

Badanie przyczyny uszkodzenia zmęczeniowego osi lokomotywy EP 09-021

Artykuł dotyczy badań materiału osi lokomotywy EP09-021 w aspekcie ustalenia przyczyny jej uszkodzenia zmęczeniowego. Stwierdzono, że materiał pod względem składu chemicznego, własności mechanicznych, makro i mikrostruktury spełnia wymagania przedmiotowej normy. Badania fraktograficzne przelomu zmęczeniowego wykazały, że jest on następstwem napoiny wykonanej w strefie promienia przejściowego pomiędzy czopem spoczynkowym osi a częścią środkową osi.

1. Wstęp

Złożony proces kontroli elementów i całego zestawu kołowego w procesie produkcji ograniczył w sposób radykalny możliwość wprowadzenia do eksploatacji zestawów wadliwych. Stosuje się w tym celu różnorodne metody badań i pomiarów, które pozwalają na eliminowanie elementów niepełnowartościowych, wyprodukowanych z materiałów o niewłaściwej jakości lub niezgodnie z obowiązującymi parametrami w procesie wytwarzania. Praktyka wykazuje jednak, że pomimo tego mamy do czynienia z losowymi uszkodzeniami takich elementów i układów funkcjonalnych.

Celem opracowania było przeprowadzenie badań laboratoryjnych materiału osi nr 341 lokomotywy EP09-021, zgodnie z normą PN-93/K-9146, oraz ustalenie przyczyny jej uszkodzenia zmęczeniowego. Z uwagi na złożoność problemu badania przeprowadzono dwóch etapach. W etapie pierwszym przeprowadzono badania składu chemicznego, badania własności mechanicznych oraz badania makrostruktury i mikrostruktury materiału osi. Celem tych badań było potwierdzenie zgodności własności zastosowanej stali gatunku P35G z obowiązującym dokumentem normatywnym. Etap drugi badań poświęcono badaniom fraktograficznym, których celem było ustalenie przyczyny i mechanizmu uszkodzenia osi.

2. Identyfikacja i ocena złomu zmęczeniowego osi

Złomy zmęczeniowe są istotnym źródłem informacji o charakterze poznawczym i użytkowym. Z wyglądu określonych stref i cech złomu widocznych nieuzbrojonym okiem można ocenić w przybliżony sposób rodzaj i rozkład naprężeń jaki istniał w eksploatowanym elemencie lub zespole, kierunek naprężeń, rodzaj i wielkość przeciążeń [2]. Można też wnioskować o przyczynach zmęczeniowego zniszczenia, które można rozpatrywać jako:

- eksploatacyjne: warunki pracy, wpływ otoczenia, działanie ośrodków aktywnych,
- technologiczne: materiał, obróbka cieplna, obróbka mechaniczna,

- konstrukcyjne: kształt i wymiary, wpływ połączenia z innymi elementami.

Obraz powierzchni złomu zmęczeniowego, dla analizowanego przypadku osi zestawu kołowego lokomotywy elektrycznej serii EP09-021 przedstawiono na rys. 1 i 2.

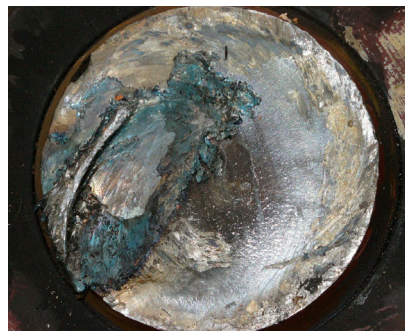
Złom powstał w strefie promienia przejściowego pomiędzy czopem spoczynkowym osi (podpiałcem) a częścią środkową. Jest to typowa lokalizacja dla tego typu elementów z połączeniem wciskowym. Złom ma charakter typowy dla zmiennego obciążenia giętno-obrotowego, z wyraźnie usytuowanym ogniskiem i strefą przyogniskową. Brak jest natomiast widocznych innych cech powierzchni złomów zmęczeniowych, takich jak np. uskoki pierwotne i wtórne. Wynika to z faktu, że elementy po uszkodzeniu przemieszczały się względem siebie, prowadząc do powstania plastycznego nanoszenia produktów zużycia na powierzchnię złomu. Z dużym prawdopodobieństwem złom można zakwalifikować do grupy złomów plastyczno-kruchych. Dla uzyskania wymaganej wytrzymałości w połączeniach wciskowych koła jezdnego z osią zestawu kołowego stosuje się wartości wcisków prowadzące do odkształceń o charakterze sprężystoplastycznym. Stan naprężenia w tej strefie osi był więc czynnikiem intensyfikującym powstanie złomu o charakterze plastyczno-kruchym. Ocena makroskopowa badanego złomu prowadzi do wniosku, że jest on następstwem karbu technologicznego w strefie szczególnie wyężonej elementu. Nie można natomiast podać wniosków dotyczących dalszych propagacji pęknięcia z uwagi na naruszenie struktury złomu w procesie eksploatacji.

