

## Badania jakościowe materiałów szyn kolejowych

Ireneusz MIKŁASZEWICZ<sup>1</sup> Małgorzata FRELEK-KOZAK<sup>2</sup>

### Streszczenie

W artykule przedstawiono obligatoryjne badania jakościowe materiału szyn kolejowych, wykonywane dla przemysłu kolejowego i mające status badań kwalifikacyjnych, którym poddaje się szyny kolejowe. Obejmują one badania mechaniki pęknięcia (wyznaczenie krytycznego współczynnika intensywności naprężeń  $K_{IC}$ , wyznaczenie prędkości rozwoju pęknięcia zmęczeniowego  $da/dN$ ), określenie naprężeń w stopkach szyn oraz badania zmęczeniowe. W artykule zaprezentowano wyniki badań szyn normalnotorowych typu 60E1, odwalcowanych ze stali gatunku R260 przez wybranych producentów europejskich oraz przeprowadzono analizę wyników na podstawie wytycznych normy PN-EN 13674-1+A1:2017-07.

**Słowa kluczowe:** badania jakościowe szyn, współczynnik  $K_{IC}$ , propagacja  $da/dN$ , naprężenie

### 1. Wstęp

Szyny są jednym z kluczowych składników infrastruktury kolejowej, wpływającym na bezpieczeństwo transportu. Ich niezawodna praca i niska awaryjność są czynnikami decydującymi o możliwości eksploatacji całego systemu kolejowego na danym obszarze. Podczas jazdy, pojazd kolejowy o masie kilkudziesięciu ton wywiera nacisk na szyny w procesie współpracy koło – szyna. Współpraca ta ma charakter dynamiczny, powodując zmienność obciążeń tych elementów. Szyny kolejowe pracują zatem w środowisku bardzo dużych, zmiennych obciążeń o charakterze cyklicznym [5]. Skutkiem tych oddziaływań jest tworzenie się wad w materiale – głównie w postaci nieciągłości typu pęknięcia.

Pojawienie się pierwszego pęknięcia wydatnie zmniejsza przekrój poprzeczny szyny odpowiedzialny za przenoszenie obciążeń. Proces ten zasadniczo zmienia rozkład naprężeń w całym elemencie. Obecność nieciągłości w materiale, czyli zmniejszenie jego przekroju przy tym samym poziomie obciążeń, powoduje zwiększenie efektywnych naprężeń w materiale wywołujące jego szybszą degradację. Dodatkowo należy podkreślić, że zmiana rozkładu naprężeń wokół powstałej wady w pracującym elemencie powoduje dalsze jej pogłębianie. Eksploatacja takiego materiału wywołuje dalszy wzrost nieciągłości, skorelowany z postępującym zmniejszaniem przekroju właści-

wego elementu. W takich warunkach, szybkość przyrostu pęknięcia wraz z czasem eksploatacji ulega ciągłemu zwiększeniu, prowadząc do przekroczenia dopuszczalnych naprężeń i w konsekwencji niekontrolowanego, katastroficznego pęknięcia lub złamania szyny. W związku z tym, szyny przed dopuszczeniem do eksploatacji, poddaje się licznym badaniom, mającym na celu określenie jakości materiału. Badania te mają dwa główne cele:

- 1) zminimalizowanie ryzyka powstania pęknięcia,
- 2) określenie zachowania się materiału w układzie z wadą strukturalną.

Uwzględniając powyższe założenia, badania kwalifikacyjne szyn obejmują badania mechaniczne odporności materiału na kruche pęknięcie  $K_{IC}$  [4] i określenie prędkości rozwoju szczeliny zmęczeniowej  $da/dN$ . Obie te metody są badaniami próbek, w których rejestruje się zachowanie materiału z wadą sztuczną. Ponadto, wykonuje się określenie poziomu naprężeń w stopce szyny oraz rozkład siarki na przekroju gotowych szyn, za pomocą próby Baumanna – jako czynnika sprzyjającego powstawaniu pęknięć. Prowadzi się również badania zmęczeniowe próbek pobranych z główek szyn. Producenci szyn wyznaczają także statystyczne, prognostyczne równania wytrzymałości materiału na podstawie przyjętego okresu produkcji, w zależności od zawartości pierwiastków stopowych w wytopach wyprodukowanych szyn.

