

Problem uszkodzenia iglic łukowych w rozjazdach zwyczajnych

Marcin CZARNECKI¹, Robert BIŃKOWSKI²

Streszczenie

W artykule przedstawiono problem nadmiernego zużycia iglic łukowych w rozjazdach kolejowych zwyczajnych, charakteryzujący się wykruszeniem i ubytkiem materiału na pewnej długości w początkowym odcinku iglicy. Problem jest na tyle istotny, że zużycie pojawiło się w rozjazdach na zmodernizowanych liniach kolejowych już po kilkunastomiesięcznej eksploatacji. Na podstawie badań laboratoryjnych przeprowadzonych według norm PN-EN 13674-1:2011 i PN-EN 13674-2+A1:2010 oraz symulacji i analizy wykonanej metodą elementów skończonych (MES) wskazano prawdopodobne przyczyny nadmiernego zużycia iglic w rozjazdach kolejowych.

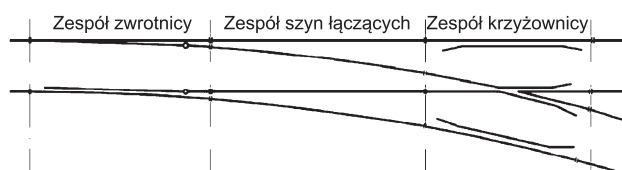
Słowa kluczowe: rozjazd kolejowy, iglica rozjazdu, wtrącenia niemetaliczne, naprężenia rozciągające, metoda elementów skończonych

1. Wstęp

W ostatnich latach nastąpił szybki rozwój różnych typów i konstrukcji rozjazdów kolejowych. Jest to spowodowane koniecznością zapewnienia dużej trwałości i niezawodności rozjazdów w warunkach ciągłego zwiększania prędkości pociągów, nacisków osi na tor oraz częstotliwości przejazdów pociągów zarówno pasażerskich, jak i towarowych. Rozwój konstrukcji rozjazdów wynika również z postępu technologicznego w produkcji nowych gatunków stali na rozjazdy kolejowe, rozwoju nowych metod badawczych materiałów oraz lepszego poznania zjawisk zachodzących we współpracy koło – szyna [1, 2, 4].

Rozjazd jest to specjalna konstrukcja wielotorowa wykonana z szyn i kształtowników iglicowych (o określonym profilu i gatunku stali) oraz innych elementów, umożliwiająca przejazd pojazdów kolejowych z jednego toru na drugi przy zachowaniu określonej prędkości [3]. Jednym z najbardziej rozpowszechnionych rozjazdów kolejowych jest rozjazd zwyczajny (Rz) [7] przedstawiony na rysunku 1. Składa się on z trzech podstawowych zespołów, tj. zespołu zwrotnicy, zespołu szyn łączących oraz zespołu krzyżownicy. Zespół zwrotnicy (rys. 2) jest to ruchomy zespół rozjazdu, który za pomocą napędu przestawia iglice, umożliwiając tym samym zmianę toru poruszającego się pociągu na inny tor. Spokojna i bezpieczna zmiana toru jest uwarunkowana prawidłowym wyko-

naniem początkowego fragmentu iglicy, który musi mieć odpowiedni kształt, aby dobrze przylegać do szyny oporowej (opornicy) w rozjeździe. Prawidłowe dopasowanie iglicy do opornicy wpływa na bezpieczeństwo i komfort jazdy taboru oraz zapewnia prawidłową eksploatację zespołu zwrotnicy w rozjeździe.



Rys. 1. Schemat rozjazdu zwyczajnego [7]



Rys. 2. Zespół zwrotnicy rozjazdu zwyczajnego [fot. M. Czarnecki]

¹ Mgr inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Materiałów i Elementów Konstrukcji; e-mail: marcinczarnecki@ikolej.pl.

² Mgr inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Materiałów i Elementów Konstrukcji; e-mail: rbinkowski@ikolej.pl.

2. Przypadki nadmiernego zużycia iglic

Podczas prac badawczych wykonywanych w Laboratorium Badań Materiałów i Elementów Konstrukcji, spotkano się z przypadkami nadmiernego zużycia iglic w rozjazdach na modernizowanych liniach kolejowych. Napotkane przypadki mają wiele wspólnych cech, tzn. charakteryzują się podobnym zużyciem na początku iglicy, które pojawiło się w krótkim okresie po zabudowaniu nowego rozjazdu w torze; uszkodzenia dotyczyły rozjazdów zwyczajnych, gdzie iglice były wykonane z tego samego materiału i tego samego profilu kształtownika. Cechy charakterystyczne trzech rozjazdów z nadmiernym zużyciem iglic lukowych przedstawiono w tablicy 1.

