

Określenie podatności powierzchni tocznej szyn kolejowych na pęknięcia

Ireneusz MIKŁASZEWICZ¹, Robert BIŃKOWSKI², Jakub MICHALIK³, Michał SZYMAŃSKI⁴

Streszczenie

W artykule przedstawiono jedną z głównych wad szyn kolejowych typu pęknięcie oraz zależności wpływające na wielkość pęknięcia. Zastosowano nową metodę badań polegającą na wciskaniu stożka o kącie rozwarcia 60° w przygotowany fragment szyny. Stwierdzono, że tworzący się zgniot powierzchniowy materiału spowodowany obciążeniem, a także dynamiką jazdy taboru kolejowego jest przyczyną powstawania wady typu pęknięcia krawędziowe powierzchni (*head checks*) szyn. Stwierdzono również duży wpływ struktury warstwy powierzchni tocznej szyn na powstawanie pęknięć. Zaproponowano sposób określenia podatności powierzchni tocznej szyn na tworzenie się wad szyn za pomocą współczynnika W_p .

Słowa kluczowe: head check szyn, powierzchnia toczna, współczynnik podatności

1. Wstęp

Zapewnienie bezpiecznej jazdy pociągów przy zwiększającej się prędkości jazdy wymusza modernizację nawierzchni kolejowej, w tym stosowanie właściwej jakości szyn. Istniejąca nawierzchnia kolejowa, szczególnie na liniach o dużym nasileniu ruchu pociągów, wymaga stosowania monitoringu, którego celem jest między innymi ocena stanu szyn jako jednego z najważniejszych czynników bezpiecznego transportu [1]. Jedną z wad powierzchni tocznej szyn powstającą podczas eksploatacji i mającą wpływ na bezpieczeństwo jazdy taboru towarowego oraz pasażerskiego jest pęknięcie.

Pod wpływem eksploatacji powierzchnia toczna szyn kolejowych ulega istotnym zmianom, takim jak odkształcenia i tworzenie się wad na powierzchni. Głównymi wadami nastroczającymi wiele trudności są wszelkiego rodzaju pęknięcia krawędziowe, tzw. *head checks* (2223) [2] (rys. 1, 2) oraz powierzchniowe, tj. *squat* (227) [2] (rys. 3) [3]. Występują również inne wady typu *shelling* (222) [2], falistość, wybuksovania, pęknięcia poprzeczne i poziome czy nadmierne zużycie [4]. Wady te wpływają na dyskomfort jazdy pasażerów stwarzając jednocześnie zagrożenie w podróżowaniu. Walka z tymi wadami jest bardzo trudna

oraz wymaga dużych nakładów finansowych. W warunkach eksploatacji toru podlegają ciągłej obserwacji przez służby torowe, jednocześnie wykonuje się badania ujawniające te wady, np. badania ultradźwiękowe, reprofiliację powierzchni szyny drogą szlifowania lub frezowania, naprawy przez miejscowe napawanie, a także wymianę nadmiernie wadliwych szyn na nowe. Stosowane naprawy powierzchni tocznej szyn nie usuwają całkowicie ujawnionych wad. W przypadku pęknięć krawędziowych szyn szlifowanie daje efekty tylko w okresie początkowym, tj. kiedy pęknięcia *head checks* [5] są jeszcze płytkie do 0,5 mm głębokości – moment ten jest niezwykle trudno uchwycić i w trybie pilnym wykonać operację szlifowania szyn. Dalsza eksploatacja powoduje rozwój powstałych pęknięć i zwiększenie ich głębokości w materiale. Po tym czasie szlifowanie szyn jest mało skuteczne ze względu na większą głębokość występowania wad.

Przyczyną, która wpływa między innymi na zmniejszoną odporność szyn na pęknięcia, jest odwęglenie powierzchni tocznej [6, 7]. Dopuszczalne odwęglenie szyn określone przez normę PN-EN 13674-1+A1:2017-07 [8] wynosi maksymalnie 0,50 mm. Zjawisko to występuje na szynach bez względu na profil oraz gatunek stali z jakiej zostały wykonane

¹ Inż.; Emerytowany pracownik Instytutu Kolejnictwa; e-mail: irekmik@o2.pl.

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

³ Inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Materiałów i Elementów Konstrukcji; e-mail: jmichalik@ikolej.pl.

⁴ Mgr inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Materiałów i Elementów Konstrukcji; e-mail: mszymanski@ikolej.pl.

i jest uzależnione od procesu technologicznego walcowania, tj. atmosfery ochronnej w piecu grzewczym lub długości czasu nagrzewania i wygrzewania. Wraz ze zmianą odwęglenia zmienia się podatność materiału na pęknięcia powierzchniowe. Skład chemiczny szyn oraz ich twardość mają również ogromny wpływ na stan powierzchni tocznej i jej odporność na tworzenie się wad powierzchniowych szyn [9, 10].