<sup>1</sup> Inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Materiałów i Elementów Konstrukcji; e-mail: imiklaszewicz@ikolej.pl.

<sup>2</sup> Mgr inż.; Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Laboratorium Badań Materiałowych; e-mail: Małgorzata.Frelek@ncbj.gov.pl.

## 2. Materiał i metodyka badawcza

Materiał do badań stanowiły szyny ze stali gatunku R260, profilu 60E1, wykonane w hutach przez czterech głównych producentów szyn w Europie, oznaczone literami A, B, C i D. Wybrane, reprezentatywne składy chemiczne wytopów oraz otrzymane właściwości wytrzymałościowe materiału szyn zamieszczono w tablicy 1. Badania wykonano na podstawie wymagań obowiązującej normy europejskiej PN-EN 13674-1+A1:2017-07 [7].

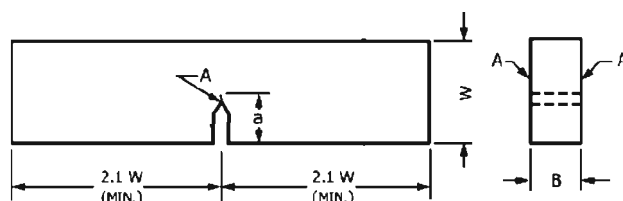
## 3. Badania jakościowe szyn

### 3.1. Badanie odporności materiału szyn na pękanie $K_{IC}$

Badania odporności materiału na kruche pękanie prowadzono zgodnie z wymaganiami norm ASTM E399-19 [1], PN EN ISO 12737:2011 [8] oraz PN-EN 13674-1+A1:2017-07 [7]. Te badania polegają na złamaniu próbki ze szczeliną zmęczeniową z jednoczesną rejestracją siły i otwarcia szczeliny. Test ma na celu wywołanie w próbce płaskiego stanu odkształcenia (PSO). Z tego względu, niezwykle istotne są zależności geometryczne testowanej próbki (tzn. stosunek grubości do wysokości oraz stosunek szczeliny zmęczeniowej do wysokości próbki) [5]. Badanie umożliwia określenie krytycznej wartości współczynnika  $K_C$  w układzie naprężeń typu I (stąd oznaczenie  $K_{IC}$ ), w którym wierzchołek pęknięcia jest obciążony siłami rozciągającymi (tzn. siły rozciągające działają w kierunku prostopadłym w stosunku do wierzchołka szczeliny) [4]. Ten parametr jest jednym z podstawowych danych jakościowych, stosowanym do pro-

gnozowania krytycznego, z punktu widzenia pęknięcia, stanu konstrukcji [1]. Wartość  $K_{IC}$  odpowiada współczynnikowi intensywności naprężeń, po przekroczeniu którego następuje wzrost szczeliny w elemencie o dowolnej grubości – stąd im większa wartość  $K_{IC}$ , tym większe obciążenia może przenosić element zawierający szczelinę [5].

Pomiary przeprowadzono na próbkach belkowych typu SE(B) o wymiarach: 45×25×230 mm (W×B×L), rysunek 1. W celu wytworzenia szczeliny zmęczeniowej, na próbkach wycięto metodą elektroiskrową (*Wire Electric Discharge Machining* – WEDM) karb mechaniczny typu Chevron. Tak przygotowaną próbkę poddano cyklicznym obciążeniom zginającym w układzie trójpunktowego zginania. Zastosowano sinusoidalny charakter zmian obciążeń o amplitudzie 20 Hz i stałej amplitudzie współczynnika intensywności naprężeń  $\Delta K$ . Propagację szczeliny zmęczeniowej prowadzono aż do uzyskania stosunku długości szczeliny „a” do wysokości próbki  $a/W \approx 0,50$ . Proces ten realizowano w temperaturze pokojowej. Na tak przygotowanych próbkach przeprowadzono pomiary odporności na kruche pękanie w ujemnej temperaturze  $T = -20^\circ\text{C}$  przez zginanie próbki aż do jej zniszczenia. Podczas próby rejestrowano siłę i otwarcie szczeliny. Analizę otrzymanych danych wykonano zgodnie z normą PN-EN 13674-1+A1:2017-07 [7].