Materiałem do produkcji badanych rozjazdów były kształtowniki iglicowe dwóch różnych producentów (materiał rozjazdów 2 i 3 pochodził z tej samej huty). Produkcję rozjazdów i zabudowanie ich w torze wykonało także dwóch różnych producentów (rozjazdy 2 i 3 wykonała ta sama firma). Można zatem przyjąć, że producenci materiału na kształtowniki iglicowe, jak i producenci całych rozjazdów gwarantują podobną jakość wyrobów, gdyż

nadmierne zużycie zaobserwowano w każdym z powyższych przypadków niezależnie od promienia łuku w rozjeździe (190 m, 300 m, 500 m), skosu (1:9, 1:12), konstrukcji iglic (szynowo-sprężyste, sprężyste) lub rodzaju podrozjazdnic (drewniane, betonowe).

Jak już wspomniano, cechą charakterystyczną analizowanych rozjazdów było podobieństwo w uszkodzeniu iglicy. Dla każdego z trzech przypadków uszkodzenie charakteryzowało się wykruszeniem materiału na początku iglicy, które pojawiło się na jednakowej wysokości od stopki kształtownika iglicowego (rys. 3). W obszarach znajdujących się w bezpośredniej bliskości ubytku materiału zauważono propagujące i rozwijające się pęknięcia (rys. 4), które w wyniku dalszej eksploatacji zapewne doprowadziłyby do powiększenia się wykruszenia materiału na początku iglicy. Ze względu na brak danych o przeniesionym obciążeniu przez rozjazdy, nie można określić wpływu tego czynnika na szybkość degradacji iglic. Wykruszony materiał (rys. 5) był fragmentem iglicy, który oderwał się od kształtownika, natomiast jego zachowane powierzchnie wskazywały na normalne zużycie charakterystyczne dla współpracy z kołami taboru.

Tablica 1

Charakterystyka uszkodzonych rozjazdów

Parametry	Rozjazd 1	Rozjazd 2	Rozjazd 3
Profil kształtownika iglicy	60E1A6	60E1A6	60E1A6
Gatunek stali	R260	R260	R260
Czas eksploatacji	~23 miesiące	~9 miesięcy	~17 miesięcy
Miejsce uszkodzenia	w odległości około 130 mm od początku iglicy	w odległości około 640 mm od początku iglicy	w odległości około 1105 mm od początku iglicy
Długość uszkodzenia [mm]	~260	~280	~470
Największe zużycie pionowe w miejscu uszkodzenia* [mm]	7,3	10,4	6,5
Największe zużycie boczne [mm]	4,9	3,9	4,6

*Wartość stanowi sumę zużycia oraz wykruszenia materiału
[Opracowanie własne]

a)



b)



Rys. 3. Uszkodzenia iglic w postaci wykruszenia materiału: a) iglica rozjazdu 3, b) iglica rozjazdu 1 [fot. M. Czarnecki]



Rys. 4. Propagujące pęknięcie obok wykruszenia materiału w iglicy [fot. M. Czarnecki]



Rys. 5. Wykruszony materiał iglicy [fot. M. Czarnecki]

Powstałe wykruszenia stwarzały realne niebezpieczeństwo najechania obrzeży kół przez iglicę na opornicę, a także złamanie samej iglicy, co w konsekwencji mogłoby doprowadzić do wykolejenia taboru.

3. Badania laboratoryjne

W celu odpowiedzi na pytanie, czy użyty materiał do produkcji kształtowników iglicowych spełniał wymagania jakościowe, z każdej uszkodzonej iglicy pobrano próbki i wykonano badania laboratoryjne według norm przedmiotowych dla stali szynowych, tj. PN-EN 13674-1:2011 [5]

i PN-EN 13674-2+A1:2010 [6]. Według wymienionych norm wykonano między innymi badania składu chemicznego, wytrzymałości na rozciąganie, twardości HBW, mikro- i makrostruktury oraz czystości tlenkowej. Dodatkowo postanowiono wykonać badania naprężeń resztkowych (własnych), rozszerzając zakres badania o pomiar naprężeń w szyjce i ostrzu iglicy (standardowo według PN-EN 13674-1:2011 pomiar naprężeń resztkowych – własnych, wykonuje się jedynie na stopce). W tabelicy 2 zestawiono składy chemiczne iglic, z których próbki pobrano w pobliżu uszkodzenia ostrza, w tabelicy 3 przedstawiono właściwości wytrzymałościowe materiału, a w tabelicy 4 cechy struktury materiału.

Tabela 2

Skład chemiczny materiału iglic

Numer rozjazdu	Udział masowy [%]								[ppm]	
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	V	O	H
Rozjazd 1	0,74	0,32	1,11	0,019	0,019	0,045	<0,002	<0,003	11	<0,4
Rozjazd 2	0,79	0,32	1,15	0,010	0,011	0,034	<0,002	<0,003	12	0,5
Rozjazd 3	0,72	0,33	1,09	0,020	0,015	0,094	<0,005	<0,003	11	<0,5
Wymagania dla stali R260 według PN-EN 13674-2	0,60 ÷ 0,82	0,13 ÷ 0,60	0,65 ÷ 1,25	0,030 _{max}	0,030 _{max}	0,15 _{max}	0,004 _{max}	0,030 _{max}	20 _{max}	2,5 _{max}

[Opracowanie własne]