Rys. 1. Pęknięcia krawędziowe szyny na etapie początkowym [fot. I. Mikłaszewicz]



Rys. 2. Pęknięcia krawędziowe o różnym nasileniu w bezpośrednim sąsiedztwie złącza spawanego [fot. I. Mikłaszewicz]



Rys. 3. Pęknięcie powierzchniowe szyny typu *squat* [fot. I. Mikłaszewicz]

Szyny kolejowe produkowane zgodnie z normą PN-EN 13674-1+A1:2017-07 [8] są dostarczane odbiorcom. Według wspomnianej normy badania odbiorcze szyn mają na celu ocenę jakości wyrobu z uwzględnieniem wymagań w zakresie następujących parametrów: całkowitej analizy składu chemicznego, właściwości wytrzymałościowych na rozciąganie, twardości HBW, odwęglenia, rozkładu siarki na przekroju szyny, oceny mikrostruktury, profilu

i powierzchni szyny oraz spójności wewnętrznej materiału (badanie ultradźwiękowe).

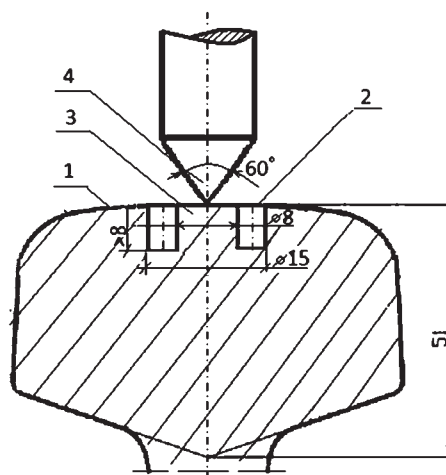
2. Materiał i metody badań

W celu określenia współczynnika W_p podjęto badania laboratoryjne w Instytucie Kolejnictwa w Laboratorium Badań Materiałów i Elementów Konstrukcji. Materiałem do badań były nowe szyny o profilu 60E1 ze stali gatunku R260, R350HT i R400HT. Próbki oznaczono odpowiednio: 1 – R260, 2 – R350HT i 3 – R400HT.

Próbki szyn poddano frezowaniu powierzchni na głębokość 0,3 mm oraz 0,5 mm celem usunięcia odwęglonej powierzchni materiału (rys. 4). Tak przygotowaną powierzchnię szyny wiercono wiertłem koronowym o średnicy 15 mm na głębokość 8÷9 mm (rys. 5). W procesie przygotowania próbki walec o średnicy 8 mm wciskano centrycznie stożek o kącie rozwarcia 60 stopni z prędkością narastania siły 40 kN/min, rejestrując siłę wciskania F wyrażoną w kilonewtonach i głębokość penetracji końcówki stożka h w materiale szyny wyrażoną w milimetrach. Badanie przerywano w momencie pęknięcia materiału.



Rys. 4. Odcinki trzech gatunków szyn wykorzystane w badaniach [fot. I. Mikłaszewicz]



Rys. 5. Schemat wciskania stożka w powierzchnię szyny: 1) szyna, 2) wywiercony otwór za pomocą wiertła koronowego, 3) pręt, 4) stożek [I. Mikłaszewicz]

Dodatkowo wykonano analizę składu chemicznego, oznaczając ilość węgla (C), manganu (Mn), krzemu (Si), fosforu (P), siarki (S), chromu (Cr), niklu (Ni), miedzi (Cu), glinu (Al), molibdenu (Mo), wanadu (V) wodoru (H) i tlenu (O), twardość (HBW i HV30) oraz właściwości wytrzymałościowe (granica plastyczności $R_{e0,2}$, wytrzymałość R_m , wydłużenie A_5 , i przewężenie Z).

Badania składu chemicznego wykonano za pomocą spektrometru Magellan Q8 Bruker, parametry wytrzymałościowe na maszynie INOVA FU250 rejestrującej siłę z dokładnością ± 1 N i przemieszczenie $\pm 0,01$ mm.

Na podstawie wykonanych badań określono podatność warstwy powierzchniowej na pęknięcie za pomocą parametru W_p [kN/mm^2]. Parametr ten został obliczony jako stosunek siły wciskania F do powierzchni bocznej stożka S_b wciśniętego w materiał.

$$W_p = \frac{F}{S_b}$$

gdzie: F – siła wcisku [kN]; S_b – powierzchnia boczna stożka [mm^2].

Po wykonaniu badań wciskania stożka na mikroskopie optycznym Keyence VHX-900F obserwowano

mikrostrukturę powierzchni początku, środka i dna pękniętej warstwy powierzchniowej badanych szyn wyprodukowanych z różnych gatunków stali.

Analizę naprężeń powstających podczas wciskania stożka w powierzchnię szyny wykonano za pomocą symulacji komputerowej MES w programie HyperMesh, natomiast obliczeń dokonano przy użyciu solvera Radioss (explicit). Zastosowano model elastoplastyczny Johnsona-Cooka oraz model uszkodzenia materiału dla stali R260.

