

## Badanie naprężeń wewnętrznych w złączach zgrzewanych szyn kolejowych

Ireneusz MIKŁASZEWICZ<sup>1</sup>, Jakub SIWIEC<sup>2</sup>

### Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań naprężeń wewnętrznych w szynach kolejowych i w zgrzewanych połączeniach szyn. Badano przebieg naprężeń w złączach szynowych po zgrzewaniu oraz po badaniach zmęczeniowych. W badaniach naprężeń zastosowano tensometryczną metodę niszczącą. Porównano kształtowanie się naprężeń w szynach oraz złączach szynowych wykonanych ze stali gatunku R260 oraz gatunku R350HT. Metodę pomiaru naprężeń oparto na wymaganiach zawartych w normie PN EN 13674-1:2011+A1:2017.

**Słowa kluczowe:** naprężenie, złącze szynowe, tensometr, badania zmęczeniowe

### 1. Wstęp

Naprężenia wewnętrzne istniejące w szynach oraz połączeniach szyn kolejowych odgrywają znaczącą rolę w eksploatacji szyn w torach. Zastosowanie szyn z naprężeniami powyżej 250 MPa [7] powoduje potencjalne niebezpieczeństwo wystąpienia pęknięć naprężeniowych rozdzielczych, a także jest czynnikiem zwiększającym szybkość propagacji powstałych zmęczeniowych nadpęknięć krawędziowych [1, 2, 8] oraz pęknięć wewnętrznych (*head check*) szyn. Podobny skutek w torach mogą wywołać naprężenia wewnętrzne powstające w złączach szynowych.

Proces powstawania naprężeń w szynach podczas produkcji oraz złączach szynowych, tj. w miejscach łączenia szyn można podzielić na kilka okresów:

1. Po procesie walcowania i studzenia szyn powstają naprężenia strukturalne własne związane z odkształceniem plastycznym oraz przemianami fazowymi w materiale. Objawia się to głównie brakiem prostości po studzeniu na rusztach chłodni u producenta szyn (rys. 1);
2. Po prostowaniu szyn na zimno w prostownicach w układzie XX i YY, powstają naprężenia powodowane procesem prostowania, tj. wielopłaszczyznowym zgniotem szyn (rys. 2), w wyniku których zmienia się przebieg i rodzaj naprężeń. Przebieg naprężeń na przekroju poprzecznym w główce szyny nieeksploatowanej jest widoczny na rysunku 3;

3. Przy wykonywaniu złączy szynowych za pomocą zgrzewania, następuje całkowita likwidacja naprężeń na końcach zgrzewanych szyn, co jest spowodowane wzrostem temperatury do około 1350°C. Jednocześnie, podczas chłodzenia złącza powstają naprężenia strukturalne oraz naprężenia spowodowane prostowaniem miejsc zgrzanych na prasie przed wymaganym szlifowaniem połączenia, celem zachowania prostoliniowości miejsc zgrzanych.



Rys. 1. Chłodzenie szyn po walcowaniu na rusztach chłodni  
[fot. autorów]

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

<sup>2</sup> Mgr inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Materiałów i Elementów Konstrukcji; e-mail: jsiwiec@ikolej.pl.



Rys. 2. Prostowanie szyn w prostownicy dziewięciorolkowej [fot. autorów]

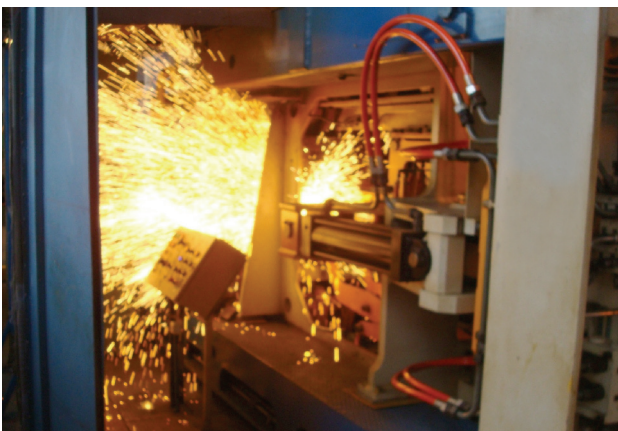


Rys. 3. Przekrój poprzeczny główki szyny po cięciu na pile [fot. autorów]