3. Badania materiałowe osi

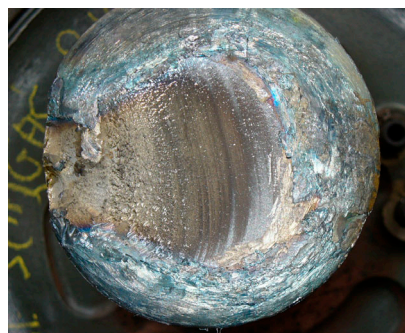
W ramach badań materiałowych, zgodnie z normą PN-93/K-91046, wykonano analizę kontrolną składu chemicznego oraz przeprowadzono badania własności mechanicznych w oparciu o próbę statyczną rozciągania i próbę udarności oraz badania makrostruktury i mikrostruktury materiału osi uznając, że otrzymane

wyniki mogą być źródłem ważnych informacji wyjaśniających relacje przyczynowo- skutkowe uszkodzenia osi.

Analizę składu chemicznego materiału uszkodzonej osi wykonano na powierzchni próbki 1 (rys. 7). Miejsce wykonania analizy obrazuje rys. 3. W badaniu składu chemicznego wykorzystano metodę spektrometryczną. Otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli 1. Ostatnie dwa wiersze w tabeli zawierają informację o maksymalnym udziale procentowym pierwiastków, wymienionych w normie PN-91/H-84027/03 i karcie UIC 811-1, dla materiału osi P35G (A1).



Rys. 1. Złom zmęczeniowy osi od strony koła jezdneho

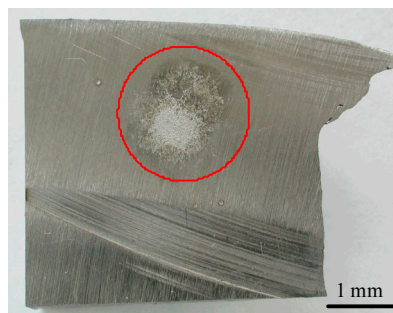


Rys. 2. Złom zmęczeniowy osi od strony części środkowej

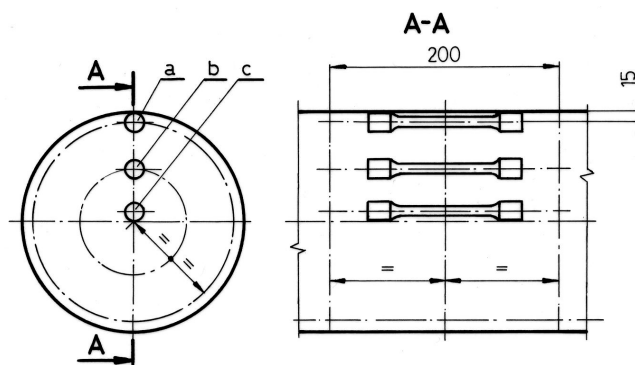
Na podstawie otrzymanych wyników można wnioskować, że oś wykonano z niestopowej stali konstrukcyjnej o średniej zawartości węgla i odtlenionej aluminium. Jakość metalurgiczna stali, oceniona poprzez zawartość fosforu i siarki, nie budzi zastrzeżeń. Świadczy o tym bardzo mała zawartość fosforu i siarki ($P, S < 0,01\%$). Jeśli otrzymane wyniki odnieść do warunków zawartych w normie PN-91/H-84027/3 i karcie UIC 811-1 to należy zauważyć, że materiał osi spełnia wymagania zawarte w wymienionych dokumentach normatywnych.



Rys. 3. Makro zdjęcie próbki 1 z oznaczonym miejscem analizy składu chemicznego



Za podstawę określenia własności mechanicznych, zgodnie z normą PN-93/K-91046, przyjęto statyczną próbę rozciągania oraz próbę udarności. Próbkę do statycznej próby rozciągania o średnicy $d_0 = 10$ mm, w ilości 3-ech sztuk, pobrano z części środkowej osi wg schematu zamieszczonego na rys. 4. Dodatkowo wykonano badania na próbkach cylindrycznych o średnicy $d_0 = 5$ mm. Próbę udarności przeprowadzono na próbkach poprzecznych i wzdłużnych z nacięciem U. Próbkę poprzeczną i wzdłużną pobrano zgodnie ze schematem zawartym w normie PN-93/K-91046.