3. Wyniki badań

Analizę składu chemicznego badanych gatunków stali, z których wykonano szyny przedstawiono w tabelicy 1, wyniki parametrów wytrzymałościowych w tabelicy 2, a twardości w tabelicy 3.

Wyniki badań siły pęknięcia F , głębokości wciskania h , powierzchni stożka S_b oraz wyliczonego współczynnika W_p zamieszczono w tabelicy 4. Na wykresach przedstawiono zależności siły F od głębokości penetracji stożka h , odpowiednio dla szyn niefrezowanych i poddanych frezowaniu (rys. 6–8).

Tabela 1

Zawartość pierwiastków badanych szyn

Numer próbki / gatunek	Zawartości pierwiastków [%]												
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Mo	V	H [ppm]	O [ppm]
1-R260	0,72	1,08	0,31	0,014	0,014	0,076	0,015	0,034	< 0,002	0,005	0,003	≤ 2,5	≤ 20
2-R350HT	0,77	1,10	0,40	0,009	0,009	0,076	0,015	0,013	< 0,002	0,005	0,003		
3-R400HT	0,93	1,23	0,24	0,014	0,012	0,28	0,015	0,011	< 0,002	0,005	0,003		

[Opracowanie własne].

Tabela 2

Właściwości wytrzymałościowe próbek z gatunku R260, R350HT i R400HT

Parametr	Numer próbki					
	1.1 – R260	1.2 – R260	2.1 – R350HT	2.2 – R350HT	3.1 – R400HT	3.2 – R400 HT
$R_{e0,2}$ [MPa]	427,3 ±14,1	422,3 ±13,9	422,3 ±13,9	–	427,8 ±14,1	417,2 ±13,8
R_m [MPa]	996,7 ±32,9	980,3 ± 32,3	1195,7 ±39,5	1207,7 ±39,6	1389,4 ±45,8	1382,9 ±45,6
A_5 [%]	12,1 ±0,4	12,4 ±0,4	11,8 ±0,4	–	11,8 ±0,4	9,1 ±0,3
Z [%]	20,2 ±0,7	22,0 ±0,7	23,8 ±0,8	–	21,3±0,7	20,4 ±0,7

[Opracowanie własne].

Tabela 3

Wyniki pomiaru twardości próbek z gatunku R260, R350HT i R400HT

Wielkość badana	Numer próbki								
	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3
HBW	278,7 ±10	286 ±11	285 ±11	295 ±11	353 ±13	349 ±13	401 ±15	398 ±14	396 ±15
HV30	241 ±17	264 ±19	272 ±20	276 ±20	343 ±25	344 ±25	339 ±24	368 ±27	406 ±29

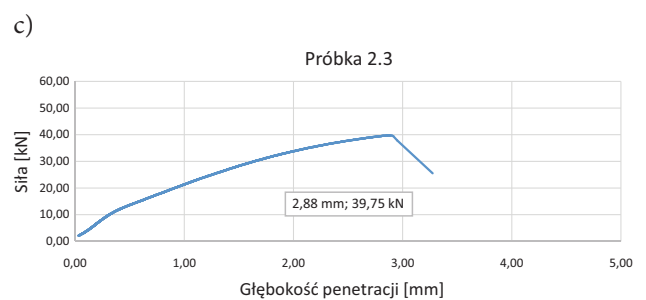
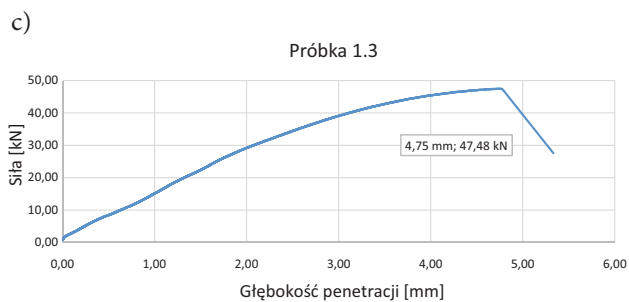
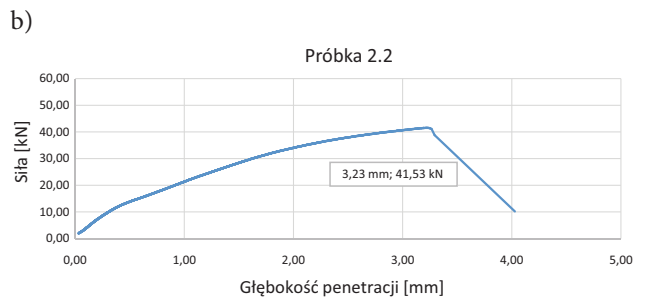
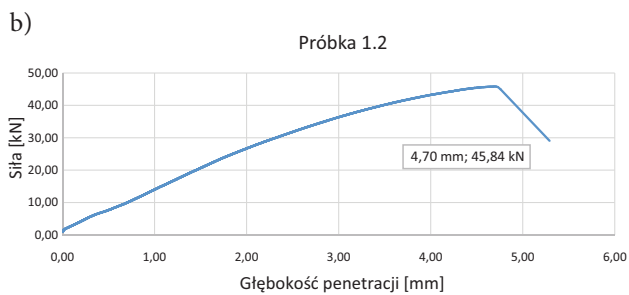
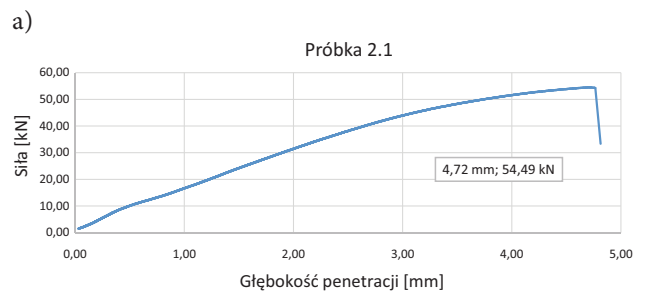
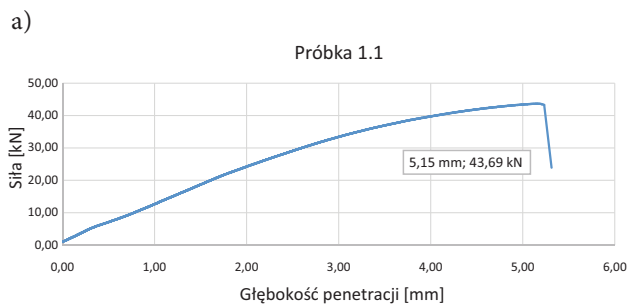
[Opracowanie własne].