Tabela 3

Właściwości wytrzymałościowe materiału iglic

Parametry	Rozjazd 1	Rozjazd 2	Rozjazd 3	Wymagania dla stali R260 wg PN-EN 13674-2
Granica plastyczności $R_{0,2}$ [Mpa]	563	548	487	–
Wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]	979	994	935	min. 880
Wydłużenie [%]	12	10	11	min. 10
Przewężenie [%]	20	16	17	–
Twardość HBW	271	279	281	260 ÷ 300
Naprężenia resztkowe [MPa]	w stopce: 26 w szyjce: 62 w główce: 100	w stopce: 40 w szyjce: 79 w główce: 40	w stopce: 47 w szyjce: 18 w główce: 100	max 250 w stopce

[Opracowanie własne]

Tablica 4

Właściwości strukturalne materiału iglic

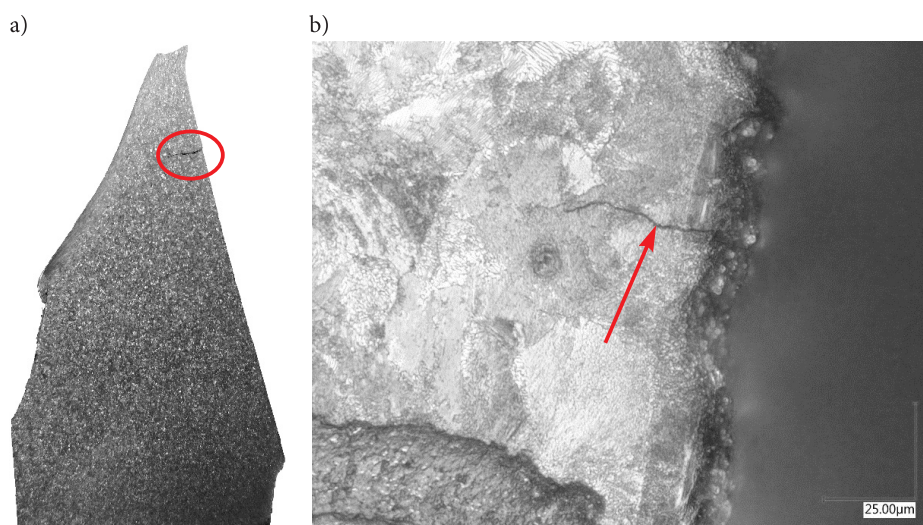
Parametry	Rozjazd 1	Rozjazd 2	Rozjazd 3	Wymagania dla stali R260 wg PN-EN 13674-2
Rodzaj mikrostruktury	perlityczna bez udziału innych faz	perlityczna bez udziału innych faz	perlityczna bez udziału innych faz	perlityczna, bez wydzielenia cementytu na granicach ziarn, bez udziału martenzytu i bainitu
Czystość tlenkowa	K3 = 1,15	K3 = 1,56	K3 = 4,16	K3 < 10
Próba Baumanna	odbitki zgodne ze wzorcem D4	odbitki zgodne ze wzorcem D4	odbitki zgodne ze wzorcem D4	wzorce akceptowalne od D1 do D7

[Opracowanie własne]

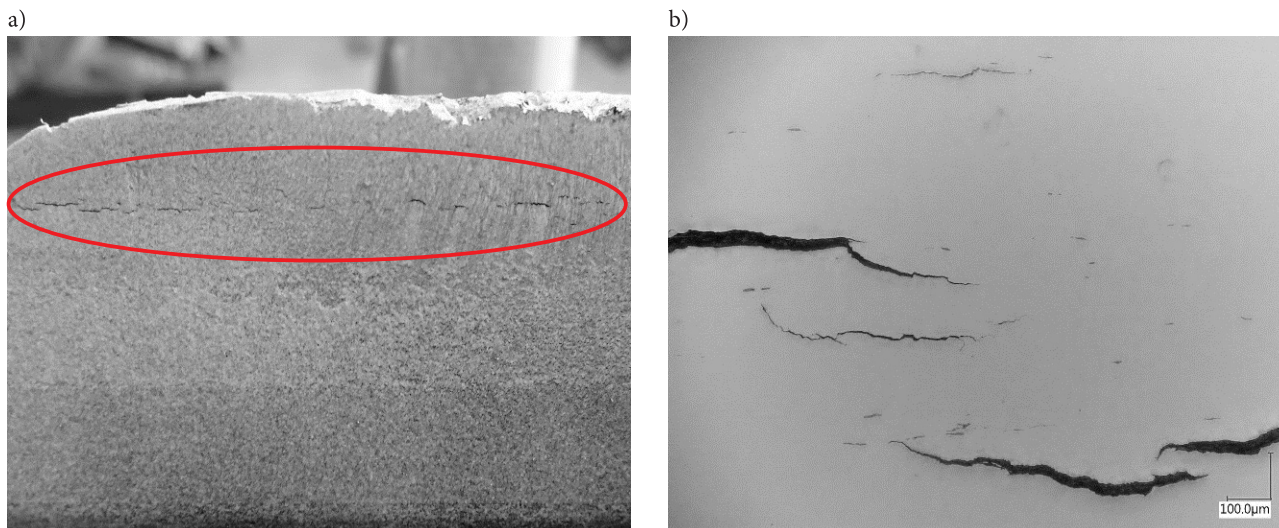
Na podstawie wyników przeprowadzonych badań laboratoryjnych stwierdzono, że w każdym z analizowanych przypadków, właściwości materiałów użytych do produkcji kształtowników iglicowych spełniają wymagania normy PN-EN ISO 13674-2:2010 [6]. Otrzymano pozytywne wyniki z badań składu chemicznego, właściwości wytrzymałościowych oraz badań strukturalnych. Pomiary naprężeń resztkowych wykazały, że w iglicy nie występują na tyle duże naprężenia, aby mogłyby spowodować pęknięcie materiału. Największe zarejestrowane naprężenia w miejscu wykruszenia materiału (główka), wynoszą 100 MPa (dla rozjazdu 1 i rozjazdu 3).

