

# Badanie naprężeń wewnętrznych w połączeniach szyn kolejowych

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

## Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań naprężeń wewnętrznych w szynach i złączach zgrzewanych i spawanych termitowo. W badaniach naprężeń zastosowano metodę tensometryczną niszczącą, zgodną z wymaganiami normy PN EN 13674-1+A1:2017. Porównano wielkości naprężeń w szynach i złączach szynowych wykonanych ze stali gatunków R260 i R350HT.

**Słowa kluczowe:** naprężenie, złącza szynowe, tensometry

## 1. Wstęp

Impulsem do podjęcia tematyki naprężeń wewnętrznych szyn kolejowych była znikoma liczba publikacji technicznych na ten temat. Naprężenia wewnętrzne istniejące w szynach kolejowych oraz połączeniach szyn odgrywają znaczącą rolę eksploatacji szyn w torach kolejowych, a także w torach tramwajowych. Zastosowanie szyn mających naprężenia wewnętrzne powyżej 250 MPa [4] powoduje potencjalne niebezpieczeństwo wystąpienia pęknięć naprężeniowych rozdzielczych, a także jest czynnikiem zwiększającym szybkość propagacji zmęczeniowych nadpęknięć krawędziowych na powierzchni tocznej szyn oraz pęknięć (*head check*), rozwijających się w materiale szyn [1, 3]. Podobny skutek w torach mogą wywołać naprężenia wewnętrzne powstające w złączach szynowych.

Analizując chronologię powstawania naprężeń w szynach, należy uwzględnić proces produkcji i wykonywania miejsc łączenia szyn, tj. złączy szynowych. W procesie walcowania i studzenia szyn powstają naprężenia strukturalne wewnętrzne związane z zastosowaną technologią i przemianami fazowymi, natomiast po prostowaniu szyn na prostownicy powstają dodatkowe naprężenia spowodowane wielokierunkowym naciskiem na szyny [2, 6]. Zbyt duża wartość naprężeń stwarza niebezpieczeństwo wystąpienia pęknięć naprężeniowych podczas eksploatacji szyn w torach kolejowych. Ogólnie naprężenie w szynach pracujących w torze przedstawia wzór:

$$\sigma = \sigma_g + \sigma_T + \sigma_E,$$

gdzie:

$\sigma_g = M/Wx$  [N/mm<sup>2</sup>] – naprężenie spowodowane obciążeniem od pojazdu i ładunku,

$\sigma_T = \alpha \Delta t E$  [N/mm<sup>2</sup>] – naprężenia w szynach, zależne od zmiany temperatury,

$\sigma_E$  – [N/mm<sup>2</sup>] – naprężenia własne w szynach spowodowane procesem wytwarzania.

Przy wykonywaniu złączy szynowych metodą zgrzewania następuje likwidacja naprężeń na końcach zgrzewanych szyn, spowodowana wzrostem temperatury do około 1350–1400°C w procesie nagrzewania i wyiskrzania, jednocześnie powstają zwiększone naprężenia strukturalne związane z szybkim chłodzeniem złącza i zachodzącymi przemianami strukturalnymi. Wzrost poziomu naprężeń jest również spowodowany prostowaniem miejsca zgrzanych szyn na prasie przed wymaganym szlifowaniem, celem zachowania prostoliniowości powierzchni tocznej i bocznej oraz wymaganej jakości powierzchni połączeń zgrzewanych.

Spawanie złączy szynowych metodą termitową powoduje całkowitą likwidację naprężeń na końcach szyn, powstałych w procesie ich produkcji. Odlewanie do form ciekłego staliwa o temperaturze reakcji termitowej około 2500°C powoduje zanik naprężeń, jednak podczas skrzepnięcia staliwa zostają wprowadzone naprężenia związane ze skurczem metalu w spoinie o około 1,8% oraz dodatkowe naprężenia związane z przemianami fazowymi mikrostruktury szyn zachodzącymi podczas studzenia. W wyniku tych procesów należy spodziewać się powstania większych naprężeń w złączu termitowym niż w złączu zgrzewanym.