Tablica 4

Wyniki badań podatności warstwy powierzchniowej szyn na pęknięcie z gatunku R260, R350HT i R400HT

Gatunek stali	Nr próbki	Głębokość szlifowania [mm]	Siła przy pękaniu powierzchni [kN]	Głębokość wciskania [mm]	Powierzchnia stożka [mm ²]	Współczynnik podatności materiału na pęknięcie W_p [kN/mm ²]	Odchylenie standardowe
R260	1.1	0	43,69	5,15	55,63	0,785	0,1404
R260	1.2	0,30	45,84	4,70	46,21	0,992	
R260	1.3	0,50	47,48	4,75	46,92	1,01	
R350HT	2.1	0	54,49	4,72	45,2	1,21	0,6116
R350HT	2.2	0,30	41,53	3,23	24,78	1,67	
R350HT	2.3	0,50	39,75	2,88	17,36	2,29	
R400HT	3.1	0	48,58	4,14	35,87	1,354	0,5513
R400HT	3.2	0,30	45,36	3,08	19,90	2,28	
R400HT	3.3	0,50	49,00	3,58	26,84	1,825	

[Opracowanie własne]



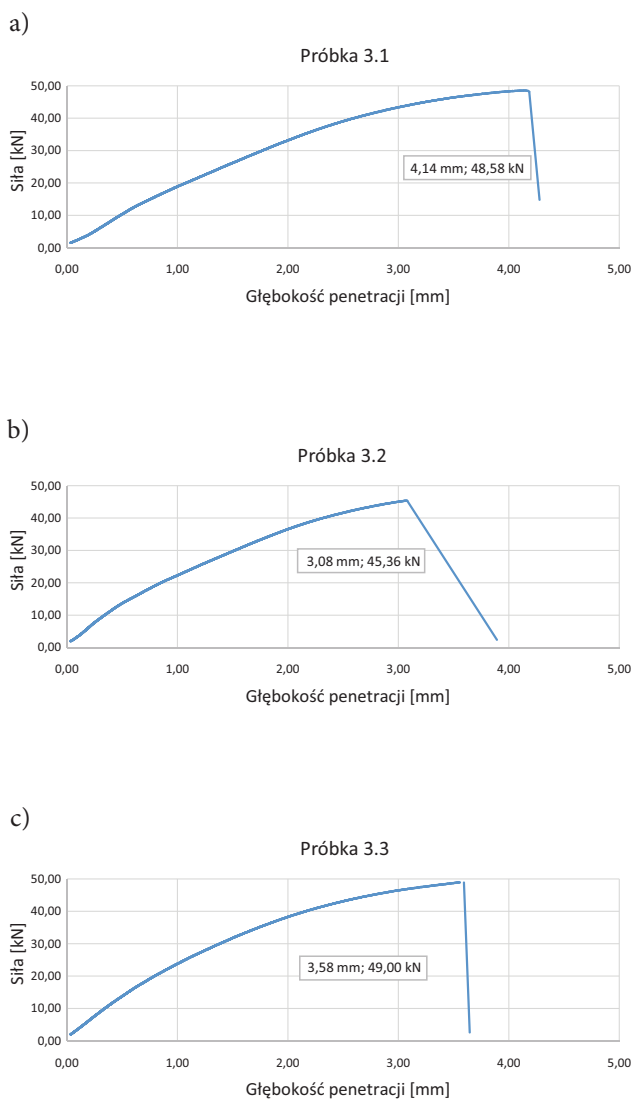
Rys. 6. Zależność siły od głębokości wciskania stożka w szynę z gatunku R260: a) bez frezowania, b) we frezowaną powierzchnię na głębokość 0,3 mm, c) we frezowaną powierzchnię na głębokość 0,5 mm [oprac. J. Michalik, I. Mikłaszewicz]

