcz zderzakowych wybrano napawanie laserowe. Metoda napawania laserowego polegająca na laserowym stopieniu materiału dodatkowego w postaci drutu lub proszku oraz częściowym nadtopieniu podłoża jest metodą cechującą się szeregiem zalet przy zastosowaniu w pokryciu tarcz zderzakowych. Metoda napawania laserowego pozwoliła na trwałe pokrycie tarczy zderzakowej oraz próbek, poddanych dalszym badaniom, powłoką materiału pozwalającą na zmniejszenie zużycia ściernego oraz zwiększenie trwałości. Ponadto, powłoka ta, ze względu na sposób jej nakładania, pozwoliła uniknąć niebezpieczeństwa odpryskiwania jej elementów, w trakcie dynamicznych zderzeń tarcz zderzakowych. Metoda napawania laserowego wybrana została spośród innych metod trwałego tworzenia powłok na materiałach metalicznych, ze względu na:

- Możliwość nakładania powłoki z materiałów w znacznym stopniu różniących się pod względem składu chemicznego, w stosunku do materiału podłoża, co było szczególnie istotne w przypadku tarcz zderzaków kolejowych.
- Niewielki wpływ zjawisk termicznych na materiał podłoża, ze względu na bardzo wąską strefę wpływu ciepła.
- Bardzo wysoką jakość napoin, charakteryzującą się drobnoziarnistą strukturą.
- Możliwością kontroli składu chemicznego napoiny, poprzez kontrolę udziału materiału podłoża w napoinie.
- Możliwość nakładania powłok o niewielkiej grubości (ok. 0,1 mm).

Właściwości napawania laserowego przedstawione powyżej, zwłaszcza wysoka wartość gęstości mocy wykorzystywanej w tej metodzie, która pozwala w bardzo znaczący sposób ograniczyć oddziaływanie cieplne na podłoże, zminimalizować naprężenia i odkształcenia spawalnicze, a także fakt, że metoda napawania laserowego cechuje się wyjątkowo małą obecnością materiału podłoża w napoinie (od 5% do 10%) [56] okazały się przeważającymi

w kwestii wyboru metody nakładania powłoki zwiększającej trwałość tarcz zderzaków kolejowych.

Materiał powłoki, która powinna być nałożona na tarcze zderzaków kolejowych, w celu zwiększenia ich trwałości oraz zmniejszenia zużycia, musiał spełniać kilka założonych kryteriów. Oczywistym było, że materiał taki powinien cechować się odpowiednimi właściwościami ślizgowymi, jednak oprócz tego powinien spełniać jeszcze kilka warunków. Materiał powłoki powinien odznaczać się właściwościami odpornościowymi na korozję, ze względu na charakter pracy tarcz zderzaków kolejowych oraz negatywny wpływ korozji ich powierzchni na wzajemną współpracę. Ponadto, zastosowanie powłoki powinno być ekonomicznie uzasadnione, a co za tym idzie opierać się na niedeficytowych materiałach oraz niekosztownych technologiach ze względu na ewentualną skalę zastosowań w przypadku eksploatowanych zderzaków kolejowych. W związku z dużymi siłami ściskającymi działającymi na tarcze zderzakowe, występującymi w trakcie normalnego użytkowania (zgodnie z przeprowadzonymi wcześniej badaniami wstępnymi), zakładana powłoka musiała również cechować się odpowiednią twardością i wytrzymałością. Co więcej, zastosowana powłoka musiała być możliwa do nałożenia na powierzchnię tarczy zderzakowej z wykorzystaniem powszechnie stosowanych metod, w szczególności poprzez napawanie laserowe. W związku z powyższym, w celu maksymalnego spełnienia założonych kryteriów oraz w wyniku przeprowadzonej analizy literaturowej, jako powłoki mogące mieć zastosowanie w analizowanym rozwiązaniu przyjęto stopy na osnowie miedzi, w szczególności brązy. Cechują się one korzystnymi własnościami ślizgowymi połączonymi z dobrymi właściwościami mechanicznymi wynikającymi z ich niejednorodnej struktury oraz obecności w stopie fazy o małej wytrzymałości na ścinanie. Brązy były i są wykorzystywane od wielu lat jako metaliczne materiały ślizgowe i z powodzeniem znajdują zastosowanie w wielu obszarach techniki, w tym również w transporcie [32], [42], [65], [68]. Po dalszej analizie, ze względu na kompromis pomiędzy dobrymi własnościami ślizgowo-mechanicznymi, a dostępnością i kosztem materiału, do badań stanowiskowych przeprowadzonych na próbkach wytypowano brąz aluminiowy oraz brąz manganowy. Brązy aluminiowe (znacznie tańsze od cynowych) cechują się dobrymi właściwościami ślizgowymi oraz dużą wytrzymałością i stosowane są tam, gdzie występują duże obciążenia [65], [117]. Ponadto, cechują się bardzo dużą odpornością zmęczeniową oraz według badań opisanych w [73] ich zużycie ściernie jest niewielkie w porównaniu z innymi, podobnymi materiałami. Co więcej, zgodnie z badaniami zużycia ściernego z wykorzystaniem tarczy

i trzpienia, przeprowadzonych przez Autora i opisanych w [73], wywnioskować można bardzo dobre właściwości zwiększające trwałość na zużycie ściernie stali, poprzez pokrycie jej powłoką z brązu aluminiowego. Naniesienie powłoki z brązu na element stalowy ma ogromną zaletę w porównaniu do zastosowania elementu w całości wykonanego z brązu (np. przekładki zmniejszające tarcie), ponieważ eliminuje problem kruchości, który w przypadku powłok o odpowiedniej grubości, praktycznie nie występuje. Powłoki wykonane z brązów aluminiowych posiadają również właściwości zabezpieczające podłoże przed czynnikami korozyjnymi [33]. Brąz manganowy, wytypowany również do badań stanowiskowych, cechuje się zwiększoną wytrzymałością brązu na rozciąganie, przy jednoczesnym obniżeniu przewodności elektrycznej, co nie ma jednak znaczenia przy zastosowaniu na powierzchni tarczy zderzakowej. W związku z powyższym, do dalszych badań wybrano brąz aluminiowy o oznaczeniu CuAl9Fe3 oraz brąz aluminiowo-manganowy (nazywany w dalszej części pracy manganowym) o oznaczeniu CuMn11Al8Fe3Ni3. W związku z tym, stopiwo zastosowane w procesie napawania cechowało się własnościami przedstawionymi w Tab. 2.

Tab. 2 Parametry brązów wybranych do badań

Oznaczenie stopiwa	Własności mechaniczne			Rodzaj analizy	Stężenie pierwiastków w % masowych				
	R _m [MPa]	A ₁₀ [%]	HB		Cu	Al	Fe	Mn	Ni
CuAl9Fe3	550	12	100	Kontrolna	89.83	8.8	1.05	0.12	0.19
	÷ 600		÷ 120	Według EN 1982	78÷90	8÷11	0÷5.5	0÷2.5	0÷5.5
CuMn11Al8Fe3Ni3	630	18	150	Kontrolna	78.28	6.27	1.66	11.94	1.52
				Według EN 1982	68÷77	7÷9	2÷4	8÷15	1.5÷4.5

Analiza kontrolna prowadzona była na stołowym spektrometrze optycznym emisyjnym Foundry-Master Compact 01L00113. Pomiar składu chemicznego polegał na wypaleniu ośmiu prób na materiale litym, po czym, odrzucając dwa skrajne wyniki, z sześciu obliczono średnią arytmetyczną.

Napoiny wykonano na powierzchni zewnętrznej wałka ze stali S355J2 (powszechnie wykorzystywanej na tarczy zderzaków kolejowych [30]) i średnicy zewnętrznej 38 mm tak,

aby możliwe było przygotowanie próbek wykorzystanych w badaniach stanowiskowych zużycia ściernego. Skład chemiczny stali S355J2 w stanie dostarczenia (otrzymany w wyniku przeprowadzonej kontrolnej analizy przy użyciu spektroskopu ARL 2460) przedstawiono w Tab. 3.

Tab. 3 Skład chemiczny stali S355J2

Oznaczenie stali	Rodzaj analizy	Stężenie pierwiastków w % masowych									
		C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Al	Fe
S355J2	Kontrolna	0.17	1.05	0.20	0.015	0.011	0.17	0.13	0.10	0.02	reszta
	Według EN 10025-2	≤ 0.2 2	≤ 1.60	≤ 0.55	≤ 0.03	≤ 0.03	≤ 0.55	≤ 0.3	≤ 0.3	≤ 0.02	reszta

Na podstawie przeprowadzonej analizy składu chemicznego wyznaczono (z wykorzystaniem empirycznego wzoru (7) opracowanego przez Międzynarodowy Instytut Spawalnictwa [62], [111]) równoważnik węgla CEV badanej stali, co pozwoliło na ocenę spawalności analizowanego materiału.

$$CEV = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} \quad (7)$$

Gdzie: %C, %Mn, %Ni, %Cu, %Cr, %Mo, %V – stężenie pierwiastków w % masowych

Po podstawieniu do wzoru (7) wartości stężeń pierwiastków w % masowych uzyskanych w wyniku kontrolnej analizy spektroskopowej otrzymano:

$$CEV = 0,17 + \frac{1,05}{6} + \frac{0,1+0,17}{15} + \frac{0,13}{5} \approx 0,39 \quad (8)$$

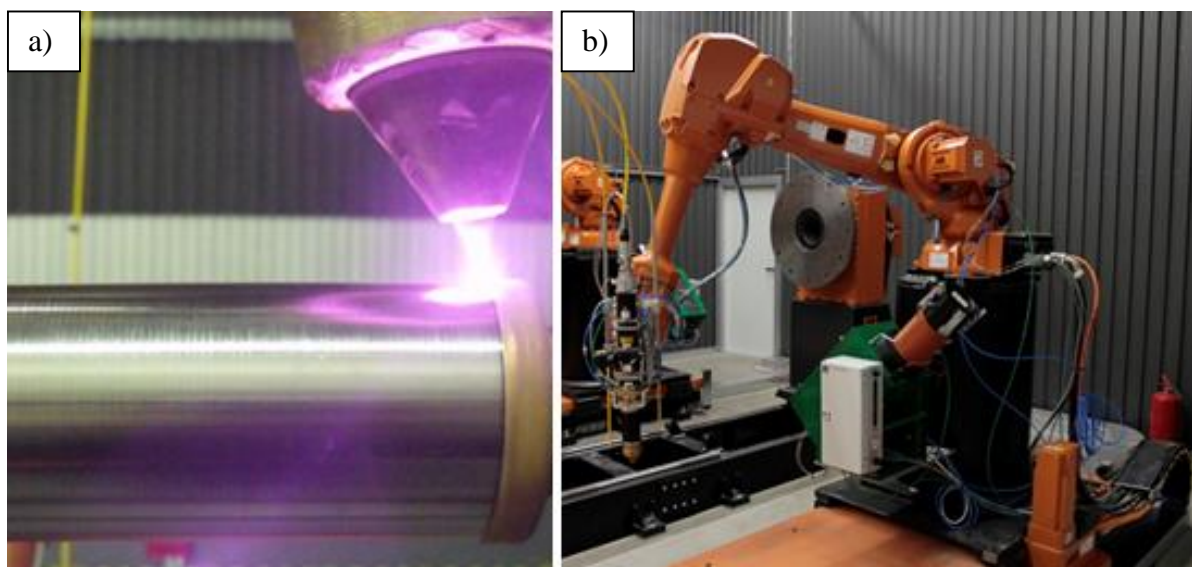
Wartość CEV wynosząca ok. 0,39 oznacza, że stal S355J2 w stanie dostarczenia cechowała się dobrą spawalnością. Wartość ta znajduje potwierdzenie również w innych opracowaniach naukowych dotyczących tej stali [58].

Podstawowe własności mechaniczne stali S355J2 poddanej procesowi napawania laserowego przedstawiono w Tab. 4.

Tab. 4 Własności mechaniczne stali S355J2

Oznaczenie stali	Wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]	Min. granica plastyczności R_{eH} [MPa]	Wydłużenie minimalne A_5 [%]	Twardość HB	Minimalna praca złamania [J] (-20°C)
S355J2	470÷630	355	15	146÷187	27

Zastosowane powłoki brązów nakładane były w postaci proszkowej, ze względu na korzyści wynikające z tego typu sposobu nanoszenia, który cechuje się zdecydowanie większą dokładnością i jakością, niż w przypadku stosowania materiału dodatkowego w postaci drutu [57]. Proces napawania prowadzono na zrobotyzowanym stanowisku, wyposażonym w roboty przemysłowe ABB oraz laser diodowy dużej mocy HPDL LDF 4000-30 LaserLine o mocy maksymalnej 4 kW. Widok stanowiska oraz przebieg procesu napawania laserowego powierzchni zewnętrznej wałka stalowego przedstawiono na Rys. 30.



Rys. 30 Widok stanowiska oraz procesu napawania

Wiązkę laserową transmitowano z generatora laserowego HDPL do głowicy ogniskującej CoaxPowerline wyprodukowanej przez Instytut Fraunhofer za pomocą światłowodu o średnicy rdzenia 1000 μm . Proszki (CuAl9Fe3 oraz CuMn11Al8Fe3Ni3) podawano bezpośrednio do jeziora napoiny w strumieniu argonu, jako gazu transportującego. Podobnie, do osłony obszaru napawania zastosowano nadmuch argonu o wysokiej czystości (Ar 5.0) poprzez dyszę cylindryczną. W trakcie napawania powierzchni zewnętrznej wałka, głowica laserowa ustawiona była pionowo i prostopadle do osi wałka, który wykonywał ruch

obrotowy, a głowica przemieszczała się zadaną, stałą prędkością liniową. W taki sposób wykonano napoiny zakładkowe na całej powierzchni zewnętrznej wałka stalowego. Szczegółowe parametry procesu napawania przedstawione zostały w Tab. 5.

Tab. 5 Parametry procesu napawania laserowego

		Brąz aluminiowy/brąz manganowy
Moc	[W]	2100
Prędkość liniowa	[mm/s]	15
Podawanie proszku	[g/min]	15
Gaz podający proszek	[l/min]	15
Gaz osłonowy	[l/min]	10
Skok	[mm]	1,6
Światłowód	[μm]	1000

Po wykonaniu napoin wałki stalowe z powłoką pocięto i przygotowano próbki w postaci pierścieni do dalszych badań metalograficznych, tribologicznych oraz pomiarów twardości.

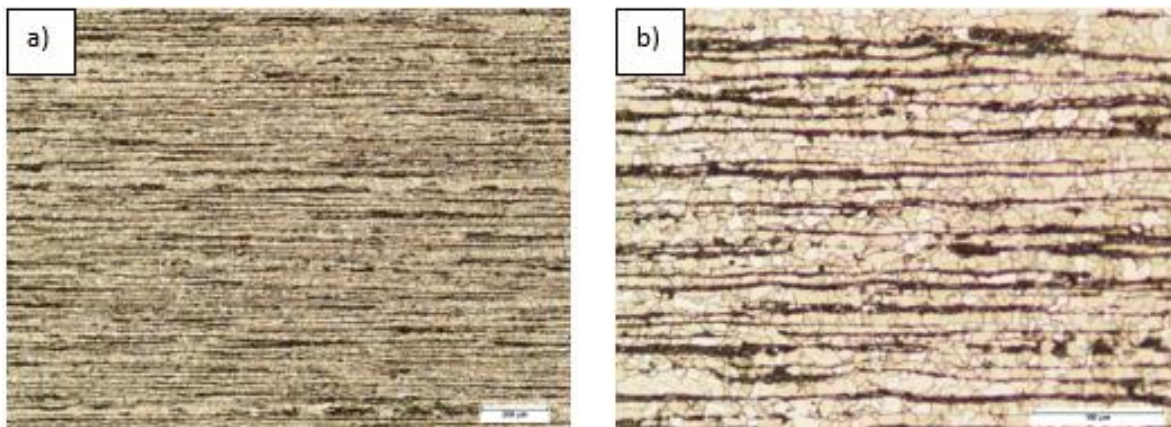
6. BADANIA METALOGRAFICZNE POWŁOKI

6.1 Metodyka badań metalograficznych

Badania struktury przeprowadzono metodami mikroskopii świetlnej i skaningowej na próbkach ze stali S355J2 w stanie dostarczenia oraz po napawaniu proszkiem brązu aluminiowego oraz proszkiem brązu manganowego. Obserwacje metalograficzne przy użyciu mikroskopu świetlnego wykonano na wybranych zglądach wzdłużnych i poprzecznych wykonanych z próbek stali w stanie dostarczenia oraz po napawaniu laserowym proszkami CuAl9Fe3 i CuMn11Al8Fe3Ni3 zarówno w stanie nietrawionym jak i po trawieniu. Przygotowanie zglądów do badań obejmowało wycięcie fragmentów próbek, zatopienie ich na gorąco z wykorzystaniem urządzenia SimpliMet 3000 firmy Buehler (parametry inkludowania: temperatura 300°C , ciśnienie zatapiania 300 bar, czas grzania 3 minuty) oraz procedury szlifowania na papierach ściernych o gradacji od 220 do 2000 i polerowania mechanicznego w zawieszinach diamentowych o wielkości ziarna od $9\ \mu\text{m}$ do $1\ \mu\text{m}$. Próbki do obserwacji mikrostruktury stali trawiono w odczynniku Adlera (ASTM E407) zawierającym 3 g chlorku miedziowo-amonowego, 25 ml wody destylowanej, 50 ml kwasu solnego i 15 g chlorku żelazowego. Natomiast trawienie próbek napawanych powłokami brązu aluminiowego i manganowego wykonano w odczynniku zawierającym 2 g dwuchromianu potasu $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ i $100\ \text{cm}^3$ wody destylowanej w temperaturze pokojowej. W obu przypadkach czasy trawienia każdej próbki dobierano indywidualnie z przedziału od 20 do 120 sekund. Obserwacje zglądów po trawieniu realizowano na mikroskopie świetlnym Olympus GX71, wyposażonym w oprzyrządowanie umożliwiające elektroniczny zapis dokumentacji badań przy powiększeniach od 50 do 200x. Obserwacjom w skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM) poddano zglądy metalograficzne poprzeczne pobrane z próbek stali po napawaniu laserowym proszkami brązu aluminiowego oraz manganowego. Obserwacje mikrostruktury wykonano przy użyciu mikroskopu skaningowego typu EVO MA10 firmy Zeiss. Dodatkowo wykonano mikroanalizę składu chemicznego stali S355J2 pokrytej brązem aluminiowym i manganowym w procesie napawania laserowego za pomocą spektrometru EDS Bruker XFlash 5010 sprzężonego komputerowo z mikroskopem elektronowym.

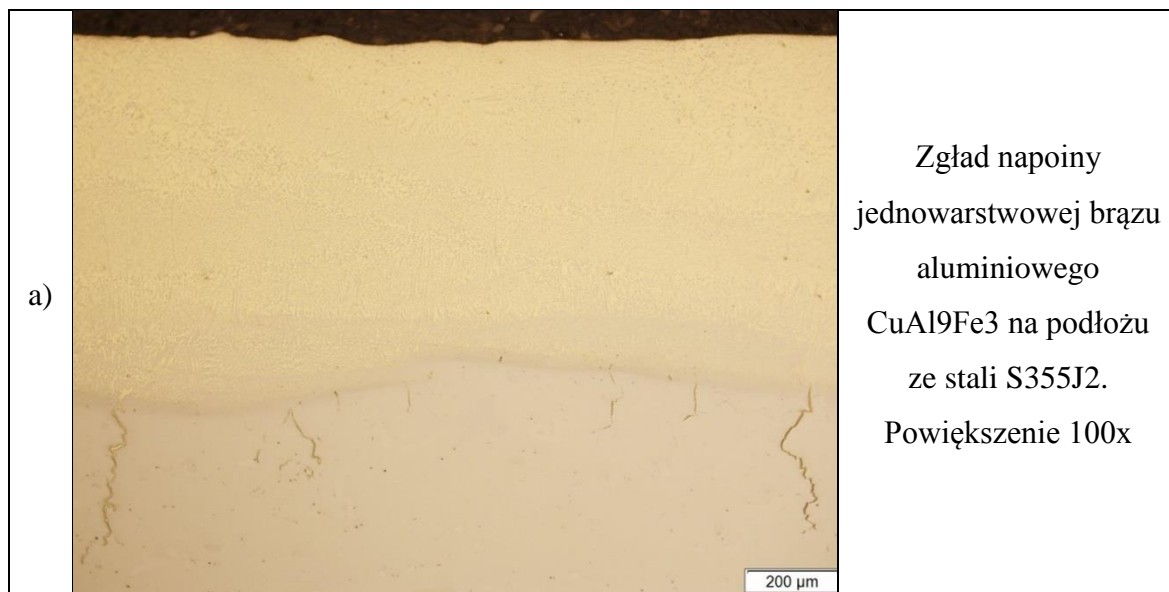
6.2 Wyniki badań metalograficznych oraz ich analiza

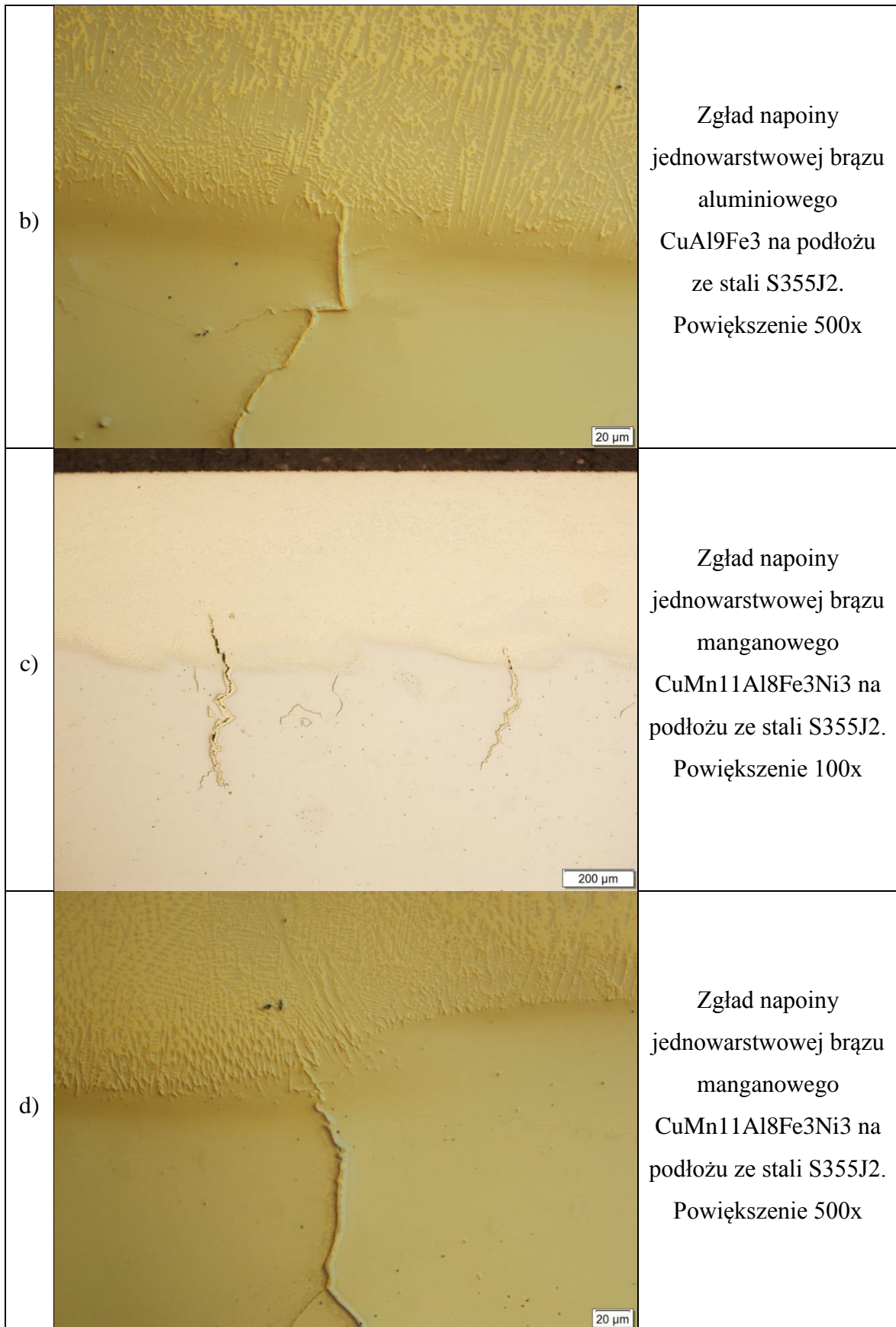
W pierwszej kolejności badaniu poddano zgląd otrzymany z próbki stalowej niepoddanej procesowi napawania laserowego. Badany materiał w stanie dostarczenia wykazuje charakterystyczną, pasmową strukturę ferrytyczno-perlityczną (Rys. 31).



Rys. 31 Zgląd wykonany z próbki stalowej niepokrytej żadną powłoką w powiększeniu 50x (a), oraz 200x (b), trawienie Adler, zgląd wzdłużny

Na Rys. 32a przedstawiono zgląd wykonany z próbki pokrytej brązem aluminiowym w powiększeniu 100 razy, natomiast na Rys. 32b ten sam zgląd w powiększeniu 500x. Na Rys. 32c przedstawiono zgląd wykonany z próbki pokrytej brązem manganowym w powiększeniu 100x, natomiast na Rys. 32d ten sam zgląd w powiększeniu 500x.