## 2. Metoda badawcza

### 2.1. Cel badań

Podstawowym celem badań było określenie naprężeń w połączeniach szyn, tj. złączach szynowych stosowanych w torach bezстыkowych po zgrzewaniu w zgrzewarce stacjonarnej (rys. 4, 5) oraz po badaniach zmęczeniowych próbek. Uzyskane wyniki pomiarów naprężeń w złączach szynowych, w szczególności uzyskane na próbkach zmęczeniowych, umożliwiły ocenę wielkości naprężeń złączy zgrzewanych szyn.



Rys. 4. Zgrzewarka podczas pracy – okres wyiskrzania [fot. autorów]



Rys. 5. Linia zgrzewania szyn na przekroju wzdłużnym [fot. autorów]

### 2.2. Wybrane sposoby pomiaru naprężeń

Dążenie do skracania czasów przejazdu pociągów, a tym samym wzrostu prędkości powoduje zwiększenie wymagań dotyczących prostoliniowości szyn, co jest związane z prostowaniem szyn przez producenta, a także uzyskaniem minimalnych naprężeń w szynach po prostowaniu. Spośród rozpowszechnionych kilku metod pomiaru naprężeń wzdłużnych szyn [4], największe zastosowanie znalazły dwie metody badania:

- Metoda tensometryczna niszcząca polegająca na wykonaniu pomiaru uwolnionych naprężeń własnych podczas cięcia wybranych odcinków szyn z umieszczonymi tensometrami. Jest to technika pozwalająca na bardzo dokładne pomiary odkształceń, jak również obliczenia wartości naprężeń. Metoda ta wymaga bardzo precyzyjnego i dokładnego umieszczenia tensometrów na powierzchni badanego elementu.
- Metoda nieniszcząca ultradźwiękowa, wykorzystująca zjawisko elastoakustyczne, tj. pomiar czasu przejścia fal ultradźwiękowych w szynie. W zależności od wielkości naprężeń w strukturze materiału w badanym odcinku szyny, wyświetlona jest wielkość naprężeń w szynach. Urządzeniem używanym do badania naprężeń tą metodą jest aparat Debro-30.

W pracy [8] przedstawiono wyniki badań naprężeń w szynach metodą ultradźwiękową przed prostowaniem i po prostowaniu prostownicą rolkową. Największe naprężenie własne ściskające rzędu 150 MPa stwierdzono w szyjce szyny, natomiast rozciągające w główce i stopce szyny około (240–300) MPa. Po procesie walcowania i studzenia szyn, naprężenia własne oscylowały w granicach (–50 do +35) MPa, czyli proces prostowania szyn na zimno wpływa w istotny sposób na poziom naprężeń wewnętrznych w szynach nowych.

Według najnowszych badań dotyczących naprężeń w szynach, opracowane obecnie metody prostowania szyn przez producentów umożliwiają uzyskanie naprężeń rozciągających w stopce szyny na poziomie (100–200) MPa [6]. Podczas eksploatacji szyn kolej-

wych wpływ wywiera również neutralna temperatura, której zmiany wartości, na określonej długości toru w czasie jednej doby i przy różnych temperaturach szyny, powodują znaczne zróżnicowanie rozkładu naprężeń wzdłużnych toru [3].