W pracy [5] przedstawiono wyniki badań metodą ultradźwiękową naprężeń w szynach przed prostowaniem i po prostowaniu prostownicą rolkową. Po procesie walcowania i studzenia szyn, naprężenia własne

<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.

oscylowały w granicach  $-50$  do  $+35$  MPa, natomiast po prostowaniu w prostownicy rolkowej największe naprężenie własne ściskające rzędu  $150$ – $190$  MPa stwierdzono w szyjce szyny, rozciągające zaś w główce i stopce szyny o wielkości około  $110$ – $180$  MPa. Odkształcenia plastyczne szyn w prostownicy spowodowane momentami gnącymi rolek prostujących wraz z naciskami kontaktowymi powodowały, że prostowanie szyn na zimno w istotny sposób zwiększało poziom naprężeń wewnętrznych w nowych szynach.

## 2. Sposoby pomiaru naprężeń wewnętrznych szyn

Do najczęściej stosowanych metod pomiaru naprężeń wewnętrznych w szynach należą:

- **Metoda niszcząca tensometryczna**, polegająca na pomiarze uwolnionych naprężeń własnych w wyniku cięcia elementu z naklejonym tensometrem. Jest to technika umożliwiająca bardzo dokładne pomiary odkształceń, jak również obliczanie wartości naprężeń. Metoda ta wymaga bardzo precyzyjnego i dokładnego umieszczenia tensometrów na powierzchni badanego elementu.
- **Metoda akustyczna ultradźwiękowa**, wykorzystująca efekt elastoakustyczny zależności prędkości propagacji fali ultradźwiękowej od naprężenia. Pomiar prędkości penetracji fali ultradźwiękowej w materiale lub czasu przejścia fali na określonej drodze odpowiada wartości naprężeń. Urządzeniem wykorzystującym tę metodę jest aparat DEBRO.
- **Metoda rentgenograficzna**, oparta na dyfrakcji promieni X płaszczyzn atomowych. Umożliwia pomiar odległości między płaszczyznami krystalograficznymi. Wadą tej metody jest czasochłonność pomiaru oraz konieczność zabezpieczenia otoczenia i obsługi aparatu rentgenowskiego przed promieniowaniem.
- **Metoda magnetosprężysta**, wykorzystująca efekt Barkhausena, tj. zależności właściwości magnetycznych od naprężenia. Jednakże z uwagi na wysoką czułość na stan mikrostruktury materiału, metoda dotychczas nie znalazła szerszego zastosowania praktycznego.
- **Metody stosowane do porównia z szynami bez naprężeń** polegające na wykonaniu nacięć w szyjce szyny, wbiciu klina rozpierającego i porównaniu powstałego pęknięcia z wzorcami szyn bez naprężeń lub przecięciu szyjki szyny i pomiarze szerokości rozwarcia szczeliny w wyniku uwolnienia naprężeń. W tym przypadku rozwarcie szczeliny jest proporcjonalne do długości nacięcia i stanu naprężenia przed przecięciem.
- **Metoda symulacji komputerowej MES**, polegająca na zbudowaniu siatki badanego modelu, za-

daniu stosowanych obciążeń rzeczywistych, obliczeniu naprężeń i graficznym przedstawieniu występujących naprężeń w badanym elemencie. Jest to najnowsza, obecnie chętnie stosowana metoda obliczania naprężeń wewnętrznych.

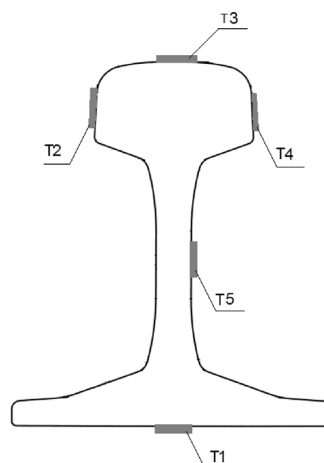
Wymienione metody pomiaru naprężeń wewnętrznych szyn można również zastosować do pomiaru naprężeń w złączach szynowych.