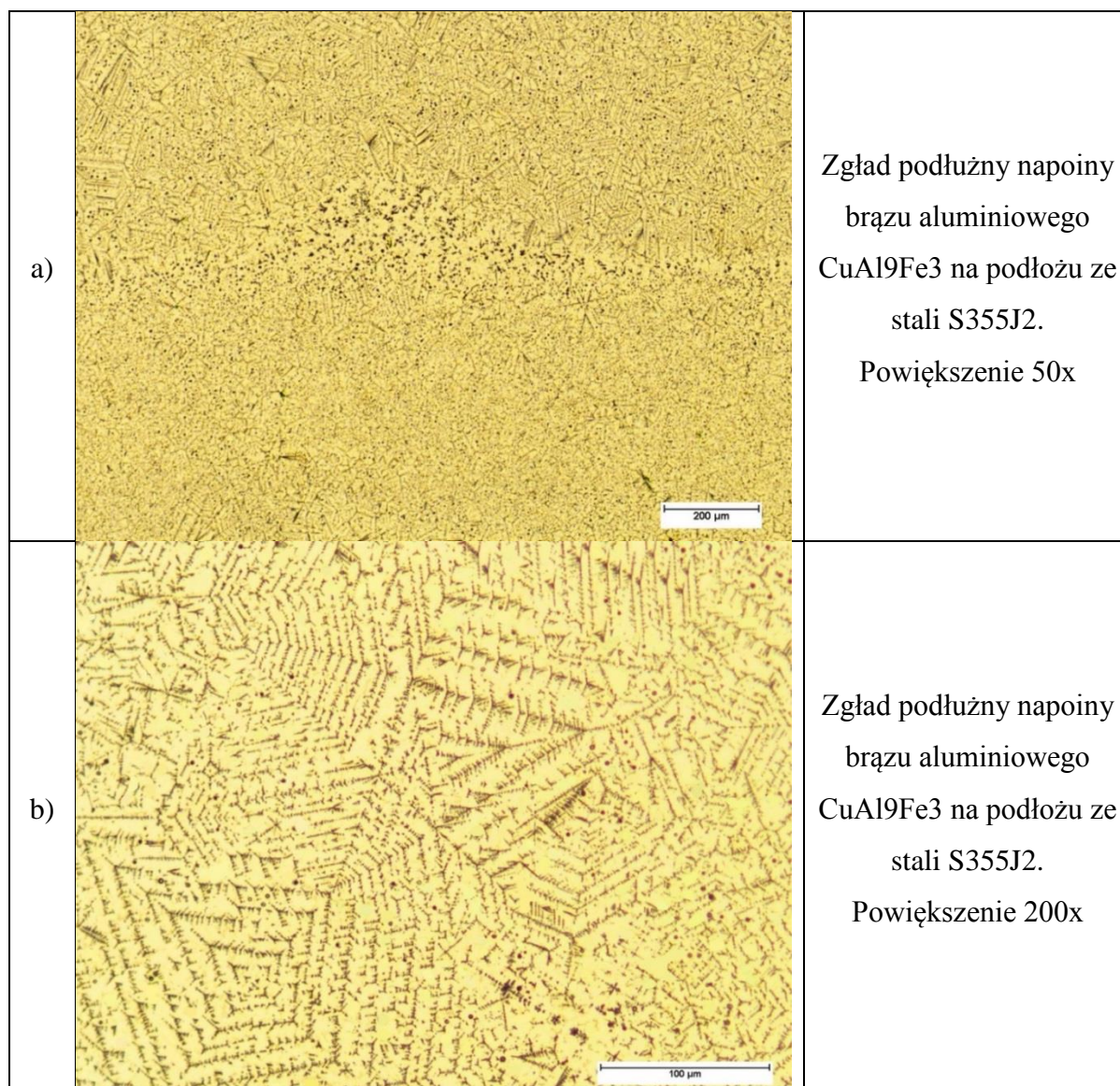


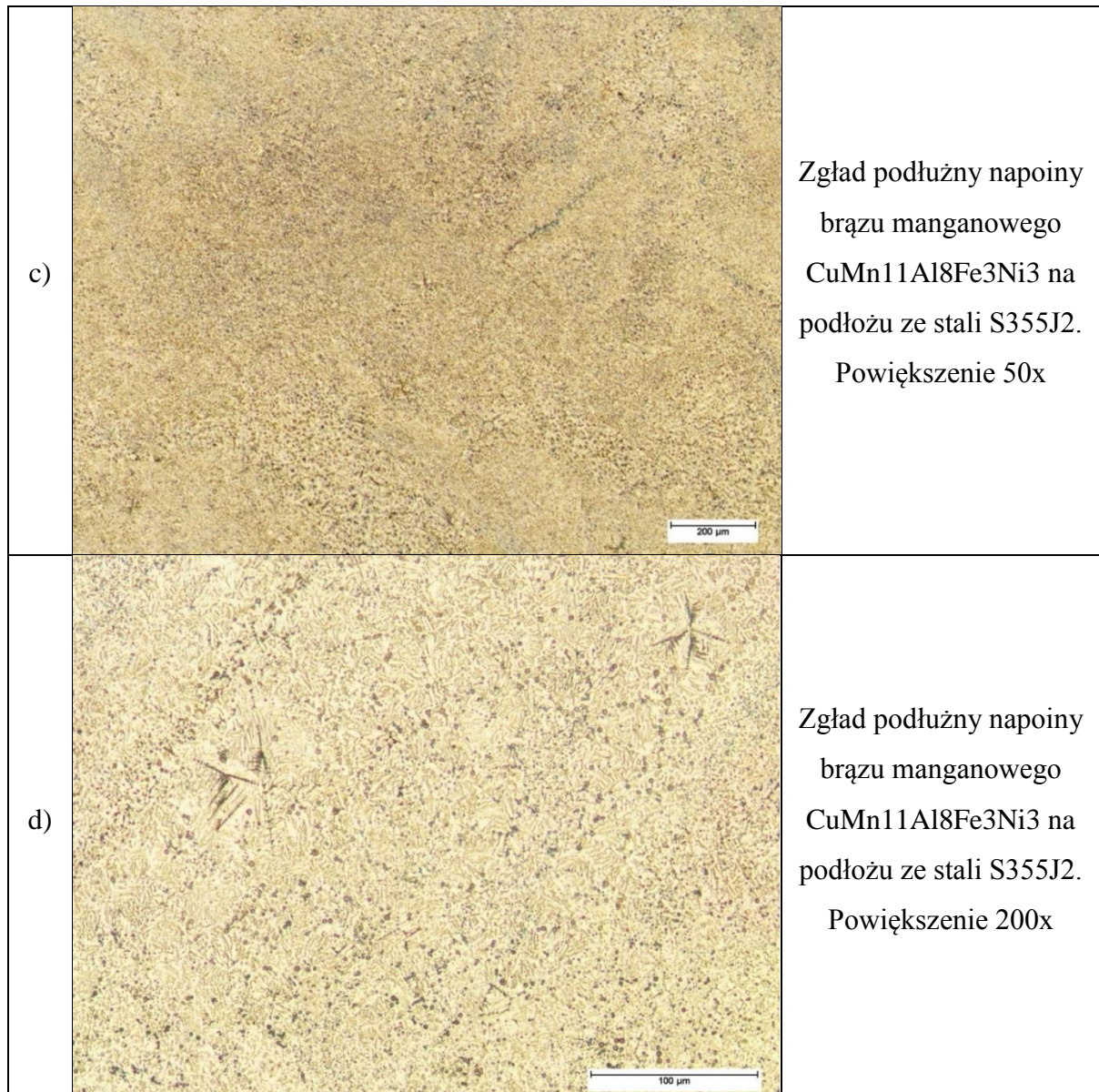


Rys. 32 Zgłady napoin jednowarstwowych brązu aluminiowego i manganowego

Na Rys. 32 zaobserwować można (zarówno w przypadku napoiny z brązu aluminium (rys. a i b) jak i manganowego (rys. c i d)) występowanie niewielkich i nielicznych wtrąceń niemetalicznych, głównie tlenków glinu. Zarówno w jednym jak i w drugim przypadku ujawniono występowanie w strefie wpływu ciepła (SWC) licznych pęknięć, prostopadłych do linii wtopienia o długościach ok. 200 μm . Występowanie pęknięć spowodowane jest najprawdopodobniej brakiem podgrzania materiału stalowego, co może być wskazane przy wykorzystywaniu stali niskowęglowych takich jak S355J2.

Analizie poddano również zglądy podłużne pobrane z próbek pokrytych brązem CuAl9Fe3 oraz CuMn11Al8Fe3Ni3 . Na Rys. 33 przedstawiono analizowane zglądy. Na Rys. 33a przedstawiono zgląd brązu aluminium w powiększeniu 50x, na Rys. 33b ten sam zgląd w powiększeniu 200x natomiast na Rys. 33c zgląd pobrany z próbki pokrytej powłoką z brązu manganowego w powiększeniu 50x oraz 200x (Rys. 33d).





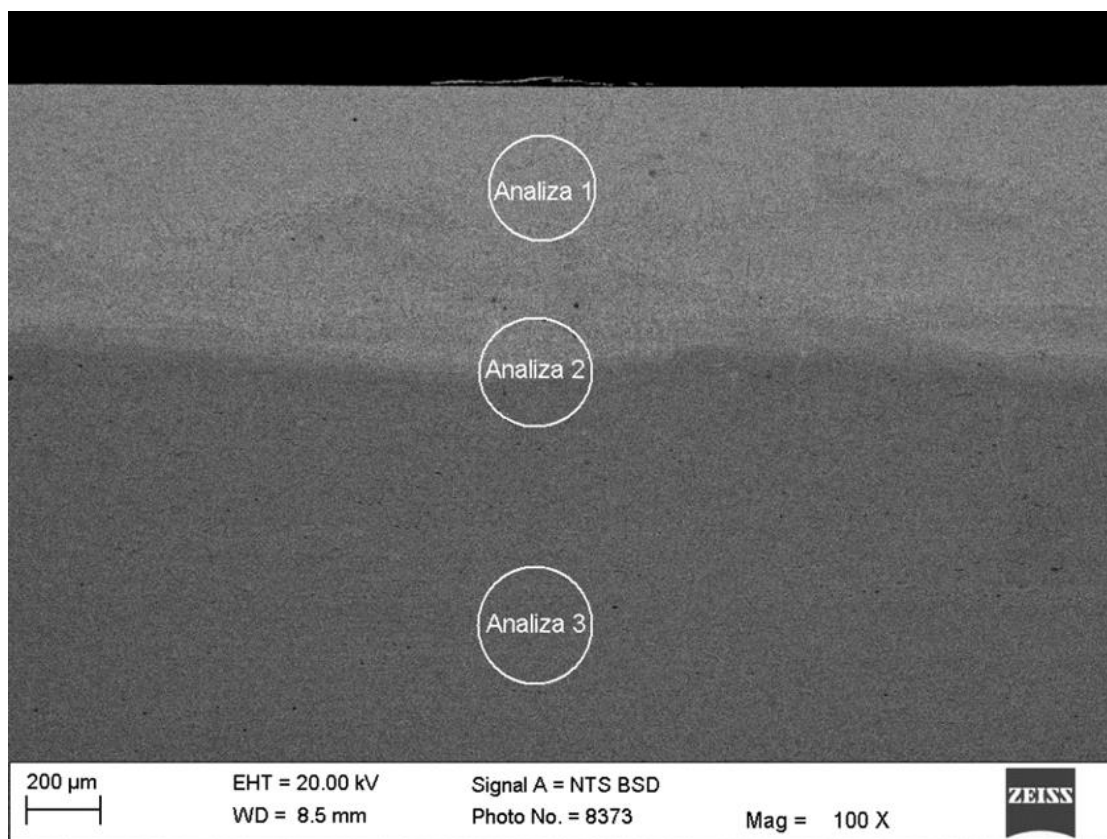
Rys. 33 Zgłady podłużne napoin brązu aluminiowego i manganowego

Na Rys. 33 a i b zaobserwować można występowanie niewielkich wtrąceń niemetalicznych, głównie tlenków Al. Na rysunkach tych ujawniono również charakterystyczną dendrytyczną strukturę brązu aluminiowego CuAl9Fe3 występującą w obszarze środkowym napoiny składającą się z jasnych kryształów roztworu stałego α , ciemnych pól eutektoidu ($\alpha+\gamma_2$) oraz drobnych wydzieleni fazy żelazowej.

Na Rys. 33 c i d zaobserwować można strukturę brązu manganowego CuMn11Al8Fe3Ni3, która w znaczący sposób różni się od struktury brązu CuAl9Fe3. Dendrytyczna struktura nie jest tutaj widoczna, natomiast ze względu na zawartość manganu w granicach 12% dostrzegalna jest struktura roztworu stałego γ . Na przedstawionych zgładach ujawniono

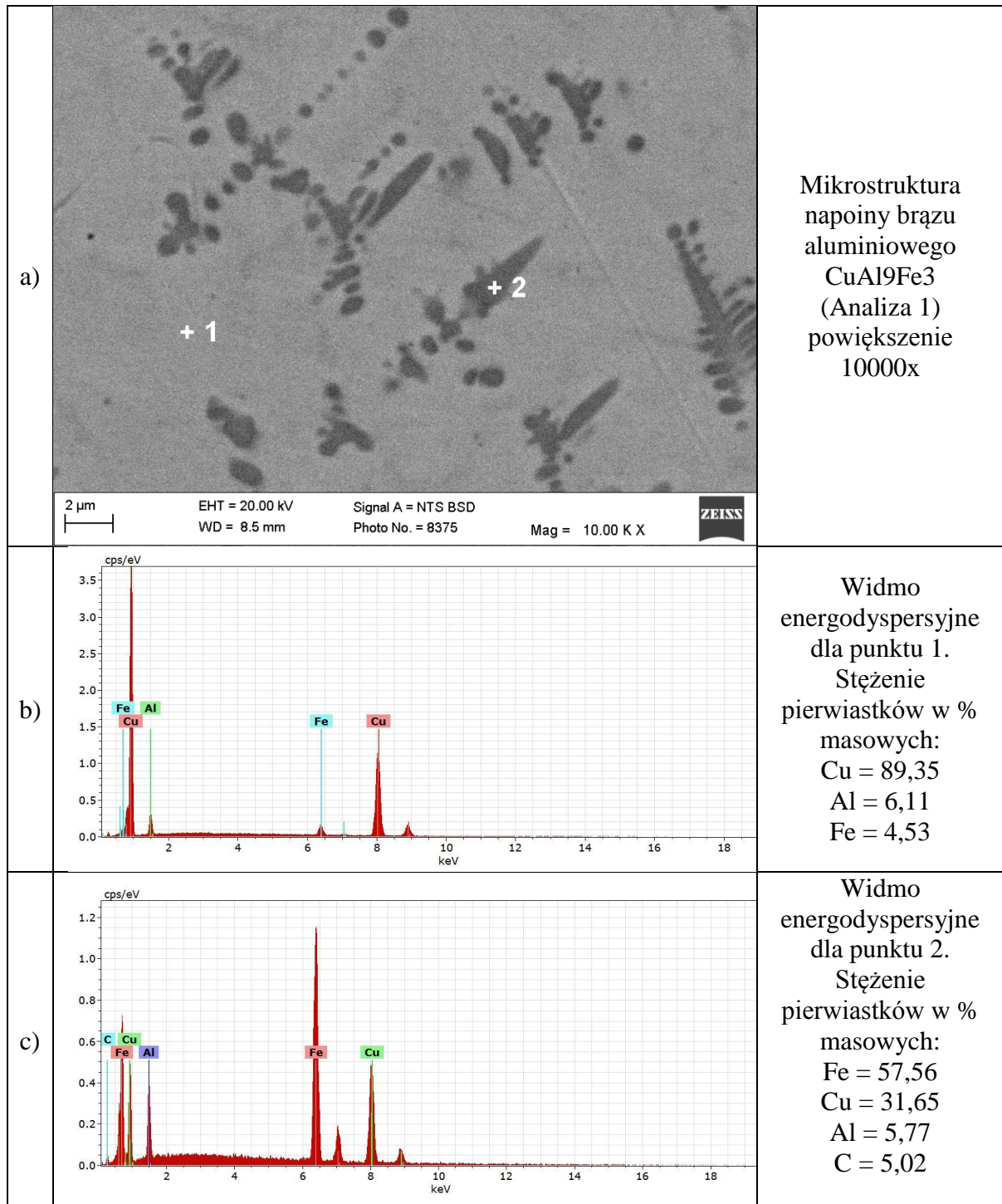
również wydzielenia fazy żelazowej (ciemniejsze pola) oraz licznie wtrącenia niemetaliczne.

Kolejnym etapem była analiza zglądów poprzecznych z wykorzystaniem elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM). Analizie poddane zostały zglądy przygotowane z próbek pokrytych powłoką z brązu aluminiowego (CuAl9Fe3) oraz powłoką z brązu manganowego (CuMn11Al8Fe3Ni3). Na Rys. 34 przedstawiono zgląd poprzeczny przygotowany z próbki pokrytej brązem aluminiowym w powiększeniu 100x. Wyraźnie zaobserwować można napoinę, linię wtopienia oraz materiał podłoża (stal S355J2). W trzech zaznaczonych na rysunku miejscach przeprowadzono analizę składu chemicznego z wykorzystaniem metody dyspersji energii (EDS).



Rys. 34 Miejsca analizy składu chemicznego próbki pokrytej brązem aluminiowym

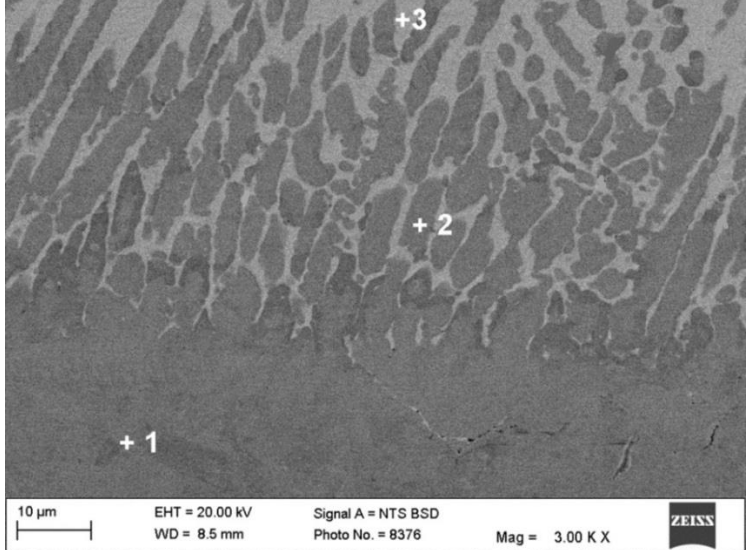
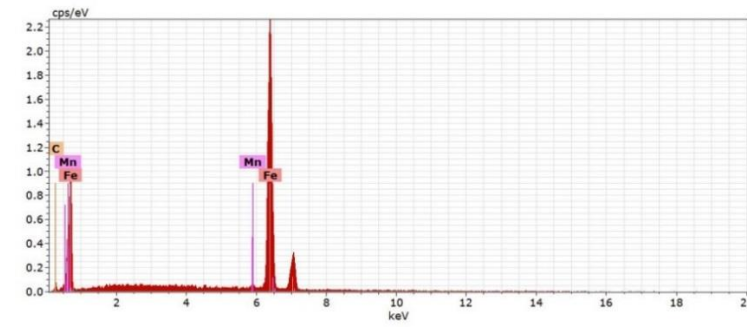
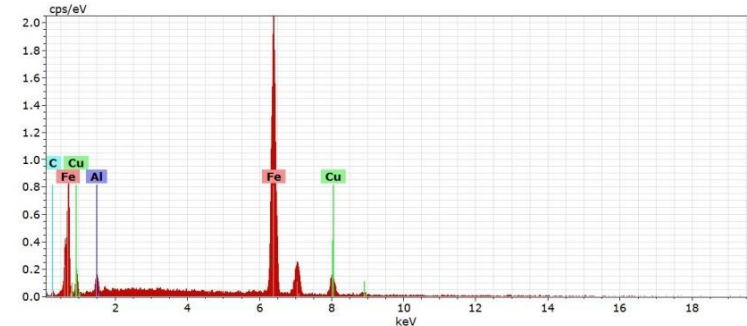
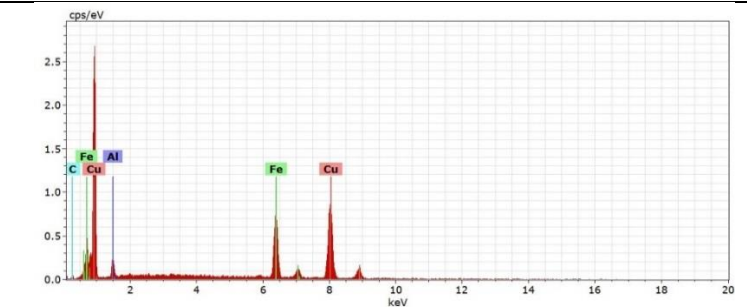
W analizowanych obszarach (Analiza 1, Analiza 2, Analiza 3) przeprowadzono kilka pomiarów składu chemicznego metodą EDS, zależnie od ujawnionej struktury. Na Rys. 35a zaobserwować można miejsce oznaczone na Rys. 34 jako „Analiza 1” (napoina) w powiększeniu 10000x.



Rys. 35 Mikrostruktura napoiny brązu aluminiowego oraz mikroanaliza EDS składu chemicznego w wybranych obszarach

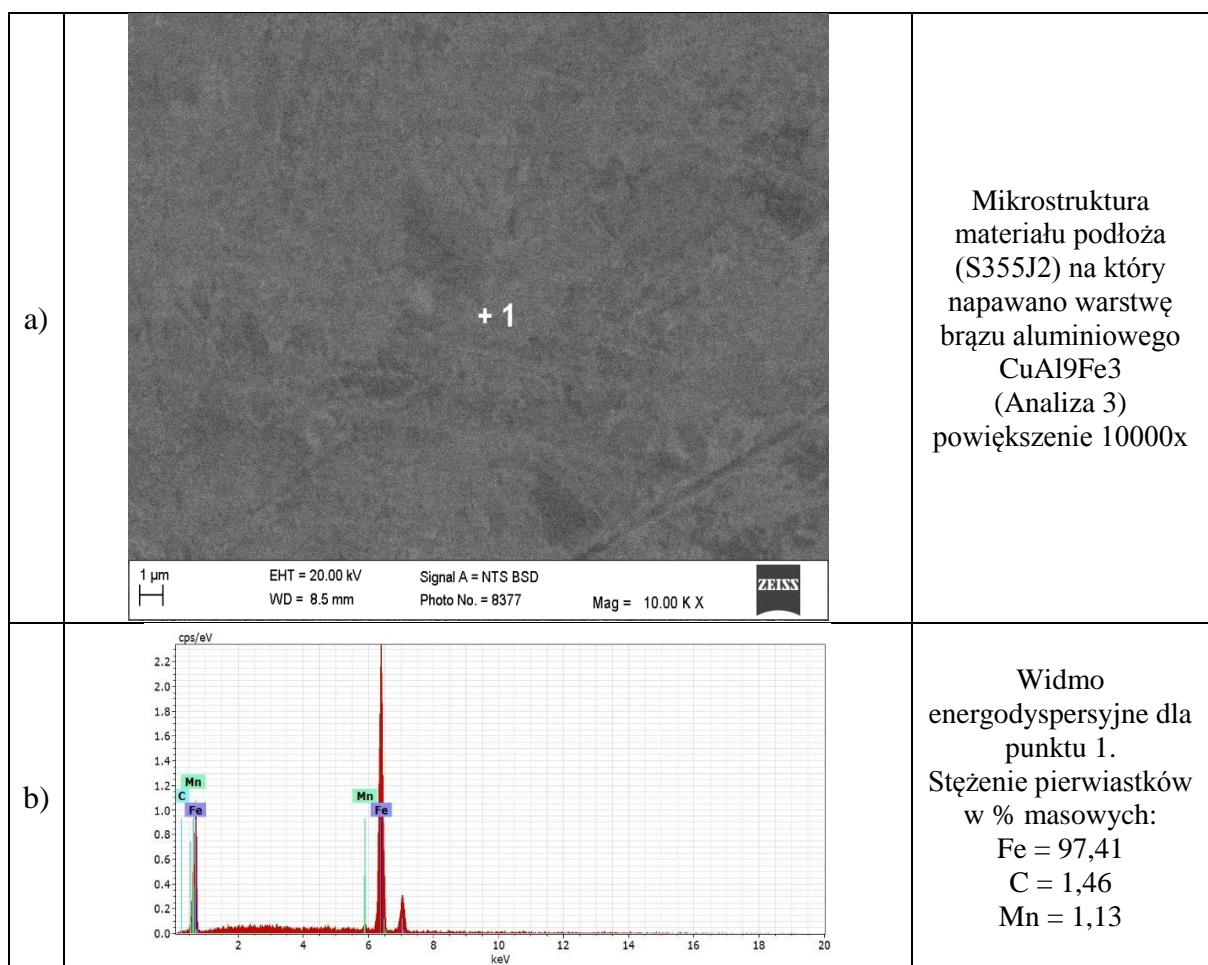
Na podstawie analizy składu chemicznego wykonanego techniką dyspersji energii stwierdzono, że skład chemiczny napoiny w obszarze środkowym i bezpośrednio pod licem jest typowy dla brązu aluminiowego CuAl9Fe3 (Rys. 35). Wyniki badań składu chemicznego metodą EDS w tym obszarze wskazują zawartość ok. 89,35% Cu, ok. 6,11% Al i ok. 4,53% Fe. Jednocześnie wyniki badań EDS wskazują na znaczną niejednorodność

składu chemicznego w tym obszarze spowodowaną dużym udziałem materiału rodzimego w napoinie. Z tego względu zawartość Fe w niektórych miejscach napoiny sięga aż 58% (Rys. 35c). Na Rys. 36a zaobserwować można miejsce oznaczone na Rys. 34 jako „Analiza 2” (linia wtopienia) w powiększeniu 3000x.

a)		<p>Mikrostruktura napoiny brązu aluminiowego CuAl9Fe3 w linii wtopienia w materiał podłoża (Analiza 2) powiększenie 3000x</p>
b)		<p>Widmo energodispersyjne dla punktu 1. Stężenie pierwiastków w % masowych: Fe = 94,32 C = 4,64 Mn = 1,03</p>
c)		<p>Widmo energodispersyjne dla punktu 2. Stężenie pierwiastków w % masowych: Fe = 83,03 Cu = 12,31 Al = 1,86 C = 2,81</p>
d)		<p>Widmo energodispersyjne dla punktu 3. Stężenie pierwiastków w % masowych: Cu = 66,91 Fe = 26,36 Al = 3,49 C = 3,24</p>

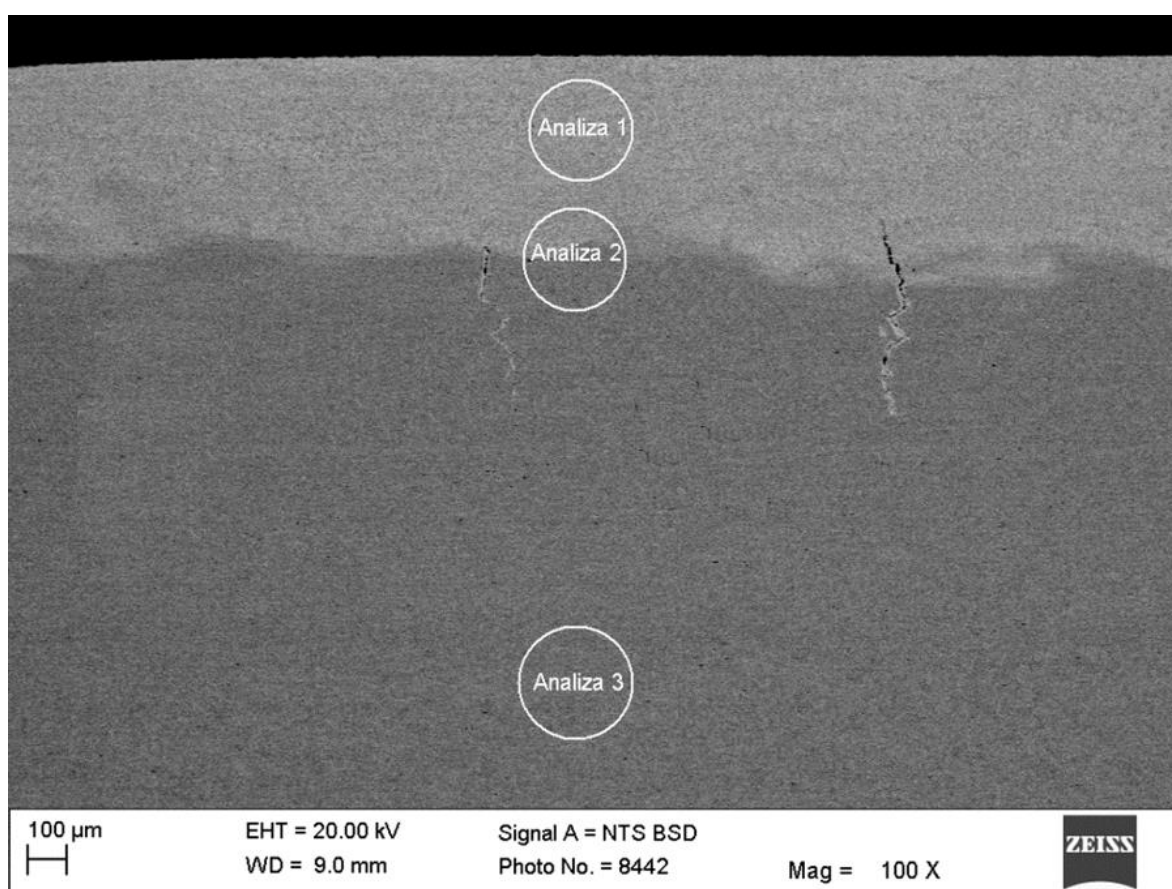
Rys. 36 Mikrostruktura napoiny brązu aluminiowego w linii wtopienia oraz mikroanaliza EDS składu chemicznego w wybranych obszarach

Na Rys. 36 zaobserwować można, że od linii wtopienia w początkowej fazie przebiega płaski front krystalizacji, który następnie przechodzi w komórkowy front krystalizacji o wielkości ziaren ok. 10-15 μm , a następnie w dendrytyczny front krystalizacji o osiach dendrytów prostopadłych do linii wtopienia. Na podstawie analizy składu chemicznego wykonanej metodą EDS w strefie wpływu ciepła podłoża stwierdzono obecność węgla żelaza (Fe_3C), o stężeniu masowym Fe ponad 94% i ok. 5% C (Rys. 36b). Obecność tego typu węgla w stali S355J2 potwierdza jej ferrytyczno-perlityczną strukturę. Z kolei mikroanaliza w obszarze środkowym linii wtopienia (Rys. 36c) i w napoinie (Rys. 36d) wskazuje na wzrost udziału pierwiastków pochodzących od brązu aluminiowego, głównie Cu i Al kosztem udziału pierwiastków pochodzących od materiału rodzimego (spadek udziału Fe z ok. 94% do ok. 26%). Na Rys. 37a zaobserwować można miejsce oznaczone na Rys. 34 jako „Analiza 3” (materiał rodzimy) w powiększeniu 10000x. Ze względu na stosunkowo dużą jednorodność analizowanego materiału badanie składu chemicznego metodą EDS przeprowadzono tylko w jednym obszarze (Rys. 37b).