Podczas badań mikroskopowych, na próbkach pobranych blisko uszkodzenia, zauważono, że główne pęknięcie zostało zainicjowane na powierzchni kontaktu iglicy z opornicą, a następnie propagowało w głąb materiału (rys. 6a). W sąsiedztwie główne-

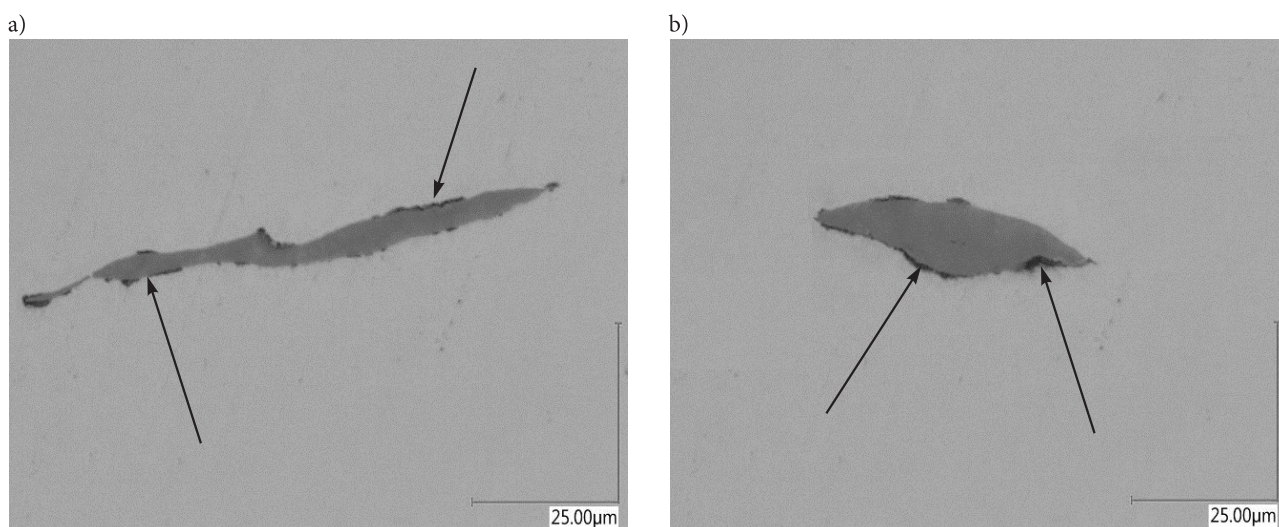
go pęknięcia wykryto również mniejsze pęknięcia, które podobnie jak główne, zostały zainicjowane na powierzchni (rys. 6b). Fakt ten potwierdziły również badania magnetyczno-proszkowe, które wykazały, że nieciągłości układają się w jednym paśmie położonym na jednej wysokości (rys. 7). Miejscami inicjacji pęknięć mogą być wtrącenia niemetaliczne znajdujące się na powierzchni kontaktu iglicy z opornicą. Stanowią one potencjalne karby strukturalne, gdzie na styku wtrącenia i metalicznej osnowy (skokowa zmiana właściwości materiału) mogą powstawać mikropęknięcia, które w wyniku dalszej eksploatacji mogą połączyć się w jedno duże pęknięcie. Może to z kolei doprowadzić do wykruszenia materiału i uszkodzenia iglicy rozjazdu. Przykłady potencjalnych ognisk mikropęknięć materiału na wtrąceniach niemetalicznych przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 6. Wycinek iglicy z propagującym pęknięciem: (a) mniejsze pęknięcie w sąsiedztwie głównego pęknięcia (b) [fot. M. Czarnecki]



Rys. 7. Nieciągłości na iglicy w miejscu kontaktu z opornicą wykryte podczas badań MT: (a) widok zaznaczonego obszaru podczas obserwacji mikroskopowych (b) [fot. M. Czarnecki]