Rys. 7. Zależność siły od głębokości wciskania stożka w szynę z gatunku R350HT: a) bez frezowania, b) we frezowaną powierzchnię na głębokość 0,3 mm, c) we frezowaną powierzchnię na głębokość 0,5 mm [oprac. J. Michalik, I. Mikłaszewicz]

Wyniki badań wskazują na zależność podatności na pęknięcie warstwy tocznej szyn od jakości i budowy mikrostruktury powierzchni, która z kolei jest zależna od zastosowanej technologii końcowego etapu produkcji, tj. końcowego etapu walcowania, warunków chłodzenia i prostowania szyn. Również istotny wpływ na pęknięcie ma skład chemiczny materiału szyn oraz obróbka cieplna główki szyny w przypadku stali gatunku R350HT. Z wyników zawartych w tabeli 4 można zauważyć regułę prowadzącą do wzrostu

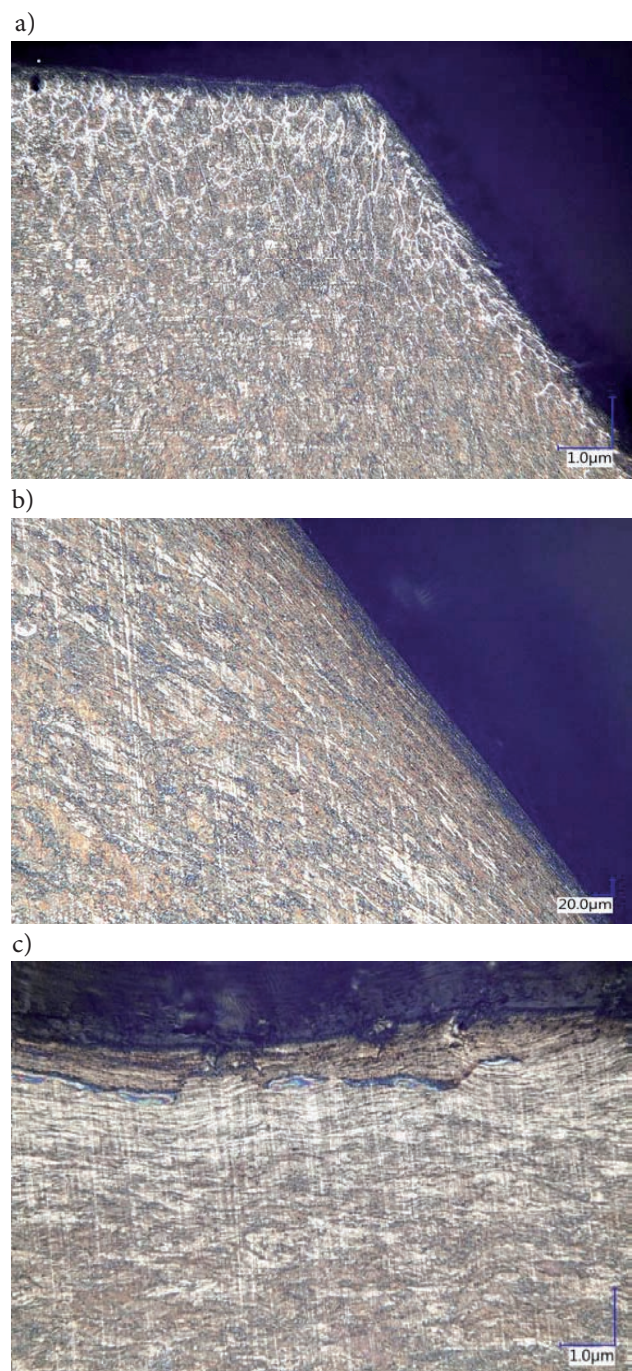
współczynnika W_p w miarę stosowania szyn o większej wytrzymałości materiału.