Rys. 37 Mikrostruktura materiału podłoża (S355J2) oraz mikroanaliza EDS składu chemicznego w wybranym obszarze

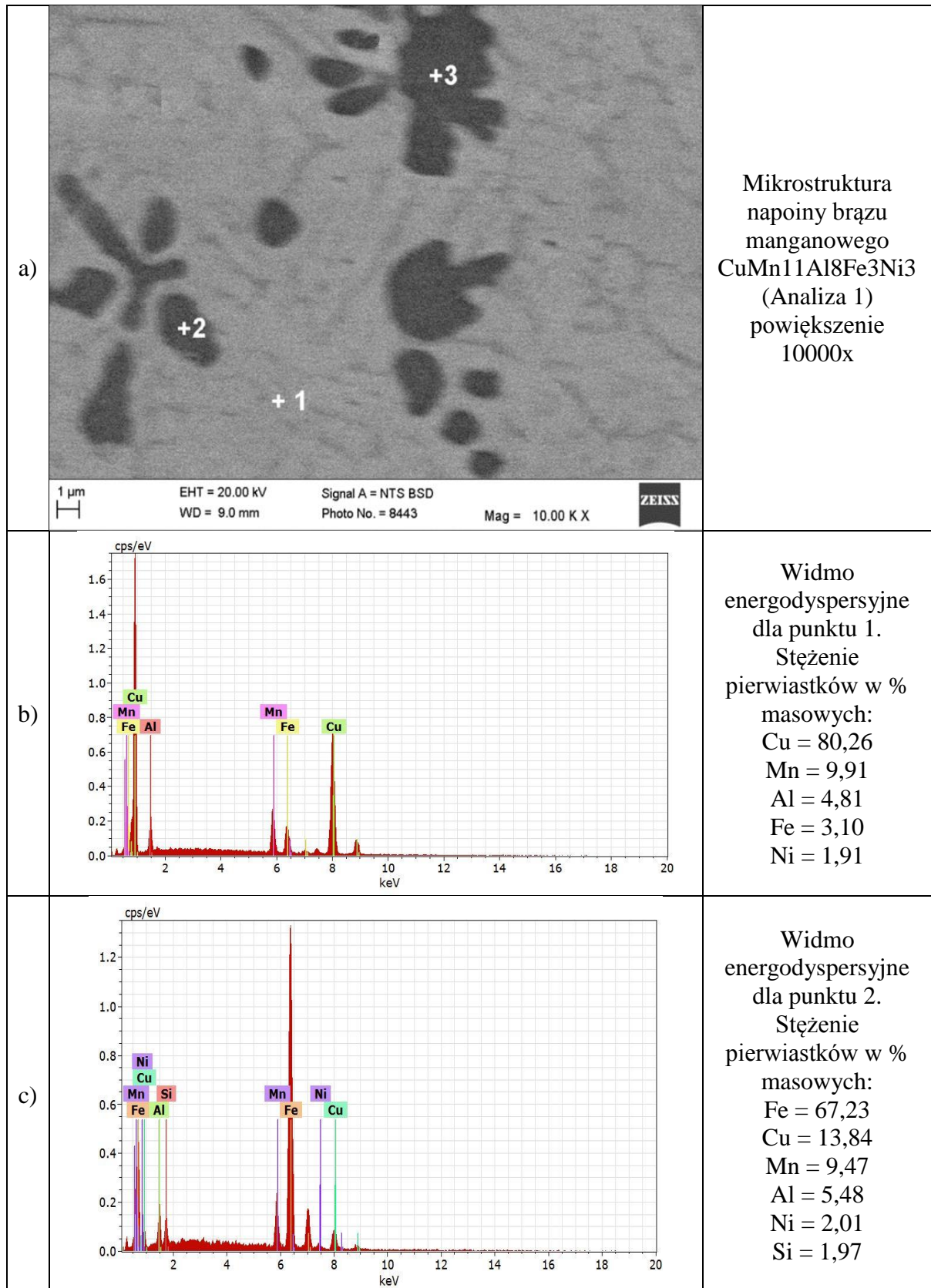
Wykazana na Rys. 37a struktura materiału podłoża (stal S355J2) charakteryzuje się dużą jednorodnością. Brak jest wyraźnych defektów materiału czy wtrąceń niemetalicznych. Przeprowadzona w ramach badania analiza składu chemicznego metodą EDS, potwierdza brak wtrąceń powstałych w wyniku procesów metalurgicznych oraz procesu napawania. Podobną procedurę badawczą (analiza 3 obszarów – napoina, linia wtopienia, materiał rodzimy) przeprowadzono w przypadku próbki pokrytej powłoką z brązu manganowego CuMn11Al8Fe3Ni3 . Na Rys. 38 przedstawiono mikrostrukturę powierzchni zglądu poprzecznego próbki powiększoną 100x oraz pokazano obszary, które poddane były dokładniejszej analizie.

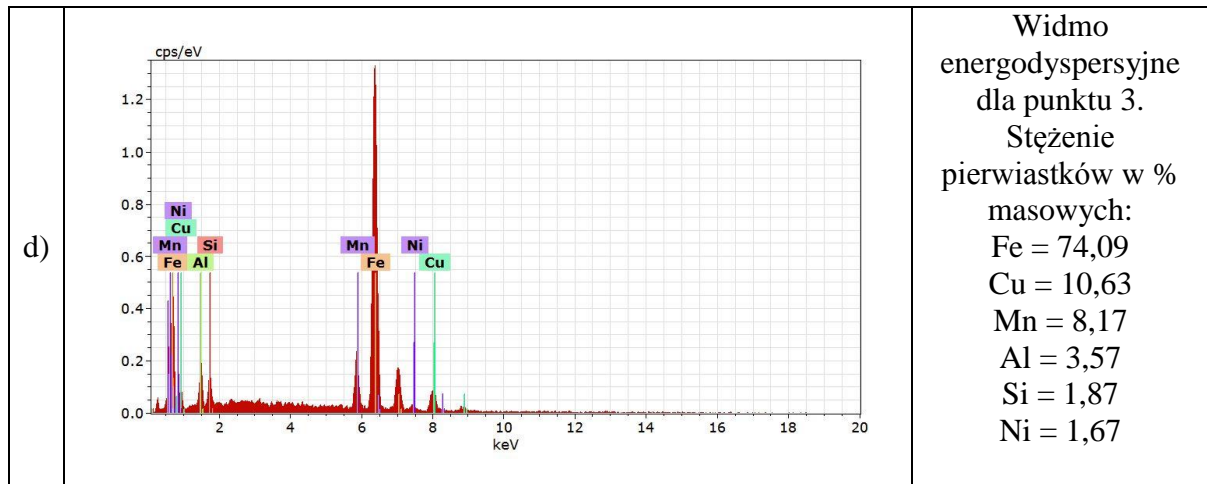


Rys. 38 Obszary analizy próbki pokrytej brązem manganowym CuMn11Al8Fe3Ni3

Na Rys. 38 zauważyć można pęknięcia powstałe w procesie napawania w strefie wpływu ciepła (SWC) wykazane wcześniej przy wykorzystaniu mikroskopii świetlnej na Rys. 32c. Podobnie jak w przypadku brązu aluminiowego, dokładniejszej analizie poddano 3 obszary odpowiadające kolejno materiałowi napoiny, linii wtopienia i materiałowi podłoża. We wszystkich przypadkach w charakterystycznych punktach wyznaczono skład chemiczny z wykorzystaniem metody EDS. Na Rys. 39 przedstawiono obszar opisany jako „Analiza 1”

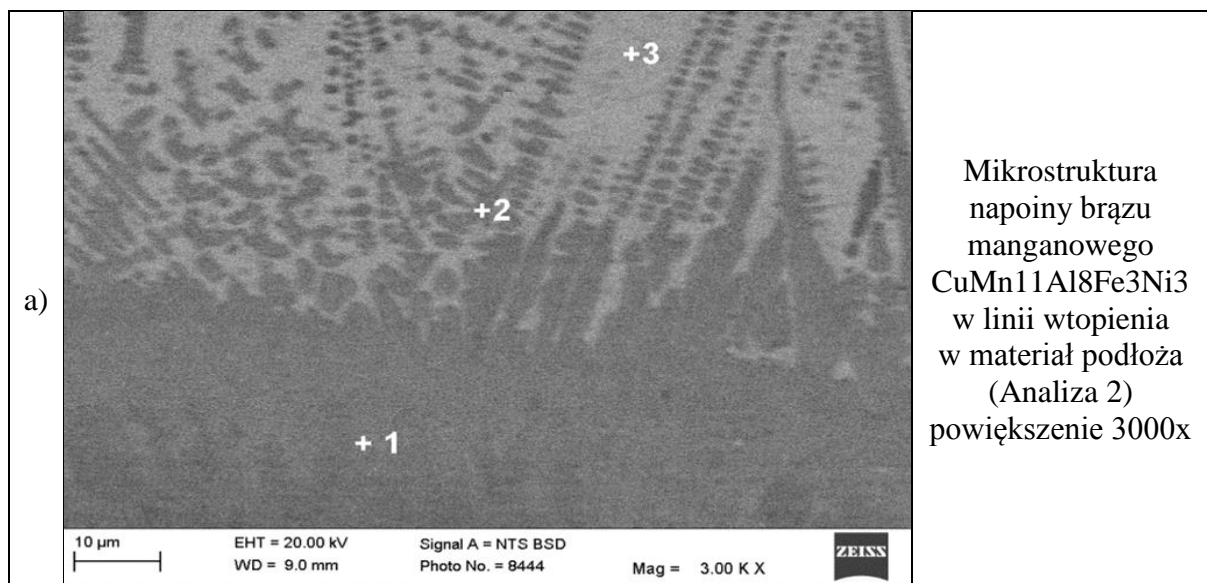
odpowiadający materiałowi napoiny z brązu manganowego CuMn11Al8Fe3Ni3 w powiększeniu 10000x.

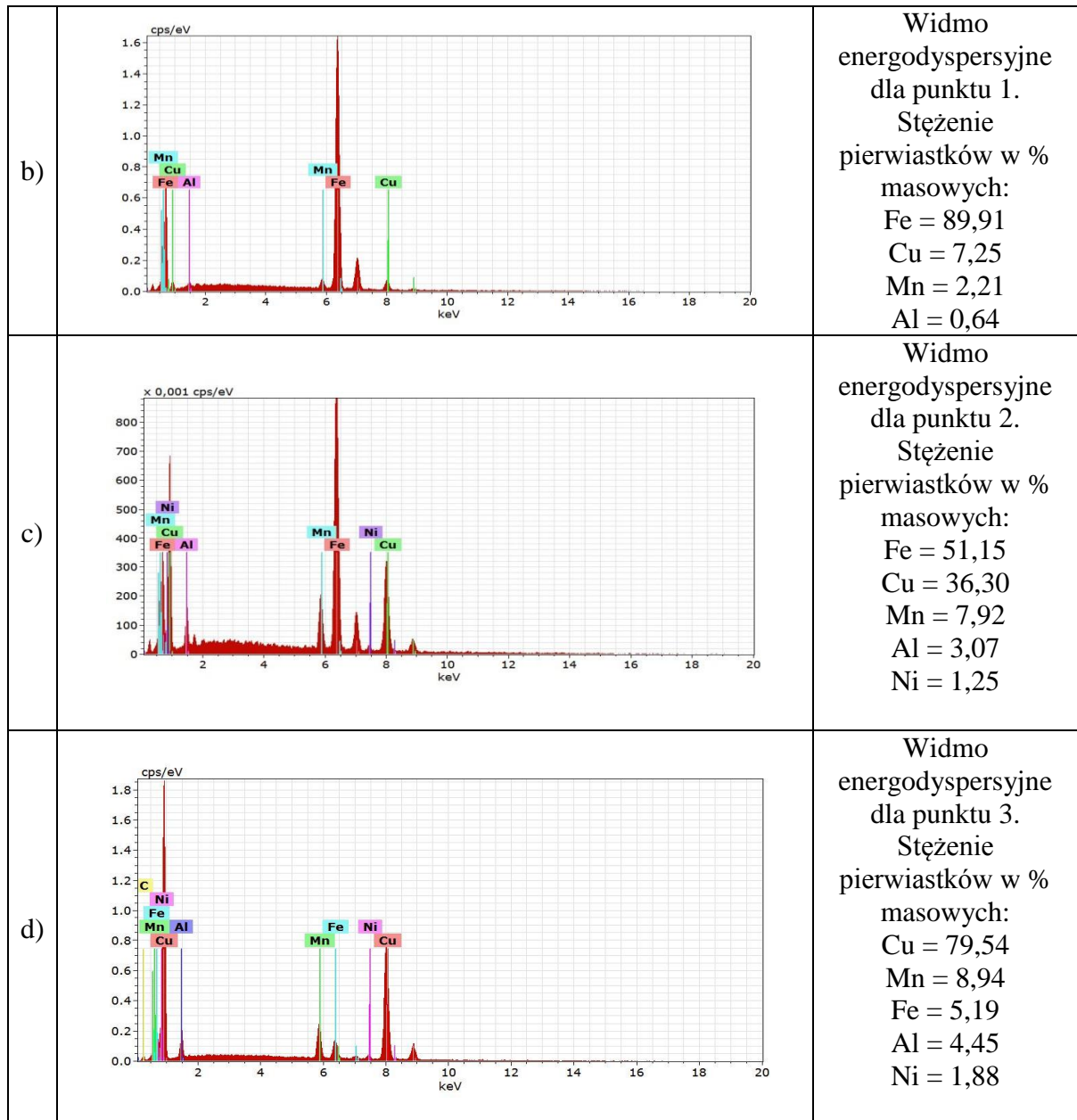




Rys. 39 Mikrostruktura napoiny brązu manganowego oraz mikroanaliza EDS składu chemicznego w wybranych obszarach

Na podstawie analizy składu chemicznego, wykonanej techniką dyspersji energii, stwierdzono, że skład chemiczny napoiny w obszarze środkowym i bezpośrednio pod licem jest typowy dla brązu manganowego CuMn11Al8Fe3Ni3 (Rys. 39a). Wyniki badań składu chemicznego metodą EDS w tym obszarze wskazują zawartość ok. 80,26% Cu, ok. 9,91% Mn, ok. 4,81% Al, ok. 3,10% Fe i ok. 1,91% Ni. Jednocześnie wyniki badań EDS wskazują na znaczną niejednorodność składu chemicznego w tym obszarze spowodowaną dużym udziałem materiału rodzimego w naponie. Zauważyć można, że zależnie od punktu analizy (coraz ciemniejsze obszary na Rys. 39 c i d) stopniowo spada udział procentowy miedzi, przede wszystkim kosztem wzrastającego udziału żelaza pochodzącego od materiału podłoża. Na Rys. 40a zaobserwować można miejsce oznaczone na Rys. 38 jako „Analiza 2” (linia wtopienia) w powiększeniu 3000x.

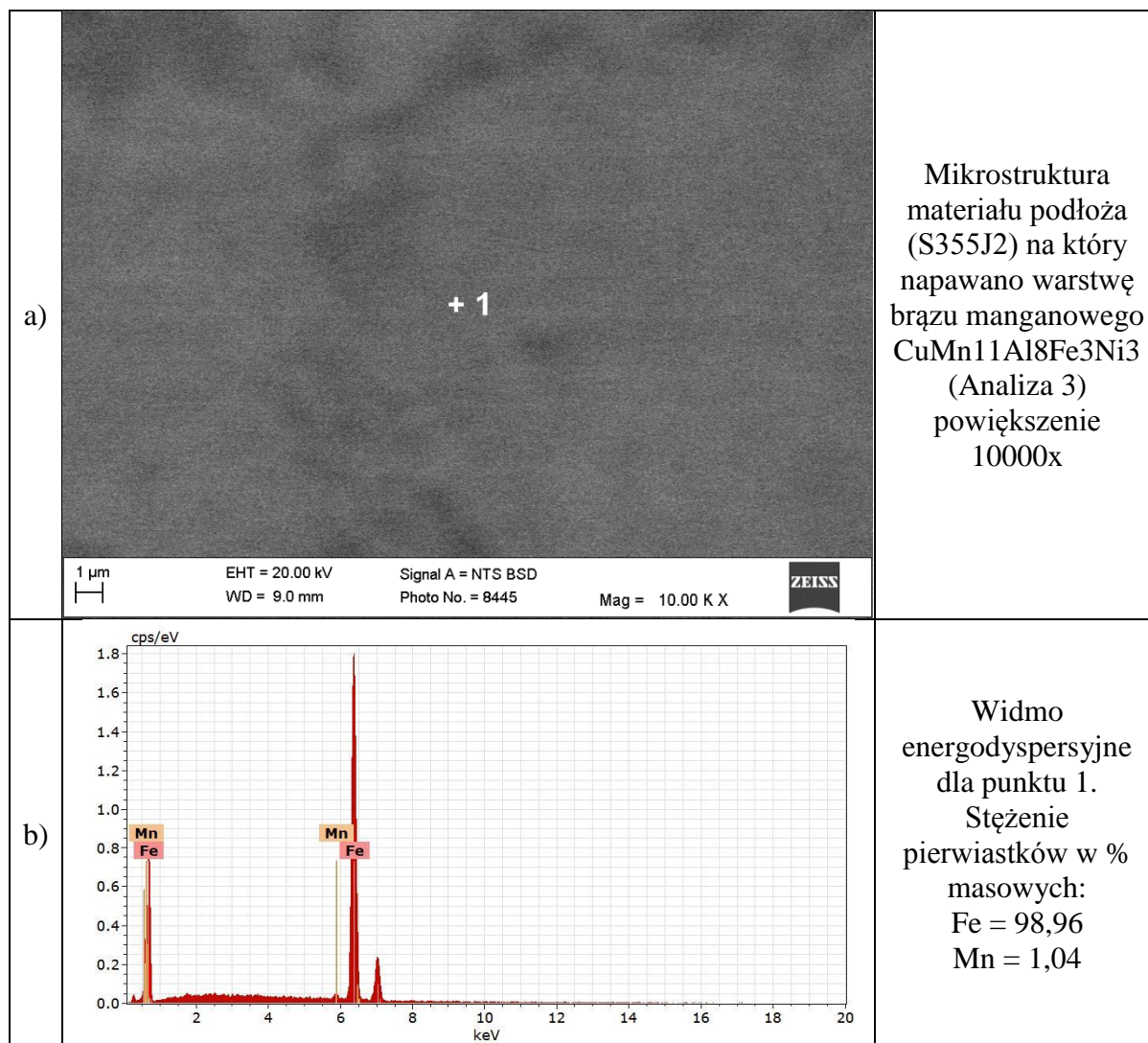




Rys. 40 Mikrostruktura napoiny brązu manganowego w linii wtopienia oraz mikroanaliza EDS składu chemicznego w wybranych obszarach

Na Rys. 40a przedstawiono linię wtopienia brązu manganowego $\text{CuMn}_{11}\text{Al}_{18}\text{Fe}_3\text{Ni}_3$ w materiał podłoża (S355J2). Na Rys. 40 b,c,d przedstawiono natomiast wyniki badania składu chemicznego metodą EDS poszczególnych punktów analizy. Zaobserwować można stopniowy spadek udziału procentowego Cu oraz Mn i wzrost udziału procentowego Fe wraz ze zbliżaniem się do linii wtopienia, a następnie do materiału napoiny. Skład chemiczny materiału otrzymany w trakcie analizy w punkcie oznaczonym jako „3” potwierdza skład odpowiedni dla brązu manganowego $\text{CuMn}_{11}\text{Al}_{18}\text{Fe}_3\text{Ni}_3$. Na Rys. 41 przedstawiono mikrostrukturę otrzymaną z analizy obszaru oznaczonego na Rys. 38 jako „Analiza 3”. Można zauważyć, że analiza ta prowadzona była w relatywnie dużej odległości

od linii wtopienia. W związku z tym badanie składu chemicznego metodą EDS (rys. 37b) ujawniło skład odpowiedni dla materiału podłoża, tj. stali S355J2 (ok. 99 % Fe i ok. 1% Mn). Nieujawnienie węgla w analizowanym obszarze spowodowane jest najprawdopodobniej niejednorodnością materiału podłoża.



Rys. 41 Mikrostruktura materiału podłoża (S355J2) oraz mikroanaliza EDS składu chemicznego w wybranym obszarze

6.3 Badanie twardości

Pomiary twardości wykonano metodą Vickersa [45] na próbkach stali S355J2 w stanie dostarczenia oraz po napawaniu brązami aluminiowymi CuAl9Fe3 i CuMn11Al8Fe3Ni3 , wykorzystując mikrotwardościomierz FM-700 firmy Future-Tech, wyposażony w automatyczny system pomiaru. Badania realizowano, stosując obciążenie 500G i czas pomiaru równy 15 sekund. Wyniki twardości stanowią średnią arytmetyczną z pięciu

pomiarów. Pomiary przeprowadzono również selektywnie na przekroju zgładów metalograficznych w warstwie materiału podłoża (stal S355J2), brązu oraz w pobliżu linii wtopienia. W pierwszej serii pomiarowej badaniom twardości poddano próbki przygotowane w formie pierścieni, które w późniejszym etapie wykorzystywane były do badań zużycia ściernego. Przeprowadzono 5 cykli pomiarowych sprawdzając twardość stali w stanie dostarczenia, twardość powłoki brązu aluminiowego oraz twardość powłoki brązu manganowego. Wyniki tych pomiarów przedstawiono w Tab. 6.

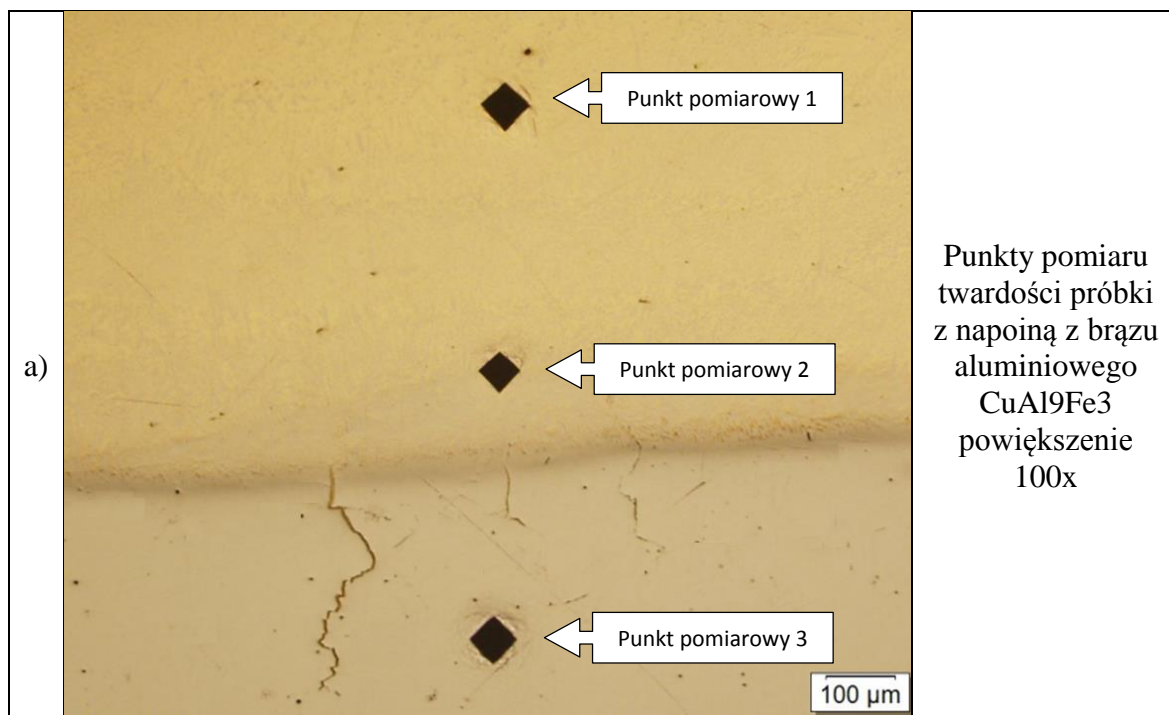
Tab. 6 Pomiary twardości powierzchni zewnętrznej próbek

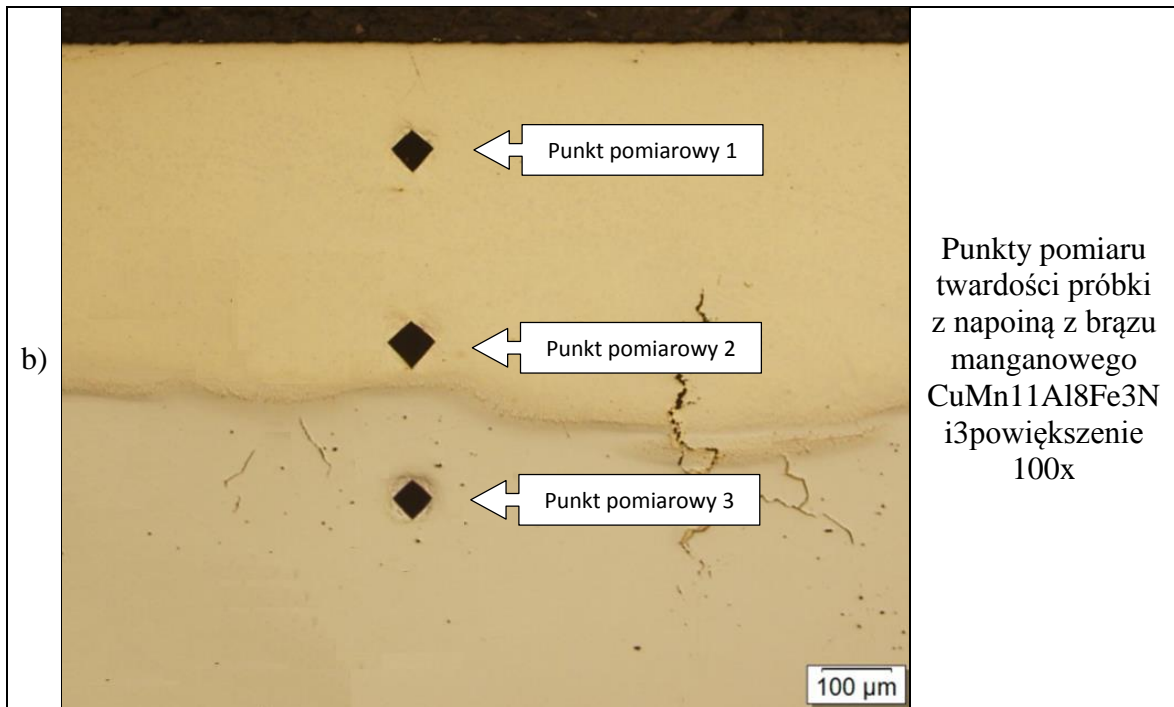
Próbka	Twardość HV 0.5					
	Nr pomiaru					$\overline{HV0.5}$
	1	2	3	4	5	
Stalowa (S355J2)	149,5	153,0	153,2	153,1	150,2	151,8
Pokryta brązem aluminiowym (CuAl9Fe3)	195,8	199,2	201,2	198,9	199,6	198,9
Pokryta brązem manganowym (CuMn11Al8Fe3Ni3)	254,8	255,8	255,7	255,3	254,9	255,3

Przeprowadzone badanie twardości stali w stanie dostarczenia potwierdza jej normatywną twardość na poziomie ok. 152 HV (ok. 145 HB). Wyniki pomiaru twardości powłok z brązu aluminiowego i manganowego wykazują znaczne różnice w porównaniu do wartości normatywnych, zgodnie z którymi brąz aluminiowy powinien cechować się twardością na poziomie 100-120 HB (ok. 105-126 HV) natomiast brąz manganowy twardością ok. 150 HB (ok. 159 HV). Stan taki wynika najprawdopodobniej z faktu pomiaru twardości brązu będącego napoiną wytworzoną w procesie napawania laserowego. Zgodnie z [41] napoiny brązu aluminiowego, uzyskiwane w trakcie napawania w osłonie gazu obojętnego (jak miało to miejsce w analizowanym przypadku) mogą cechować się twardością ok. 160 HB (ok. 170

HV) natomiast w przypadku brązu manganowego twardość ta może wynosić ok. 217 HB (ok. 230 HV).

W ramach drugiego wariantu, pomiary twardości przeprowadzono na zglądach wykonanych z próbek pokrytych powłoką z brązu aluminiowego (CuAl9Fe3) oraz manganowego (CuMn11Al8Fe3Ni3) w taki sposób, aby wgłębnik zagłębiał się kolejno w warstwę stalową (podłoża), w miarę możliwości w linię wtopienia oraz w warstwę brązu (napoiny). Miejsca wykonania pomiaru i wyniki twardości przedstawiono odpowiednio na Rys. 42 i w Tab. 7 i Tab. 8. W przypadku próbki z powłoką z brązu aluminiowego, podłoże ze stali S355J2 wykazuje twardość w zakresie ok. 198 HV0.5 (Tab. 7). Wartość ta, większa niż w przypadku pomiaru twardości próbki stalowej w stanie dostarczenia (Tab. 6) jest spowodowana oddziaływaniem cyklu cieplnego w procesie napawania laserowego. W obszarze linii wtopienia stwierdzono wzrost twardości do ok. 250HV0.5 (Tab. 7). Wysoka twardość w tym obszarze spowodowana jest wymieszaniem materiału napoiny z materiałem podłoża oraz dużymi szybkościami stygnięcia, co potwierdza obecność struktury komórkowej wzdłuż linii wtopienia. Z kolei w obszarze napoiny stwierdzono poziom twardości sięgający ok. 181 HV0.5 (Tab. 7). W przypadku brązu manganowego wartości twardości wynoszą odpowiednio ok. 237 HV0.5 w obszarze napoiny, ok. 243 HV0.5 w obszarze linii wtopienia oraz ok. 209 HV0.5 w obszarze materiału podłoża (Tab. 8).