W badaniach naprężeń zastosowano metodę niszczącą tensometryczną zalecaną w normie PN EN 13674-1:2011+A1:2017. Norma ta określa wielkość dopuszczalnych naprężeń w stopce szyny wynoszącą (max 250) MPa. Metoda polega na umieszczeniu na powierzchni szyny tensometrów oporowych o długości 3,0 mm oraz oporności 120  $\Omega$ , następnie wycięciu poprzecznie tarczy o grubości  $20,0 \pm 1,0$  mm z umieszczonymi tensometrami. Wynikiem jest różnica wskazań tensometrów przed i po przecięciu tarczy, tj. wielkości uwolnionych naprężeń wewnętrznych pomnożonych przez stałą Younga, wynoszącą dla stali szynowej  $2,07 \cdot 10^6$ .

### 2.3. Materiał do badań

Materiałem do badań były próbki szyn dostarczone przez producenta ze stali gatunków R260

i R350HT oraz złącza szynowe zgrzewane z tych gatunków. Wszystkie próbki miały długość 1600 mm z położeniem symetrycznym miejsca zgrzewania. Próbki z gatunku R260 oznaczono jako A1, A2 i A3; natomiast próbki z gatunku R350HT oznaczono jako B1, B2 i B3. Próbki A1 i B1 stanowią szyny odpowiednio z gatunku R260 i R350HT. Próbki A2 i A3 oraz B2 i B3 stanowiły złącza zgrzewane odpowiednio po zgrzewaniu i badaniach zmęczeniowych. Liczba cykli zmęczeniowych próbek z gatunków R260 i R350HT, zgodnie z PN EN 13674-1:2011+A1:2017, wynosiła 5,0 mln przy naprężeniu w stopce szyny 190 MPa, stosowana siła obciążenia zaś wynosiła 215 kN. Siła ta jest zależna od rozstawu podpór na stanowisku badań zmęczeniowych, jak również od wytrzymałości materiału szyny.

Analizę składu chemicznego oraz właściwości mechaniczne badanych szyn przedstawiono w tablicy 1, natomiast na rysunku 6 pokazano schemat rozmieszczenia tensometrów na badanych próbkach. W złączach szynowych tensometry umieszczono w miejscu zgrzewania szyn (rys. 7).

Tablica 1

Skład chemiczny i właściwości mechaniczne badanych szyn

| Próbka<br>(gatunek stali) | Skład chemiczny w [%] |           |           |        |        |             |         |         |
|---------------------------|-----------------------|-----------|-----------|--------|--------|-------------|---------|---------|
|                           | C                     | Mn        | Si        | P, max | S, max | Cr          | Ni, max | Cu, max |
| Szyna A (gat. R260)       | 0,71                  | 1,11      | 0,31      | 0,014  | 0,012  | 0,02        | 0,004   | 0,01    |
| Szyna B (gat. R350HT)     | 0,78                  | 1,11      | 0,40      | 0,020  | 0,010  | 0,03        | 0,02    | 0,010   |
| R260 wg PN EN 13674-1     | 0,60–0,82             | 0,65–1,25 | 0,13–0,60 | 0,030  | 0,030  | $\leq 0,15$ | –       | –       |
| R350HT wg PN EN 13674-1   | 0,70–0,82             | 0,65–1,25 | 0,13–0,60 | 0,025  | 0,030  | $\leq 0,15$ | –       | –       |

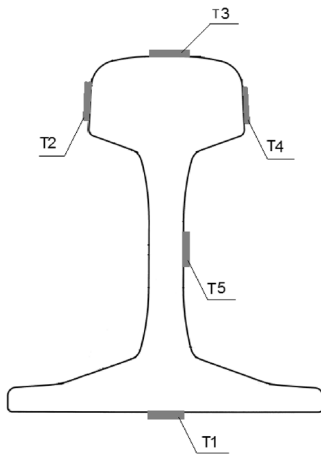
Opracowano na podstawie [7].

Tablica 1 cd.