Rys. 4. Lokalizacja próbek do badania wytrzymałości na rozciąganie pobranych z części środkowej osi

Wyniki analizy składu chemicznego stali

Tabela 1

Specyfikacja	Zawartość pierwiastków [% masowe]									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	inne
Oś uszkodzona	0,28 3	0,23 8	0,94 4	0,00 2	0,00 6	0,09 7	0,24 9	0,00 1	0,12 3	Al. = 0,034 V = 0,001
Wymagania wg PN-91/H-84027/03	max 0,37	max 0,45	max 1,10	max 0,03 5	max 0,03 5	max 0,30	max 0,30	0,00 1	max 0,30	
Wymagania wg UIC 811-1 (A1)	0,40	0,50	1,20	0,02 0	0,02 0	0,30	0,30	0,08	0,30	—

Wyniki badań własności mechanicznych

Tabela 2

Próbka		R_e [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]	Z [%]	Próbka	Praca łamania [J]	Udar- ność [J/cm ²]
$d_0 = 5$ mm	1p	362	619	29,5	70,3	2P1	49	98
	2p	384	623	29,0	70,2	2P2	48	96
	3p	378	620	27,1	70,7	2P3	47	94
$d_0 = 10$ mm	1 P	387	610	30,4	69,3	2W1	63	126
	2 P	387	609	29,1	68,7	2W2	67	134
	3 P	384	608	30,4	66,4	2W3	62	124

Wartości średnie własności mechanicznych stali na podstawie próby rozciągania

Tabela 3

Wyszczególnienie	Własności mechaniczne			
	R_m [MPa]	R_e [MPa]	A_5 [%]	Z [%]
Próbka $d_0 = 5$ mm, czop osi	620	375	28,5	70,4
Próbka $d_0 = 10$ mm, czop osi	609	386	29,9	68,1
Wymagania wg PN-	550÷700	min. 350	min. 24	min. 45
Wymagania wg UIC 811-1 dla	550÷650	≥ 320	≥ 22	**

** wskaźnik nie określany na podstawie karty UIC.

Wyniki pomiarów udarności

Tabela 4

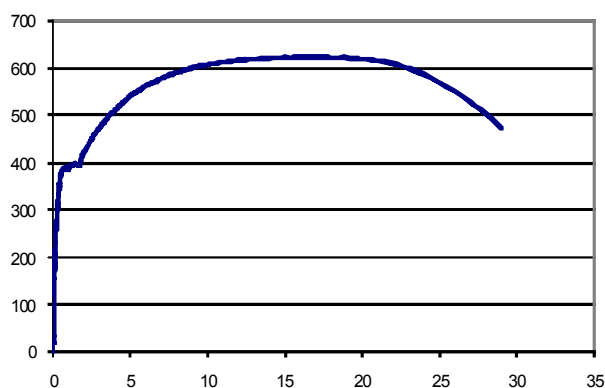
Wyszczególnienie	Próbki poprzeczne P1, P2, P3		Próbki wzdłużne W1, W2, W3	
	Praca łamania KU [J]	Udarność KCU [J/cm ²]	Praca łamania KU [J]	Udarność KCU [J/cm ²]
Wartość średnia	48	96	64	128
Odchylenie standardowe	-	1,63	-	4,32

Statyczną próbę rozciągania wykonano na hydraulicznej maszynie wytrzymałościowej typu EU 20 z wykorzystaniem ekstensometrycznych czujników siły (ZEWPN typu CL 14) i przemieszczenia (Epsilon 3542-025M-050-LT) podłączonych do komputera poprzez kartę pozyskiwania danych DAS 800. Badanie udarności przeprowadzono przy użyciu młota udarnościowego Alpha o energii początkowej 300 J.