Rys. 42 Punkty pomiaru twardości próbek z napoiną brązu aluminiowego i manganowego

Tab. 7 Pomiary twardości zglądów wykonanych z próbek (brąz aluminiowy)

Miejsce pomiaru próbki pokrytej brązem aluminiowym CuAl9Fe3	Twardość HV 0.5					
	Nr pomiaru					$\overline{HV0.5}$
	1	2	3	4	5	
Punkt pomiarowy 1 (napoina)	180,9	178,8	188,7	179,3	179,9	181,5
Punkt pomiarowy 2 (linia wtopienia)	245,9	249,8	246,5	251,7	247,6	248,3
Punkt pomiarowy 3 (podłoże)	196,1	197,4	199,7	200,0	198,1	198,2

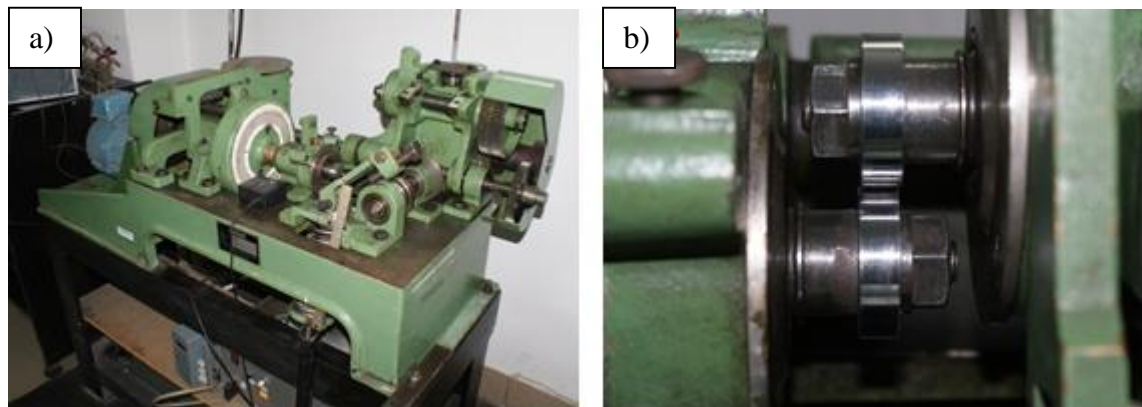
Tab. 8 Pomiar twardości zglądów wykonanych z próbek (brąz manganowy)

Miejsce pomiaru próbki pokrytej brązem manganowym CuMn11Al8Fe3Ni3	Twardość HV 0.5					
	Nr pomiaru					$\overline{HV0.5}$
	1	2	3	4	5	
Punkt pomiarowy 1 (napoina)	235,2	236,8	239,0	234,2	239,3	236,9
Punkt pomiarowy 2 (linia wtopienia)	242,1	244,6	243,6	245,8	241,4	243,5
Punkt pomiarowy 3 (podłoże)	208,5	207,6	208,6	209,6	209,2	208,7

7. BADANIA STANOWISKOWE ZUŻYCIA ŚCIERNEGO PRÓBEK

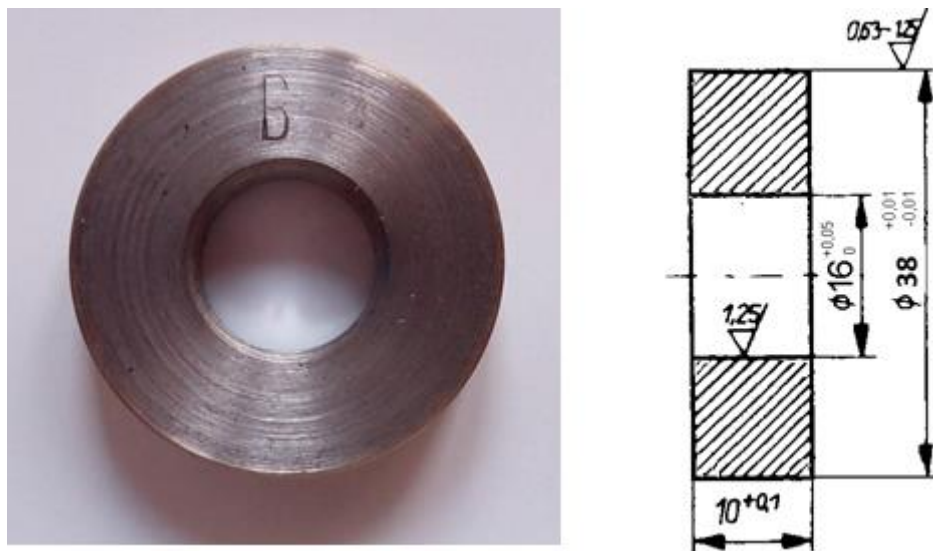
7.1 Metodyka badań

Po przeprowadzeniu badań metalograficznych możliwe było rozpoczęcie kolejnego etapu badań tj. analizy zużycia ściernego na stanowisku Amslera o skojarzeniu tribologicznym rolka-rolka (Rys. 43).



Rys. 43 Tribometr Amslera oraz widok skojarzenia rolka-rolka

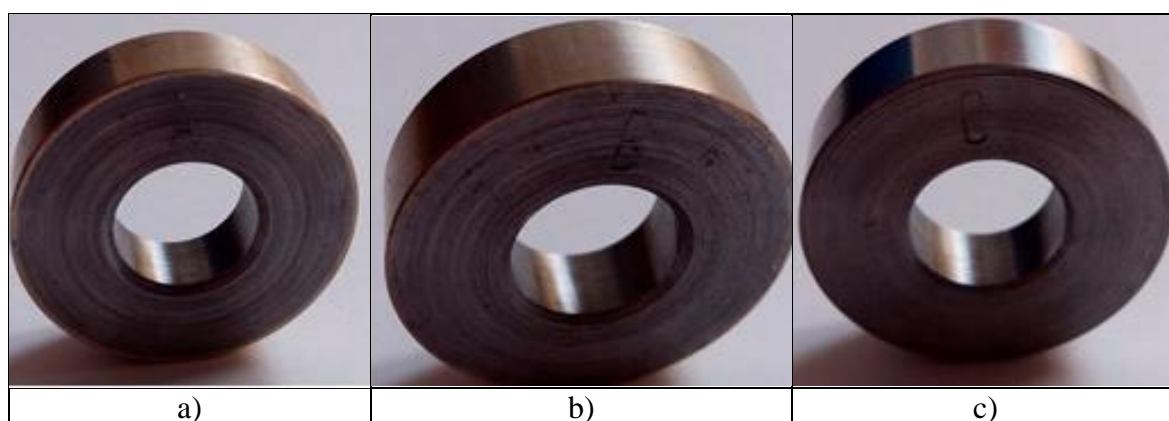
Tribometr Amslera jest z powodzeniem wykorzystywany do badań zużycia ściernego różnych materiałów. W literaturze można znaleźć przykłady wykorzystania tego urządzenia do badania materiałów takich jak stale, żeliwa czy metale nieżelazne, poddawane oraz niepoddawane obróbce plastycznej, z wykorzystaniem węzłów tarcia smarowanych oraz na sucho [3], [5], [10]–[12], [40], [51], [60], [85], [118]. Urządzenie na którym prowadzono badania wyposażone zostało w układ sterująco-pomiarowy, który umożliwiał rejestrację siły tarcia oraz ilości obrotów wykonanych przez próbkę przy możliwości dobrania prędkości obrotowej próbki z zakresu 0 – 200 obr/min oraz obciążenia poprzez mechanizm sprężynowy w zakresie od 0 – 2000 N. Badania prowadzono w styku ślizgowym (przeciwpróbka została unieruchomiona) by odwzorować zachowanie tarcz zderzakowych podczas eksploatacji. Badania prowadzono przy smarowanym węźle tarcia oraz na sucho. W wyniku obrotu próbki względem przeciwpróbki możliwe było obserwowanie zużycia ścierno-adhezyjnego w punkcie styku. Próbki do badań wykonano zgodnie z normą [93] w formie pierścieni przedstawionych na Rys. 44.



Rys. 44 Próbka wykorzystane do badań stanowiskowych

Badane próbki przygotowano w trzech wariantach (Rys. 45):

- próbki pokryte powłoką brązu aluminiowego CuAl9Fe3 - oznaczone symbolem „A” (Rys. 45a);
- próbki pokryte powłoką brązu manganowego CuMn11Al8Fe3Ni3 - oznaczone symbolem „B” (Rys. 45b);
- próbki stalowe niepokryte żadną powłoką - oznaczone symbolem „C” (Rys. 45c).



Rys. 45 Próbki przygotowane do badania zużycia ściernego

Parametry badań na próbkach poddawanych pomiarom zużycia ściernego dobrano w taki sposób, aby maksymalnie zbliżone były do warunków rzeczywistych, zidentyfikowanych w ramach przeprowadzonych badań wstępnych – rejestracji pracy tarcz zderzakowych. W związku z tym, jako prędkość obrotową próbki (n) przyjęto wartość ok. 10 obr/min, co

przy wymiarach próbek odpowiadało ok. 0,04 m/s prędkości liniowej. W trakcie badań stosowano dwie wartości nacisku (P) odpowiednio 700 N i 350 N. Wartości te zostały dobrane na podstawie teorii naprężeń kontaktowych Hertza, zgodnie z którą, dla dwóch sfer dociskanych do siebie, wykonanych z tego samego materiału, wzór pozwalający wyznaczyć maksymalną wartość naprężeń kontaktowych przyjmuje postać [80]:

$$\sigma_{dH} = 0,388 \sqrt[3]{PE^2 \left(\frac{r_1+r_2}{r_1r_2}\right)^2} \quad (9)$$

Zakładając że sfery mają te same promienie (jak ma to miejsce w rzeczywistości, w przypadku tarcz zderzaków kolejowych), zależność (9) można zapisać następująco:

$$\sigma_{dH} = 0,388 \sqrt[3]{PE^2 \frac{4}{r^2}} \quad (10)$$

gdzie:

P – siła ściskająca [N];

E – moduł Younga [Pa];

r – promień kuli (tarczy zderzakowej) [m].

Podstawiając do zależności (10) wartości promienia tarczy zderzakowej, wartości modułu Younga dla stali S355J2 oraz siły o wartości 250 kN, która została zidentyfikowana na podstawie badań wstępnych jako maksymalna, działająca przez bardzo krótki czas w przypadku intensywnego nabiegania na siebie wagonów, otrzymuje się wartość maksymalnych naprężeń kontaktowych wg teorii Hertza, wynoszących ok. 676 MPa. W przypadku podstawienia do zależności (10) siły o wartości 150 kN, która została określona na podstawie badań wstępnych jako maksymalna działająca podczas normalnego użytkowania, otrzymuje się wartość maksymalnych naprężeń kontaktowych, wg teorii Hertza, wynoszących ok. 570 MPa. Oznacza to, że w trakcie normalnej eksploatacji pojazdów, pokonywania przez nich rozjazdów oraz nabiegania na siebie w trakcie hamowania, wartości maksymalnych naprężeń kontaktowych na styku dwóch tarcz zderzakowych wahają się pomiędzy 0 – 570 MPa. W przypadku badań stanowiskowych na

próbkach, wartości te należało odnieść do dwóch ściskanych ze sobą walców, których osie są równoległe. Zgodnie z teorią Hertza, w takim wypadku wzór na maksymalne naprężenia kontaktowe przyjmuje postać:

$$\sigma_{dH} = 0,418 \sqrt{\frac{PE}{l} \frac{r_1+r_2}{r_1 r_2}} \quad (11)$$

Zakładając, że walce, z których wykonane są próbki mają taką samą średnicę (jak ma to miejsce w rzeczywistości), zależność (11) można przekształcić do następującej postaci:

$$\sigma_{dH} = 0,418 \sqrt{\frac{PE}{l} \frac{2}{r}} \quad (12)$$

gdzie:

P – siła ściskająca [N];

E – moduł Younga [Pa];

l – długość walców na której pozostają ze sobą w kontakcie [m];

r – promień walców [m].

Znając wartość maksymalnych naprężeń kontaktowych, które należało otrzymać w próbkach, możliwe było wyznaczenie wartości siły, z którą należało dociskać do siebie próbki podczas badań, na podstawie następującej zależności:

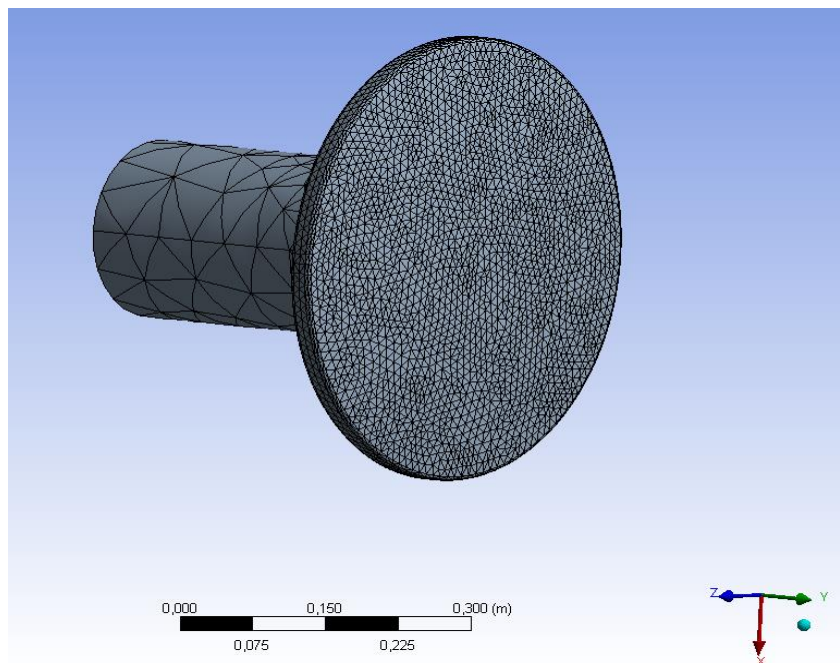
$$P = \frac{\sigma_{dH}^2 \cdot l \cdot r}{0,35E} \quad (13)$$

Po podstawieniu do równania (13) rzeczywistych wartości możliwe zostało wyznaczenie wartości sił ściskających pozwalających uzyskać wartości naprężeń kontaktowych

występujących w próbkach, zbliżone do warunków rzeczywistych. Na tej podstawie do badań przyjęto wartości siły ściskającej 700 N, dla zasymulowania skrajnych sytuacji oraz 350 N dla zasymulowania siły działającej na tarcze zderzakowe w trakcie ich normalnego użytkowania.

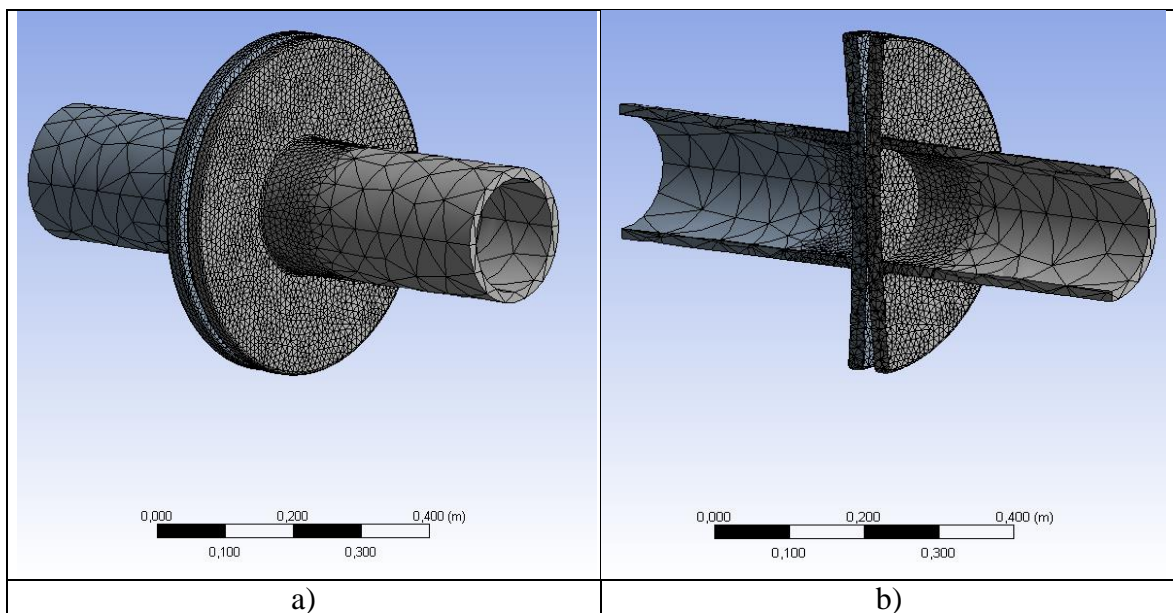
7.2 Badania wytrzymałościowe z wykorzystaniem MES

W celu potwierdzenia prawidłowości dobranych wartości sił ściskających próbki w trakcie badań stanowiskowych przeprowadzono również analizę z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Analiza ta pozwoliła na określenie wartości maksymalnych naprężeń występujących podczas dociskania do siebie dwóch tarcz zderzakowych. W celu określenia tych wielkości wykorzystano środowisko programu ANSYS Workbench umożliwiające budowanie modeli obiektów rzeczywistych i przeprowadzanie złożonych analiz statycznych i dynamicznych [39], [66] w tym również w kolejnictwie [49], [104]. Ponadto oprogramowanie to wykorzystywane jest w modelowaniu zjawisk kontaktowych i badaniu zużycia ściernego z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych. [13], [59] W pierwszym etapie symulacji w programie zbudowano model tulei zderzakowej wraz z tarczą (Rys. 46).



Rys. 46 Tuleja wraz z tarczą zderzakową zamodelowana w programie ANSYS Workbench

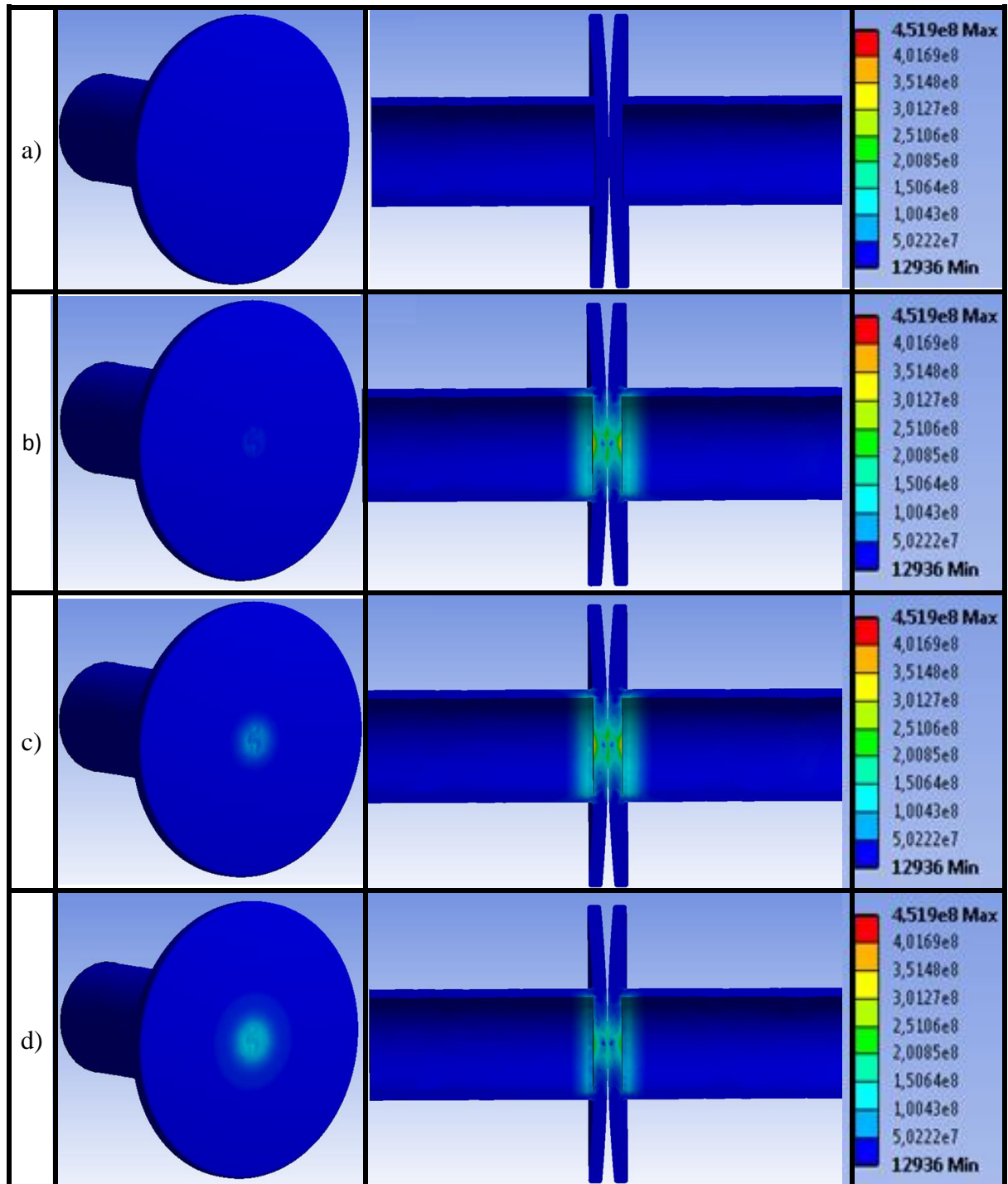
Model ten odpowiada tulei standardowego zderzaka kolejowego o skoku 105 mm stosowanego na wagonach towarowych, o tarczy okrągłej i normatywnej wypukłości o promieniu 2750 mm. Został on zbudowany w oparciu o wymiary zderzaka zamontowanego na wagonie typu 418V, na którym prowadzone były badania wstępne, polegające na rejestracji obrazu współpracujących zderzaków kolejowych w trakcie eksploatacji. W kolejnym etapie analizy model powielono, tak aby możliwe było zasymulowanie kontaktu dwóch współpracujących ze sobą tarcz. Następnie jeden z modeli umiejscowiono współosiowo z drugim i zbliżono tak, aby dwie tarcze zetknęły się w jednym, środkowym punkcie. W następnym etapie na modele nałożono siatkę elementów skończonych (Rys. 47).

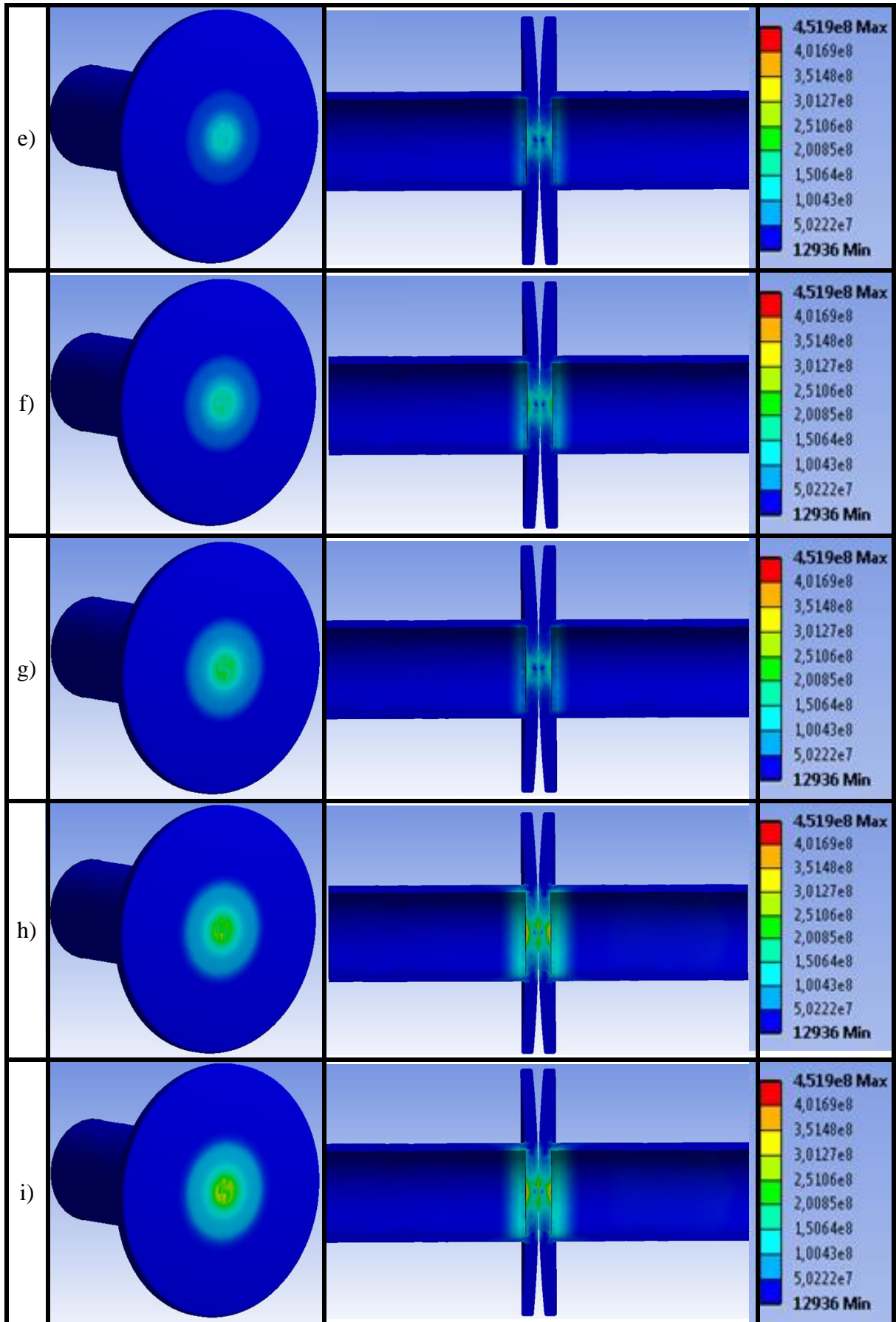


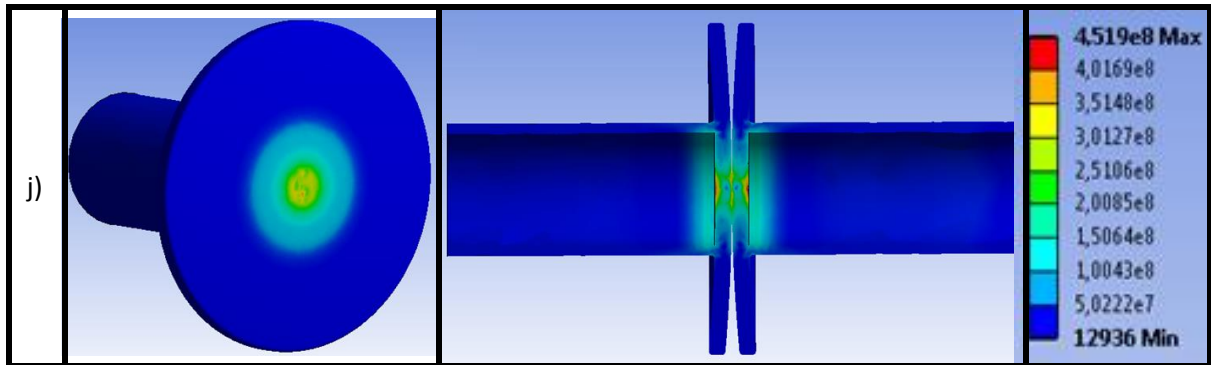
Rys. 47 Modele z nałożoną siatką elementów skończonych

Jak można zauważyć na Rys. 47 siatka elementów skończonych została nałożona na model złożeniowy w taki sposób, że wielkość elementów skończonych była różna i zależała od miejsca nałożenia siatki. Dzięki temu możliwe było znaczne zagęszczenie siatki elementów skończonych w miejscach, w których spodziewano się największych wartości naprężeń tj. w miejscu kontaktu dwóch tarcz oraz w miejscu ewentualnej koncentracji naprężeń (połączenie tarczy z tuleją). Uzyskano w ten sposób siatkę składającą się z 59095 elementów skończonych i 103401 węzłów. W następnym etapie analizy model utwierdzono w taki sposób, że możliwy stał się ruch jedynie jednej z tulei, wyłącznie w kierunku wzdłużnym. Do „ruchomej” tulei przyłożono również siłę działającą w kierunku wzdłużnym o wartości 250 kN, która dociskała do siebie dwie tarcze zderzakowe. Wartość tej siły została ustalona na podstawie badań wstępnych jako maksymalna działająca w trakcie normalnej

eksploatacji. Na Rys. 48 przedstawiono dziesięć kolejnych etapów działania siły i powstających w złozeniu naprężeń. W celu lepszego zobrazowania miejsca powstawania naprężeń model przedstawiono w taki sposób, że widoczna jest jedynie jedna z tulei oraz widok dwóch elementów w przekroju.