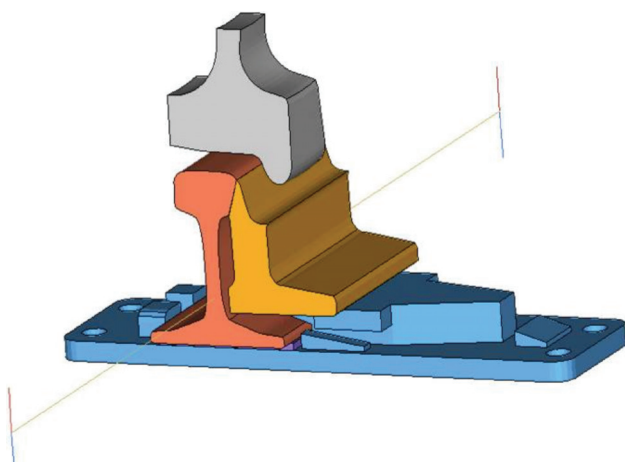


Rys. 8. Potencjalne ogniska pęknięć materiału na wtrąceniach niemetalicznych [fot. M. Czarnecki]

4. Analiza z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych MES

W celu lepszego poznania zjawisk zachodzących w iglicy, prowadzących do pęknięcia i wykruszenia materiału na określonej wysokości, zbudowano model 3D i zasymulowano rzeczywiste warunki eksploatacji rozjazdu podczas przejazdu taboru. Do tego celu wykorzystano oprogramowanie komputerowe HyperWorks z możliwością konstruowania bryłowego i analizy metodą elementów skończonych (MES). Zbudowany model składał się z wycinka iglicy, który dolegał do opornicy, trzech systemów przytwierdzenia opornicy do podrozdzielnicy oraz koła przejeżdżającego taboru działającego na opisany układ. Fragment zbudowane-

go modelu 3D przedstawiono na rysunku 9. W modelach obliczeniowych zastosowano elementy typu HEXA8N, SPRING2N, BEAM3N, RBE2, kontakt typu INTER / TYPE7, wielkość siatki w obszarze kontaktu wyniosła 2 mm, a przyjęty współczynnik tarcia $\mu = 0,1$. Do obliczeń MES wykorzystano parametry przedstawione w tabelicy 5. Są to charakterystyczne parametry dla każdego elementu wchodzącego w skład analizowanego układu. Do analizy przyjęto przyśpieszenie boczne 2 m/s^2 , które jest największym, jakie zarejestrowano przez pracowników Instytutu Kolejnictwa podczas rzeczywistych pomiarów w torze. Przyjmując taką wartość przyśpieszenia do analizy, spróbowano zaobserwować zachowanie się analizowanego układu przy parametrach ekstremalnych, które mogą wystąpić podczas eksploatacji.



Rys. 9. Fragment modelu 3D wykorzystany do analizy MES [opracowanie własne]

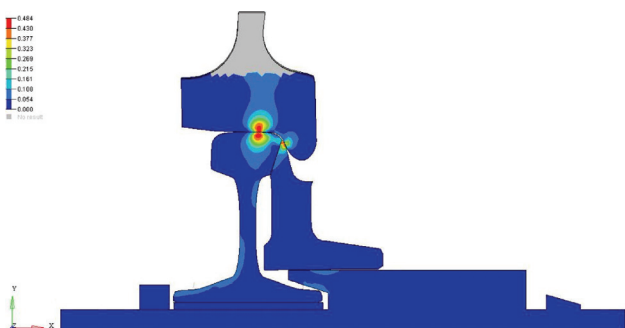
Tablica 5

Parametry przyjęte w obliczeniach MES

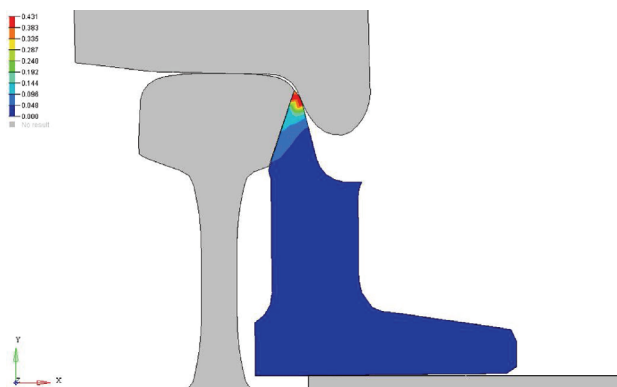
Parametr	Wartość
Statyczny nacisk zestawu na tor [kN]	200
Nacisk koła na szynę oporową po uwzględnieniu przyspieszenia bocznego 2 m/s ² [kN]	126,8
Siła boczna działająca na iglicę po uwzględnieniu przyspieszenia bocznego 2 m/s ² [kN]	40
Rozstaw podrozdziennic [mm]	600
Szytywność przekładek podszytowych [kN/mm]	1000
Szytywność każdej ze sprężyn systemu przytwierdzeń [kN/mm]	1
Siła docisku jednej sprężyny systemu przytwierdzeń [kN]	10
Materiał iglicy i szyny oporowej	R260

[Opracowanie własne]

Po stworzeniu modelu 3D oraz wprowadzeniu odpowiednich parametrów materiałowych, otrzymano rozkład pól naprężeń (rys. 10) występujących w kole, opornicy oraz iglicy podczas przejazdu taboru przez rozjazd. Na rysunku 10 widać, że największe naprężenia występują w miejscu kontaktu koła z szyną oporową (powierzchnie toczone) oraz w miejscu kontaktu obrzeża koła z iglicą.