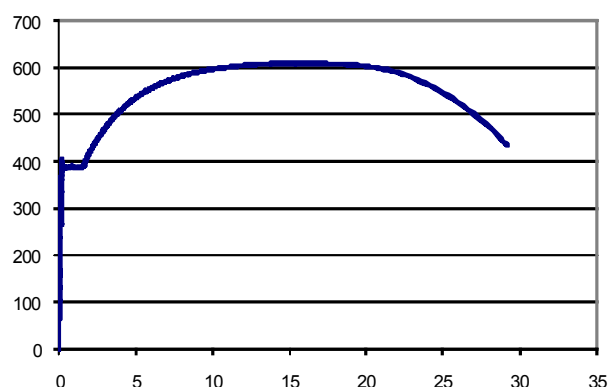
Na podstawie przeprowadzonych prób obliczono następujące wielkości:

- R_e – wyrażną granicę plastyczności [MPa],
- R_m – wytrzymałość na rozciąganie [MPa],
- A_5 – wydłużenie względne próbki [%],
- Z – przewężenie względne próbki w szyjce w momencie pęknięcia [%],
- KCU – udarność [J/cm²].

Wyniki badania własności mechanicznych, dla każdej z badanych próbek, zebrano w tabeli 2, zaś przykładowe wykresy rozciągania przedstawiono na rys. 5 i 6. Wyniki średnich wartości badanych własności mechanicznych stali zawarto w tabeli 3 i 4. Potwierdzają one, że stal P35G posiada dobre własności plastyczne i wytrzymałościowe, a różnice uzyskane dla poszczególnych próbek są nie wielkie, co świadczy o jednorodności materiału.



Rys. 5. Przykładowy wykres rozciągania próbki o średnicy ϕ 5 mm

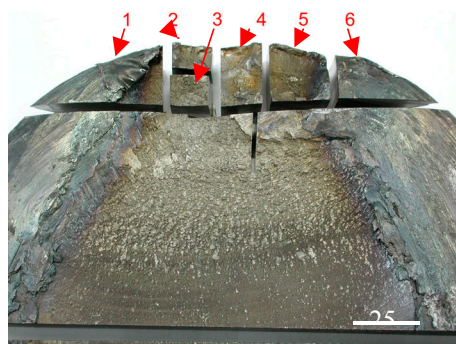


Rys. 6. Przykładowy wykres rozciągania próbki o średnicy ϕ 10 mm

Porównanie średnich wartości wskaźników określających własności wytrzymałościowe (R_m , R_e), ciągliwość (A_5 , Z) oraz udarność (KCU) z danymi zawartymi w normie PN-91/H-84027/03 oraz w karcie UIC 811-1 dla materiału A1 pozwala na stwierdzenie, że materiał osi pod względem własności mechanicznych spełnia wymagania zawarte w cytowanych dokumentach normatywnych.

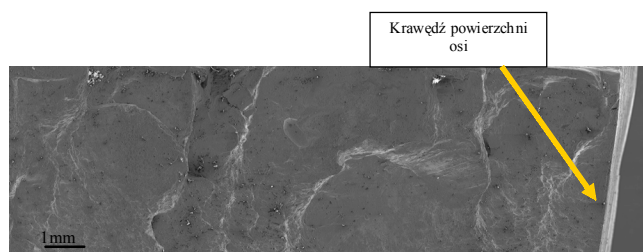
Badania makrostruktury zostały przeprowadzone na próbce w postaci krążka pobranego z przekroju poprzecznego części środkowej osi, który wytrawiono odczynnikiem Baumanna. Odbitkę próbki wykonano na papierze fotograficznym. Przeprowadzone badania makrostruktury wykazały, że rozkład siarczków jest równomierny na całej powierzchni przekroju poprzecznego osi, bez występowania wyraźnych skupień czy segregacji, co świadczy o poprawnym procesie metalurgicznym stali zastosowanej do produkcji osi nr 341.

Badania mikrostruktury oraz badania fraktograficzne przełomu zmęczeniowego osi wykonano na próbkach zestawionych wraz z ich numeracją zawiera rys. 7. Do badań mikrostruktury i badań fraktograficznych zastosowano dwie próbki oznaczone numerami 2 i 5 (rys. 7). Analizę przełomów w rejonie powierzchni osi wykonano na elektronowym mikroskopie skaningowym JSM 5510LV firmy JEOL. Wyniki tych badań przedstawiono w postaci topografii przełomów dla próbki 2 na rys. 8. Następnie na próbkach 2 i 5 wykonano zglądy metalograficzne na powierzchniach prostopadłych do powierzchni osi oraz przełomu zmęczeniowego. Po trawieniu 4% azotalem ujawniono mikrostrukturę wraz z napoinami w warstwie wierzchniej, co obrazują rys. 9 i rys. 10. Na rys. 11 przedstawiono szczegóły mikrostrukturalne warstwy wierzchniej badanej osi w rejonie napoiny (próbka 2) z widocznymi zarodkami pęknięcia kruchego. Na rys. 12 zobrazowano wyniki badań mikrostrukturalnych dla warstwy wierzchniej w próbce 5 w obszarze występowania napoiny. Na kolejnych rysunkach 13 i 14 zaznaczono punkty wykonania pomiarów mikro-twardości metodą Vickersa oraz wyniki tych pomiarów, które zebrano odpowiednio dla próbki 2 w tabeli 5 oraz dla próbki 5 w tabeli 6. Pomiary mikrotwardości wykonano na twardościomierzu FM 700e firmy Future-Tech Corp. przy obciążeniu 100 g (1 N). Dodatkowo, przy pomocy elektronowego mikroskopu skaningowego JSM-5510LV (SEM), wyposażonego w przystawkę do mikroanalizy składu chemicznego EDS firmy IX RF System 500 Digital Processing, dokonano analizy składników mikrostrukturalnych stali konstrukcyjnej zastosowanej do budowy osi. Wyniki tych badań ilustrują rys. 15, 16 i 17 oraz dane zawarte w tabelach 7–9.