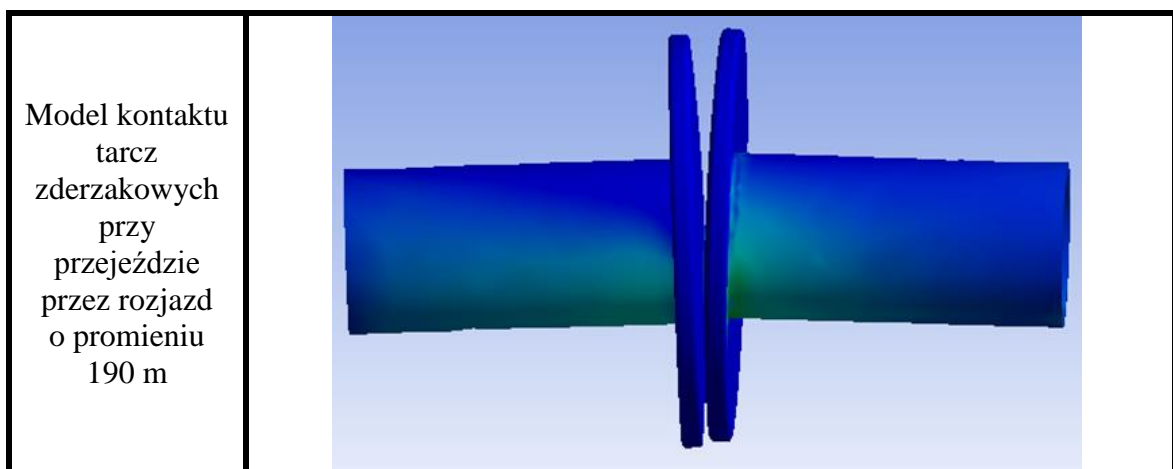


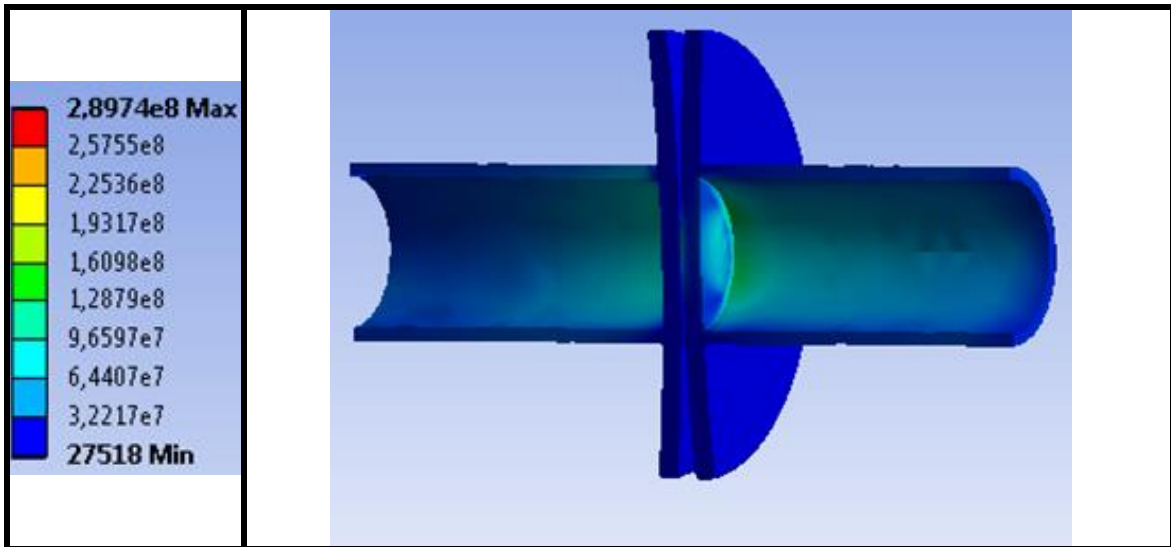




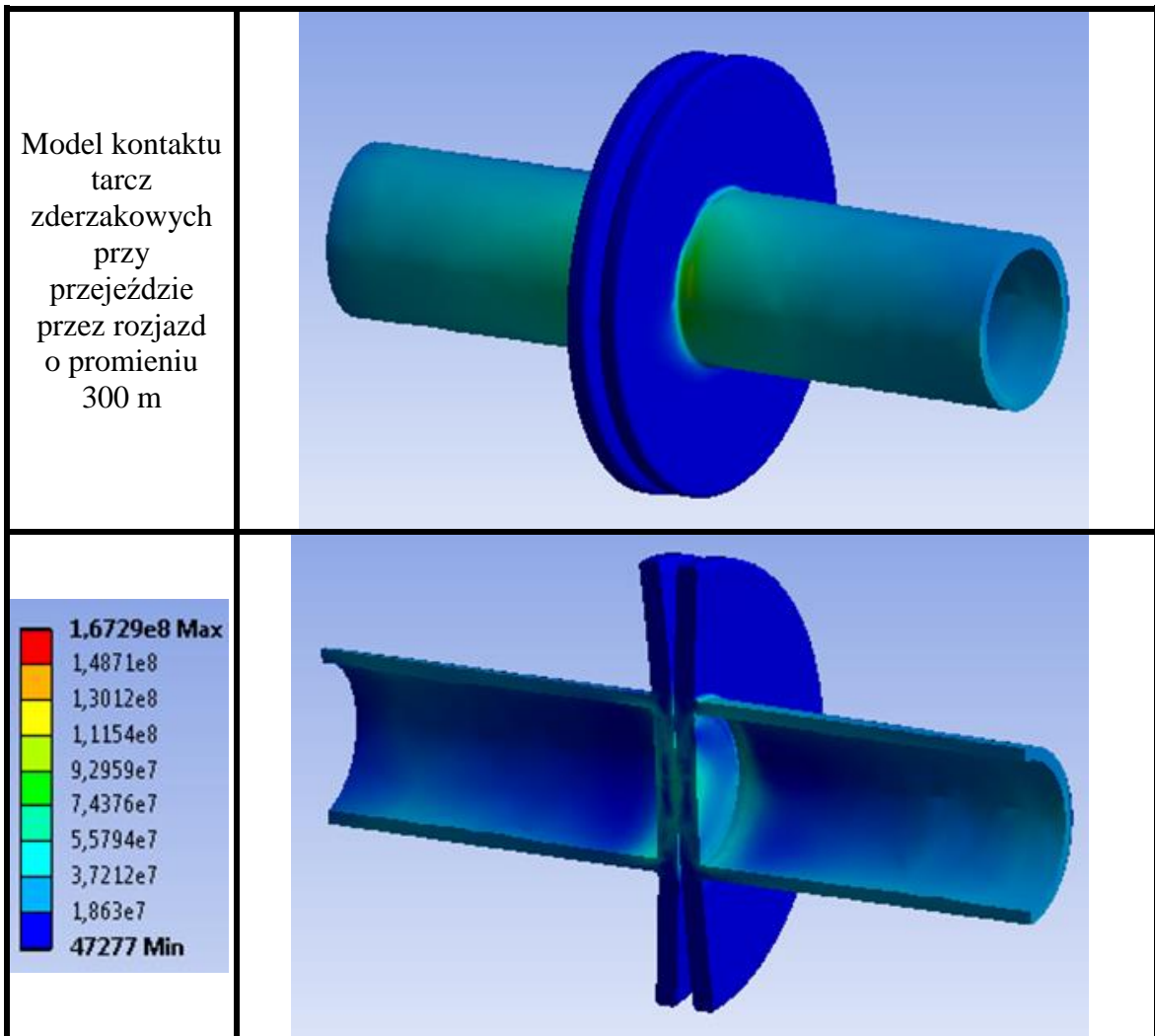
Rys. 48 Kolejne etapy działania siły o wartości 250 kN działającej w kierunku wzdłużnej osi zderzaka

Z przeprowadzonej analizy wynika, że największe naprężenia powstałe w skutek działania siły o wartości 250 kN w kierunku wzdłużnym wynoszą ok. 452 MPa. Powstają one w środkowych częściach tarcz zderzakowych, w miejscu ich kontaktu. Wynik taki znajduje potwierdzenie w rzeczywistości, ponieważ części środkowe tarcz ulegają największemu zużyciu ściernemu i zmęczeniowo-kontaktowemu. W ramach analizy z wykorzystaniem metody elementów skończonych zasymulowano również dociskanie do siebie tarcz zderzakowych podczas przejazdu pociągu przez rozjazdy o promieniach odpowiednio 190 m i 300 m. W tym celu umieszczono tuleje z tarczami względem siebie w taki sposób, że tarcze w dalszym ciągu pozostawały w kontakcie, a kąt pomiędzy osiami wzdłużnymi tulei wynosił 176° dla symulacji rozjazdu o promieniu 190 m oraz 178° dla symulacji rozjazdu o promieniu 300 m. Po umieszczeniu tulei zderzakowych w odpowiedniej pozycji na układ nałożono ograniczenia dotyczące ewentualnych przemieszczeń oraz przyłożono siłę o wartości 250 kN. Wyniki analizy MES przedstawione zostały na Rys. 49 i Rys. 50.





Rys. 49 Naprężenia występujące w tulejach i tarczach zderzakowych przy przejeździe przez rozjazd o promieniu 190 m

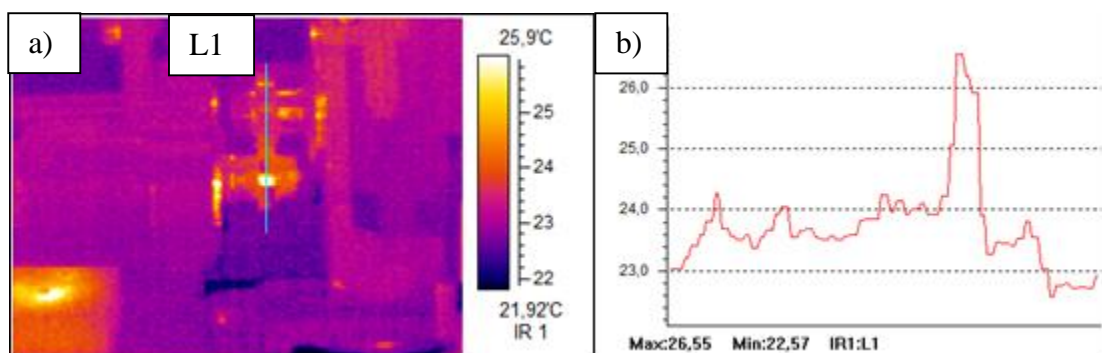


Rys. 50 Naprężenia występujące w tulejach i tarczach zderzakowych przy przejeździe przez rozjazd o promieniu 300 m

Maksymalne naprężenia zarejestrowane podczas analizy wynosiły odpowiednio ok. 290 MPa dla sytuacji przejazdu przez rozjazd o promieniu 190 m oraz ok. 167 MPa dla sytuacji przejazdu przez rozjazd o promieniu 300 m. Jak można zauważyć wartości te są znacząco mniejsze od otrzymanych w wyniku dociskania do siebie tarcz zderzakowych ułożonych współosiowo. W związku z powyższym na podstawie przeprowadzonych obliczeń oraz analizy z wykorzystaniem metody elementów skończonych założono, że do badań stanowiskowych zużycia ściernego na próbkach należy dobrać wartości siły ściskającej 700 N dla zasymulowania skrajnych sytuacji oraz 350 N dla zasymulowania siły działającej na tarcze zderzakowe w trakcie ich normalnego użytkowania.

7.3 Pomiar temperatury

Ze względu na wpływ temperatury w punkcie skojarzenia ciernego na współczynnik tarcia i charakterystyki zużycia [8], [24], [63] przed przystąpieniem do właściwych badań zużycia ściernego na stanowisku Amslera zmierzono temperaturę na powierzchniach próbek będących ze sobą w kontakcie. Pomiaru dokonano z wykorzystaniem kamery termowizyjnej Satir SAT-S180, a otrzymane termogramy poddano analizie przy użyciu oprogramowania SATReport8. Metoda pomiaru temperatury w węzłach tarcia z wykorzystaniem techniki termowizyjnej wykorzystywana jest powszechnie i potwierdziła swoją przydatność ze względu na możliwość przeprowadzenia bezinwazyjnych pomiarów ruchomych elementów [67], [69], [97]. Termogram przedstawiający badane skojarzenie wraz z wykresem temperatury przedstawiono na Rys. 51.



Rys. 51 Termogram skojarzenia tribologicznego w maszynie Amslera

Pomiarów dokonywano przy kombinacjach skojarzeń stal-brąz, stal-stal zarówno ze smarowanym węzłem tarcia jak i bez smarowania. Na Rys. 51 przedstawiono przykład termogramu, na którym zarejestrowano najwyższą temperaturę. Po analizie temperatury

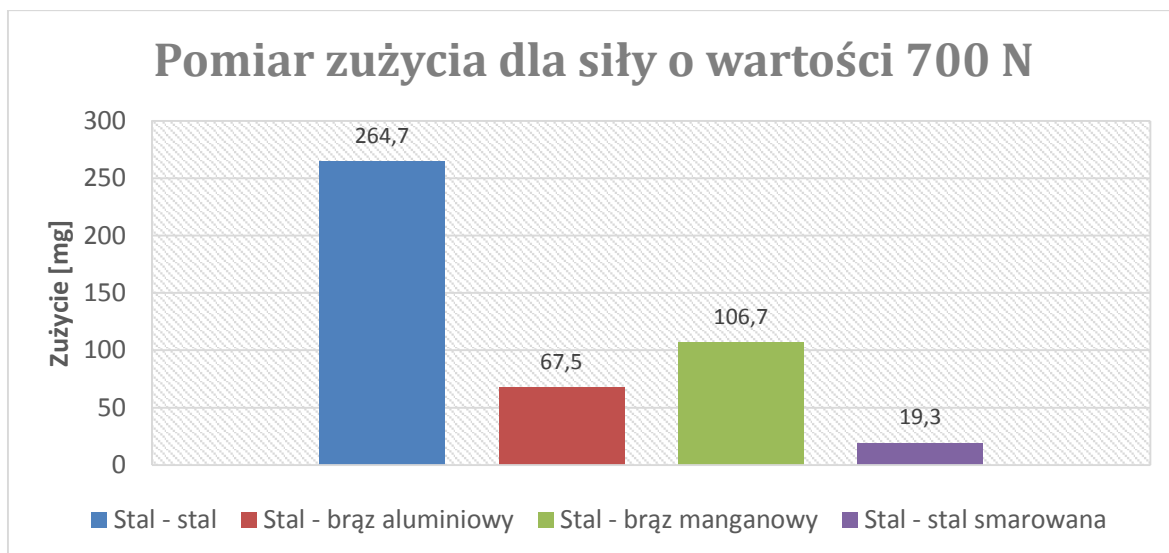
wykonanej w programie SATReport8 wzdłuż wyznaczonej linii L1 przebiegającej przez środek dwóch stykających się próbek w trakcie badania, zaobserwować można, że maksymalna zarejestrowana temperatura na powierzchni próbek nie przekracza 27°C. Dokładna wartość temperatury błyskowej w punkcie styku jest bardzo trudna do zmierzenia. Możliwe jest jej przybliżone wyznaczenie w sposób analityczny, na przykład z wykorzystaniem modeli zaproponowanych przez Bowden'a i Tabor'a [15], Jaeger'a [46] lub Archarda [7]. Jednakże ze względu na zalety metod termowizyjnych są one często i skutecznie stosowane w diagnostyce węzłów tarcia. W związku z powyższym stwierdzono, że zarejestrowana temperatura wynosząca ok. 27 °C nie jest parametrem mającym istotny wpływ na uzyskiwane wyniki pomiarów zużycia.

7.4 Wyniki badań zużycia ściernego

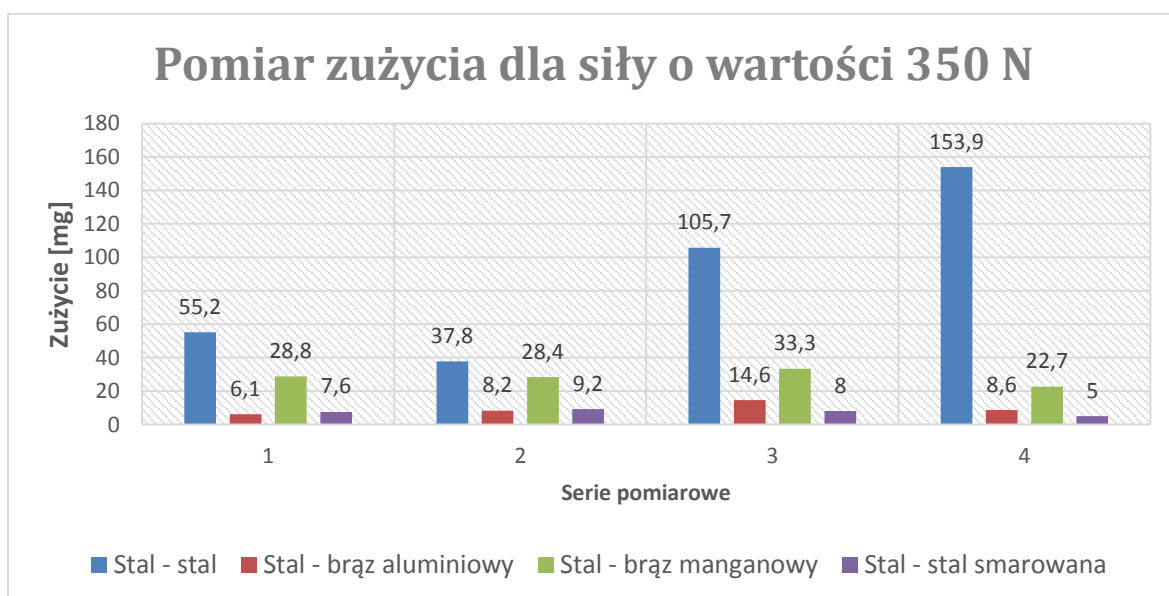
Parametrami mierzonymi podczas badań było zużycie (Z) (określane jako ubytek masy próbki) oraz siła tarcia (T). Zużycie mierzono z wykorzystaniem wagi laboratoryjnej AND HM-300, przy czym próbkę odfuszczano z wykorzystaniem izopropanolu co 25 obrotów, a następnie ważono. Wszystkie kombinacje skojarzeń poddawano 200 obrotom, a ważenie prowadzono wg powyżej opisanej metodyki. Siłę tarcia (T) mierzono w odstępach 1-sekundowych przez cały okres badania każdej z próbek. Do skojarzeń smarowanych zastosowano smar grafitowany pobrany z eksploatowanych tarcz zderzakowych w rzeczywistych warunkach. Ogółem przeprowadzono pięć serii pomiarowych - jedną przy sile dociskającej próbkę o wartości 700 N oraz cztery przy sile o wartości 350 N. W każdej serii pomiarowej przeciwpróbka wykonana była ze stali i nie była pokryta żadną powłoką. Skojarzenia te miały odwzorować rzeczywistą sytuację mającą miejsce w eksploatacji. W poszczególnych seriach badaniom poddawano próbki stalowe, próbki pokryte powłoką z brązu aluminiowego CuAl9Fe3, próbki pokryte powłoką z brązu manganowego CuMn11Al8Fe3Ni3 oraz próbki stalowe ze smarowaniem smarem grafitowanym. Pierwsza seria pomiarowa różniła się od pozostałych wartością siły z jaką dociskano próbkę i przeciwpróbkę do siebie. W serii tej była to wartość 700 N co odpowiadać miało skrajnym sytuacjom, które mogą wystąpić podczas eksploatacji. Pozostałe serie pomiarowe prowadzone były przy wykorzystaniu siły o wartości 350 N. Wszystkie parametry dla czterech pozostałych serii pozostawały niezmiennie. Wyniki pomiarów zużycia (Z) oraz średniej siły tarcia (\bar{T}) dla wszystkich typów skojarzeń, po wykonaniu przez próbki 200 obrotów, przedstawiono w Tab. 9 oraz na Rys. 52 i Rys. 53.

Tab. 9 Wyniki badań stanowiskowych

Nr próby	Skojarzenie	Smarowanie	Siła ściskająca (P)	Prędkość obrotów (n)	Zużycie (Z)	Średnia siła tarcia (\bar{T})
			[N]	[min ⁻¹]	[mg]	[N]
1	stal - stal	Nie	700	10	264,7	70,94
2	stal-brąz aluminiowy	Nie	700	10	67,5	137,98
3	stal - brąz manganowy	Nie	700	10	106,7	275,65
4	stal - stal	Tak	700	10	19,3	121,68
5	stal - stal	Nie	350	10	55,2	93,72
6	stal - stal	Nie	350	10	37,8	50,5
7	stal - stal	Nie	350	10	105,7	106,94
8	stal - stal	Nie	350	10	153,9	117,58
9	stal - brąz aluminiowy	Nie	350	10	8,7	59,93
10	stal - brąz aluminiowy	Nie	350	10	8,2	67,64
11	stal - brąz aluminiowy	Nie	350	10	14,6	59,32
12	stal - brąz aluminiowy	Nie	350	10	8,6	68,24
13	stal - brąz manganowy	Nie	350	10	28,8	92,95
14	stal - brąz manganowy	Nie	350	10	28,4	99,21
15	stal - brąz manganowy	Nie	350	10	33,3	97,01
16	stal - brąz manganowy	Nie	350	10	22,7	101,33
17	stal - stal	Tak	350	10	7,6	47,26
18	stal - stal	Tak	350	10	9,2	42,28
19	stal - stal	Tak	350	10	8,0	37,9
20	stal - stal	Tak	350	10	5,0	46,21



Rys. 52 Wyniki badań stanowiskowych



Rys. 53 Całkowity ubytek masy po wykonaniu 200 obrotów przy sile ściskającej o wartości 350 N

Z analizy wyników zamieszczonych w Tab. 9 oraz na Rys. 52 wynika, że przy sile ściskającej o wartości 700 N, największemu zużyciu uległa próbka stalowa, niepokryta żadną powłoką, będąca w kontakcie z przeciwpróbką wykonaną również ze stali, bez obecności środka smarującego (264,7 mg). Najmniejszym zużyciem cechowała się próbka stalowa, smarowana (19,3 mg). Skojarzenia te symulowały skrajną sytuację, w której tarcze zderzakowe nie zostały pokryte smarem, co ze względu na przeoczenia pracowników zajmujących się utrzymaniem pojazdów ma czasami miejsce w rzeczywistości. Na podstawie wykresu (Rys. 53) można natomiast wyciągnąć wniosek, że największemu

zużyciu w przypadku wszystkich czterech serii pomiarowych przy sile ściskającej o wartości 350 N również uległy próbki stalowe bez powłoki oraz bez smarowania (odpowiednio 55,2 mg, 37,8 mg, 105,7 mg, 153,9 dla poszczególnych serii pomiarowych). Różnica zużycia pomiędzy próbkami niesmarowanymi i bez powłoki, a pozostałymi rodzajami próbek jest znacząca w przypadku wszystkich serii pomiarowych. Najmniejszym zużyciem cechują się próbki pokryte brązem aluminiowym oraz próbki smarowane. We wszystkich czterech seriach pomiarowych ich zużycie osiągało bardzo podobny poziom. W przypadku dwóch serii pomiarowych, mniejsze zużycie osiągały próbki stalowe bez powłoki, w przypadku dwóch pozostałych serii, najmniejszym zużyciem charakteryzowały się próbki z powłoką z brązu aluminiowego. Pozwala to wyciągnąć wniosek, że możliwe byłoby zastosowanie powłoki brązu aluminiowego jako warstwy zabezpieczającej tarczę zderzaka kolejowego w trakcie eksploatacji, która zastąpiłaby obecnie stosowane rozwiązanie. Można przypuszczać, że wyniki zużywania się tarcz zderzaków będą podobne do tych osiągniętych na próbkach, stosowanie powłoki z brązu pozwoli jednak na uniknięcie wszelkich niedogodności i wad wynikających ze stosowania smaru.

Na kolejnych wykresach (Rys. 54 i 55) przedstawiono zużycie całkowite Z_c mierzone jako:

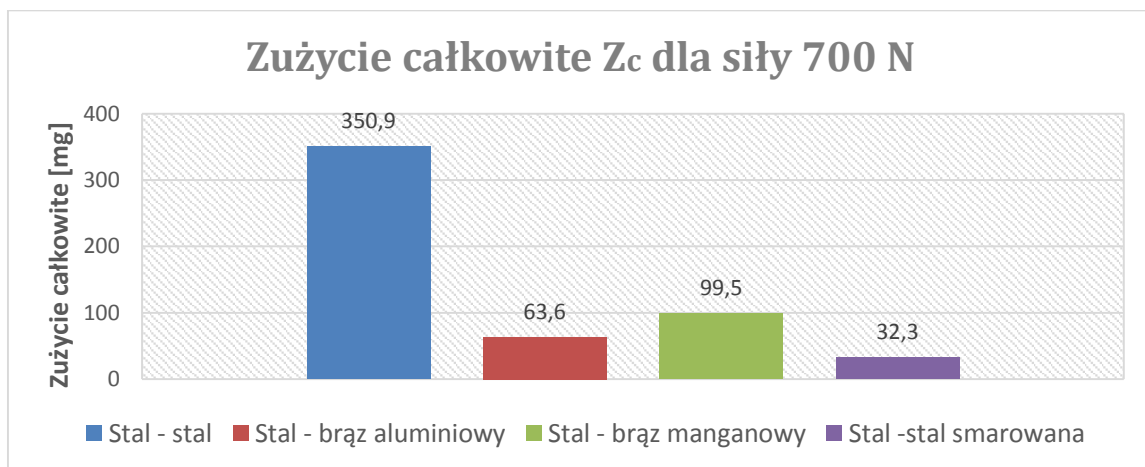
$$Z_c = Z_1 + Z_2 \quad (14)$$

gdzie:

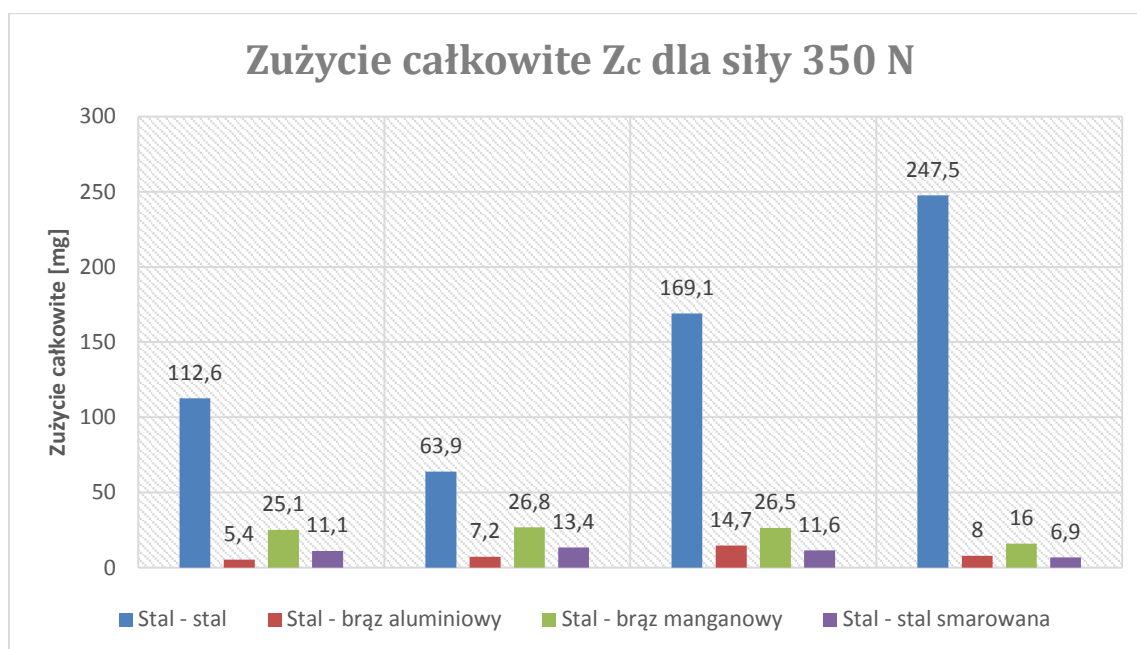
Z_c – zużycie całkowite [mg];

Z_1 – ubytek masy próbki [mg];

Z_2 – ubytek masy przeciwpróbki [mg].