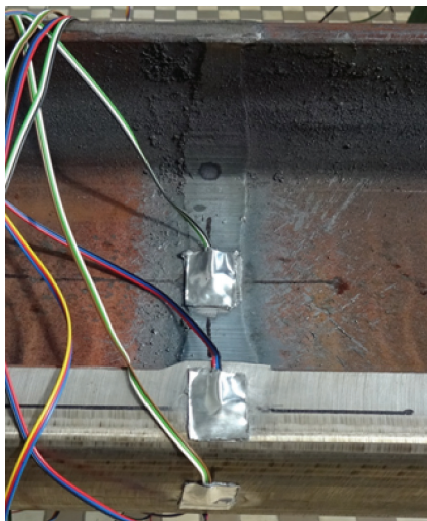
Skład chemiczny i właściwości mechaniczne badanych szyn

| Próbka<br>(gatunek stali) | Skład chemiczny      |             |            |                      | Właściwości badanych szyn |         |         |
|---------------------------|----------------------|-------------|------------|----------------------|---------------------------|---------|---------|
|                           | O <sub>2</sub> [ppm] | Al, max [%] | V, max [%] | H <sub>2</sub> [ppm] | Rm [MPa]                  | A5 [%]  | HBW     |
| Szyna A (gat. R260)       | 16                   | 0,002       | 0,003      | 1,2                  | 953                       | 14,2    | 274     |
| Szyna B (gat. R350HT)     | 9                    | <0,005      | 0,003      | < 0,5                | 1201                      | 10,6    | 359     |
| R260 wg PN EN 13674-1     | 20                   | 0,004       | 0,030      | 2,5                  | min 880                   | min 10  | 260–300 |
| R350HT wg PN EN 13674-1   | 20                   | 0,004       | 0,030      | 2,5                  | min 1175                  | min 9,0 | 350–390 |

Opracowano na podstawie [7].



Rys. 6. Profil szyny 60E1 z umieszczonymi tensometrami [rys. autorów]



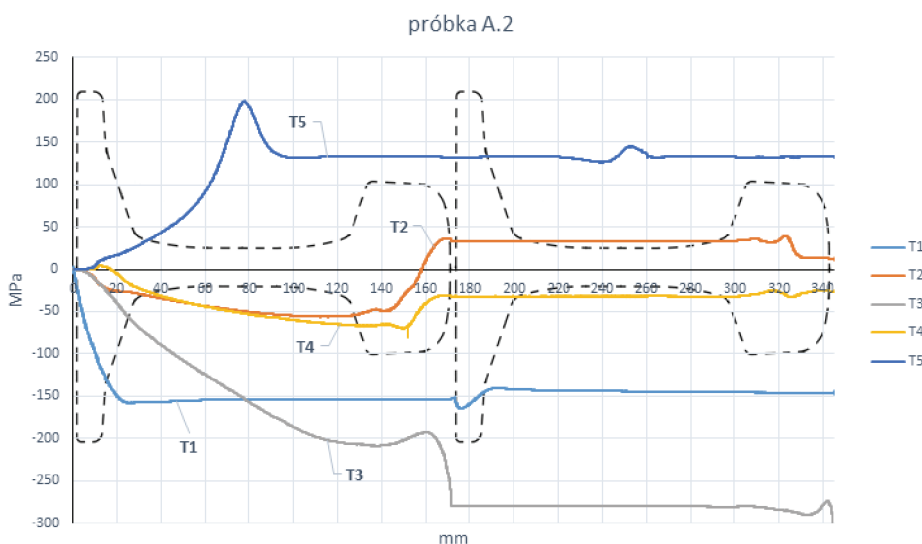
Rys. 7. Złącze szynowe z umieszczonymi tensometrami [fot. autorów]