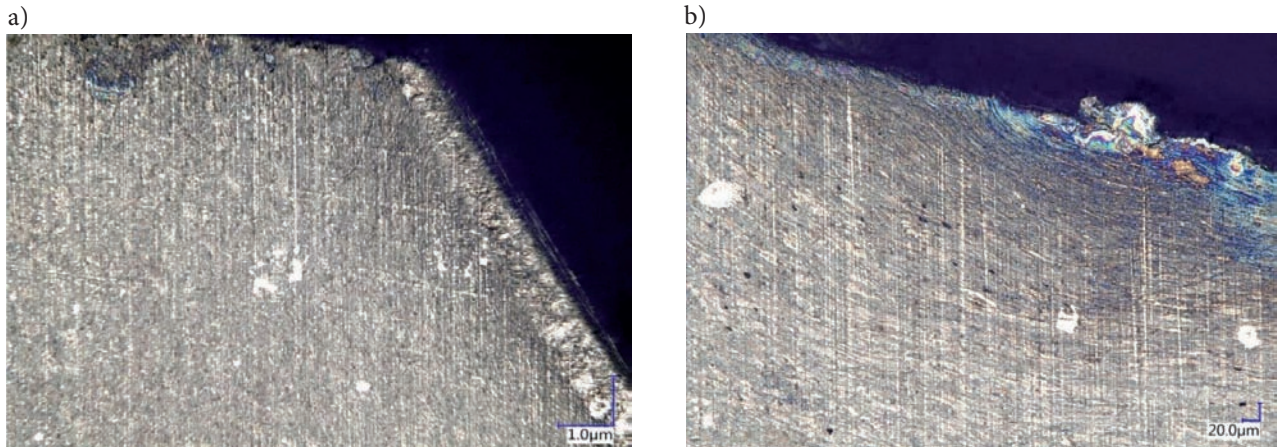
Na rysunku 9 przedstawiono mikrostrukturę początku, środka i dna pękniętej warstwy powierzchniowej szyn z gatunku R260 po wciskaniu stożka. Widoczny jest silny zgniot materiału tuż przy powierzchni szyny, w środkowej części oraz dnie. Natomiast na rysunku 10 pokazano strukturę początku i środka warstwy powierzchniowej po wciskaniu stożka w szynę gatunku R350HT.



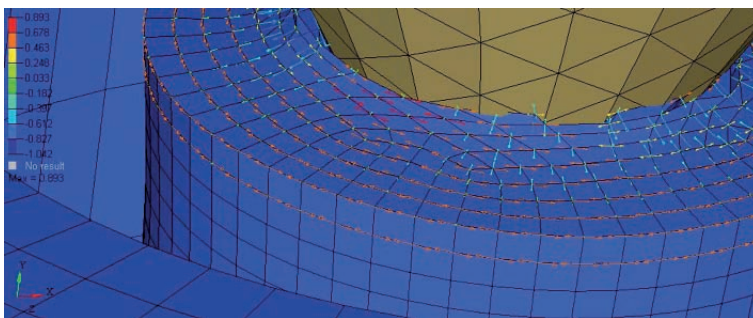
Rys. 8. Zależność siły od głębokości wciskania stożka w szynę z gatunku R400HT: a) bez frezowania, b) we frezowaną powierzchnię na głębokość 0,3 mm, c) we frezowaną powierzchnię na głębokość 0,5 mm [oprac. J. Michalik, I. Mikłaszewicz]

Rys. 9. Pęknięcia powierzchni tocznej szyny gatunku R260 po badaniu wciskania stożka w szynę: a) początek, b) środek, c) dno przy wierzchołku stożka [fot. I. Mikłaszewicz]