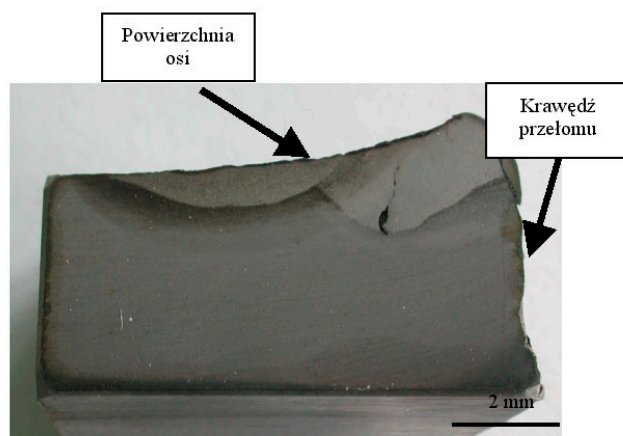


Rys. 7. Przelom osi w rejonie zarodkowania pęknięcia zmęczeniowego po wprowadzeniu oznaczeń próbek metalograficznych

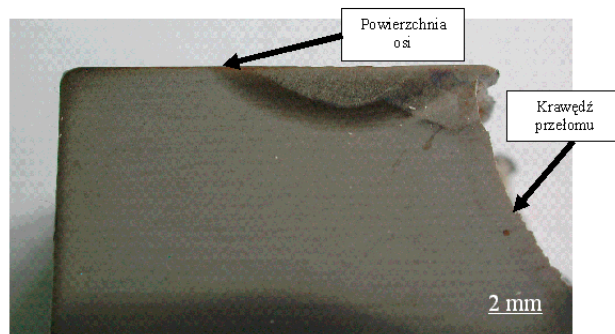
Badania mikrostruktury stali, przeprowadzone na zglądach trawionych 4% azotalem przy zastosowaniu mikroskopu skaningowego wykazały, że zastosowany do produkcji osi nr 341 gatunek stali P35G posiada drobnoziarnistą strukturę ferrytyczno-perlityczną, odpowiadającą wzorcowi nr 8–9 wg skali wzorców zawartych w PN-84/H-04507/01, co obrazuje rys. 12e, z niewielką zawartością wydłużonych siarczków manganu (rys. 15 i 16) lub krzemianów (rys. 17).



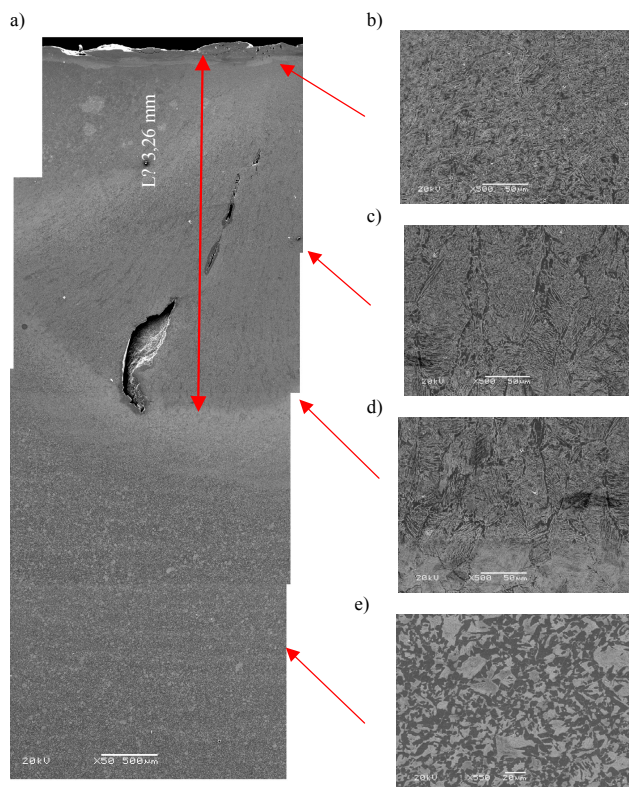
Rys. 8. Topografia przełomu w próbce 2 w strefie zarodkowania pęknięcia zmęczeniowego