### 3. Wyniki badań

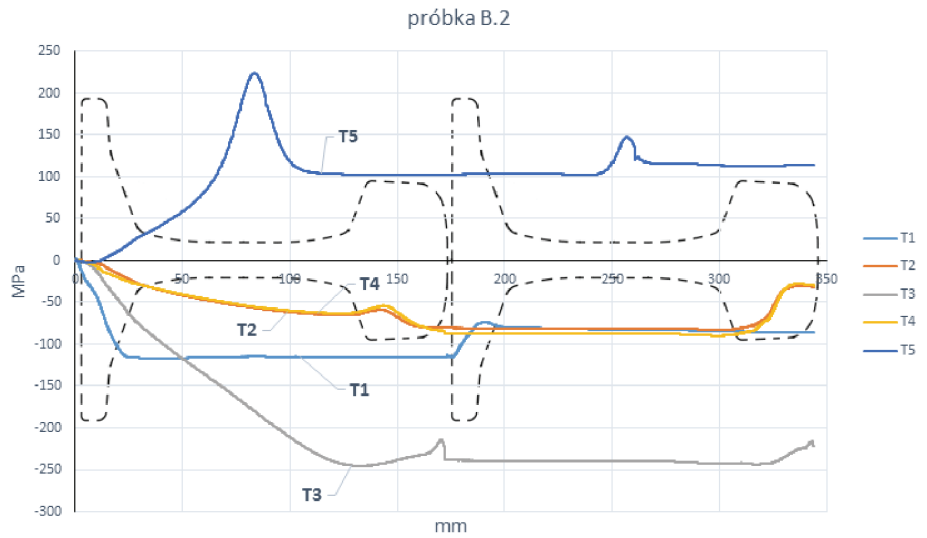
Na próbkach szyn oznaczonych A1 i B1 oraz złączach szynowych A2, A3, B2 i B3, trwale umieszczono tensometry oporowe na stopce, szyjce i główce szyny, na próbkach złączy szynowych zaś tensometry umieszczono w linii zgrzewania szyn (rys. 7). Następnie zmontowano układ pomiarowy półmostkowy z ciągłą rejestracją naprężeń w poszczególnych częściach szyn i złączy szynowych. Podczas cięcia tarczy o grubości 20,0 mm piłą taśmową rejestrowano wskazania uwalnianych naprężeń w materiale. Na (rys. 8, 9, 12 i 13) przedstawiono wykresy przebiegu naprężeń w poszczególnych obszarach złączy szynowych w trakcie pierwszego i drugiego cięcia tarcz piłą taśmową. Na rysunkach 10, 11, 14 przedstawiono skumulowane krzywe maksymalnych naprężeń zarejestrowanych przez tensometry podczas cięcia próbek szyn i złączy szynowych z gatunków R260 i R350HT.

Z przebiegu krzywych (rys. 10) wynika, że największe naprężenia ściskające dochodzące do 300 MPa zanotowano w główce złączy zgrzewanych z gatunku R260, natomiast w szyjce złącza naprężenia rozciągające do 200 MPa. W złączu poddanemu badaniom zmęczeniowym (rys. 14) największe naprężenie rozciągające zanotowano w główce, natomiast ściskające w szyjce złącza. Naprężenia te dochodzą do 300 MPa.

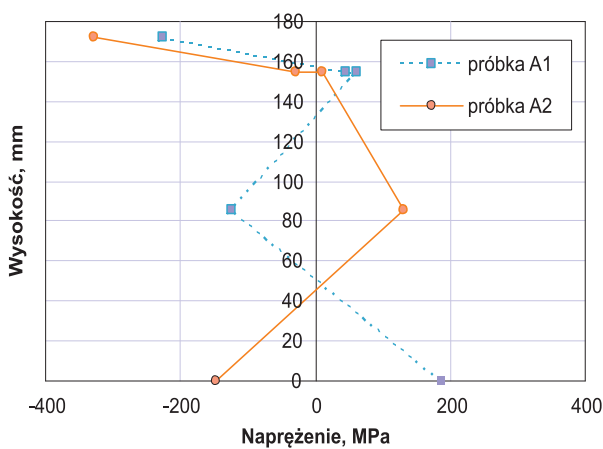
W złączu szynowym zgrzewanym z gatunku R350HT (rys. 11), naprężenia ściskające występują w stopce i główce złącza, a rozciągające w szyjce połączenia. Naprężenia te przekraczają lub są na granicy dopuszczalnych naprężeń przewidzianych dla nowych szyn, tj. 250 MPa. Natomiast w złączu szynowym po badaniach zmęczeniowych (rys. 13), przebieg naprężeń zarejestrowanych przez tensometry w główce, szyjce