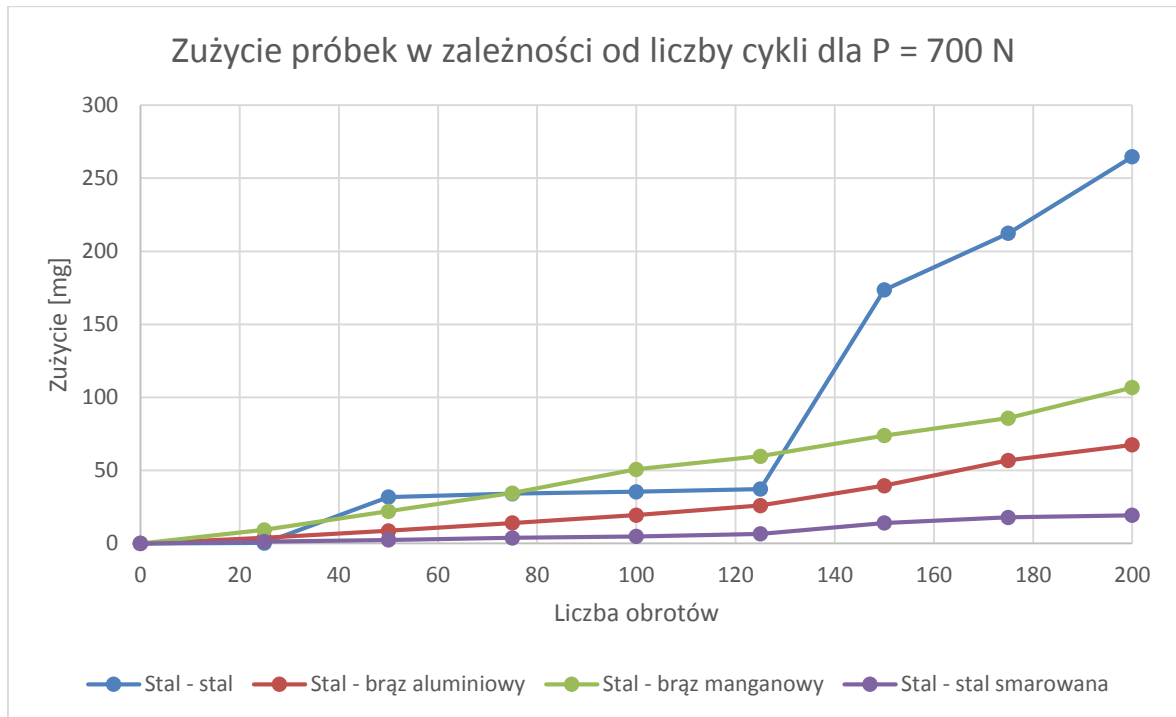
Rys. 54 Zużycie całkowite Z_c dla siły o wartości 700 N



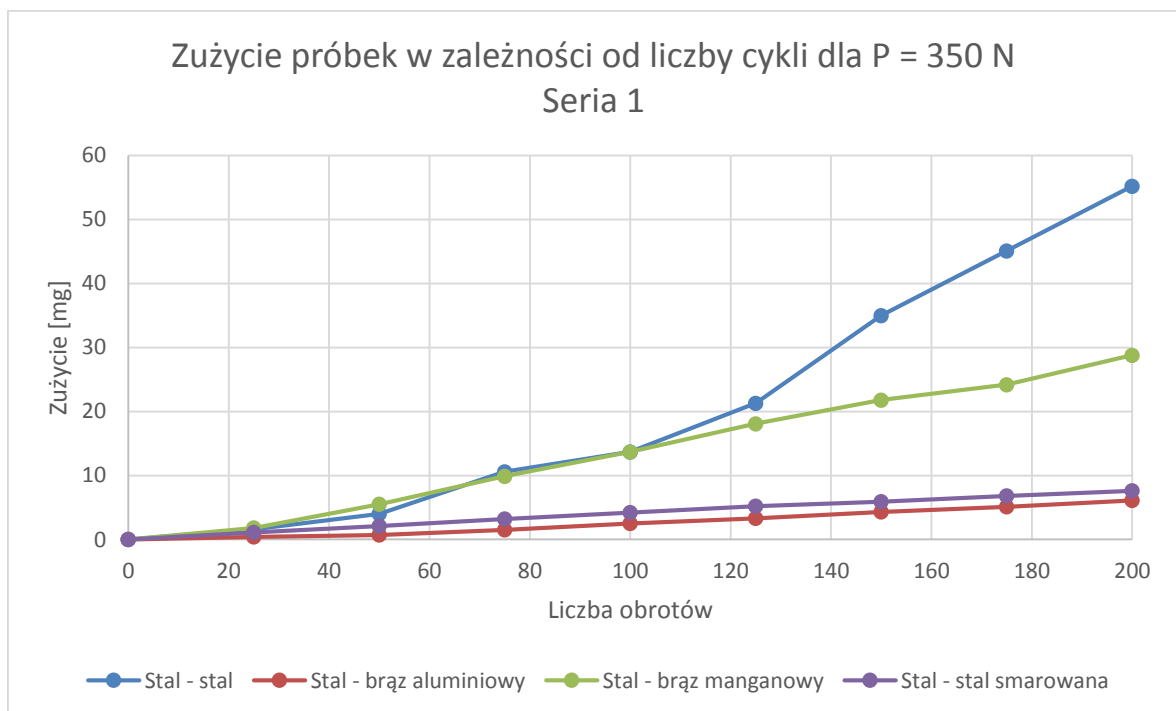
Rys. 55 Zużycie całkowite Z_c dla siły o wartości 350 N w kolejnych seriach pomiarowych

Wyniki zużycia przedstawione na Rys. 54 i Rys. 55 wskazują, że całkowite zużycie Z_c przedstawia się na podobnym poziomie jak zużycie mierzone jedynie jako ubytek masy próbki. Dodatkowo można zauważyć, że zużycie Z_c w przypadku brązu aluminiowego i manganowego jest mniejsze niż w przypadku pomiaru jedynie ubytku masy próbki. Stan taki wynika z faktu osadzania się brązu na przeciwpróbce podczas badania. Pomimo odtłuszczenia i oczyszczenia przeciwpróbki przed jej zważeniem, zarejestrowano wzrost jej masy, równy masie materiału brązu, który się na niej osadził. W pozostałych przypadkach tj. dla skojarzeń stal-stal oraz stal-stal smarowana, zużycie Z_c określane jako suma ubytku masy próbki i przeciwpróbki jest zauważalnie większe niż w przypadkach określonych na Rys. 52 i Rys. 53. Na kolejnych wykresach (Rys. 56 - Rys. 60) przedstawiono szczegółowe wyniki zużycia próbek w poszczególnych seriach pomiarowych, mierzone co 25 obrotów próbki. Na Rys. 56 przedstawiono wykres zależności zużycia od liczby obrotów wykonanych przez próbkę przy sile dociskającej próbkę do przeciwpróbki o wartości 700 N. Można zauważyć, że do wartości 125 obrotów zużycie wszystkich próbek kształtowało się na podobnym poziomie. Wraz ze wzrostem liczby obrotów powyżej 125 następował gwałtowny wzrost zużycia próbki stalowej niepokrytej żadną powłoką i bez smarowania. Spowodowane było to nagromadzeniem produktów zużycia, które po pewnym czasie zaczęły rysować próbkę, powodując jej wzmożone zużycie. Pozostałe próbki (pokryte brązami oraz smarem) cechowały się niemalże liniową zależnością zużycia od liczby cykli.

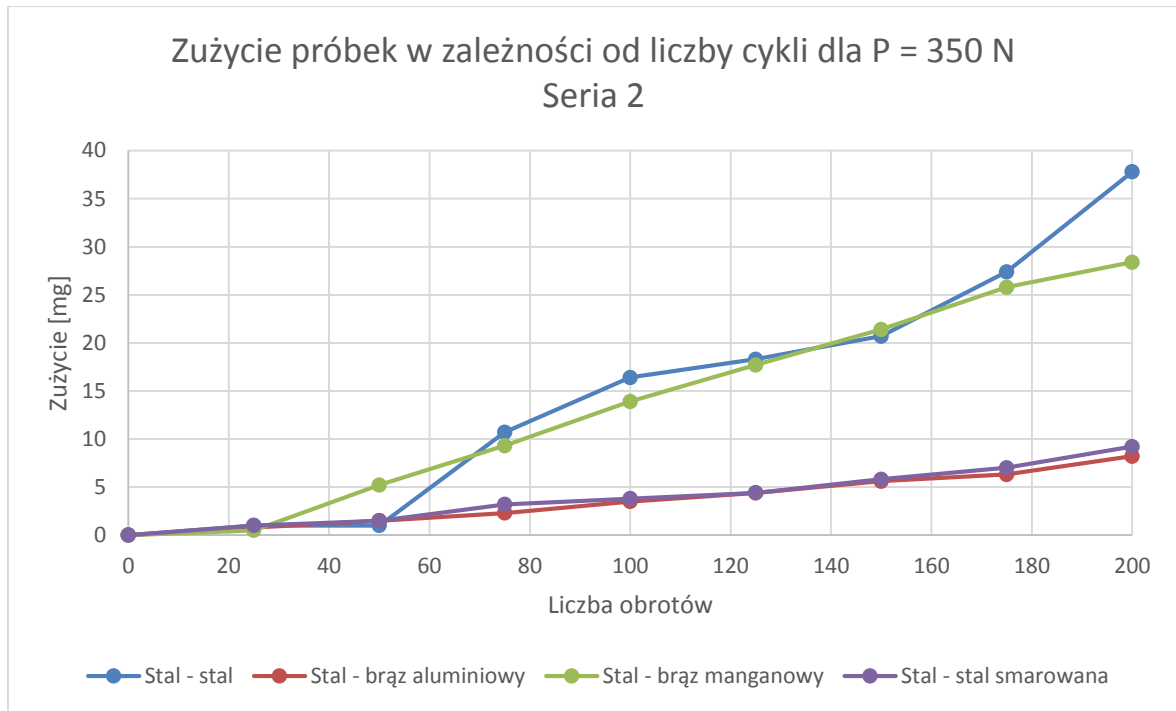
Najmniejszemu zużyciu podlegały próbki smarowane oraz z powłoką z brązu aluminiowego.



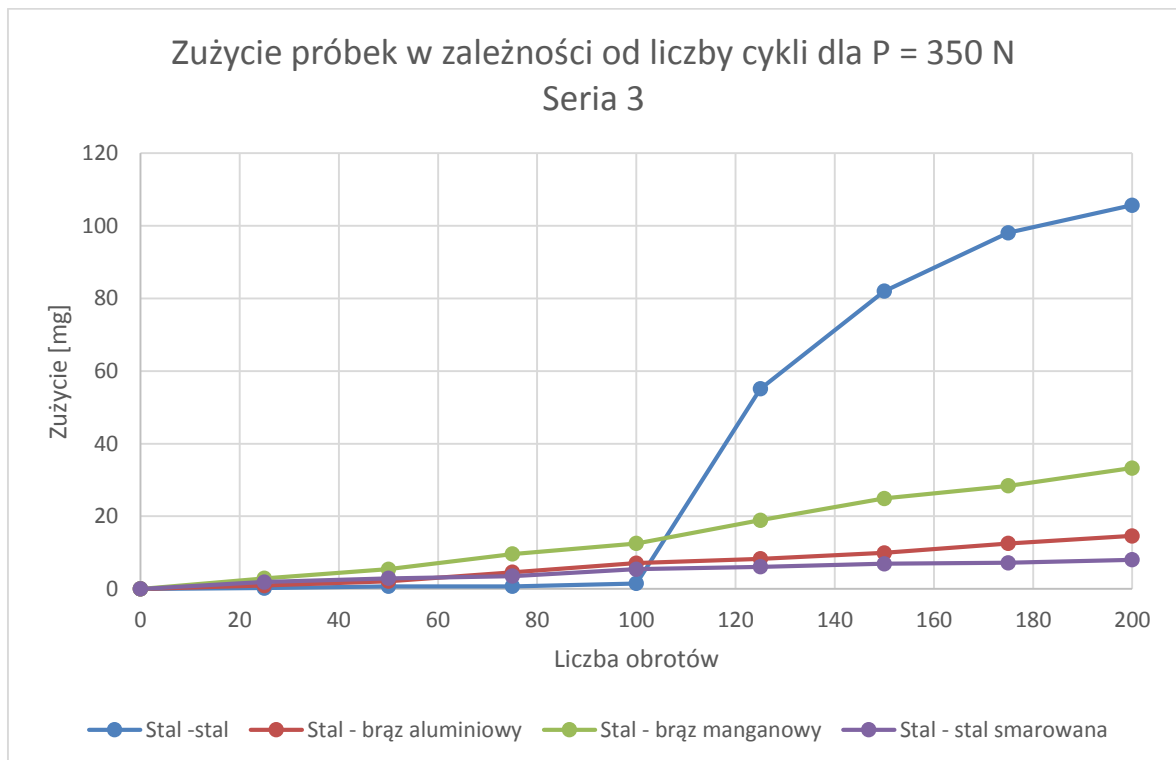
Rys. 56 Szczegółowe zużycie próbek przy sile ściskającej o wartości 700 N



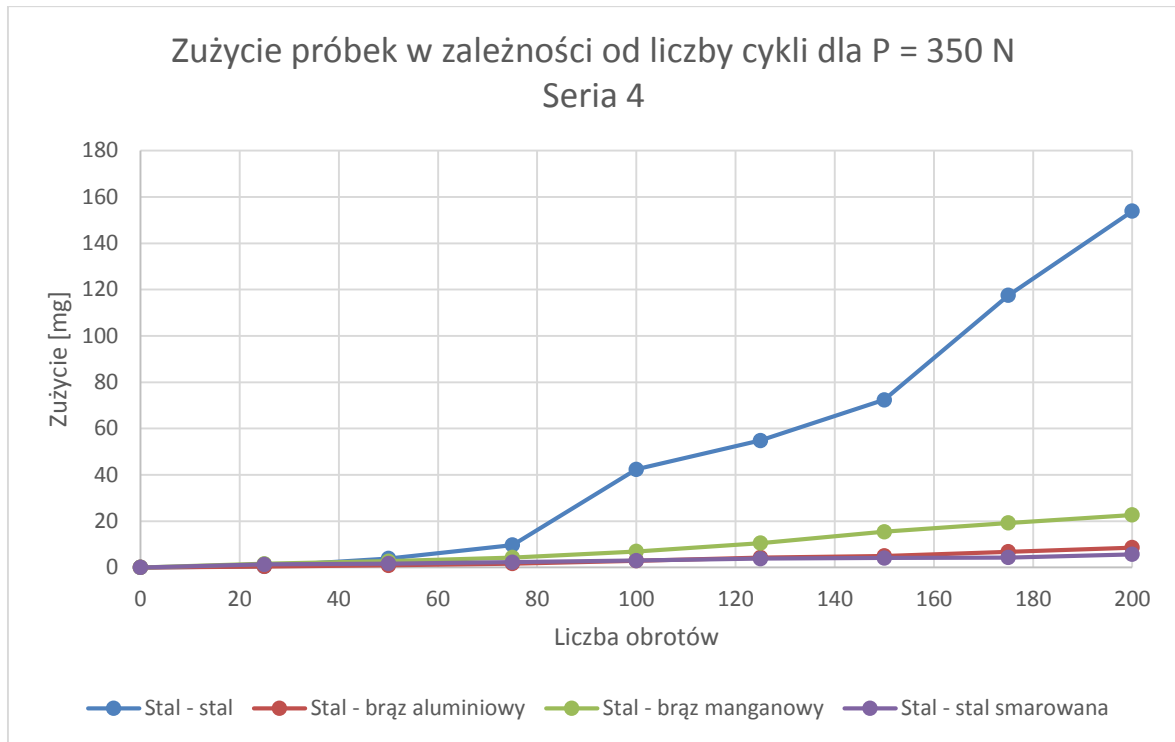
Rys. 57 Szczegółowe zużycie próbek przy sile ściskającej o wartości 350 N – seria 1



Rys. 58 Szczegółowe zużycie próbek przy sile ściskającej o wartości 350 N – seria 2



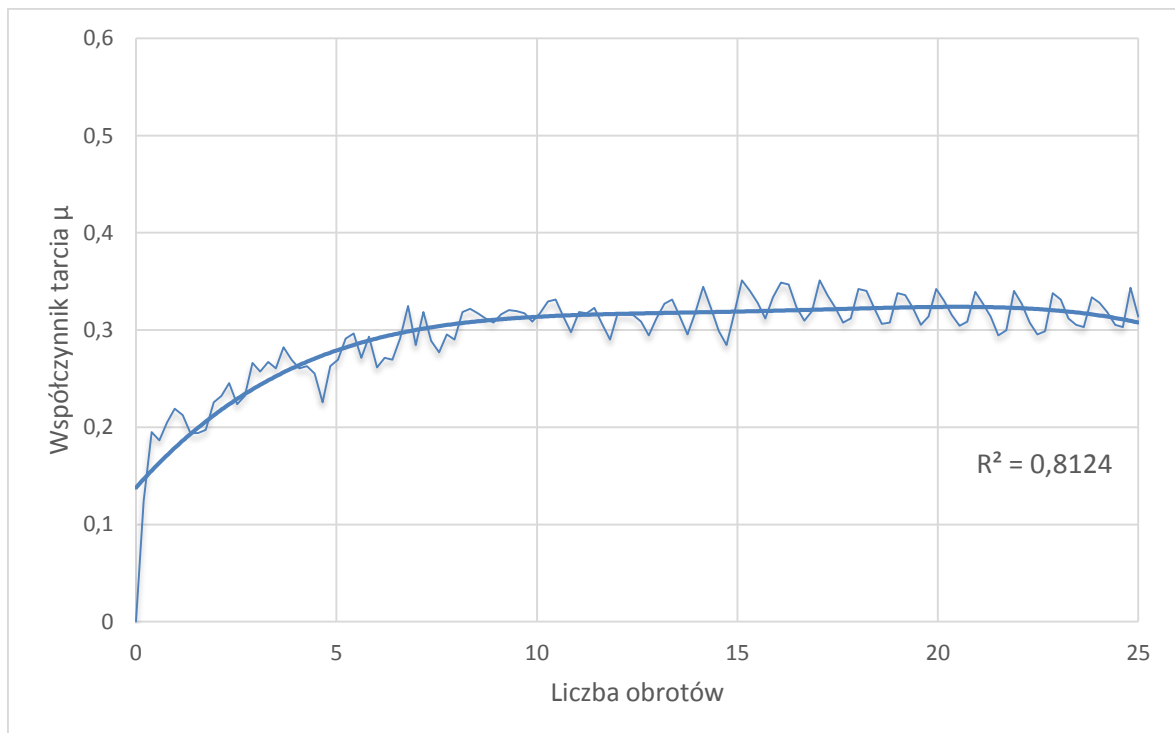
Rys. 59 Szczegółowe zużycie próbek przy sile ściskającej o wartości 350 N – seria 3



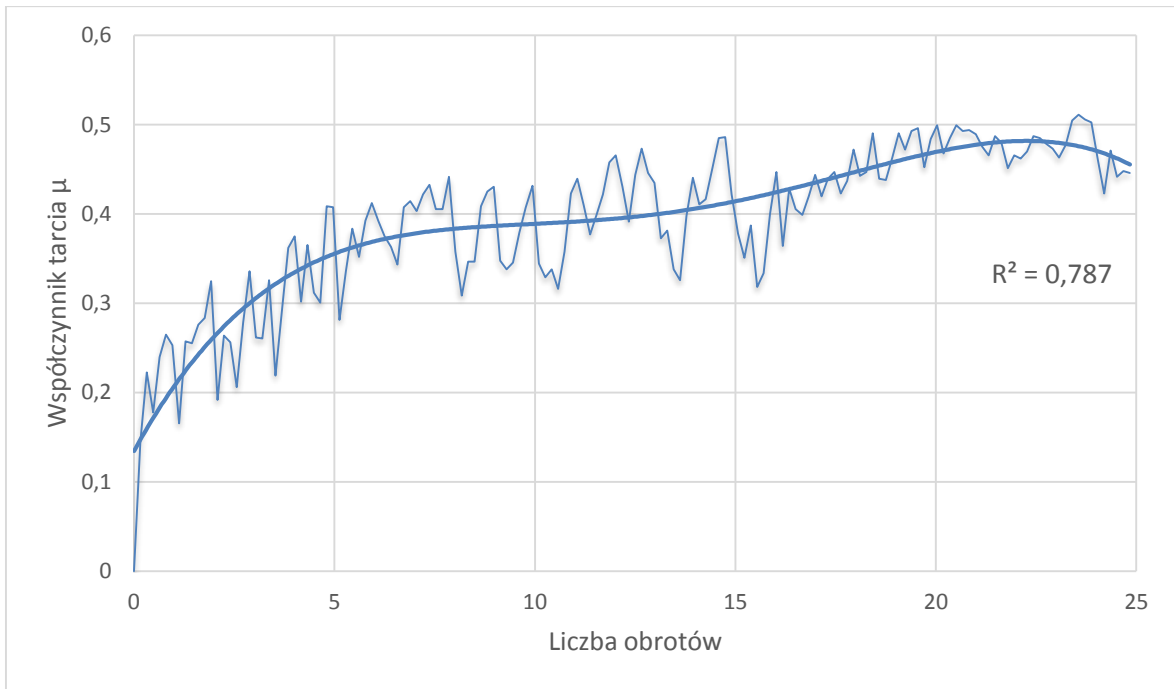
Rys. 60 Szczegółowe zużycie próbek przy sile ściskającej o wartości 350 N – seria 4

Analizując wykresy przedstawione na Rys. 57 -Rys. 60 można zaobserwować, że zużywanie się poszczególnych próbek przebiegało w każdej serii w bardzo podobny sposób. W przypadku próbek stalowych bez powłoki z brązu i bez smarowania można zauważyć prawidłowość polegającą na gwałtownym wzroście zużycia po przekroczeniu określonej liczby obrotów. Dzieje się tak, ponieważ po przekroczeniu określonej wartości obrotów (po pokonaniu przez próbkę określonej drogi) produkty zużycia zaczynają ją uszkadzać w coraz większym stopniu, powodując skrawanie i odrywanie się kolejnych jej elementów. W związku z powyższym zależność zużywania się próbki stalowej od drogi tarcia jest nieliniowa. W przypadku próbki pokrytej powłoką brązu manganowego CuMn11Al8Fe3Ni3 zależność ta jest znacznie bardziej zbliżona do liniowej. Zużycie próbek z brązem manganowym jest znacznie mniejsze niż w przypadku próbek stalowych, jednak pozostałe dwa rodzaje badanych skojarzeń (brąz aluminiowy oraz próbka stalowa smarowana) cechują się zdecydowanie lepszymi właściwościami tribologicznymi przy założonych warunkach. Zgodnie z charakterystykami przedstawionymi na wykresach (Rys. 57- Rys. 60) zużycie zarówno próbek z powłoką brązu aluminiowego CuAl9Fe3 jak i stalowych ze smarem grafitowanym wzrastało niemalże liniowo wraz ze wzrostem drogi tarcia (liczby obrotów próbek). Zauważyć można również bardzo zbliżone wartości zużycia przez cały okres badania - krzywe niemalże się na siebie nakładają. Końcowe wyniki

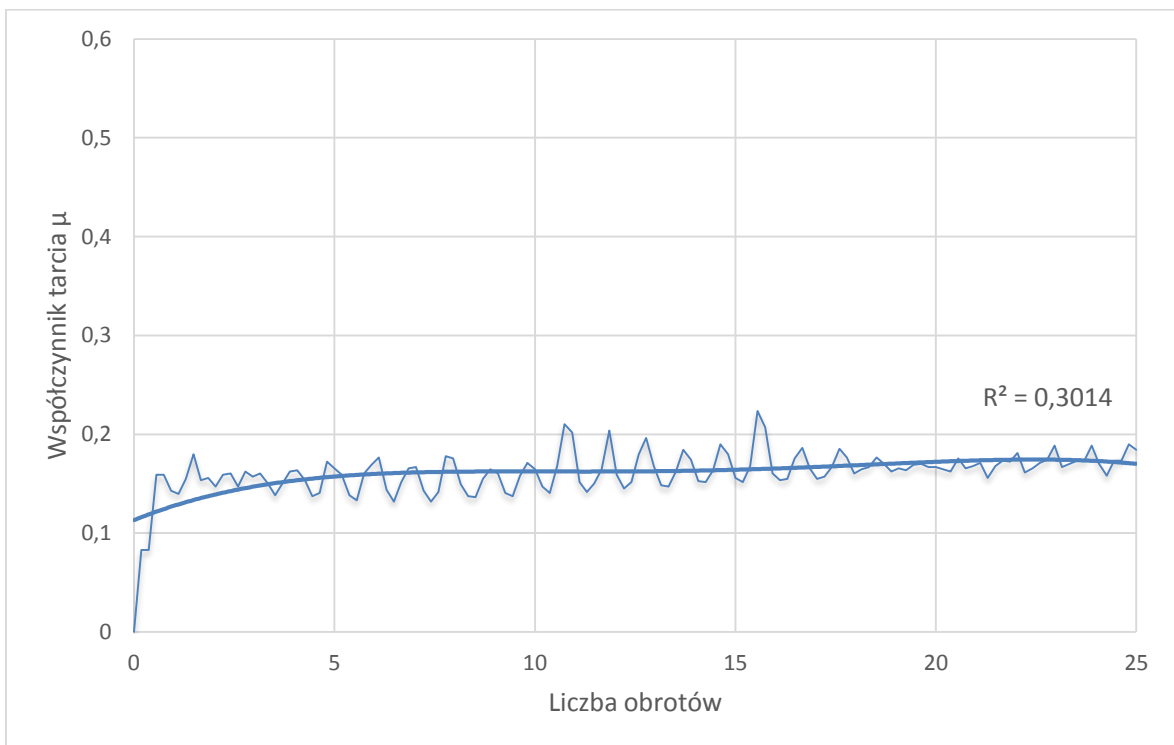
analizowanych czterech serii pomiarowych wskazują, że te dwa rodzaje próbek charakteryzują się praktycznie identycznym zużyciem w założonych warunkach. Przy odpowiedniej konstrukcji trybometru Amslera możliwy jest również pomiar współczynnika tarcia [28]. Ze względu na wyposażenie stanowiska pomiarowego w układ umożliwiający rejestrację siły tarcia, możliwe stało się wyznaczenie współczynników tarcia występujących podczas badań poszczególnych skojarzeń. Na Rys. 61 - Rys. 67 przedstawiono zależności zarejestrowanych współczynników tarcia od liczby obrotów wykonanych przez próbki (drogi tarcia). Ze względu na bardzo dużą ilość zarejestrowanych danych, zależność została opracowana na podstawie wybranych 25 obrotów każdego z rodzajów próbek, zarówno dla siły dociskającej próbki o wartości 700 N jak i 350 N. W przypadku próbki stalowej bez powłoki z brązu, bez smarowania i przy udziale siły 700 N, ze względu na dużą ilość produktów zużycia zaburzających rejestrację siły tarcia nie udało się wyznaczyć wartości współczynnika tarcia. W celu lepszego zobrazowania zmian współczynnika tarcia w czasie do każdego z wykresów dodano linię trendu wyznaczoną funkcją wielomianu stopnia czwartego.