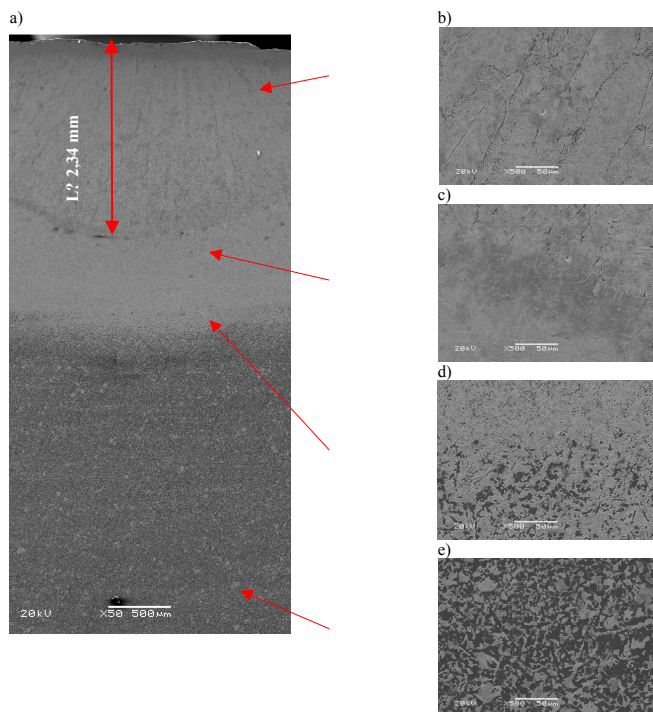
Rys. 9. Pęknięcie w napoinie wykonanej na powierzchni osi – próbka 2



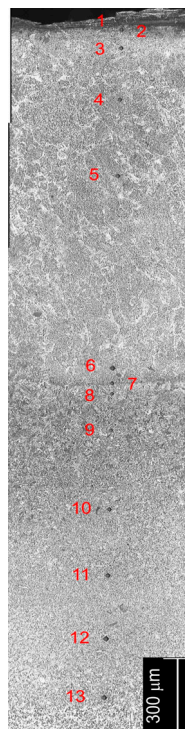
Rys. 10. Napoina wykonana w warstwie wierzchniej osi – próbka 5



Rys. 11. Mikrostruktura osi warstwie wierzchniej w próbce 2: a) pęknięcie napoiny, b) mikrostruktura warstwy wierzchniej, c) strefa dendrytycznej budowy napoiny, d) mikrostruktura w strefie przejściowej, e) materiał rodzimy



Rys. 12. Mikrostruktura napoiny w próbce 5; a) ogólny widok napoiny, b) budowa dendrytyczna, c) mikrostruktura w strefie przejściowej d), strefa wpływu ciepła, e) materiał rodzimy

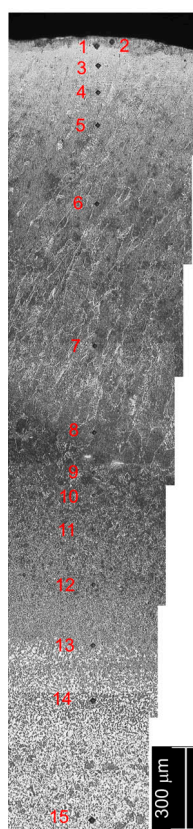


Pomiary mikrotwardości Tabela 5
napoiny w próbce 2

Nr odciski	Mikrotwardość 100 g		Uwagi
	HV	HRC	
1	608	56	Warstwa wierzchnia
2	392	40	Spoina dendryty
3	409	42	Spoina dendryty
4	360	37	Spoina dendryty
5	380	39	Spoina dendryty
6	311	31	Spoina dendryty
7	485	48	SWC
8	551	52	SWC
9	545	52	SWC
10	344	35	SWC
11	288	28	SWC
12	272	26	SWC
13	228	18	MR