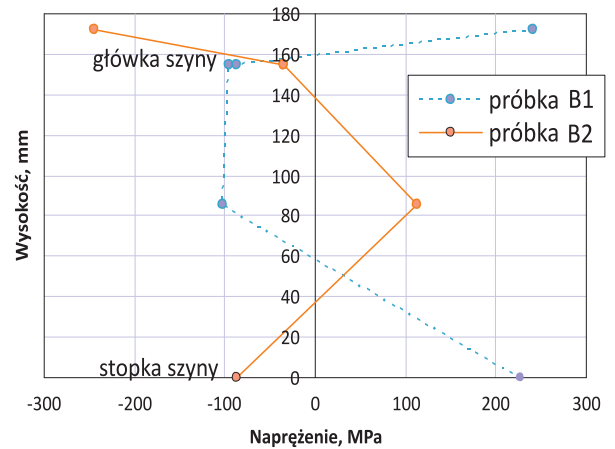
Rys. 8. Przebieg naprężeń w złączu szynowym z gatunku R260 [rys. autorów]



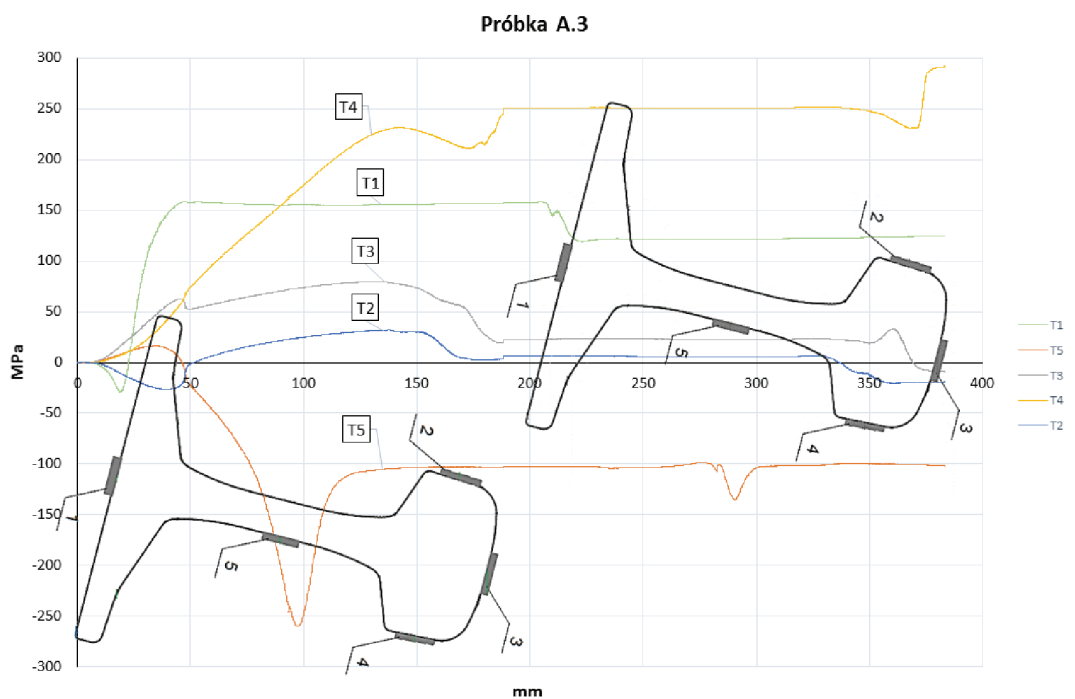
Rys. 9. Przebieg naprężeń w złączu szynowym z gatunku R350HT [rys. autorów]