Rys. 1. Próбка typu SE(B) do pomiarów mechaniki pęknięcia [1]

Tablica 1

Skład chemiczny i właściwości mechaniczne badanych szyn w gatunku R260 o profilu 60E1

Próbka (gatunek stali)	Skład chemiczny [%]												Właściwości badanych szyn		
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	V	O <sub>2</sub> [ppm]	H <sub>2</sub> [ppm]	Rm [Mpa]	A5 [%]	HBW
Szyna A	0,74	0,95	0,40	0,018	0,012	0,012	0,010	0,010	0,004	0,005	10	1,1	988	11,6	281
Szyna B	0,69	0,97	0,34	0,022	0,025	0,09	0,06	0,04	0,004	0,003	4	2,3	968	14,0	280
Szyna C	0,76	1,01	0,31	0,014	0,017	0,08	0,02	–	0,002	–	–	1,0	955	11,4	287
Szyna D	0,72	0,94	0,35	0,013	0,015	0,07	0,04	0,05	0,003	0,03	–	1,7	945	12,5	278
R260 według PN EN 13674-1	0,60–0,82	0,65–1,25	0,13–0,60	max 0,030	max 0,030	≤ 0,15	–	–	max 0,004	max 0,030	max 20	max 2,5	min 880	min 10,0	260–300

[Opracowanie własne].

### 3.2. Badanie prędkości wzrostu pęknięcia zmęczeniowego da/dN

Badania typu da/dN są testami określającymi prędkość rozwoju pęknięcia w środowisku cyklicznie zmiennych obciążeń. Opisane wcześniej pomiary  $K_{IC}$  mają na celu określenie maksymalnego obciążenia statycznego, które można przyłożyć do szyny kolejowej tak, aby istniejąca w niej szczelina o określonej długości nie powiększyła się. Zmiana charakteru obciążenia ze stałego na cyklicznie zmienny, diametralnie wpływa na możliwość bezpiecznej eksploatacji elementu. Decydującą rolę w tym przypadku nie pełni wielkość obciążenia, a jego zmienność. Udowodniono, że naprężenia nieprzekraczające nawet połowy dopuszczalnych statycznych obciążeń, ale o zmiennym charakterze, znacząco skracają czas eksploatacji elementów konstrukcyjnych [5].

Z tego powodu badania prędkości rozwoju szczeliny zmęczeniowej da/dN mają na celu symulowanie efektów niszczenia zmęczeniowego. Procesy niszczenia zmęczeniowego dzielą się na kilka mniejszych etapów, zależnych przede wszystkim od kształtu układu geometrycznego, występujących naprężeń, a także zmienności, parametrów mechanicznych i strukturalnych materiału konstrukcyjnego oraz układu geometrycznego szczeliny. Złożoność tych aspektów powoduje, że określenie ogólnych prawidłowości jest trudne. Z tego powodu wyznaczenie prędkości wzrostu szczeliny zmęczeniowej prowadzi się z uwzględnieniem, aktualnej w czasie badania, wartości amplitudy współczynnika naprężeń  $\Delta K$  [3–5]. Próbkę poddaje się cyklicznemu obciążeniu o stałej amplitudzie (rys. 2a). Podczas badania rejestruje się długość szczeliny i liczbę cykli (rys. 2b). Na podstawie uzyskanych danych wyznacza się prędkość rozwoju szczeliny zmęczeniowej dla określonej wartości współczynnika intensywności naprężeń  $K$  (rys. 2c).