SWC – strefa wpływu ciepła,
MR – materiał rodzimy

Rys. 13. Mikrostruktura napoiny w próbce 2 z oznaczonymi miejscami pomiaru mikrotwardości

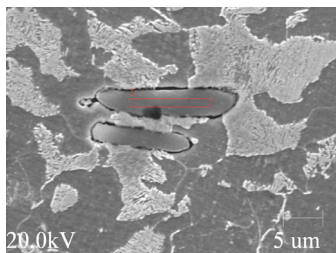


Pomiary mikrotwardości Tabela 6
napoiny w próbce 5

Nr odciski	Mikrotwardość 100 g		Uwagi
	HV	HRC	
1	332	34	Warstwa wierzchnia
2	398	41	Warstwa wierzchnia
3	362	37	napoina
4	383	39	napoina
5	382	39	napoina dendryty
6	367	37	napoina dendryty
7	350	36	napoina dendryty
8	365	37	Przed SWC
9	425	43	SWC
10	462	46	SWC
11	402	41	SWC
12	361	37	SWC
13	338	34	SWC
14	307	31	SWC
15	232	19	MR

Rys. 14. Mikrostruktura napoiny w próbce 5 z oznaczonymi miejscami pomiaru mikrotwardości

a)



b)

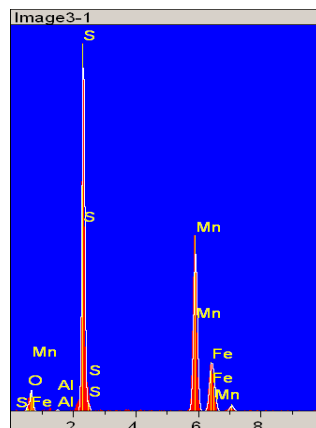


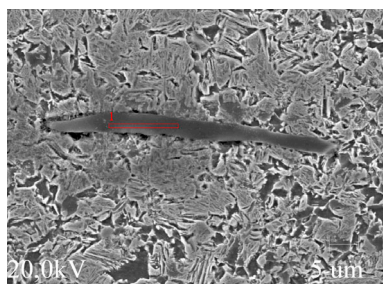
Tabela 7

Skład chemiczny analizowanego wtrącenia

Pierwiastek	Orbita	Intensywność (c/s)	Błąd 2-sig	zawartość % wag.
O	Kα	7,60	1,007	4,34
Al	Kα	3,31	0,664	0,24
Si	Kα	0,69	0,303	0,04
S	Kα	790,29	10,26	41,68
Mn	Kα	471,97	7,933	41,66
Fe	Kα	120,98	4,016	12,06

Rys. 15. Analiza składu chemicznego wtrącenia niemetalicznego w próbce 2: a) obszar analizy, b) widmo charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego

a)



b)

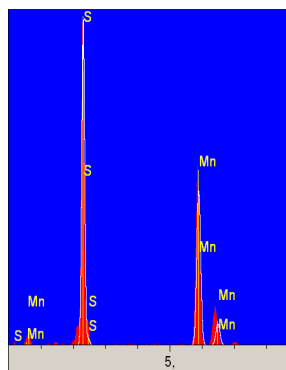


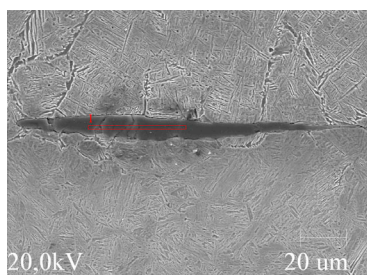
Tabela 8

Skład chemiczny analizowanego wtrącenia

Pierwiastek	Orbita	Intensywność (c/s)	Błąd 2-sig	zawartość % wag.
S	Kα	783,36	10,219	46,84
Mn	Kα	508,84	8,236	53,16

Rys. 16. Analiza składu chemicznego wtrącenia niemetalicznego typu MnS w próbce 5: a) obszar analizy, b) widmo charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego

a)



b)

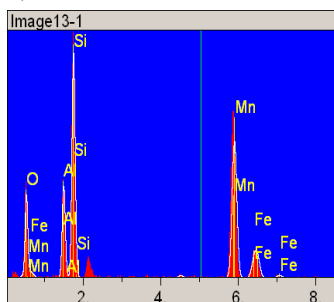


Tabela 9

Skład chemiczny analizowanego wtrącenia

Pierwiastek	Orbita	Intensywność (c/s)	Błąd 2-sig	zawartość % wag.
O	Kα	97,03	3,597	36,465
Al	Kα	126,33	4,104	9,617
Si	Kα	316,70	6,498	21,848
Mn	Kα	283,52	6,148	27,997
Fe	Kα	36,71	2,212	4,073