Rys. 10. Naprężenia zredukowane von Misesa na przekroju analizowanego układu podczas przejazdu taboru [opracowanie własne]



Rys. 11. Naprężenia zredukowane na przekroju iglicy podczas przejazdu taboru [opracowanie własne]

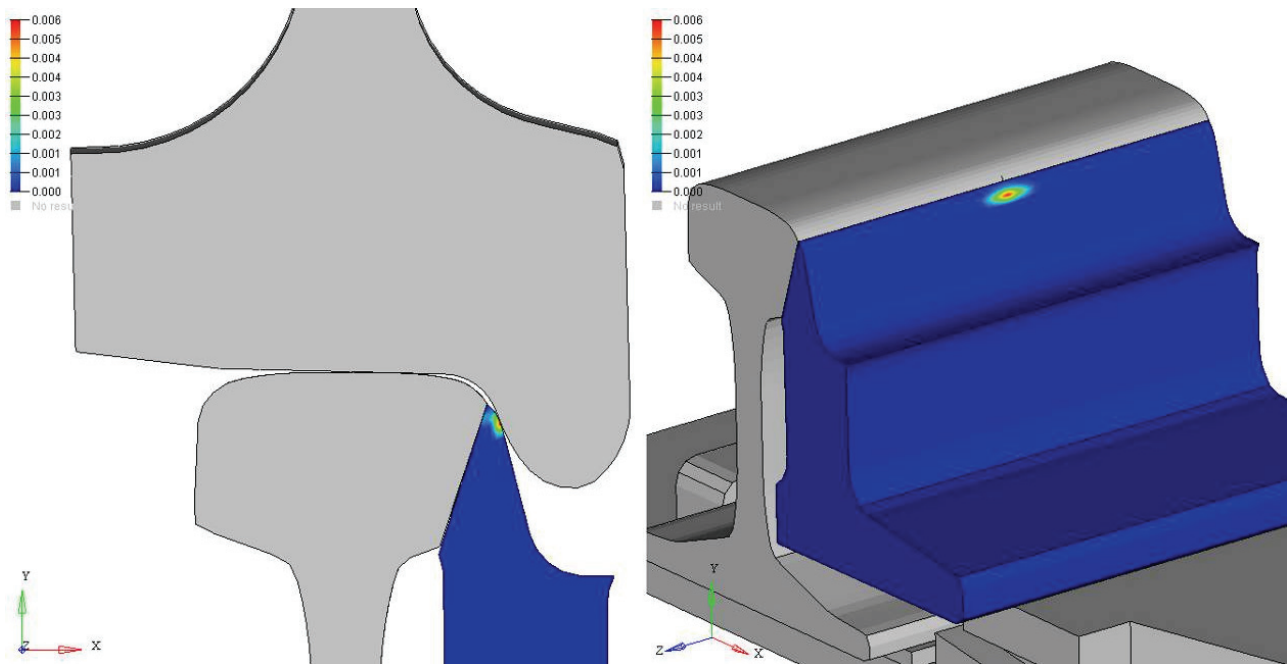
W przypadku iglicy, największe naprężenia występują w miejscu kontaktu obrzeża koła z iglicą oraz iglicy z opornicą (rys. 11) i mogą przyjmować wartość około 430 MPa, co stanowi wartość bliską wartości granicy plastyczności dla stali w gatunku R260. W tych miejscach występują także obszary największych odkształceń plastycznych (rys. 12).

Naprężenia zredukowane w iglicy przyjmują największe wartości w obszarach znajdujących się w niewielkiej odległości poniżej górnej krawędzi, zarówno w miejscach największych odkształceń plastycznych (kontakt z obrzeżem koła), jak i w obszarach kontaktu powierzchni iglicy z opornicą. Występowanie naprężeń ściskających i rozciągających, przedstawiono na rysunku 13. Obszary ściskane, to obszary kontaktu powierzchni iglicy z obrzeżem koła (kolor niebieski), natomiast obszary rozciągane, to obszary kontaktu powierzchni iglicy z opornicą (kolor czerwony). Największe naprężenia ściskające, jakie uzyskano w wyniku symulacji, osiągnęły wartość około 420 MPa natomiast największe naprężenia rozciągające wartość około 410 MPa.