## 3. Metoda badawcza

W badaniach zastosowano zgodną z normą PN EN 13674-1+A1:2017 [4] metodę niszczącą tensometryczną. Metoda polega na naklejeniu w kilku miejscach badanej powierzchni tensometrów oporowych o długości  $3$  mm i oporności  $120 \Omega$ , a następnie wycięciu tarczy templetu o grubości  $20,0 \pm 1,0$  mm z naklejonymi tensometrami. Wynikiem jest różnica wskazań tensometrów przed i po wycięciu tarczy templetu, tj. wielkości uwolnionych naprężeń wewnętrznych pomnożonych  $2,07 \times 10^6$  (stała Younga materiału).

### 3.1. Materiał do badań

Materiałem do badań były próbki nowych szyn oraz złącza szynowe zgrzewane, ze stali gatunków R260 i R350HT oraz spawane termitowo metodą SoWoS-P ze stali gatunku R260. Próbki złącza miały długość  $1600$  mm i symetryczne położenie miejsca połączenia. Próbki z gatunku R260 oznaczono jako A1 i A2; próbki z gatunku R350HT oznaczono jako B1 i B2, natomiast próbkę spawaną z gatunku R260 oznaczono jako C. Schemat rozmieszczenia tensometrów na badanej próbce pokazano na rysunku 1, natomiast analizę składu chemicznego oraz właściwości mechaniczne badanych szyn przedstawiono w tablicy 1.



Rys. 1. Profil szyny 60E1 z naklejonymi tensometrami [opracowanie J. Siwiec]

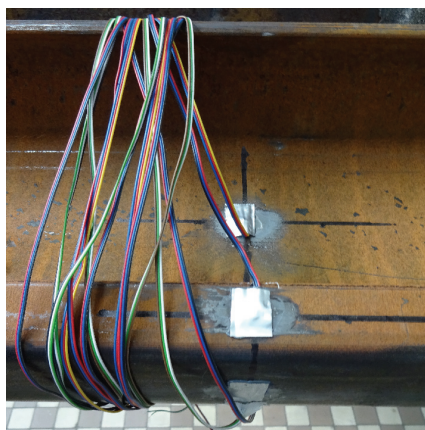
Tablica 1

## Skład chemiczny i właściwości mechaniczne badanych szyn

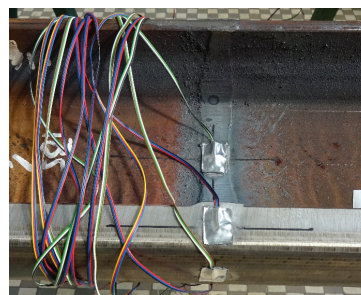
Próbka (gatunek stali)	Skład chemiczny											Właściwości badanych szyn			
	[%]										[ppm]		Rm, [MPa]	A5 [%]	HBW
	C	Mn	Si	P, max	S, max	Cr	Ni, max	Cu, max	Al, max	V, max	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>			
Szyna A (gat. R260)	0,71	1,11	0,31	0,014	0,012	0,02	0,004	0,01	0,002	0,003	16	1,2	953	14,2	274
Szyna B (gat. R350HT)	0,78	1,11	0,40	0,020	0,010	0,03	0,02	0,010	<0,005	0,003	9	<0,5	1201	10,6	359
Szyna C (gat. R260)	0,73	1,10	0,32	0,010	0,010	0,02	0,003	0,01	0,003	0,04	17	1,0	974	12,8	274
R260 wg PN EN 13674-1	0,60–02	0,65–1,25	0,13–0,60	0,030	0,030	≤0,15	–	–	0,004	0,030	20	2,5	min. 880	min. 10	260– 300
R350HT wg PN EN 13674-1	0,70–0,82	0,65–1,25	0,13–0,60	0,025	0,030	≤0,15	–	–	0,004	0,030	20	2,5	min. 1175	min. 9,0	350– 390