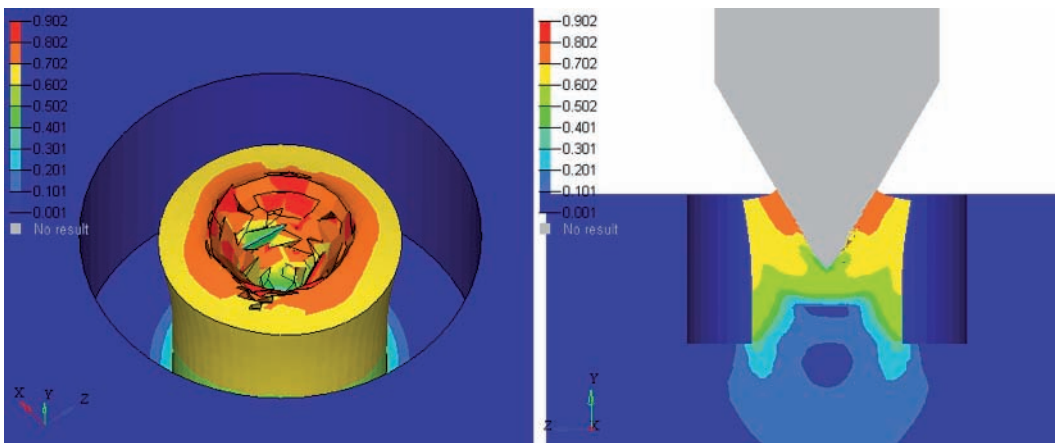




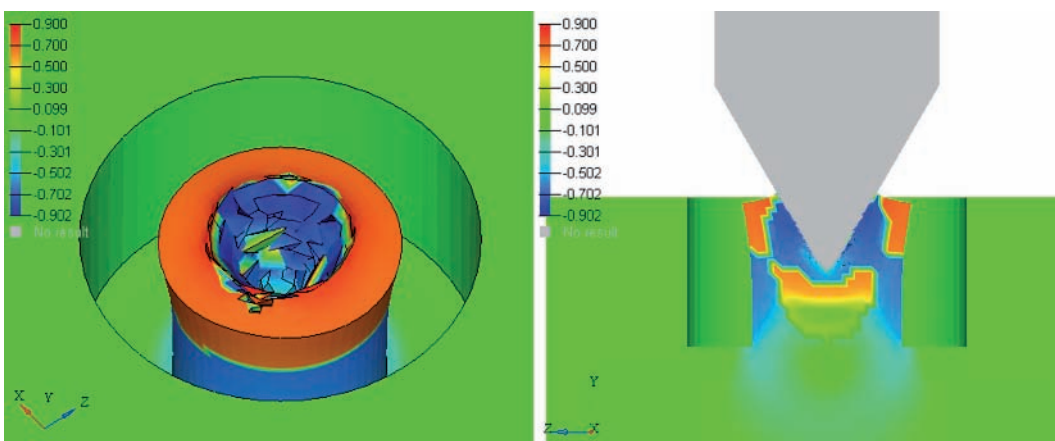
Rys. 10. Pęknięcia powierzchni tocznej szyny gatunku R350HT po badaniu: a) początek, b) środek [fot. I. Mikłaszewicz]



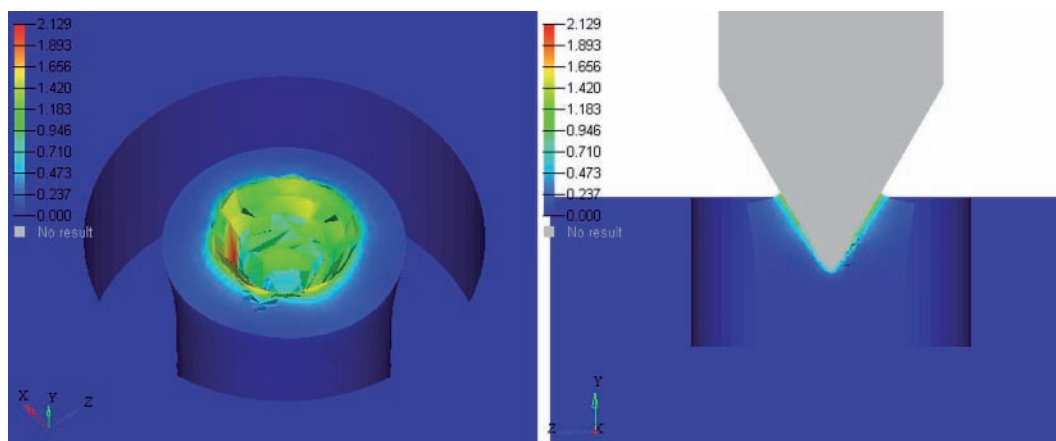
Rys. 11. Naprężenia główne i ich kierunki w górnej części pręta tuż przed pęknięciem [oprac. R. Bińkowski]



Rys. 12. Naprężenia zredukowane von Misesa [oprac. R. Bińkowski]



Rys. 13. Naprężenia zredukowane von Misesa z uwzględnieniem rozciągania i ściskania [oprac. R. Bińkowski]



Rys. 14. Wynik odkształcenia plastycznego z początkowym pęknięciem materiału [oprac. R. Bińkowski]

4. Komentarz i wnioski

Podstawą do podjęcia tematu było znalezienie sposobu ograniczenia wad typu pęknięcie powierzchniowe szyn o różnym nasileniu na tej samej linii kolejowej. Podczas budowy torów zabudowane szyny pochodzą z kilkunastu wytopów jednego gatunku, w zdecydowanej większości jest to gatunek R260 o profilu 60E1, a więc badane właściwości materiału szyn odpowiadają wymaganiom normy PN-EN 13674-1+A1:2017-07 [8].

Mechanizm pęknięcia krawędziowego szyn przebiega w następujący sposób: na skutek obciążenia jazdą na powierzchnię szyny w początkowym okresie oddziałuje zgniot, który mieści się w obszarze granicy plastyczności ($Re_{0,2}$) materiału. Podczas dalszej eksploatacji następuje umocnienie materiału i początek pęknięcia zachodzi po przekroczeniu granicy wytrzymałości (R_m). W związku z tym ograniczenie pęknięć na powierzchni tocznej szyn wiązałyby się ze stanem mikrostruktury warstwy powierzchniowej szyny oraz jej wytrzymałością.

Przeprowadzone badania podatności na pęknięcie warstwy powierzchniowej szyn metodą wciskania stożka opierały się na zasadzie różnego stopnia zgniotu powierzchni tocznej, a tym samym różnego stopnia odkształcenia warstwy powierzchniowej szyn. Podczas wciskania stożka największy zgniot występuje w warstwie powierzchniowej. W miarę działania siły wcisku następuje odkształcenie warstwy powierzchniowej szyny zdecydowanie silniej niż wewnątrz materiału. Analogicznie jak opisano wyżej, po przekroczeniu granicy plastyczności $Re_{0,2}$ następuje proces umocnienia się powierzchni i po przekroczeniu granicy wytrzymałości materiału R_m zachodzi pęknięcie od powierzchni szyny w głąb materiału.