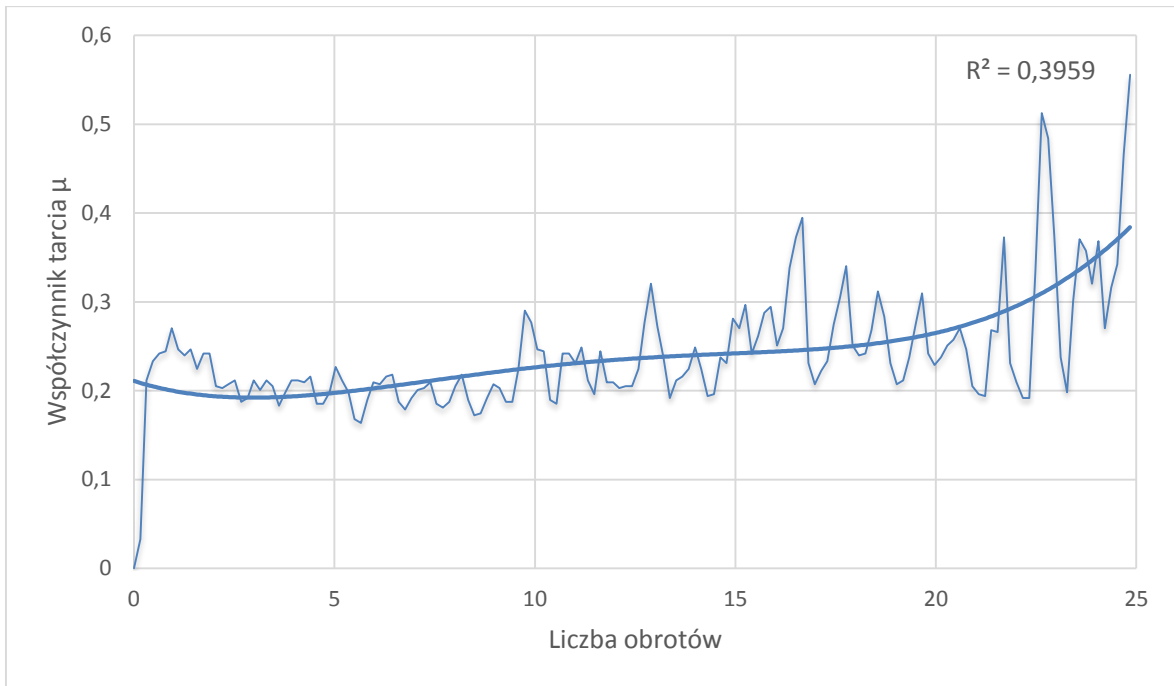
Rys. 61 Zależność współczynnika tarcia od liczby obrotów próbki pokrytej powłoką z brązu aluminiowego przy sile o wartości 700 N



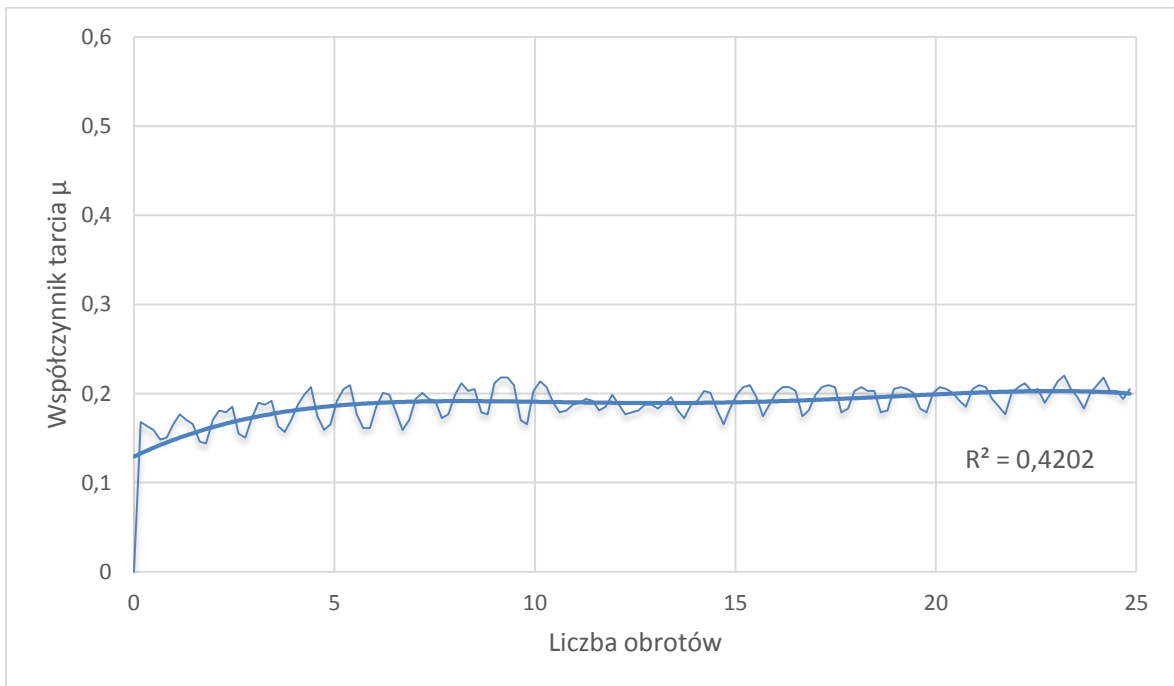
Rys. 62 Zależność współczynnika tarcia od liczby obrotów próbki pokrytej powłoką z brązu manganowego przy sile o wartości 700 N



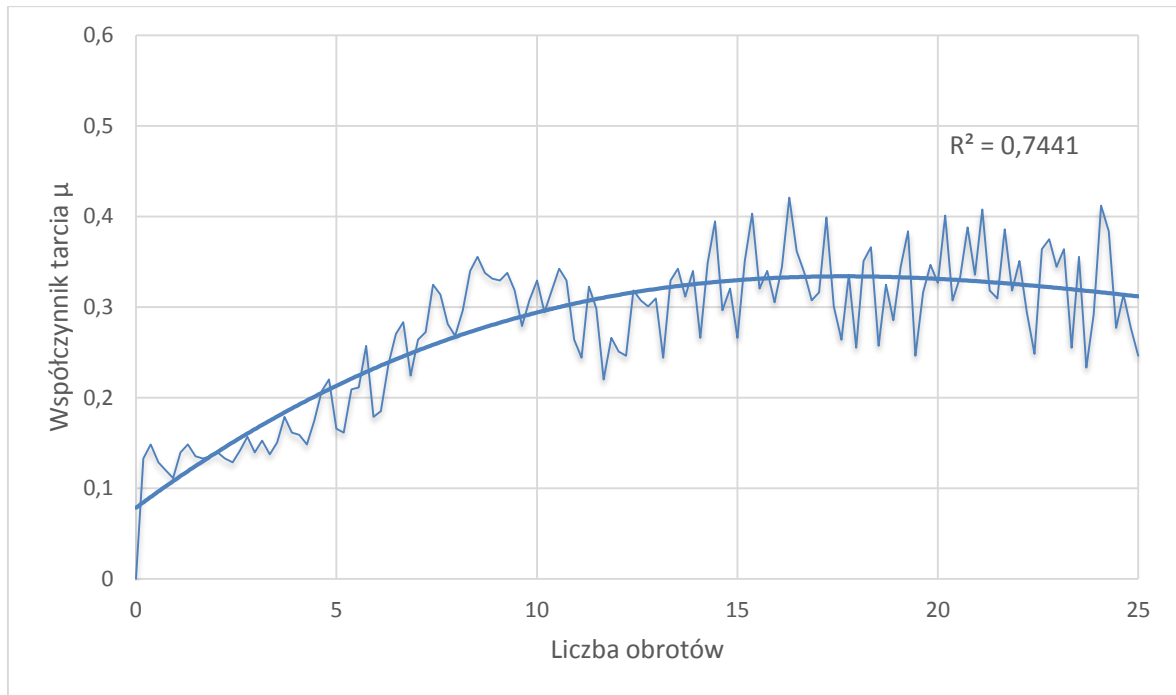
Rys. 63 Zależność współczynnika tarcia od liczby obrotów próbki stalowej pokrytej smarem grafitowanym przy sile o wartości 700 N



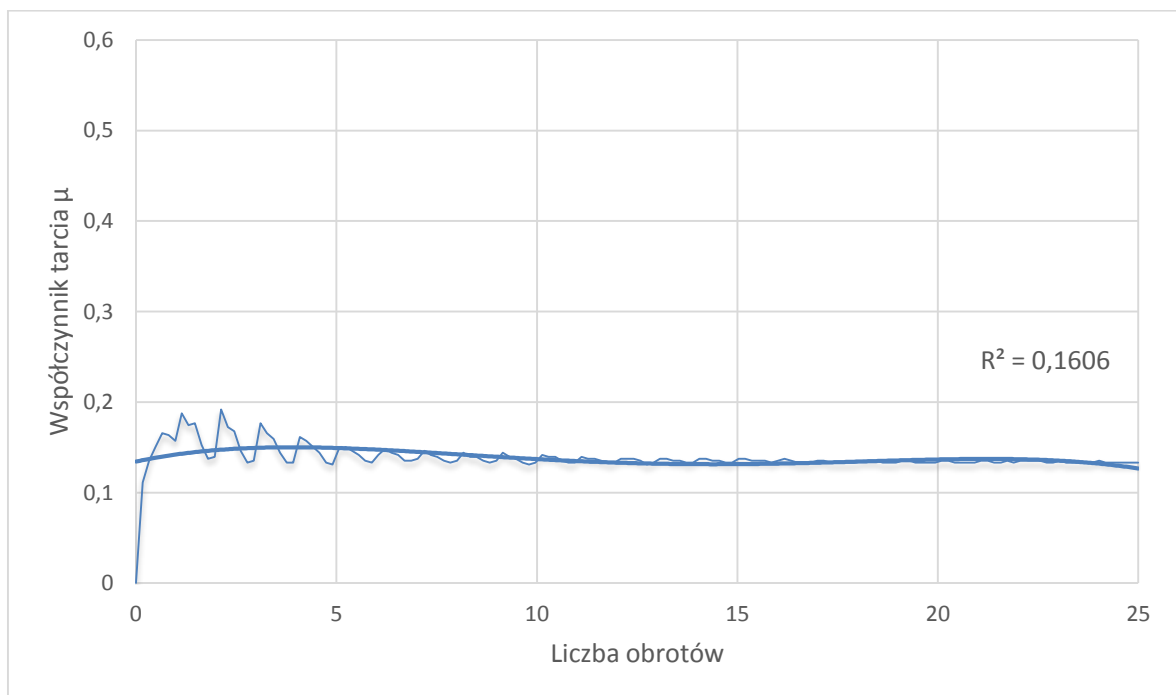
Rys. 64 Zależność współczynnika tarcia od liczby obrotów próbki stalowej (tarcie suche) przy sile o wartości 350 N



Rys. 65 Zależność współczynnika tarcia od liczby obrotów próbki pokrytej powłoką z brązu aluminiowego przy sile o wartości 350 N



Rys. 66 Zależność współczynnika tarcia od liczby obrotów próbki pokrytej powłoką z brązu manganowego przy sile o wartości 350 N



Rys. 67 Zależność współczynnika tarcia od liczby obrotów próbki stalowej pokrytej smarem grafitowanym przy sile o wartości 350 N

Na podstawie wykresów (Rys. 61- Rys. 67) zaobserwować można, że niezależnie od wartości przyłożonej siły dociskającej do siebie próbkę i przeciwpróbkę zależność

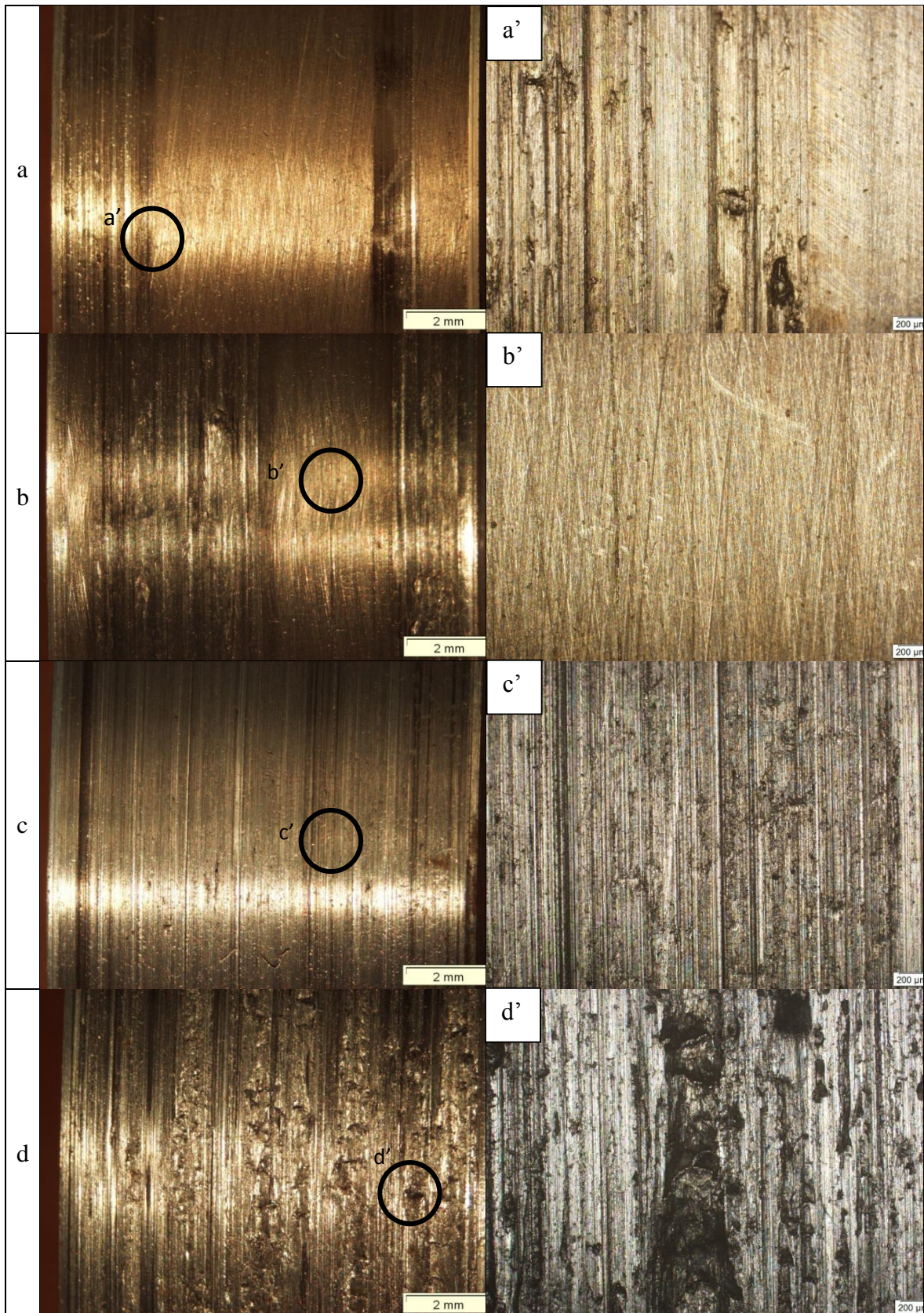
współczynnika tarcia od liczby obrotów jest podobna. W przypadku próbki pokrytej powłoką z brązu aluminiowego CuAl₁₉Fe₃ w początkowej fazie badania następuje stopniowy, niewielki wzrost współczynnika tarcia, który po pewnym czasie stabilizuje się na określonym poziomie ($\mu \approx 0,3$ dla siły $P=700$ N i $\mu \approx 0,2$ dla siły $P=350$ N) i pozostaje praktycznie niezmienny do końca badania. W przypadku brązu manganowego CuMn₁₁Al₈Fe₃Ni₃ wzrost współczynnika tarcia jest podobny jak dla próbki pokrytej powłoką z brązu aluminiowego, można jednak zauważyć większe wahania współczynnika tarcia w czasie oraz jego większą wartość (sięgające nawet $\mu \approx 0,5$ w przypadku siły $P=700$ N i $\mu \approx 0,4$ w przypadku siły $P=350$ N). W przypadku próbki stalowej pokrytej warstwą smaru grafitowanego można zauważyć, że współczynnik tarcia jest praktycznie stały od początku badania i wynosi ok. 0,18 dla siły $P=700$ N i ok. 0,15 dla siły $P=350$ N. Z Rys. 63 i Rys. 67 wynika również, że w trakcie trwania badania zmiany współczynnika tarcia w czasie są znikome i nie występują duże rozbieżności chwilowe w jego wartościach. W przypadku próbki stalowej (skojarzenie z tarcieniem na sucho) zaobserwować można największe nieregularności wartości współczynnika tarcia w czasie oraz większe wartości maksymalne, sięgające nawet ok. 0,55. Duże wahania są spowodowane występowaniem licznych produktów zużycia na powierzchni próbki i przeciwpróbki, które w sposób znaczący zwiększały rejestrowane wartości chwilowe siły tarcia.

7.5 Analiza zużycia powierzchni próbek

Na Rys. 68 przedstawiono zdjęcia próbek po badaniach wykonane przy użyciu mikroskopu świetlnego. Zaobserwować można przykłady wybranych próbek z każdego z czterech skojarzeń, które poddawane były badaniom zużycia ściernego. Próbki:

- a) pokryta brązem aluminiowym;
- b) pokryta brązem manganowym;
- c) bez powłoki, smarowana;
- d) bez powłoki i bez smarowania;

przedstawiono w dwóch powiększeniach.



Rys. 68 Zdjęcia powierzchni próbek po przeprowadzonych badaniach zużycia. a – próbka pokryta powłoką z brązu aluminiowego, b – próbka pokryta powłoką z brązu manganowego, c – próbka bez pokrycia, smarowana, d – próbka bez pokrycia, niesmarowana, a', b', c', d' – wybrane fragmenty próbek w większym powiększeniu

Powierzchnie próbek pokrytych powłokami brązu aluminiowego i manganowego (Rys. 68a i b) z widocznymi oznakami rysowania, bruzdowania i mikroskrawania świadczą o ściernym charakterze zużycia próbek. Na powierzchni próbek widoczne są efekty działania skrawania wywołanego przez wióry, będące produktem zużycia. Należy podkreślić, że na wielkość zużycia wszystkich rodzajów próbek, miała również wpływ wymiana tych produktów, poprzez przemywanie próbek w trakcie badania izopropanolem co 25 obrotów. W przypadku próbki stalowej bez powłoki, badanej w obecności środka smarnego w postaci smaru grafitowanego (Rys. 68c) zdjęcie powierzchni po przeprowadzeniu badania wskazuje na mechanizm zużycia opierający się zarówno na zużyciu ściernym jak i adhezyjnym. Oznacza to działanie mechanizmu zużycia określanego mianem scuffing (gwałtowne zużycie występujące w przypadku przzerwania warstwy smarnej). Na powierzchni widoczne są bruzdy i zarysowania podobne jak w przypadku próbek pokrytych brązami, charakterystyczne dla zużycia ściernego, oraz objawy specyficzne dla zużycia adhezyjnego – wyrwy w materiale powstałe wskutek rozerwania lokalnych szczepień materiału. Mechanizm ten jest charakterystyczny dla materiałów jednoimiennych, jak miało to miejsce w tym przypadku (przeciwpróbka wykonana została również ze stali S355J2, niepokrytej żadną powłoką). W przypadku ostatniego rodzaju analizowanych próbek – stalowych bez powłoki, badanych bez obecności środka smarnego (Rys. 68d) na powierzchni można zaobserwować objawy charakterystyczne zarówno dla zużycia ściernego jak i adhezyjnego. Na powierzchni próbki widoczne są bruzdy powstałe w wyniku rysowania i mikroskrawania przez produkty zużycia, jak również głębokie ubytki materiału powstałe wskutek wrywania szczepionego materiału próbki i przeciwpróbki. Adhezyjny charakter zużycia potwierdza również jednoimienny materiał obu obiektów będących w kontakcie.

8. BADANIA EKSPLOATACYJNE

Ostatnim etapem badań powłok były badania eksploatacyjne z wykorzystaniem obiektów rzeczywistych, tj. tarcz zderzakowych wykonanych ze stali S355J2 użytkowanych w kolejowych wagonach towarowych, zarówno w stanie niezmiennym jak i po nałożeniu powłok z brązu aluminiowego.

8.1 Wybór i przygotowanie obiektów do badań

W celu pomiaru zużycia tarcz pokrytych powłoką z brązu, należało zdemontować aktualnie eksploatowane zderzaki z pojazdu i poddać je procesowi napawania laserowego z wykorzystaniem proszku brązu aluminiowego. W tym celu, spośród wagonów eksploatowanych na bocznicach kopalni piasku, bocznicach kopalni węgla kamiennego oraz kilku liniach kolejowych na terenie województwa śląskiego, wybrano pojazd o najlepszym możliwym stanie tarcz zderzakowych, wynikającym z niedawno przeprowadzonej naprawy rewizyjnej. Obiekt badań został wybrany ze względu na miejsce jego eksploatacji (kopalnia piasku i kopalnia węgla kamiennego), którego warunki były szczególnie niekorzystne w aspekcie zużycia ściernego tarcz zderzakowych. Częste operacje ładowania i rozładowywania wagonów przewożących piasek oraz węgiel kamienny powodowały przedostawanie się drobin tych materiałów na powierzchnie tarcz zderzakowych, przyspieszając tym samym ich zużycie. Założono, że pomiar zmian zużycia w czasie będzie najbardziej widoczny w przypadku jego intensywnego charakteru, ponadto wybór obiektu badań pozwolił na sprawdzenie nowej konstrukcji w najmniej dogodnych warunkach. Wybranim pojazdem był wagon typu 418V z którego zdemontowano dwa zderzaki z tej samej czołownicy. W obu przypadkach były to zderzaki, których korpus (i tarcza) zostały wykonane ze stali S355J2, a jako element amortyzujący zastosowano sprężyny pierścieniowe. Pozostałe zderzaki wagonu (zamontowane na drugiej z czołownic) cechowały się takimi samymi parametrami. Po zdemontowaniu zderzaków z czołownicy wagonu możliwy stał się ich demontaż na poszczególne elementy składowe. W kolejnym kroku powierzchnię roboczą tarczy zderzakowej poddano procesowi szlifowania w celu usunięcia zanieczyszczeń oraz pozostałości po smarze grafitowanym. Ze względu na możliwości robota przemysłowego ABB oraz lasera diodowego HPDL LDF 4000-30 LaserLine, którym wykonywano proces napawania, podjęto decyzję o poddaniu procesowi napawania tarczę bez jej demontażu z tulei zderzakowej. W tym celu tuleje poddawane

napawaniu ustawiono w pozycji pionowej, a sam proces prowadzony był z wykorzystaniem proszku brązu aluminiowego (CuAl9Fe3), który podawano bezpośrednio do jeziora napoiny w strumieniu argonu, jako gazu transportującego. Głowica lasera podczas procesu wykonywała koliste ruchy, które umożliwiły ułożenie koncentrycznych okręgów napoiny na powierzchni tarcz zderzakowych (Rys. 69)



Rys. 69 Tarcze zderzakowe z napoinami brązu aluminiowego

Po wykonaniu napoin tuleje zderzakowe połączono z pozostałymi elementami zderzaków kolejowych oraz przytwierdzono do czołownicy. Tym samym wagon mógł zostać z powrotem włączony do eksploatacji.

8.2 Metodyka oraz przebieg badań

Po przytwierdzeniu zderzaków z tarczami pokrytymi powłokami z brązu aluminiowego do czołownicy stało się możliwe rozpoczęcie badań eksploatacyjnych. W pierwszym kroku z wykorzystaniem przymiaru (Rys. 70 i Rys. 71) oraz głębokościomierza dokonano pomiaru początkowych wartości spłaszczenia tarcz zderzakowych pokrytych brązem aluminiowym.



Rys. 70 Przymiar do pomiaru spłaszczenia tarczy zderzakowej



Rys. 71 Przymiar do pomiaru spłaszczenia tarczy zderzakowej

Dodatkowo w celu uzyskania wartości referencyjnych należało zmierzyć spłaszczenie tarcz zderzakowych przytwierdzonych do drugiej czołownicy wagonu, w których nie dokonywano zmian żadnych parametrów konstrukcyjnych. W tym celu oczyszczono powierzchnie robocze tarcz zderzaków ze smaru grafitowanego oraz dokonano pomiarów. Podczas badań eksploatacyjnych kluczową sprawą była metodyka ich prowadzenia. Założono, że konieczna jest eksploatacja nowej konstrukcji przez okres co najmniej jednego roku, ze względu na możliwość sprawdzenia parametrów powłoki we wszystkich możliwych warunkach atmosferycznych (zwłaszcza w zakresie zmiennych temperatur i opadów). Ponadto założono, że konieczne jest eksploataowanie pojazdów w taki sposób, aby wagon wyposażony w badane zderzaki zawsze znajdował się w środku składu pociągu, tak, aby zderzaki zarówno na jednej jak i na drugiej czołownicy pozostawały w trakcie użytkowania w kontakcie ze zderzakami innych pojazdów. W tym celu poinstruowano pracowników zajmujących się użytkowaniem i utrzymaniem przedmiotowego wagonu o konieczności zestawiania pociągów w taki właśnie sposób. Ponadto, konieczne było, aby zderzaki z tarczami pokrytymi powłoką z brązu aluminiowego nie były pokrywane smarem grafitowanym, co więcej, sąsiednie tarcze zderzakowe, z którymi przedmiotowe zderzaki współpracowały, również nie powinny posiadać na roboczej powierzchni żadnego środka smarnego. W związku z powyższym poinstruowano pracowników zajmujących się eksploatacją wagonu o konieczności jego specyficznej obsługi. Pomiary spłaszczenia tarcz zderzakowych wykonywano w odstępach czasowych około jednego miesiąca. Pomiar polegał na rozformowaniu składu pociągu, oczyszczeniu powierzchni roboczej tarcz zderzaków kolejowych z wykorzystaniem benzyny ekstrakcyjnej oraz dokonaniu pomiaru z użyciem przymiaru oraz głębokościomierza. Wykonywano pomiary spłaszczenia obu tarcz zderzakowych pokrytych powłokami brązu aluminiowego oraz tarcz znajdujących się na drugiej czołownicy badanego wagonu, niepokrytych żadną powłoką, z warstwą smaru grafitowanego.

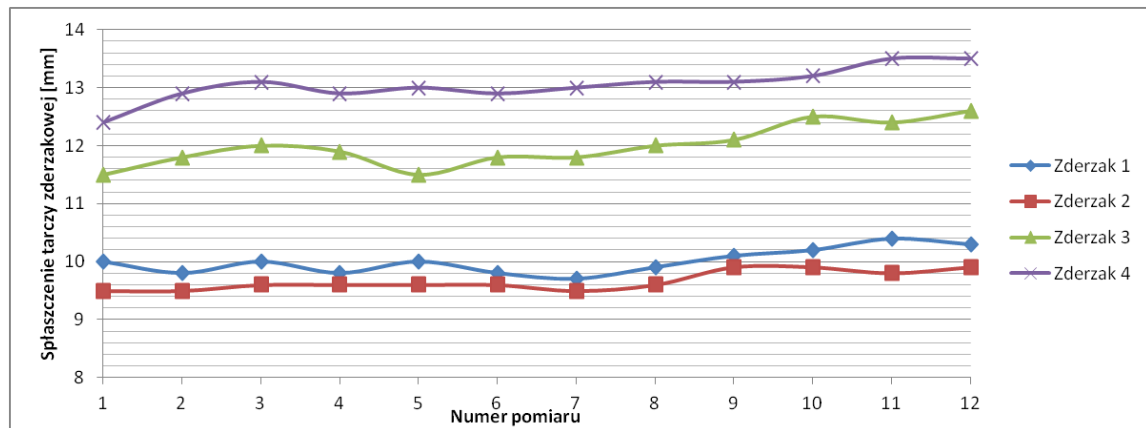
8.3 Wyniki pomiarów

Wyniki pomiarów spłaszczenia poszczególnych badanych tarcz zderzakowych przedstawiono w Tab. 10. Pomiar polegał na zmierzeniu za pomocą przymiaru i głębokościomierza różnicy pomiędzy nominalną krzywizną tarczy zderzakowej wynoszącą 2750 mm [30], [52]–[54] a krzywizną rzeczywistą. W związku z powyższym większa wartość pomiaru spłaszczenia (wyrażona w mm) oznacza większe odstępstwo od normatywnej krzywizny.

Tab. 10 Wyniki pomiarów spłaszczenia tarcz zderzakowych

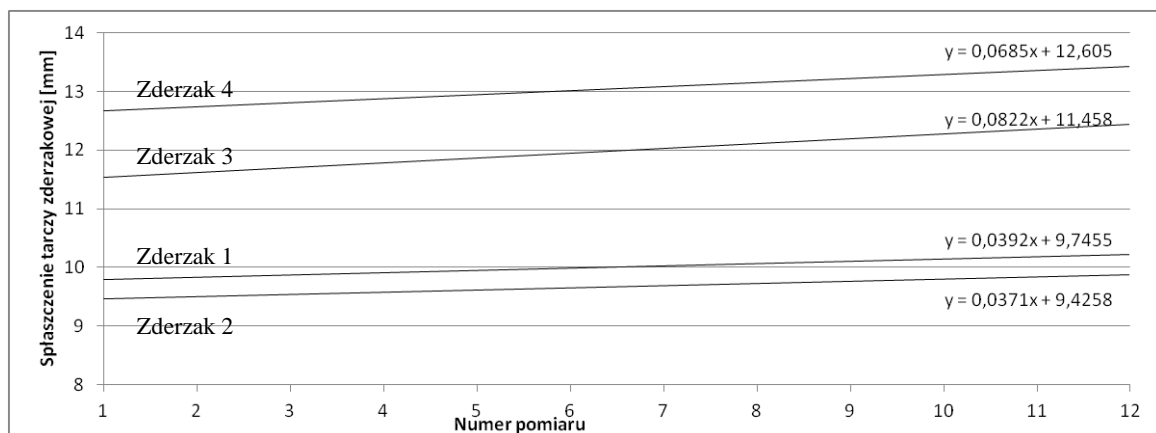
Numer pomiaru	Pomiar zużycia/spłaszczenia tarcz zderzakowych [mm]			
	Zderzaki z tarczami pokrytymi brązem aluminiowym		Zderzaki z tarczami smarowanymi	
	Zderzak 1	Zderzak 2	Zderzak 3	Zderzak 4
1	10,0	9,5	11,5	12,4
2	9,8	9,5	11,8	12,9
3	10,0	9,6	12,0	13,1
4	9,8	9,6	11,9	12,9
5	10,0	9,6	11,5	13,0
6	9,8	9,6	11,8	12,9
7	9,7	9,5	11,8	13,0
8	9,9	9,6	12,0	13,1
9	10,1	9,9	12,1	13,1
10	10,2	9,9	12,5	13,2
11	10,4	9,8	12,4	13,5
12	10,3	9,9	12,6	13,5

Zderzak oznaczony w Tab. 10 jako „Zderzak 1” oznacza zderzak z tarczą pokrytą powłoką z brązu aluminiowego, znajdujący się z prawej strony czołownicy (dla obserwatora zwróconego do niej). Analogicznie „Zderzak 3” oznacza zderzak bez zmian parametrów konstrukcyjnych, znajdujący się z prawej strony widzianej na wprost czołownicy wagonu. Ogólnie przeprowadzono 12 pomiarów w odstępach czasu około jednego miesiąca. Pierwszy z pomiarów wykonano 14.07.2015, natomiast ostatni 18.07.2016. Wyniki pomiarów przedstawione w Tab. 10 przedstawiono również na Rys. 72.



Rys. 72 Wyniki pomiarów splaszczania tarcz zderzakowych

Jak wynika z danych przedstawionych w Tab. 10 oraz na Rys. 72, zmiany zużycia (splaszczania tarcz) w czasie nie są znaczące. Zauważyć można nawet chwilowe zmniejszenia splaszczania w czasie. Fakt ten spowodowany jest niedokładnością pomiaru, wynikającą przede wszystkim z warunków pomiaru i zanieczyszczenia obiektu pomiaru (tarczy). Pomimo tego, zaobserwować można pewną tendencję odnośnie wzrostu zużycia w czasie. Na Rys. 73 przedstawiono proste regresji wyznaczone dla poszczególnych zderzaków, potwierdzające powyższą teorię.