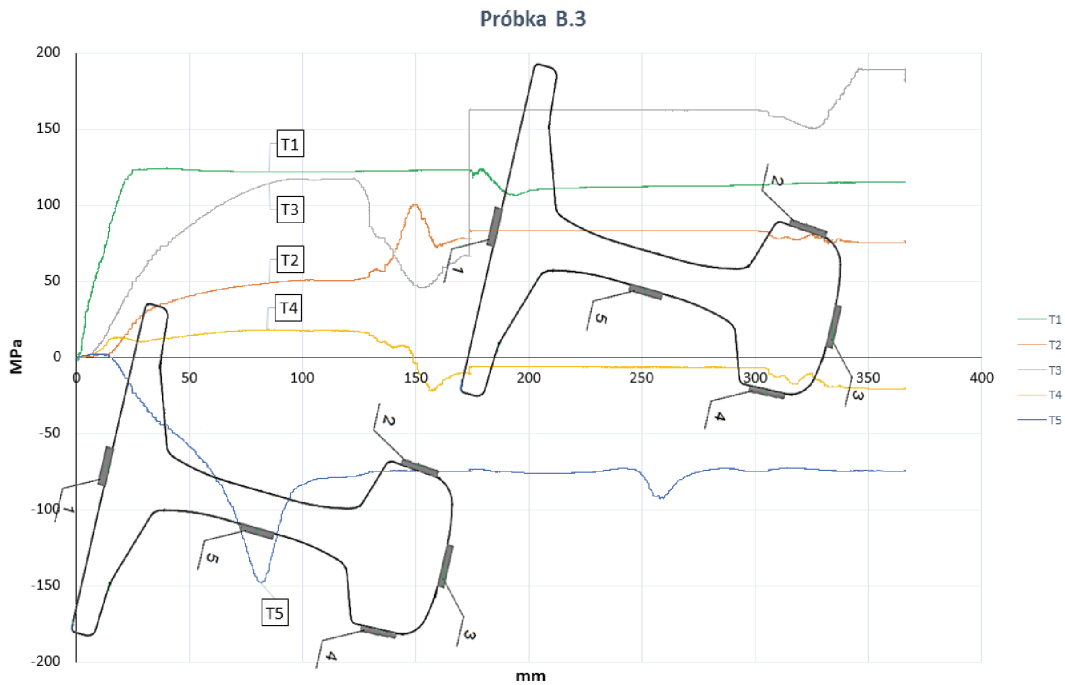
Rys. 10. Przebieg naprężeń w szynie i złączu szynowym z gatunku R260 [rys. autorów]



Rys. 11. Przebieg naprężeń w szynie i złączu szynowym z gatunku R350HT [rys. autorów]

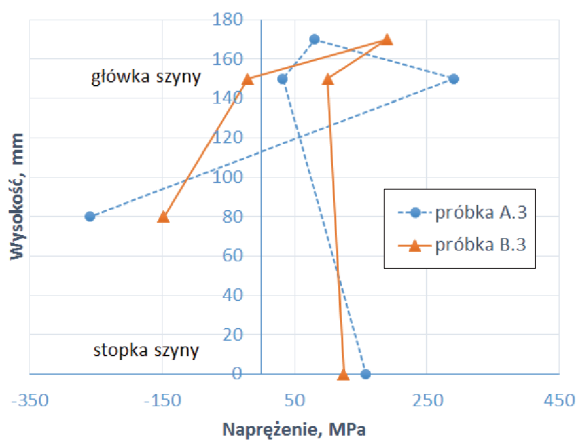


Rys. 12. Przebieg naprężeń w złączu szynowym z gatunku R260 po badaniach zmęczeniowych [rys. autorów]



Rys. 13. Przebieg naprężeń złącza szynowego z gatunku R350HT po badaniach zmęczeniowych [rys. autorów]

i stopce złącza nie przekracza 200 MPa, czyli poziom naprężeń wewnętrznych w stopce złącza szynowych po badaniach zmęczeniowych jest zgodny z wymaganiami PN EN 13674-1:2011+A1:2017.