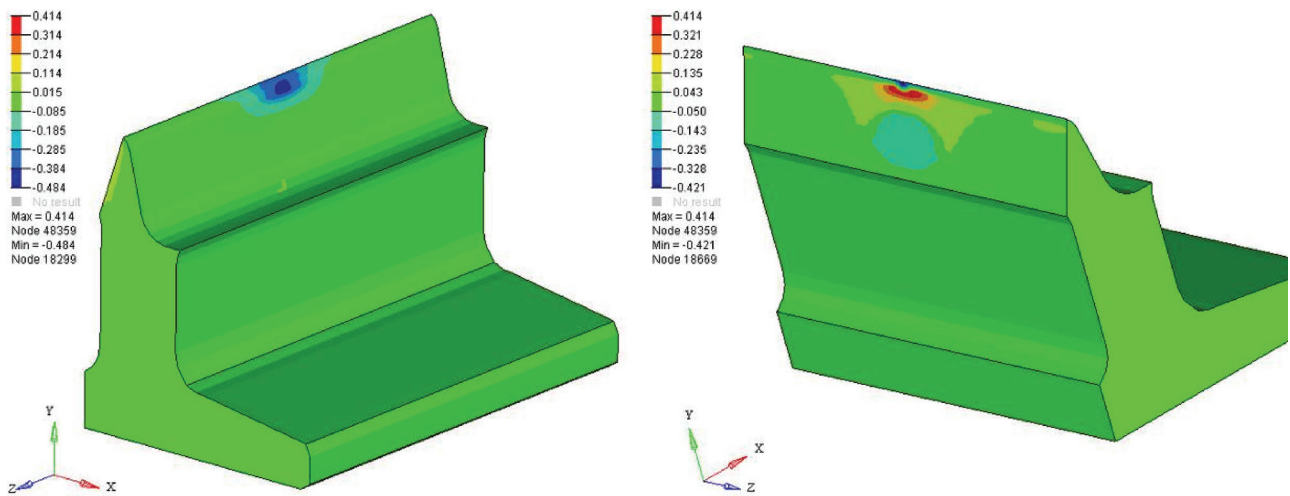
Na rysunku 14 przedstawiono kierunki naprężeń rozciągających występujących po stronie kontaktu iglicy z opornicą, a więc w miejscach potencjalnych ognisk uszkodzenia iglicy (rys. 6, 7). Kierunek naprężeń rozciągających jest prostopadły do osi wzdłużnej iglicy oraz kierunku ułożenia wtrąceń niemetalicznych w iglicy, co jest czynnikiem najbardziej niekorzystnym z punktu widzenia powstawania i propagacji pęknięć na wtrąceniach niemetalicznych. Skutkiem takiego działania jest powstanie pasma pęknięć na powierzchni kontaktu iglicy z opornicą, gdzie działały największe naprężenia rozciągające, które ujawniono podczas badań magnetyczno-proszkowych (rys. 7a).

5. Podsumowanie

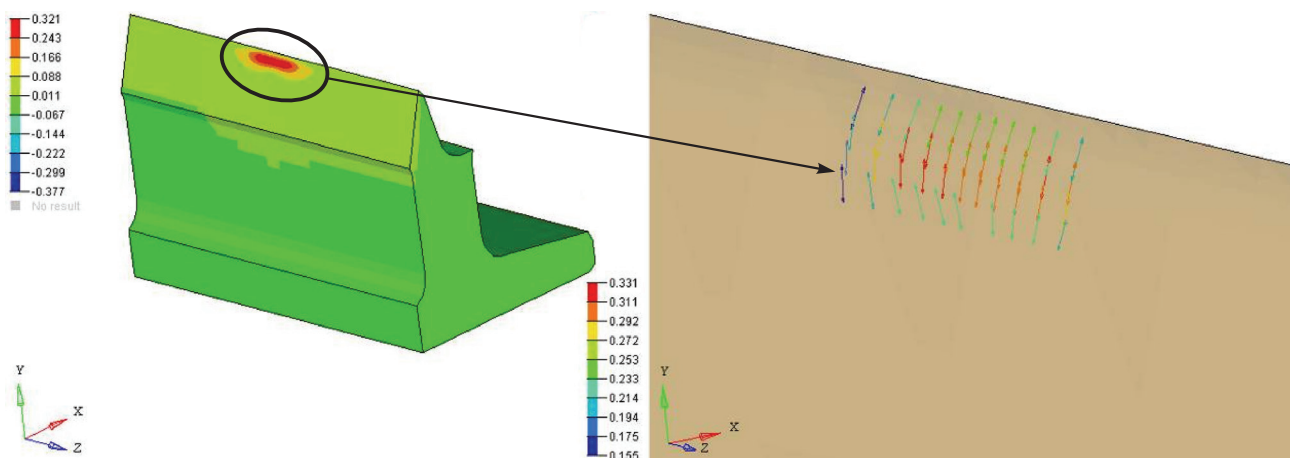
Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych oraz wykonanej symulacji MES stwierdzono,



Rys. 12. Obszar największych odkształceń plastycznych w iglicy [opracowanie własne]



Rys. 13. Naprężenia główne po uwzględnieniu ściskania (kolor niebieski) i rozciągania (kolor czerwony) [opracowanie własne]



Rys. 14. Kierunki naprężeń rozciągających (pierwszego naprężenia głównego σ_1) występujące w iglicy [opracowanie własne]

że jedną z głównych przyczyn uszkodzeń iglic łukowych w analizowanych rozjazdach zwyczajnych było przyspieszenie niezerównoważone (siła pozioma działająca na iglicę) pochodzące od przejeżdżającego taboru, które w iglicach doprowadziły do powstania stanu naprężeń rozciągających występujących po stronie kontaktu iglicy łukowej z opornicą prostą. Naprężenia rozciągające, jako skutek nierównoważonego przyspieszenia, doprowadziły do powstania pęknięć na granicy wtrąceń niemetalicznych i metalicznej osnowy, co wynika z różnic właściwości obu materiałów. Stan naprężeń rozciągających spowodował, że osnowa metaliczna odrywała się od wtrącenia, a po połączeniu naderwań wokół wtrącenia powstawało jedno większe mikropęknięcie, które dalej propagowało w metalicznej osnowie. W wyniku propagacji pojedynczych mikropęknięć powstawało jedno, duże pęknięcie, które doprowadziło do wykruszenia materiału i zniszczenia iglicy.