Rys. 73 Proste regresji splaszczania tarcz zderzakowych

Wyniki pomiarów przedstawione w Tab. 10 oraz na Rys. 72 i Rys. 73 pozwalają na wyciągnięcie wniosku, że zużycie tarcz zderzaków kolejowych pokrytych powłokami brązu oraz pokrywanych smarem grafitowanych nie różni się znacząco od siebie. Co więcej, na podstawie równań prostych regresji wyznaczonych dla każdego zderzaka, zaobserwować można, że zwiększenie zużycia (splaszczania) w czasie jest mniejsze dla tarcz pokrytych powłokami brązu aluminiowego - mniejsze wartości współczynników „a” odpowiednio 0,0392 i 0,0371 dla tarcz pokrytych brązem oraz 0,0822 i 0,0685 dla tarcz smarowanych. Niewielkie zmiany zużycia (splaszczania) w czasie oraz ich niewielka różnica pomiędzy

zderzakami z tarczami smarowanymi oraz z pokrytymi powłokami brązu, pozwala przypuszczać, że cechują się one co najmniej tak samo korzystnymi własnościami eksploatacyjnymi w zakresie odporności na zużycie ściernie. Oprócz szeregu korzyści wynikających ze stosowania tarcz pokrytych powłokami brązu opisanych w niniejszej pracy na szczególne uwzględnienie zasługuje również odporność na korozję chemiczną, którą uzyskują tarcze zderzaków kolejowych. Na Rys. 74 a,b,c,d,e,f przedstawiono wybrane zdjęcia tarcz pokrytych powłokami brązu wykonane podczas badań eksploatacyjnych, ukazujące postęp zużycia w czasie.

a)



b)



c)



d)



e)



f)



Rys. 74 Tarcza zderzakowa pokryta brązem aluminiowym podczas kolejnych pomiarów w trakcie badań eksploatacyjnych

Należy również zaznaczyć, że przez cały okres prowadzenia badań eksploatacyjnych nie zaobserwowano żadnych, widocznych nieuzbrojonym okiem, defektów powłoki, w postaci pęknięć czy wykruszeń.

9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Aktualnie w transporcie kolejowym zużywanie się elementów pojazdów szynowych jest poważnym problemem powodującym wymierne koszty dla przewoźników kolejowych i zarządców infrastruktury oraz zjawiskiem mającym negatywny wpływ na bezpieczeństwo i środowisko naturalne. Zużycie to przejawia się w wielu formach, zarówno tribologicznych jak i nietribologicznych. W zakresie zużywania się elementów w procesach nietribologicznych dominującymi mechanizmami są starzenie się oraz korozja chemiczna. Najczęściej procesy te łączą się z innymi (w tym tribologicznymi) powodując przyspieszoną degradację elementów. Zużycie tribologiczne elementów pojazdów szynowych występuje wszędzie tam, gdzie dochodzi do kontaktu dwóch elementów poruszających się względem siebie. Najczęściej dostrzeganym problemem jest zużywanie się elementów układu biegowego pojazdów, w tym kół, na skutek kontaktu z główką szyny oraz elementów odbieraków prądu, w tym przede wszystkim nakładek pozostających w bezpośrednim kontakcie z przewodem jezdny sieci trakcyjnej. W związku z tym podejmowano wiele prób optymalizacji tych elementów, zarówno w obszarze konstrukcji, materiału, jego obróbki czy sposobu eksploatacji. Jednakże koła kolejowe i pantografy nie są jedynymi elementami pojazdu kolejowego, zużywającymi się wskutek tarcia. Jednym z elementów, który nie był do tej pory poddany wyczerpującym analizom jest tarcza zderzaka kolejowego, która na skutek współpracy z tarczą sąsiedniego pojazdu kolejowego zużywa się ściernie powodując spłaszczanie nominalnej krzywizny. Problem ten jest o tyle istotny, że krańcowe zużycie tarczy zderzaka może okazać się bardzo niebezpieczne dla dynamiki sprzęgniętych ze sobą pojazdów kolejowych, a w skrajnych przypadkach może nawet doprowadzić do zdarzenia kolejowego. Aktualnie stosowane metody, mające na celu zmniejszenie zużycia tarcz wskutek ich kontaktu, oparte są głównie na okresowym pokrywaniu smarem grafitowanym powierzchni roboczej tarcz. Jak wykazano w niniejszej pracy rozwiązanie to ma wiele wad i jest niekorzystne z punktu widzenia eksploatacji pojazdów kolejowych. Zaproponowanie nowej metody zabezpieczania tarcz przed nadmiernym zużyciem ściernym jest więc korzystne dla użytkujących i utrzymujących pojazdy kolejowe. Proponowana w ramach niniejszej pracy metoda, opierająca się na nakładaniu powłoki z materiału o korzystnych własnościach tribologicznych na roboczą część tarczy zderzaka pozwala na wyeliminowanie praktycznie wszystkich niedogodności metody stosowanej obecnie. Przeprowadzone badania i analizy ich wyników pozwoliły na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Aktualnie stosowana metoda zabezpieczania tarczy zderzakowej przed nadmiernym zużyciem ściernym (smarowanie) posiada wiele wad i jest niekorzystna z eksploatacyjnego punktu widzenia.
2. Wskazany jest wybór i zastosowanie nowej metody, pozbawionej niedogodności obecnie stosowanego rozwiązania.
3. Pokrywanie roboczej części tarczy zderzakowej w sposób trwały materiałem o korzystnych właściwościach tribologicznych jest wskazane z punktu widzenia użytkowania i utrzymania zderzaków kolejowych.
4. Metoda napawania laserowego jest odpowiednią metodą łączenia warstwy materiału o korzystnych właściwościach tribologicznych z materiałem rodzimym tarczy zderzakowej.
5. Brąz aluminiowy CuAl9Fe3 zastosowany jako materiał powłoki zwiększającej trwałość tarczy zderzakowej cechuje się pożądanymi właściwościami tribologicznymi.
6. Powłoka z brązu aluminiowego CuAl9Fe3 pozwala na zabezpieczenie tarczy zderzakowej przed zużyciem ściernym w sposób nie gorszy niż obecne rozwiązanie oparte na stosowaniu smaru.
7. Stosowanie powłoki z brązu aluminiowego CuAl9Fe3 zamiast smaru grafitowanego pozwala na eliminację szeregu wad wynikających z konieczności okresowego pokrywania tarcz zderzakowych środkiem smarnym.
8. Stosowanie powłoki z brązu aluminiowego CuAl9Fe3 pozwala na osiągnięcie dodatkowych korzyści w postaci zabezpieczenia roboczej powierzchni tarczy zderzaka przed korozją chemiczną.
9. Powłoka z brązu aluminiowego zdeponowana na tarczę zderzakową cechuje się wysoką odpornością na zmienne warunki atmosferyczne.
10. Powłoka z brązu aluminiowego zdeponowana na tarczę zderzakową jest połączona z elementem zderzaka w sposób trwały, a w trakcie eksploatacji nie występują pęknięcia, odpryski i wykruszenia materiału.
11. Wskazana jest optymalizacja parametrów zarówno powłoki jak i procesu jej deponowania w celu osiągnięcia jeszcze korzystniejszych właściwości tribologicznych.

Na podstawie wniosków sformułowanych w wyniku przeprowadzonych badań należy przyjąć, że teza postawiona w pracy została udowodniona. Oznacza to, że nałożenie powłoki o odpowiednich właściwościach tribologicznych na tarcze zderzakowe jest możliwe

i wskazane oraz pozwoli na zwiększenie ich odporności na zużycie ściernie. Pomimo tego, że powłoka brązu CuAl9Fe3 zdeponowana na roboczą powierzchnię tarczy zderzakowej cechuje się pożądanymi parametrami tribologicznymi możliwa i wskazana jest optymalizacja zarówno w aspekcie parametrów samej powłoki oraz metody jej nakładania. Szczególnie istotna w tym zakresie będzie konieczność przygotowania materiału rodzimego tarczy przed procesem napawania laserowego tak, aby nie powstały ewentualne defekty w strefie wpływu ciepła (SWC), które wykazano podczas badań metalograficznych na próbkach. W związku z powyższym w dalszym etapie prac planuje się przeprowadzić kompleksową optymalizację w zakresie składu chemicznego stosowanych brązów aluminiowych, parametrów procesu napawania laserowego, czy parametrów warstwy pokrywanej napoiną. Najprawdopodobniej pozwoli to na uzyskanie powłoki zabezpieczającej cechującej się jeszcze korzystniejszymi parametrami tribologicznymi.

10. LITERATURA

- [1] Adamiec, P., Dziubiński, J., *Regeneracja i wytwarzanie warstw wierzchnich elementów maszyn transportowych*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 1999.
- [2] Adamiec, P., Dziubiński, J., *Badanie i modelowanie zużycia napawanych części maszyn*, Przegląd Spaw., vol. 1–2, pp. 3–6, 1996.
- [3] Adamiec, P., Witaszek, K., Witaszek, M., *Eksploatacyjna intensywność zużycia kół kolejowych*, Zesz. Nauk. Politech. Śląskiej, Transp., vol. 38, no. 1433, pp. 39–46, 1999.
- [4] Adamiec, P., Witaszek, M., Witaszek, K., *Intensywność zużycia stali na obręcze kół kolejowych*, Zesz. Nauk. Politech. Śląskiej, Transp., vol. 30, no. 1384, pp. 71–78, 1998.
- [5] Aniołek, K., *Wpływ morfologii perlitu w stali na odporność na zużycie ściernie kształtowników klockowych stosowanych w rozjazdach kolejowych*, Politechnika Śląska, Praca doktorska, 2009.
- [6] Archard, J., *Wear theory and mechanisms*, *Wear Control Handbook*. Nowy Jork: The American Society of Mechanical Engineers, 1980.
- [7] Archard, J., *The temperature of rubbing surfaces*, *Wear*, vol. 2, no. 6, pp. 438–455, 1959.
- [8] Bae, Y., Lee, W., Besmann, T., Yust, C., Blau, P., *Preparation and friction characteristics of self-lubricating tin-mos2 composite coatings*, *Mater. Sci. Eng. A209*, pp. 372–376, 1996.
- [9] Bayer, R., Ku, T., *Handbook of analytical design for wear*. Nowy Jork: Plenum Press, 1964.
- [10] Bąkowski, H., *Computer aided analysis of wear of the surface layer with a pearlitic structure using an amsler stand*, *Tribologia*, no. 4, pp. 9–19, 2016.
- [11] Bąkowski, H., *Ocena właściwości tribologicznych skojarzenia koło–szyna w określonych warunkach eksploatacji*, Politechnika Śląska, 2006.
- [12] Bąkowski, H., Adamiec, J., *Conditions, the influence of operating parameters on tribological properties of the wheel-rail couple in laboratory*, *Inżynieria Mater.*, vol. 29, no. 4, pp. 275–280, 2008.
- [13] Bąkowski, H., Stanik, Z., Kubik, A., Wieszała, R., *Prognozowanie zużycia w skojarzeniu ślizgowym na podstawie rozkładów i wartości naprężeń za pomocą mes*, *Tech. Transp. Szyn.*, no. 12, pp. 49–51, 2016.
- [14] Bednarek, S., Krawczyk, J., Bała, A., Łukaszek-Sołek, A., Śleboda, T., Wojtaszek, M., Chyła, P., *Analiza oddziaływania materiału wsadowego na mechanizm zużycia wkładek matrycowych formujących w procesie kształtowania elementów zderzaka kolejowego*, *Tribologia*, no. 4, pp. 33–41, 2011.
- [15] Bowden, F., Tabor, D., *Friction and Lubrication of solids*. Oxford University Press, 1967.
- [16] Bowden, F., Tabor, D., *Friction. An introduction to tribology*. London: Anchor Press, 1974.
- [17] Burakowski, T., Wierzchoń, T., *Inżynieria powierzchni metali*. 1995.

- [18] Bushan, B., *Modern Tribology Handbook*. CRC Press Book, 2001.
- [19] Cheli, F., Melzi, S., *Experimental characterization and modeling of a side buffer for freight trains*, Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit, vol. 224, no. 6, pp. 535–546, 2010.
- [20] Copaci, I., Tanasoiu, A., *Experimental study of the characteristics of shock insulators used on railway vehicles*, in *CONTROL'10 Proceedings of the 6th WSEAS international conference on Dynamical systems and control*, 2010, pp. 25–29.
- [21] Craciun, C., Mitu, A., *Modeling of experimental hysteretic loops for railway vehicles buffers*, in *SISOM 2011 and Session of the Commission of Acoustics*, 2011, pp. 408–413.
- [22] Craciun, C., Mitu, A., Cruceanu, C., Sireteanu, T., *Modeling the buffers hysteretic behavior for evaluation of longitudinal dynamic in-trains forces*, in *SISOM 2011 and Session of the Commission of Acoustics*, 2012, pp. 105–111.
- [23] Ding, L., Xie, J., Song, Z., *Research on the effect of buffer's properties on train longitudinal impact*, in *Fourth International Conference on Information and Computing*, 2009, pp. 252–255.
- [24] Dryzek, E., *Badania warstwy wierzchniej w aluminium i stopach aluminium za pomocą anihilacji pozytonów i metod komplementarnych*.
- [25] DSU, *Dokumentacja Systemu Utrzymania PKP Cargo węglarki budowy normalnej serii E*. 2010.
- [26] DSU, *Dokumentacja Systemu Utrzymania Autobus Szynowy Typu 218Ma, Koleje Wielkopolskie*. 2011.
- [27] Dumont, E., Maurer, W., *Dymorail: a modelica library for modeling railway buffers*, in *Proceedings of the 9th International Modelica Conference*, 2012, pp. 690–696.
- [28] Elmanov, I., Darovskoi, G., *Improvement of the accuracy of friction coefficient determination with amsler-type friction machines*, J. Frict. Wear, vol. 30, no. 4, pp. 297–304, 2009.
- [29] EN15085, *Railway applications. Welding of railway vehicles and components*. 2007.
- [30] EN15551, *Railway applications. Railway rolling stock. Buffers*. 2011.
- [31] EP0855534, *Puffer für ein Schienenfahrzeug und zugehöriges Verfahren*, Patent. 1998.
- [32] Equey, S., Houriet, A., Mischler, S., *Wear and frictional mechanisms of copper-based bearing alloys*, Wear, no. 273, pp. 9–16, 2011.
- [33] Fauchais, P., Vardelle, A., *Advanced plasma spray applications, Chapter 1: Thermal Sprayed Coatings Used Against Corrosion and Corrosive Wear*, 2012.
- [34] Gałąź, R., *Badania doświadczalne tłumika i zderzaka z ciekłym silikonowym elastomerem*, Pr. Nauk. Inst. Konstr. i Eksploat. Masz. Politech. Wrocławskiej, no. 86, pp. 173–188, 2002.
- [35] Gamon, W., *Zderzaki kolejowe. podział, wymagania, projektowanie, badania. cz. 2 wymagania*, Tech. Transp. Szyn., vol. 4, pp. 47–49, 2014.
- [36] Gamon, W., *Przegląd rozwiązań patentowych wraz z przeprowadzeniem analizy numerycznej nowej konstrukcji zderzaka elastomerowego*, Praca magisterska,

- Politechnika Śląska, 2012.
- [37] Gamon, W., *Movement analysis of cooperating railway buffer heads*, Arch. Transp., vol. 33, pp. 4–15, 2015.
- [38] Garnham, J., *The wear of bainitic and pearlitic steels*, University of Leicester, 1995.
- [39] Gołębski, R., Paszta, P., *Numeryczna symulacja testu zderzeniowego taylora z wykorzystaniem oprogramowania ansys workbench 14.5*, Mechanik, no. 87, pp. 189–194, 2014.
- [40] Gościański, M., Pirowski, Z., Dudziak, B., *Porównawcze badania właściwości tribologicznych żeliw adi w warunkach tarcia suchego. część I*, J. Res. Appl. Agric. Eng., vol. 56, pp. 51–54, 2011.
- [41] Góral, T., *Wpływ technologicznych parametrów napawania brązu na podłoże stalowe na wybrane właściwości użytkowe napoin*, Akademia Górniczo-Hutnicza, Praca doktorska, 2007.
- [42] Grzegorzewicz, T., *Beznikłowe brązy aluminiowe o podwyższonej wytrzymałości i odporności na korozję*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2005.
- [43] Hebda, M., Wachal, A., *Tribologia*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo Techniczne, 1981.
- [44] Hejwowski, T., *Nowoczesne powłoki nakładane cieplnie odporne na zużycie ściernie i erozyjne*. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2013.
- [45] ISO6507, *Metallic materials -- Vickers hardness test*. 2007.
- [46] Jaeger, J. ., *Moving sources of heat and the temperature of sliding contacts*, J. Proc. R. Soc. New South Wales, 1942.
- [47] Janczewski, Z., Majerska, I., *Środki smarowe stosowane na PKP*. Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 1968.
- [48] Janecki, J., Hebda, M., *Tarcie, smarowanie i zużycie części maszyn*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo Techniczne, 1969.
- [49] Kaewunruen, S., Remennikov, A., *Nonlinear finite element model ling of railway prestressed concrete sleeper*, in *The Tenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, 2006, pp. 323–328.
- [50] Kalinkowski, A., Orlik, A., *Wagony kolejowe i hamulce*. Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 1981.
- [51] Kapcińska-Popowska, D., *Porównawcze badania zużycia ściernego nowej generacji stali hardox 500 i materiałów powszechnie stosowanych*, J. Res. Appl. Agric. Eng., vol. 56, pp. 66–70, 2011.
- [52] Karta UIC-526-1, *Wagons - Buffers with a stroke of 105 mm*. 2008.
- [53] Karta UIC-526-2, *Wagons - Buffers with a stroke of 75 mm*. 2008.
- [54] Karta UIC-526-3, *Wagons- Buffers with a stroke of 130 and 150 mm*. 2008.
- [55] Karta UIC-571-2, *Standard wagons - Ordinary bogie wagons - Characteristics*. 2001.
- [56] Klimpel, A., *Napawanie i natryskiwanie cieplne technologie*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo Techniczne, 2000.

- [57] Klimpel, A., *Technologie laserowe: spawanie, napawanie, stopowanie, obróbka cieplna i cięcie*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2012.
- [58] Klimpel, A., Cholewa, W., Bannister, A., Luksa, K., Przystalka, P., Rogala, T., Skupnik, D., Cicero, S., Martín-Meizoso, A., *Experimental investigations of the influence of laser beam and plasma arc cutting parameters on edge quality of high-strength low-alloy (hsla) strips and plates*, Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 92, no. 1–4, pp. 699–713, 2017.
- [59] Kosmol, J., Lis, P., *Modelowanie zjawisk kontaktowych w łożysku skośnym metodą elementów skończonych*, Model. Inżynierskie, no. 56, pp. 65–70, 2015.
- [60] Kotnarowski, A., Makowski, R., Piczugin, W., *Osobliwości oddziaływania materiałów smarowych na powierzchnię metalu w procesie tarcia*, Tribologia, no. 4, pp. 229–235, 2003.
- [61] Kowalski, E., *Pojazdy trakcyjne*. Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 1987.
- [62] Kozioł, P., Organek, P., *Ocena spawalności stali konstrukcyjnych*, Przegląd Budowlany, vol. 86, no. 1, pp. 22–26, 2015.
- [63] Krupa, M., *Wpływ temperatury na wartość współczynnika tarcia samochodowych hamulców ciernych*, Zesz. Nauk. Politech. Śląskiej, Transp., no. 64, pp. 151–157, 2008.
- [64] Krzemieniecki, A., *Tabor kolejowy*. Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 1976.
- [65] Laworowski, Z., *Tribologia Tarcie, Zużywanie i Smarowanie*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1993.
- [66] Lee, H., *Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 16*. 2015.
- [67] Lepiarczyk, D., Gawędzki, W., Tarnowski, J., *Modelowanie zjawisk cieplnych w procesie tarcia łożyska ślizgowego*, Tribologia, vol. 6, pp. 41–48, 2015.
- [68] Lijewski, M., Wiśniewska-Weinert, H., Szczepanik, S., Wiśniewski, T., *Właściwości samosmarnych łożysk z proszku brązu z modyfikowaną powierzchnią nanocząsteczkami smaru mos₂*, Tribologia, no. 4, pp. 141–150, 2012.
- [69] Lis, P., Kosmol, J., *Application of thermovision techniques in temperature identification during the drilling process*, Przetwórstwo tworzyw, no. 1, pp. 23–26, 2013.
- [70] Lucanin, V., Tanaskovic, J., Milkovic, D., Golubovic, S., *Experimental research of the tube absorbers of kinetic energy during collision*, FME Trans., no. 35, pp. 201–204, 2007.
- [71] Łukaszek-Sołek, A., Sińczak, J., Bednarek, S., *Wpływ tarcia na rozkład odkształceń oraz trwałość narzędzi w procesie wyciskania przeciwbieżnego – modelowanie numeryczne*, Obróbka Plast. Met., vol. XVIII, no. 4, pp. 11–18, 2007.
- [72] Marczewski, R., Podemski, J., *Technologia dla mechaników wagonowych*. Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 1990.
- [73] Meigh, H., *Cast and wrought aluminium bronzes properties, processes and structure, Chapter 10: Resistance to Wear of Aluminium Bronzes*, IOM Communications, 2000.
- [74] Meran, A. P., Baykasoglu, C., Mugan, A., Toprak, T., *Development of a design for a*

- crash energy management system for use in a railway passenger car*, Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit, vol. 230, pp. 206–219, 2014.
- [75] Milho, J., Ambrosio, J., Pereira, M., *Optimization of train structural components for crashworthiness*, in *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, 2004.
- [76] Mochida, T., Yamaguchi, T., Kawasaki, T., Miyamoto, T., *Development of crashworthy structure composed of aluminium alloys for high-speed railway vehicle*.
- [77] Moczarski, M., *Technologia wytwarzania i napraw pojazdów szynowych*. Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 1993.
- [78] Nasr, A., Mohammadi, S., *The effects of train brake delay time on in-train forces*, Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit, vol. 224, pp. 523–534, 2010.
- [79] Nesovic, J., *Design and calculation of ring springs as spring elements of the wagon buffer*, Mech. Eng., vol. 1, no. 9, pp. 1127–1133, 2002.
- [80] Niezgodziński, M., Niezgodziński, T., *Wzory wykresy i tablice wytrzymałościowe*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo Techniczne, 2013.
- [81] Opala, M., *Symulacyjne badanie zużycia profili niezależnie obracających się kół z wykorzystaniem różnych modeli wózków tramwajowych*, Pr. Nauk. Politech. Warsz. Transp., no. 112, pp. 313–322, 2016.
- [82] Otlacan, D., Kaposta, I., *Studies concerning the dependence of the characteristic on the speed of deformation applied to metallic shock absorbers through plastic deformation*, in *Annals of DAAAM for 2012 & Proceedings of the 23rd International DAAAM Symposium*, 2012.
- [83] Piec, P., *Badania eksploatacyjne elementów pojazdów i zespołów pojazdów szynowych*. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2004.
- [84] Piec, P., *Problemy eksploatacyjne zestawów kołowych pojazdów szynowych, Eksploatacja systemów tribologicznych*, Kielce: Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2013, pp. 69–85.
- [85] Pietrzak, K., Makowska, K., Rudnik, D., Wojciechowski, A., Eminger, A., Michalski, R., *Mikrostrukturalne uwarunkowania odporności na zużycie wybranych par ciernych stosowanych w układach hamulcowych*, Transp. Samoch., no. 3, pp. 51–63, 2011.
- [86] PL13624, *Zderzak*, Patent. 1931.
- [87] PL172461, *Urządzenie zderzne*, Patent. 1993.
- [88] PL193896, *Zderzak wagonu kolejowego*, Patent. 1999.
- [89] PL212572, *Zderzak kolejowy*, Patent. 2008.
- [90] PL7991, *Zderzak cierny do wagonów kolejowych*, Patent. 1928.
- [91] Płaza, S., Margielewski, L., Celichowski, G., *Wstęp do tribologii i tribochemia*. Łódź: Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, 2005.
- [92] PN-59/C-96153, *Przetwory naftowe. Smar grafitowany*.
- [93] PN-82/H-04332, *Badania wytrzymałościowe metali -- Badanie zużycia metali lub ich warstw dyfuzyjnych w procesie tarcia ślizgowego przy stałym nacisku na maszynie Amslera*. 1982.

- [94] PN-EN-15085, *Kolejnictwo -- Spawanie pojazdów szynowych i ich części składowych*. 2007.
- [95] Podemski, J., Marczewski, R., *Urządzenia ciąglowe i zderzakowe*. Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 1979.
- [96] Pugi, L., Fioravanti, D., Rindi, A., *Modelling the longitudinal dynamics of long freight trains during the braking phase*, in *12th IFToMM World Congress*, 2007.
- [97] Sawczuk, W., Tomaszewski, F., *Ocena rozkładu średniej temperatury pary ciernej tarcza hamulcowa-okładzina wraz z obsadą hamulcową w czasie hamowania ze stałą mocą*, *Pomiary Autom. Kontrola*, vol. 59, no. 9, pp. 938–941, 2013.
- [98] Scholes, A., Lewis, J. H., *Development of crashworthiness for railway vehicle structures*, *Proc. Instn. Mech. Engrs*, vol. 207, no. 1, pp. 1–16, 1993.
- [99] Seńko, J., *Symulacyjne badania zderzaków z dodatkowym segmentem rozpraszającym energię, przeznaczonych do stosowania w wagonach towarowych*, *Zesz. Nauk. Inst. Pojazdów*, vol. 64, pp. 111–116, 2007.
- [100] Seńko, J., *Model zderzaka kolejowego z dodatkowym segmentem energochłonnym*, *Zesz. Nauk. Katedr. Mech. Stosow. Politech. Śląska*, vol. 23, pp. 525–529, 2004.
- [101] Sińczak, J., Łukaszek-Sołek, A., Bednarek, S., *Ocena trwałości narzędzi w procesie wyciskania elementów ciąglowych i zderzakowych na przykładzie zderzaka kolejowego*, *Mechanik*, no. 8–9, pp. 694–699, 2008.
- [102] Sitarz, M., *Wybrane problemy tribologiczne w transporcie szynowym, Eksploatacja systemów tribologicznych*, Kielce: Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2013.
- [103] Sitarz, M., Gamon, W., *Zderzaki kolejowe. podział, wymagania, projektowanie, badania. cz. 1, podział zderzaków kolejowych*, *Tech. Transp. Szyn.*, vol. 9, pp. 29–35, 2013.
- [104] Sitarz, M., Mańka, A., *Aerodynamika a termodynamika układu koło kolejowe – klocek hamulcowy*, *Pojazdy Szyn.*, no. 4, pp. 22–28, 2013.
- [105] Sobek, M., Baier, A., Grabowski, Ł., Majzner, M., *Fatigue test of a fiberglass based composite panel. increasing the lifetime of freight wagon*, *Mater. Sci. Eng.*, no. 145, pp. 2–6, 2016.
- [106] Solski, P., Ziemba, S., *Zużycie elementów maszyn spowodowane tarciem*. Warszawa: PWN, 1969.
- [107] Specyfikacja, *Czteroosiowy wagon samowyladowczy dumpcar typu 418V, Europejskie Konsorcjum Wagonowe*. 2007.
- [108] Tanaskovic, J., Milkovic, D., Lucanin, V., Simic, G., *Experimental and numerical determination of tube collision energy absorbers characteristics*, *FME Trans.*, no. 40, pp. 11–16, 2012.
- [109] Tanasoïu, A., Copaci, I., *On the static and dynamic characteristics of the shock insulators equipping railway vehicles*, *Acta Tech. Corviniensis – Bull. Eng.*, pp. 37–42, 2009.
- [110] Tanasoïu, A., Copaci, I., Ilias, N., Mihailescu, S., *Study on the shock insulators of railway vehicles*, *Ann. Univ. Petroșani, Mech. Eng.*, no. 12, pp. 213–220, 2010.
- [111] Tasak, E., Ziewiec, A., *Spawalność materiałów konstrukcyjnych. Tom 1 Spawalność stali*. Kraków: Wydawnictwo JAK, 2009.

- [112] Tomaszewski, F., Wojciechowska, E., *Conditions, the influence of operating parameters on tribological properties of the wheel-rail couple in laboratory*, Czas. Tech. Mech., no. 4, pp. 115–122, 2011.
- [113] Tyrell, D., *Us rail equipment crashworthiness standards*, Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit, no. 216, pp. 123–130, 2012.
- [114] UIC, *Załącznik 9 do Ogólnej umowy o użytkowaniu wagonów towarowych (AVV). Warunki oględzin (rewizji) technicznych wagonów towarowych dla przejścia*. 2013.
- [115] US2146015, *Buffer for railway cars, Patent*. 1939.
- [116] Wasilewski, P., Bułhak, J., *Próby eksploatacyjne kompozytowych wstawek hamulcowych typu k - wpływ rodzaju wstawki na koszt cyklu życia (lcc) wagonu towarowego*, Pr. Nauk. Politech. Warsz. Transp., no. 112, pp. 403–410, 2016.
- [117] Wierzbicka, B., *Obróbka cieplna brązu aluminiowego krzepnącego pod ciśnieniem*, Solidif. Met. Alloy., vol. 2, no. 42, pp. 117–124, 2000.
- [118] Wojciechowski, Ł., *Wpływ stanu energetycznego warstwy wierzchniej na zacieranie adhezyjne wybranych skojarzeń*, MOTROL - Motoryz. i Energ. Rol., vol. 11, pp. 199–208, 2009.
- [119] Xue, X., Schmid, F., Smith, R., *Analysis of the structural characteristics of an intermediate rail vehicle and their effect on vehicle crash performance*, Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit, no. 221, pp. 339–352, 2007.