Rys. 17. Analiza składu chemicznego złożonego wtrącenia niemetalicznego w próbce 5 zaznaczonego okręgiem na rys. 13: a) obszar analizy, b) widmo charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego

Szczegółowe badania fraktograficzne przeprowadzone na próbkach 2 i 5, których wyniki przedstawiono na serii mikrofotografii, rys. 8–14 oraz w tabelach 5 i 6, pokazują, że bezpośrednią przyczyną katastrofального pęknięcia osi była napoina o głębokości od 2 mm do około 3 mm wykonana na powierzchni osi. Wyrażnie potwierdzają to wyniki pomiarów mikrotwardości w rejonie napoiny, gdzie twardość stali jest co najmniej dwukrotnie wyższa od twardości materiału rodzimego ($HV_{\text{stali}} \approx 230$), zaś napoiny w próbce 2 ($HV_{608-H300}$), a w próbce 5 ($HV_{409-HV285}$).

Bardzo duże różnice w twardości napoiny i materiału osi, najprawdopodobniej spowodowane znaczną szybkością chłodzenia podczas procesu napawania, musiały wywołać znaczne naprężenia cieplne i strukturalne. W wyniku takiego przebiegu zjawiska powstały zarodki kruchych pęknięć, jak to zaobserwowano w próbce 2 (rys. 9 i rys. 11) o głębokości około 3 mm. Jak wynika z analizy fraktograficznej wykonanej przy zastosowaniu SEM, te kilkumilimetrowe pęknięcia były bezpośrednią przyczyną stopniowego rozpręśtrzenia się pęknięcia zmęczeniowego. Szczegółowe badania powierzchni pęknięcia były niemożliwe ze względu na znaczne mechaniczne zniszczenie powierzchni przełomu.

5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania laboratoryjne, obejmujące badania składu chemicznego, własności mechanicznych oraz makro i mikrostruktury potwierdziły, że zastosowana na oś 341 stal P35G spełnia wymagania zawarte w normie PN-93/K-91046.

Ocena makroskopowa przełomu pozwala wnioskować, że jest on następstwem karbu technologicznego w strefie szczególnie wyężonej, to jest promienia przejściowego pomiędzy czopem spoczynkowym (podpiałciem) a częścią środkową osi.

Badania fraktograficzne przełomu zmęczeniowego osi nr 341 wykazały, że bezpośrednią przyczyną pęknięcia osi było wykonanie napoiny, o głębokości od 2–3 mm, w strefie przejściowej pomiędzy czopem spoczynkowym osi a częścią środkową.

Szczegółowe badania powierzchni pęknięcia, w celu wyjaśnienia mechanizmu propagacji pęknięcia, były niemożliwe z uwagi na mechaniczne naruszenie struktury powierzchni przełomu w procesie eksploatacji.

Literatura

- [1] *Badania materiałowe i wytrzymałościowe uszkodzonej osi nr 341 lokomotywy EP09-021 zgodnie z normą PN-93/K-91046*, Politechnika Krakowska, Kraków, maj 2009.
- [2] Kocańda S., *Zmęczeniowe niszczenie metali*, WNT, Warszawa 1978.
- [3] Tułeczki A., Sorochtej M., *Studium analityczne montażu koła z osią w zestawach kołowych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Transport, z. 7, Gliwice 1987.
- [4] Tanaka S., Hirose F.: *Fatigue behavior of fretting cracks at the wheel seat of car axles*, The Sixth International Wheelset Congress, Colorado Springs, October 1978.
- [5] Karwala K., Kulikowski H., Tułeczki A., *Technologiczne problemy trwałości zestawów kołowych pod kątem przystosowania pojazdów szynowych do zwiększonych prędkości jazdy*, Rozprawa doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 1991.
- [6] Broś J., Partyła M., Tułeczki A., *The kinds of wear and failures of bearing surface of interference joints wheel sets of rail vehicles*, 3-rd Conference on Tribology, Budapest 1983.
- [7] Bąk R., Grajek K., Zacharski M., *Metoda numeryczna analizy statycznej stanu naprężenia w kolejowych zestawach kołowych*, Zeszyty Naukowe IPKM – Pol. Śląska, z. 27/61, Gliwice 1977.
- [8] Broś J., Tułeczki A., *Badania modelowe wytrzymałości zmęczeniowej elementów połączeń wciskowych w zestawach kołowych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Transport, z. 14, Gliwice 1989.