Rys. 14. Przebieg naprężeń w złączach szynowych z gatunków R260 i R350HT po badaniach zmęczeniowych [rys. autorów]

Na rysunku 15 przedstawiono mikrostrukturę główki złącza z gatunku R260 w linii zgrzewania po badaniach zmęczeniowych. Jest to struktura perlityczna z wydzieleniami ferrytu po granicach ziaren, natomiast na rysunku 16 przedstawiono mikrostrukturę główki złącza z gatunku R350HT również po badaniach zmęczeniowych. Z uwagi na dużą zawartość węgla (0,78%) w pobliżu górnej granicy wymagań normy, jest to struktura bardzo drobnego perlitu z wydzieleniami cementytu po granicach ziaren.



Rys. 15. Linia zgrzewania złącza szynowego z gatunku R260 po badaniach zmęczeniowych [fot. autorów]



Rys. 16. Linia zgrzewania złącza szynowego z gatunku R350HT po badaniach zmęczeniowych [fot. autorów]

#### 4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań tensometrycznych rozkładu naprężeń wewnętrznych w próbkach złączy szyn kolejowych z gatunku R260 i R350HT stwierdzono, że w połączeniach zgrzewanych szyn występują naprężenia ściskające w główce i stopce złączy, dochodzące lub przekraczające nieznacznie wartość 200 MPa, natomiast w szyjce zanotowano naprężenia rozciągające. W złączach szynowych poddanych badaniom zmęczeniowym, symulujących pracę złączy w torach, w obydwu gatunkach stwierdzono naprężenia rozciągające w stopce i główce złączy nie przekraczające 200 MPa, tj. nie przekraczające 250 MPa, natomiast w szyjce zarejestrowano naprężenia ściskające.

Niezwykle ważna jest zgodność wartości naprężeń rozciągających po badaniach zmęczeniowych w stopce złączy szynowych, z naprężeniami rozciągającymi w szynach, co jest zgodne z wymaganiami normy PN EN 13674-1:2011+A1:2017. Ze względu na aspekt zgodności naprężeń w stopce szyn i złączy szynowych, eliminowany jest czynnik w postaci kumulacji naprężeń przyczyniających się do niebezpieczeństwa pęknięcia szyn kolejowych w torach.

#### Literatura

1. Bałuch H., Bałuch M.: *Eksploatacyjne metody zwiększenia trwałości rozjazdów kolejowych*, Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa, Warszawa, 2009.
2. Bałuch H.: *Zagrożenia w nawierzchni kolejowej*, Instytut Kolejnictwa, Warszawa, 2017.
3. Czyżuła W., Massel A., Towpik K.: *Raport okresowy PKP i TU-Kraków na temat badań empirycznych długookresowego zachowania ścieżki CWR*, Utrecht, 1997.
4. Kukulski J.: *Metody badań naprężeń własnych w szynach, rozjazdach i kołach monoblokowych*, Problemy Kolejnictwa, Warszawa, 2006, z. 141.
5. Mikłaszewicz I., Bińkowski R.: *Przypadki pęknięcia szyn w świetle obliczeń MES*, Problemy Kolejnictwa, 2016, z. 172.
6. Mikłaszewicz I., Siwiec J.: *Badanie naprężeń wewnętrznych w połączeniach szyn kolejowych*, Problemy Kolejnictwa, 2017, z. 177.
7. PN EN 13674-1:2011+A1:2017: Kolejnictwo – Tor – Szyna – Część 1: Szyny kolejowe Vignole’a o masie 46 kg/m i większej.
8. Szelażek J.: *Postępy w ultradźwiękowych badaniach naprężeń*, Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa, 2001.