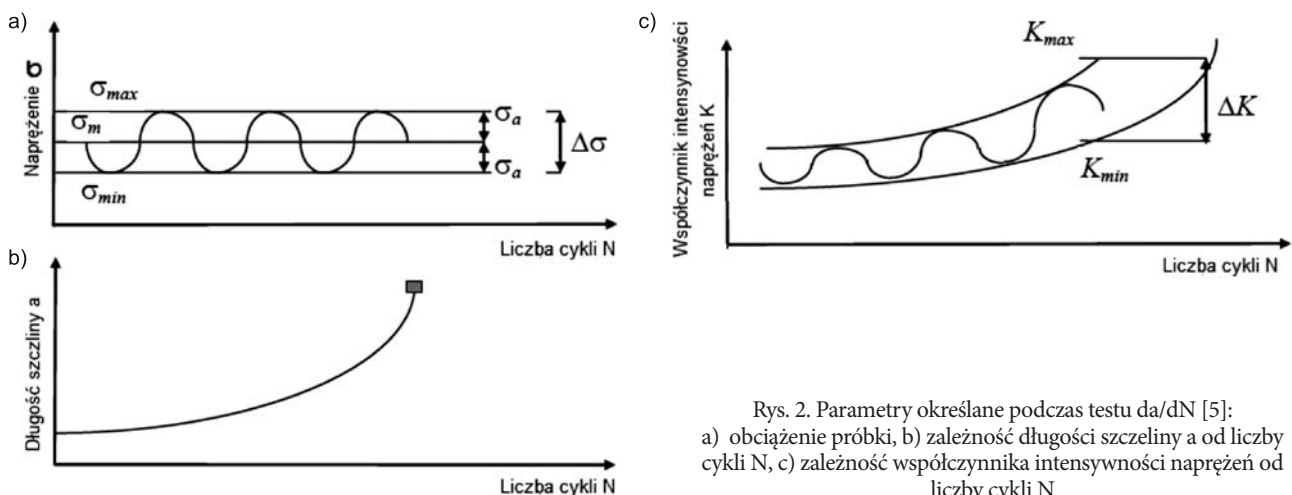
Pomiary da/dN przeprowadzono ze stałą amplitudą obciążeń o asymetrii cyklu obciążeń  $R = 0,5$  i częstotliwości 20 Hz. Badaniom poddano próbki typu SE(B) (rys. 1) o wymiarach  $45 \times 20 \times 230$  mm ( $W \times B \times L$ ), w których nacięto karby mechaniczne proste, stosując metodę WEDM. Prędkość rozwoju pęknięć zmęczeniowych wyznaczono dla dwóch zakresów współczynników intensywności naprężeń  $K = 10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$  oraz  $K = 13,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$ , zgodnie z wymaganiami normy [7]. Wartości da/dN dla każdego zakresu wyznaczono, stosując metodę wielomianową.

### 3.3. Badanie naprężenia w stopce szyny

Proces powstawania naprężeń w szynach podczas ich produkcji można podzielić na dwa okresy:

1. Po procesie walcowania i studzenia szyn. Obróbki te skutkują powstaniem naprężeń strukturalnych, związanych z odkształceniem plastycznym oraz przemianami fazowymi w materiale. Objawia się to na rusztach chłodni producenta szyn przede wszystkim brakiem prostości po studzeniu.
2. Po prostowaniu szyn na zimno w prostownicach w układzie XX i YY. Skutkiem tego procesu są naprężenia wewnętrzne, wywołane wielopłaszczyznowym zgniotem szyn, w wyniku których zmienia się przebieg i rodzaj naprężenia. Największe wartości naprężenia notuje się w stopkach szyn, z tego powodu, właśnie te strefy poddaje się kwalifikacyjnym pomiarom naprężenia [6].