## 3.2. Sposób badań i ich wyniki

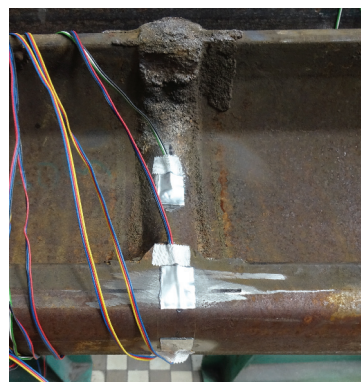
Na próbkach szyn oznaczonych A1 i B1 oraz na próbkach złączy szynowych oznaczonych A2, B2 i C, trwale umieszczono tensometry oporowe w odległościach symetrycznych do długości próbek, w miejscach pokazanych na rysunku 1. Szyny i złącza szynowe z naklejonymi tensometrami oporowymi na stopce, szyjce i głowce szyn przedstawiają rysunki 2–4. Następnie podłączono układ pomiarowy ćwierćmostkowy z ciągłą rejestracją naprężeń w poszczególnych częściach szyn i złączy szynowych. Podczas cięcia templetu o grubości 20 mm piłą taśmową rejestrowano wskazania uwalnianych naprężeń w materiale. Na rysunku 5 pokazano wycięte templety szyn i złączy szynowych, natomiast na rysunkach 6–10 przedstawiono wykresy przebiegu naprężeń w poszczególnych obszarach szyn i złączy szynowych w trakcie pierwszego i drugiego cięcia piłą taśmową. Rysunki 11 i 12 przedstawiają skumulowane krzywe maksymalnych naprężeń zarejestrowanych przez tensometry podczas cięcia próbek szyn i złączy szynowych z gatunku R260 i R350HT.



Rys. 2. Szyna z naklejonymi tensometrami oporowymi [fot. I. Mikłaszewicz]



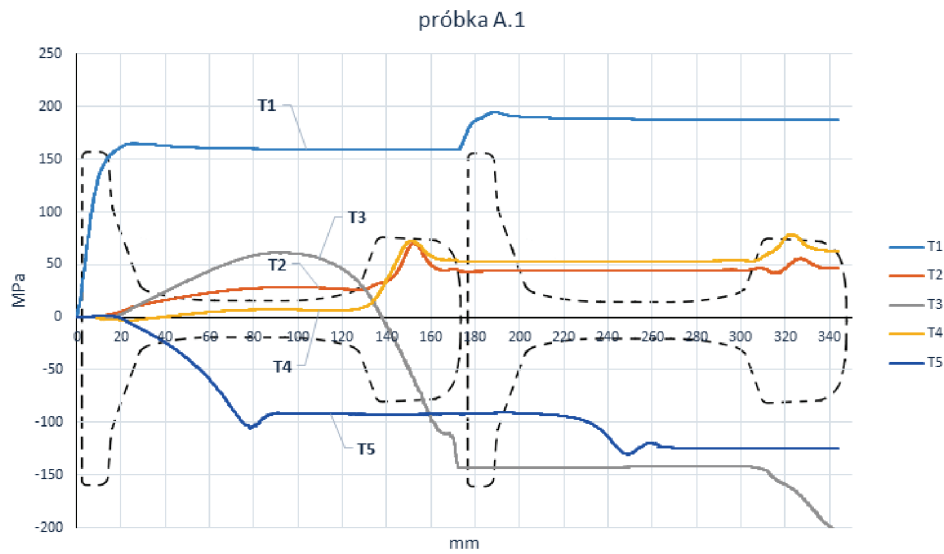
Rys. 3. Złącze szynowe zgrzewane z tensometrami [fot. I. Mikłaszewicz]