Wykonane badania składu chemicznego próbek szyn gatunku R260, R350HT i R400HT potwierdziły zgodność zawartości pierwiastków z wymaganiami

normy PN-EN 13674-1+A1:2017-07 [8]. Również wykonane badania właściwości wytrzymałościowych oraz twardości HBW i HV30 mieszczą się w wymaganiach tej normy.

Podczas eksploatacji torów kolejowych powstaje wiele wad szyn. Pojawiają się wówczas drobne wady kontaktowo-zmęczeniowe, które stopniowo rozrastają się, co może powodować pęknięcie szyn. Zaproponowany sposób badania podatności powierzchni tocznej szyn za pomocą współczynnika W_p powinien umożliwić optymalny wybór szyn wykazujących wydłużony czas inicjacji pęknięć powierzchniowych szyn. Współczynnik W_p jest wynikiem zależności siły wcisku stożka o kącie rozwarcia 60 stopni w powierzchnię toczną szyny od wielkości powierzchni bocznej penetracji stożka. Na skutek wciskania stożka zgniot powierzchni penetrowanej szyny prowadzi do pęknięcia warstwy powierzchniowej. Przeprowadzone badania współczynnika W_p szyn gatunku R260, R350HT i R400HT pozwoliły na stwierdzenie, że stan mikrostruktury powierzchni tocznej w znaczny sposób wpływa na jej odporność na pęknięcie. Powstająca mikrostruktura perlityczna warstwy tocznej szyn jest zależna od szybkości chłodzenia na chłodni po walcowaniu na gorąco oraz zawartości węgla i wielkości odwęglenia, co jest związane z atmosferą ochronną w piecu do nagrzewania materiału do walcowania. Badania wykazały, że współczynnik W_p powierzchni bez frezowania był znacznie niższy niż powierzchni frezowanej dla wymienionych gatunków stali. Zalecany współczynnik W_p dla stali R260 winien kształtować się powyżej 0,9, natomiast dla gatunku R350HT W_p powinien być powyżej 1,2, a dla gatunku R400HT powyżej 1,4. Badane szyny z gatunku R350HT i R400HT uzyskały współczynnik W_p zwiększający się w zależności od głębokości warstwy zeszlifowanej powierzchni tocznej szyny.

Naprężenia, zobrazowane metodą symulacji komputerowej MES, przedstawiono na rysunkach 11–14.

Pojawiają się one na powierzchni tocznej szyny w gatunku R260 podczas wciskania stożka kształtują się na poziomie + 900 MPa jako naprężenia zredukowane von Misesa z uwzględnieniem rozciągania, natomiast z uwzględnieniem ściskania i rozciągania również około ± 900 MPa, a więc w granicach wymaganych przez normę PN-EN 13674-1+A1:2017-07 dla wytrzymałości na rozciąganie dla stali R260 (880 MPa).

Za pomocą współczynnika W_p można wybrać takie wytopy nowych szyn (głównie z gatunku R260), które charakteryzują się mniejszą podatnością warstwy powierzchniowej na pęknięcia z powodu wysokiej wartości współczynnika W_p . W związku z tym nadają się do stosowania na liniach o większym nasileniu ruchu pojazdów, powodując wydłużenie początku inicjacji wad powierzchniowych szyn, ich większą żywotności i ograniczenie częstości wymiany szyn na nowe oraz znaczne oszczędności finansowe związane z naprawą linii kolejowej.

Literatura

1. Bałuch H.: Zagrożenia w nawierzchni kolejowej, Instytut Kolejnictwa, Warszawa, 2017.
2. Katalog wad w szynach, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Warszawa, 2005.
3. Migdal M.: *Zarządzanie szynami z wadą typu squat*, Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP Oddział w Krakowie, 2018, Nr 1(115).
4. Bogdaniuk B., Massel A.: *Pomiary nierówności powierzchni tocznych szyn na liniach PKP*, Problemy Kolejnictwa, 1995, z. 120.
5. Mikłaszewicz I., Czarnecki M.: *A cause for cracking of head-check rails*, Materials Research Proceedings, 5 (2018) 11–16.
6. Parrish G.: *Carburizing: Microstructures and Properties*, ASM International, 1999.
7. George F. Vander Voort: *Understanding and measuring decarburization*, Advanced Material and Processes, February 2015.
8. PN EN 13674-1+A1:2017-07: Kolejnictwo – Tor – Szyna – Część 1: Szyny kolejowe Vignole’a o masie 46 kg/m i większej
9. Mikłaszewicz I.: *Impact of Decarburization on the Hardness of Rails Running Surface*, Materials Research Proceedings, 17 (2020), 146–151.
10. Mikłaszewicz I., Frelek-Kozak M.: *Badania jakościowe materiałów szyn kolejowych*, Problemy Kolejnictwa, 2021, z. 191.