Na sześciu próbkach o długości 1 m gotowych szyn od każdego producenta, wykonano pomiary naprężenia przez umieszczenie tensometrów o oporności  $120 \Omega$  na stopkach szyn (rys. 3 i 4), następnie wycięciu tarczy o grubości 20 mm. Podczas cięcia rejestrowano uwolnione naprężenia w szynach. Zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 13674-1+A1:2017(E) [7], naprężenia nie mogą przekraczać 250 MPa.



Rys. 2. Parametry określone podczas testu da/dN [5]:  
 a) obciążenie próbki, b) zależność długości szczeliny a od liczby cykli N, c) zależność współczynnika intensywności naprężeń od liczby cykli N



Rys. 3. Szyna z umieszczonymi tensometrami [fot. autorzy]



Rys. 4. Szyny z uwolnionymi naprężeniami [fot. autorzy]

Zgodnie z zaleceniami tej normy, podczas badania zastosowano metodę tensometryczną, która polega na wykonaniu pomiaru uwolnionych naprężeń własnych w czasie cięcia odcinków szyn z umieszczonymi tensometrami. Metoda ta umożliwia przeprowadzenie bardzo dokładnych pomiarów odkształceń, jak również obliczenia wartości naprężeń. Jednocześnie, wymagane jest bardzo precyzyjne umieszczenie tensometrów na powierzchni badanego elementu.

### 3.4. Badania zmęczeniowe

Z uwagi na wymaganą wysoką jakość materiału szyn, szczególnie odporności na pękanie w zmieniających warunkach obciążenia eksploatacyjnego, badanie zmęczeniowe materiału przeprowadzono na próbkach wyciętych z główek szyn, obrobionych mechanicznie na maszynach skrawających CNC, co zapewniło wysoką dokładność wymiarową wykonania. Przygotowane w taki sposób próbki poddano cyklowi

obciążenia zmęczeniowego z przejściem przez zero w liczbie 5 mln, przy częstotliwości 10 Hz (rys. 5). Oznacza to, że podczas badań próbki poddawano naprzemiennie działaniu sił ściskających i rozciągających przy stosowaniu dużej częstotliwości zmian. Badanie miało na celu określenie wytrzymałości struktury szyn powstałej podczas studzenia na zmienną wytrzymałość materiału w warunkach eksploatacyjnych w torach. Kryterium zakończonych badań zmęczeniowych według normy [7] jest brak pęknięć rozdzielczych próbek po obciążeniu 5 mln cykli.



Rys. 5. Badanie zmęczeniowe próbki szyn [fot. autorzy]

### 3.5. Badanie rozkładu siarki

Obecność zwiększonej ilości siarki, tj. powyżej 0,030%, wpływa niekorzystnie na właściwości stali. W czasie wytapiania stali, siarka obecna w materiale tworzy związki chemiczne z manganem w postaci MnS i jego odmian [3]. Związki te, określane wtrąceniami niemetalicznymi, negatywnie wpływają na wytrzymałość stali. W szynach zawartość siarki powinna być zgodna z wymaganiami normy [7], tj. max 0,030% lub odpowiednimi dokumentami odniesienia. Norma ta określa dopuszczalne zawartości siarki i jej rozmieszczenie na przekroju szyny w postaci wzorców odbitek Baumanna z przypisaną im kwalifikacją zależną od gęstości i rozmieszczenia siarki na przekroju poprzecznym szyny. Zgodnie z wymaganiami kwalifikacyjnymi, z wytypowanych partii pięciu wytopów z sześciu żył odlewniczych, z każdego wytopu po przewalcowaniu szyn, pobrano próby i wykonano odbitki Baumanna. Przykładową odbitkę Baumanna z rozkładem segregacji siarki w szynie pokazano na rysunku 6, ocenioną na wzorec D2. Kontrolę i klasyfikację materiału przeprowadzono przez porównanie wykonanej odbitki Baumanna badanej szyny z wzorcami porównawczymi zawartymi w normie [7] lub dokumentach odniesienia.