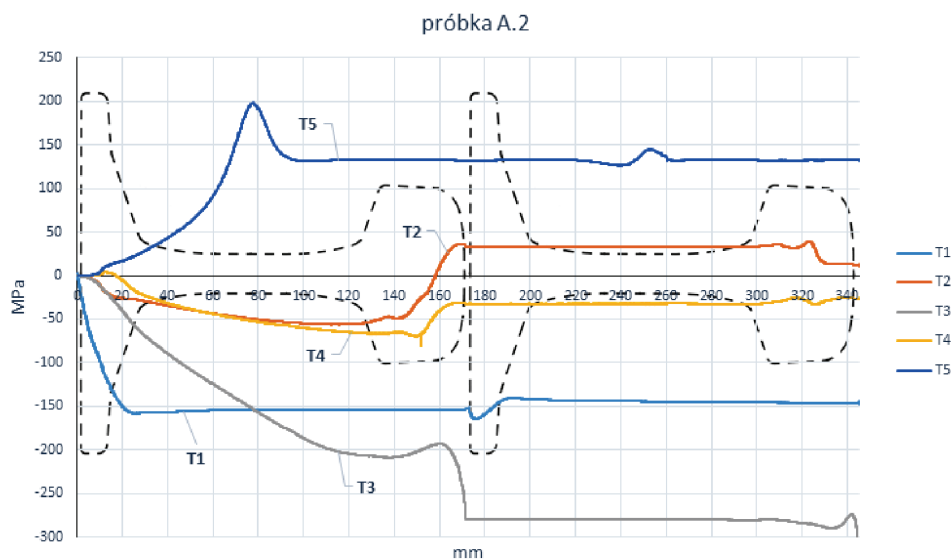
Rys. 4. Złącze szynowe spawane termitowo z tensometrami [fot. I. Mikłaszewicz]



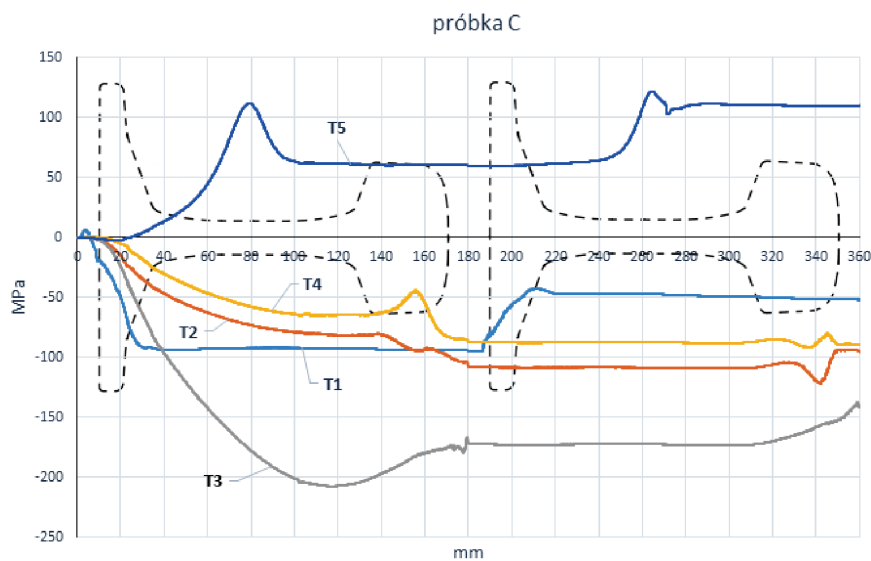
Rys. 5. Wycięte templety z szyn i złączy szynowych z tensometrami [fot. I. Mikłaszewicz]



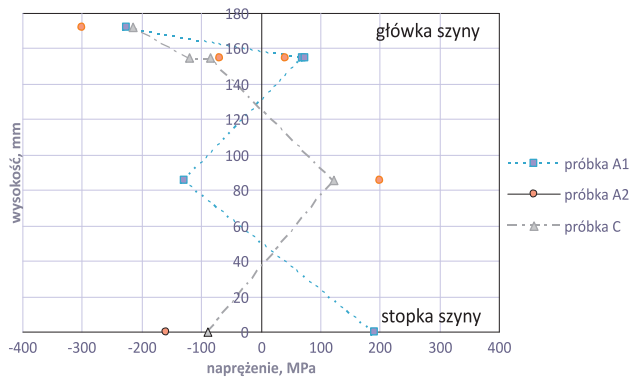
Rys. 6. Przebieg naprężeń podczas cięcia szyny ze stali gatunku R260 [opracowanie własne]



Rys. 7. Przebieg naprężeń podczas cięcia złącza zgrzewanego ze stali gatunku R260 [opracowanie własne]