Należy przy tym zaznaczyć, że pomimo tego, iż materiał iglic spełniał wymagania dotyczące zawartości wtrąceń niemetalicznych (wskaźnik K3), to jednak nie oznacza, że w materiale w ogóle nie występują wtrącenia niemetaliczne. Wtrącenia takie są mniejsze i nie podlegają analizie przy ustalaniu wartości wskaźnika czystości materiału K3.

Miejsca inicjacji pęknięć wynikają z charakteru obciążenia iglic przez koła przejeżdżającego taboru. Obrzeże koła działające w obszarach największych odkształceń plastycznych iglicy (rys. 12) prowadziło do ścierania materiału i jego spływu, a tym samym do zużycia iglicy (maksymalne zmierzone zużycie boczne wyniosło 4,9 mm). W wyniku ubytku materiału, przy stałej sile poziomej działającej na iglicę, mogły pojawić się zdecydowanie większe naprężenia niż te, które otrzymano w symulacji MES i mogły one znacznie przekraczać granicę plastyczności materiału stali R260, co jest czynnikiem bardzo niebezpiecznym w eksploatacji rozjazdu. Należy podkreślić, że otrzymane wartości naprężeń ściskających i rozciągających w analizie MES dotyczą przypadku, gdzie nie uwzględniono zużycia iglicy, opornicy, kół oraz innych niedokładności geometrycznych lub błędów we wzajemnym położeniu (np. niewłaściwe doleganie iglicy do opornicy), a przyjęte przyspieszenie boczne 2 m/s^2 jako ekstremalne, wywołało w iglicy stan naprężeń bliski granicy plastyczności materiału. Wszelkie niedokładności geometryczne we wzajemnym położeniu poszczególnych elementów w rozjeździe lub

ich zużycie mogły potęgować efekt szybkiego niszczenia iglic, gdyż w miejscach ich uszkodzeń dochodzi do szybkiego przyrostu przyspieszeń bocznych, które mogą nawet prowadzić do uderzeń obrzeży kół przejeżdżającego taboru o iglice łukowe.

W celu uniknięcia podobnych przypadków w przyszłości, w torach zwrotnych rozjazdów o dużym obciążeniu i dużej prędkości taboru, zasadnym wydaje się być stosowanie na iglice rozjazdów materiału o lepszych właściwościach wytrzymałościowych niż stal R260, np. stali w gatunku R350HT. Granica plastyczności tego materiału wynosi około 700 MPa, co mogłoby wpłynąć na zmniejszenie nadmiernego zużycia i uszkodzenia iglic łukowych w rozjazdach zwyczajnych. Dodatkowo, precyzyjne wykonywanie i montaż rozjazdów w torze, a zwłaszcza precyzyjne wykonanie zespołu zwrotnicy oraz stała kontrola wzajemnego położenia części ruchomych w rozjazdach, powinny zmniejszyć ryzyko uszkodzeń iglic.

Literatura

1. Bałuch H., Bałuch M.: *Eksploatacyjne metody zwiększania trwałości rozjazdów kolejowych*, CNTK, Warszawa 2010.
2. Cejmer J.: *Badania oddziaływań dynamicznych w rozjazdach przeznaczonych do dużych prędkości pociągów*, Problemy Kolejnictwa, Zeszyt 140, Warszawa 2005, s. 80–109.
3. *Instrukcja o oględzinach, badaniu i utrzymaniu rozjazdów Id-4*, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Warszawa 2014.
4. Korab D.: *Rozjazdy kolejowe do dużych prędkości. Wybrane zagadnienia dla interoperacyjności oraz przegląd zastosowanych niektórych rozwiązań technicznych*. Konferencja naukowo-techniczna z okazji XXX-lecia CMK, Psary-Ostaniec, 16–17 września 2004.
5. PN-EN 13674-1:2011: Kolejnictwo – Tor – Szyna – Część 1: Szyny kolejowe Vignoles'a o masie 46 kg/m i większej.
6. PN-EN 13674-2+A1:2010: Kolejnictwo – Tor – Szyna – Część 2: Szyny do rozjazdów i skrzyżowań stosowane w połączeniu z szynami kolejowymi Vignoles'a o masie 46 kg/m i większej.
7. *Tory, rozjazdy i skrzyżowania torów. Poradnik dla komisji kolejowych*. Urząd Transportu Kolejowego, Warszawa 2017.