Rys. 6. Odbitka próby Baumana szyny oceniona na wzorec D2 [fot. autorzy]

### 3.6. Badania prognostyczne

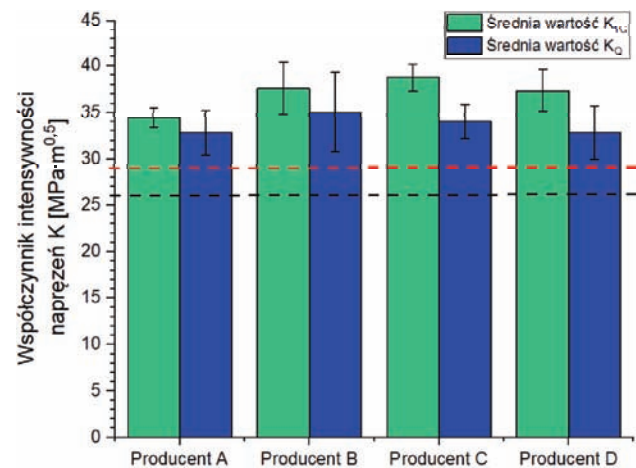
Wprowadzenie równań prognostycznych w produkcji szyn, prawdopodobnie miało na celu udzielenie pomocy producentom w prowadzeniu kontroli jakości produkcji oraz jej trendów w zbiorze wytopów przeznaczonych na szyny. Równania prognostyczne opisują zależności właściwości wytrzymałościowych na rozciąganie i wydłużenie od składu chemicznego dla poszczególnych gatunków stali szynowej. Do statystycznego obliczenia tych zależności, norma [7] zaleca wykonanie minimum 100 wytopów przez producenta szyn, a także przeprowadzenia badań wytrzymałościowych. Jednocześnie, standard ten dopuszcza limit dla równań wytrzymałościowych  $R_m = 12,5$  MPa i wydłużenia  $A_5 = 1,0\%$ . Równania prognostyczne były sporządzane indywidualnie przez poszczególnych producentów (nie publikowane) i odzwierciedlały wyniki jakościowe uzyskane na próbkach do badań kwalifikacyjnych.

## 4. Wyniki badań

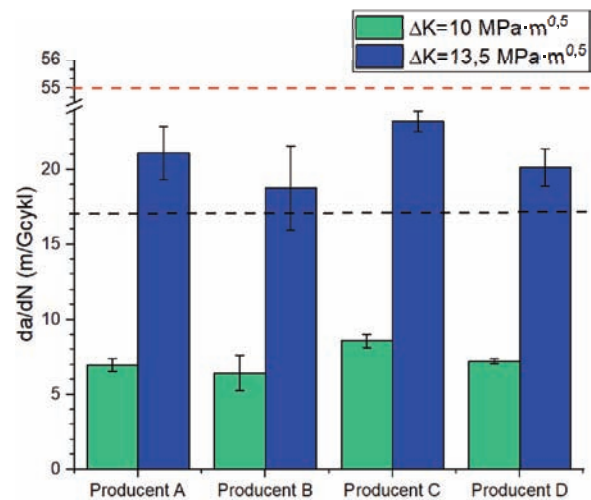
Wyniki pomiarów mechaniki pęknięcia zaprezentowano na rysunku 7, na którym zaznaczono również minimalne wymagania normy PN-EN 13674-1+A1:2017-07 dla stali z gatunku R260 [7], tj.  $26,0$  MPa·m<sup>0,5</sup> dla pojedynczej wartości współczynnika intensywności naprężeń (czarna linia) oraz  $29$  MPa·m<sup>0,5</sup> dla średniej wartości współczynnika intensywności naprężeń (czerwona linia). Dane oznaczone symbolem  $K_Q$  są wartościami, które nie spełniły wszystkich kryteriów uznania wyniku jako wartość  $K_{IC}$ . Analizując zaprezentowane dane można łatwo zauważyć, że wszystkie uzyskane wyniki spełniały minimalne wymagania normy [7]. Dodatkowo, materiały badawcze cechują się zbliżonymi parametrami mechanicznymi, niezależnie od producenta.