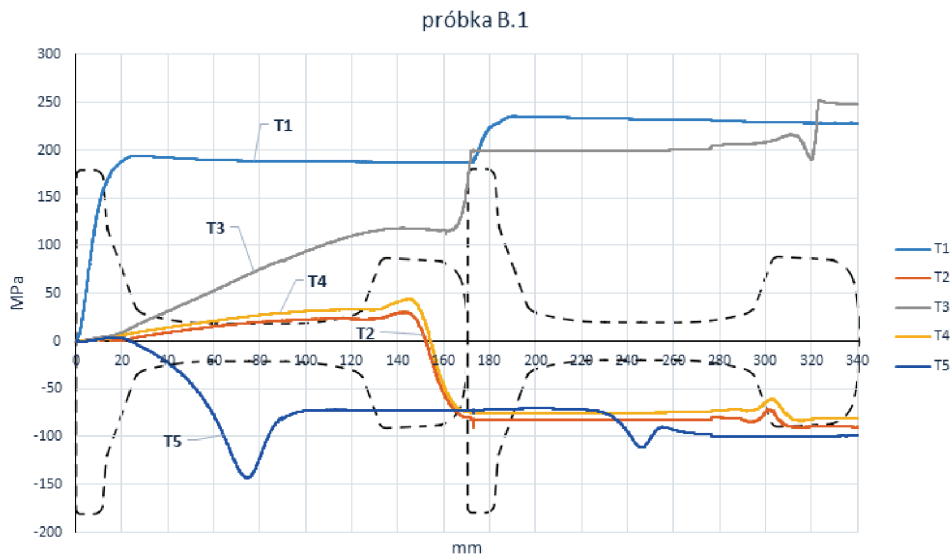


Rys. 8. Przebieg naprężeń podczas cięcia złącza spawanego ze stali gatunku R260 [opracowanie własne]

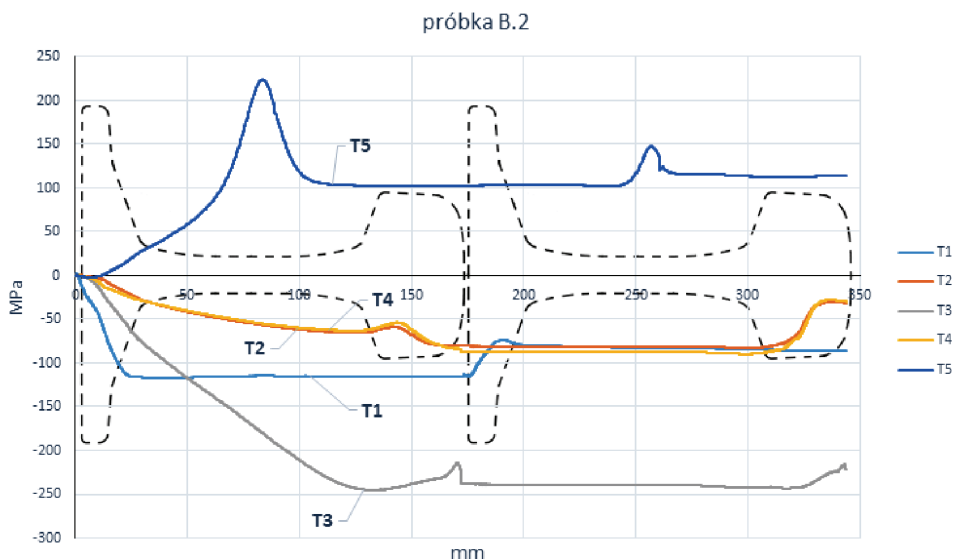


Rys. 9. Krzywe maksymalnych naprężeń w szynie, złączu zgrzewanym i spawanym ze stali gatunku R260 [opracowanie własne]