Na rysunku 8 przedstawiono wyniki rozwoju prędkości pęknięć zmęczeniowych dla dwóch zakresów pomiarowych:  $\Delta K = 10$  MPa·m<sup>0,5</sup> oraz  $\Delta K = 13,5$  MPa·m<sup>0,5</sup>. Na rysunku zaznaczono również maksymalne wartości

kwalifikacyjne dopuszczane przez normę [7], tj.  $17$  m/Gcykl dla  $\Delta K = 10$  MPa·m<sup>0,5</sup> (czarna linia) oraz  $55$  m/Gcykl dla  $\Delta K = 13,5$  MPa·m<sup>0,5</sup> (czerwona linia). Można łatwo zauważyć, że wszystkie wytopy (niezależnie od producenta), uzyskują wartości znacznie poniżej dopuszczanej przez normy wartości maksymalnej.



Rys. 7. Wyniki pomiarów  $K_Q$  oraz  $K_{IC}$  stali R260 dla wytopów poszczególnych producentów: czarną linią zaznaczono minimalną wartość pojedynczego pomiaru, natomiast czerwoną – minimalną średnią wartość  $K_{IC}$  dla serii pomiarowej zgodnie z normą PN-EN 13674-1+A1:2017-07 [opracowanie własne]



Rys. 8. Wyniki pomiarów prędkości rozwoju pęknięcia zmęczeniowego  $da/dN$  dla dwóch zakresów pomiarowych  $\Delta K$ , uzyskane dla próbek stali R260, wyprodukowanej przez różnych producentów: czarną linią zaznaczono maksymalną wartość prędkości rozwoju pęknięcia dla zakresu  $\Delta K = 10$  MPa·m<sup>0,5</sup>, zaś czerwoną dla zakresu  $\Delta K = 13,5$  MPa·m<sup>0,5</sup> [opracowanie własne]

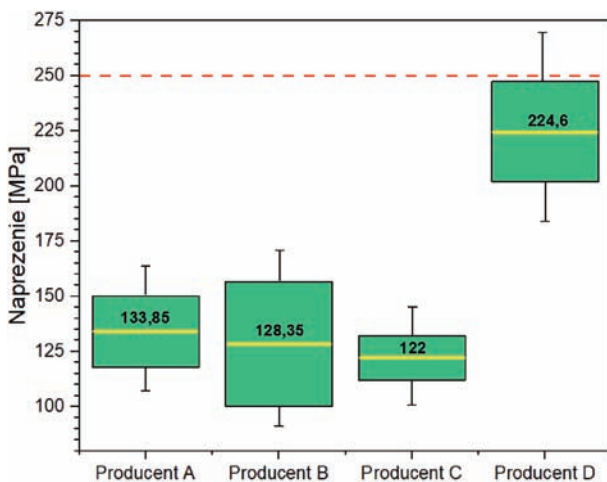
Na podstawie badań zmęczeniowych próbek szyn według wytycznych normy PN-EN 13674-1+A1:2017-07 p. 8.4 [7] uznano, że wszystkie badane próbki poddane cyklicznemu obciążeniu dynamicznemu wytrzymały 5 mln cykli i spełniły wymagania ww. normy, tzn. na próbkach nie stwierdzono pęknięć rozdzielczych. Wyniki przedstawiono w tabelicy 2.

Tablica 2  
Wyniki badań zmęczeniowych próbek szyn kolejowych

Kod producenta szyn	Amplituda	Zakres siły [kN]	Liczba cykli [mln]
A	0,00135	$\pm 10,5 - \pm 10,7$	5,0 – wynik pozytywny
B		$\pm 10,1 - \pm 10,5$	5,0 – wynik pozytywny
C		$\pm 8,24 - \pm 10,08$	5,0 – wynik pozytywny
D		$\pm 8,91 - \pm 9,92$	5,0 – wynik pozytywny
PN-EN 13674-1	0,00135	–	5,0 mln (bez pęknięć rozdzielczych)

[Opracowanie własne].

Wyniki pomiarów naprężeń wewnętrznych w stopkach szyn zaprezentowano na rysunku 9. Z ich analizy wynika, że niezależnie od producenta, naprężenia wewnętrzne nie przekraczały wartości dopuszczalnych przez normę. Szyny produkcji A, B oraz C charakteryzowały się naprężeniami znacznie poniżej przewidzianego limitu, podczas gdy pomiary uzyskane na próbkach producenta D mieściły się w górnym dopuszczalnym zakresie, znacznie powyżej wartości uzyskanych przez konkurencyjne firmy. Różnice te jednak nie wpływają na kwalifikację szyn – wszystkie wytopy charakteryzowały się naprężeniami spełniającymi kryterium normy PN-EN 13674-1+A1:2017-07 [7].



Rys. 9. Wyniki pomiarów naprężeń w stopkach szyn: zielony obszar reprezentuje rozrzut zarejestrowanych wyników pomiaru, żółtą linią zaznaczono wartość średnią, natomiast czerwoną linią maksymalną wartość naprężeń dopuszczalną przez normę [opracowanie własne]

Zgodnie z wymaganiami kwalifikacyjnymi z wytopianych partii pięciu wytopów z sześciu żył odlewniczych, z każdego wytopu po przewalcowaniu szyn pobrano próby poprzeczne i wykonano odblitek Bau-

mana. Przykładową odblitek Baumanna z rozkładem segregacji siarki w szynie pokazano na rysunku 6.

Rozkład segregacji siarki, stwierdzony w próbie Baumanna, w wytopach szyn wszystkich producentów, dał wynik pozytywny, zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 13674-1+A1:2017-07 [7]. W zdecydowanej większości, segregację siarki w szynach z odlewanych żył kwalifikowano na wzorce od D2 do D4 z niewielką liczbą wzorców D5 i D9.

## 5. Wnioski

Przedstawione wyniki badań kwalifikacyjnych szyn czterech głównych producentów w Europie, w zakresie badania odporności materiału na pęknięcie  $K_{IC}$ , prędkości wzrostu pęknięcia zmęczeniowego  $da/dN$ , wielkości naprężeń w stopkach szyn oraz badań zmęczeniowych spełniły wymagania zawarte w normie PN-EN 13674-1+A1:2017-07 [7]. Zawartości i segregację siarki w gotowych szynach również zakwalifikowano jako spełniające wymagania tej normy. Ponadto, niezależnie od producenta, wszystkie materiały charakteryzowały się zbliżonymi parametrami mechanicznymi – nie zarejestrowano znaczących różnic pomiędzy stałami dostarczonymi przez poszczególnych producentów. Statystyczne równania prognostyczne wyliczone przez producentów na zbiorze powyżej 100 wytopów potwierdziły właściwości mechaniczne zgodne z wymaganiami normy [7], mieszczące się w dopuszczalnym przedziale wytrzymałości  $R_m$  i wydłużenia  $A_5$ .

## Literatura

- ASTM, E399: Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness  $K_{IC}$  of Metallic Materials, Annu. B. ASTM Stand, 2012.
- Blicharski M.: *Inżynieria Materiałowa. Stale*, Wydawnictwo WNT, Warszawa, 2010.
- Donahue R.J. et al.: *Crack Opening Displacement and The Rate of Fatigue Crack Growth*, Defense Technical Information Center, 1972.
- Elber W.: *Fatigue crack closure under cyclic tension*, Eng. Fract. Mech. 2 (1970) 37.
- German J.: *Podstawy mechaniki pęknięcia*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2001.
- Mikłaszewicz I., Siwiec J.: *Badanie naprężeń wewnętrznych w złączach zgrzewanych szyn kolejowych*, Problemy Kolejnictwa, 2019, z. 185.
- PN-EN 13674-1+A1:2017-07: Kolejnictwo – Tor – Szyna – Część 1: Szyny kolejowe Vignole'a o masie 46 kg/m i większej.
- PN-EN ISO 12737:2011: Metale – Określanie odporności na pęknięcie w płaskim stanie odkształcenia, 2011.