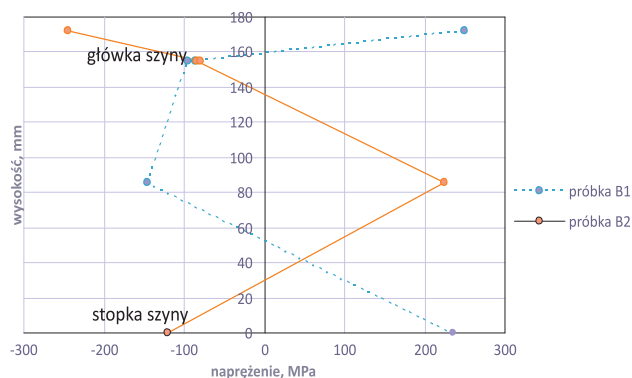
Z przebiegu krzywych (rys. 11) wynika, że największe naprężenia ściskające dochodzące do 300 MPa zanotowano w główce złącza zgrzewanych ze stali gatunku R260, natomiast w szyjce złącza naprężenia rozciągające dochodziły do 200 MPa. Z analizy rozkładu naprężeń w złączu zgrzewanym i spawanym wynika, że w główce i stopce występują naprężenia ściskające, natomiast naprężenia rozciągające występują w szyjce badanych złączy szynowych. W złączu szynowym zgrzewanym ze stali gatunku R350HT (rys. 12) naprężenia ściskające występują w stopce i główce złącza, a naprężenia rozciągające w szyjce złącza. Uwolnione naprężenia przekraczają lub są na granicy dopuszczalnych naprężeń przewidzianych dla nowych szyn, tj. 250 MPa.



Rys. 10. Przebieg naprężeń podczas cięcia szyny ze stali gatunku R350HT [opracowanie własne]



Rys. 11. Przebieg naprężeń podczas cięcia złącza zgrzewanego ze stali gatunku R350HT [opracowanie własne]



Rys. 12. Krzywe maksymalnych naprężeń w szynie i złączu zgrzewanym ze stali gatunku R350HT [opracowanie własne]

#### 4. Podsumowanie

Na podstawie tensometrycznych badań rozkładu naprężeń w próbkach złączy szyn kolejowych ze stali gatunków R260 i R350HT można stwierdzić, że zarówno w połączeniach zgrzewanych, jak i spawanych występują naprężenia ściskające w główce i stopce złączy, osiągające lub przekraczające wartość 200 MPa, co wpływa na jakość połączeń, w szczególności przy termitowym spawaniu złączy. Wszelkie odstępstwa od technologii spawania mogą skutkować wystąpieniem pęknięć tuż po zakończeniu spawania lub po pewnym czasie. Zjawisko to jest szczególnie ważne przy spawaniu termitowym szyn, które mają znacznie wyższy

profil i cieńszą szyjkę niż profil szyny 60E1, np. szyny tramwajowe rowkowe. Występujący gradient temperatury pomiędzy szyjką a główką i stopką połączenia, sprzyja powstaniu różnicy w szybkości krzepnięcia staliwa i jego skurczu, a także przemianom strukturalnym podczas studzenia złączy. Zjawiska te mają ogromny wpływ na wielkość powstających naprężeń, a w końcowym efekcie na jakość wykonanych połączeń szyn.

#### Literatura

1. Bałuch H., Bałuch M.: *Eksplatacyjne metody zwiększenia trwałości rozjazdów kolejowych*, Wydawca: CNTK, Warszawa 2009.
2. Kukulski J.: *Metody badań naprężeń własnych w szynach, rozjazdach i kołach monoblokowych*, Problemy Kolejnictwa, Zeszyt 141, Warszawa 2006.
3. Mikłaszewicz I., Bińkowski R.: *Przypadki pęknięcia szyn w świetle obliczeń MES*, Problemy Kolejnictwa, Zeszyt 172, Warszawa 2016.
4. PN EN 13674-1+A1:2017-07: Kolejnictwo – Tor – Szyna – Część 1: Szyny kolejowe Vignoles'a o masie 46 kg/m i większej.
5. Szelażek J.: *Postępy w ultradźwiękowych badaniach naprężeń*, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa 2001.
6. Wineman S.J., McClintock F.A.: *Residual Stresses Near Rail End, Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 13. Elsevier Science Publishers 1990, pp. 1–9.

### Research of Internal Stresses in Railway Rail Connections

#### Summary

The paper presents the results of internal stress tests in rails and rail joints, carried out applying the welding method and the termite welding. Stress tests were used as destroy strain gauges tests. The stress ratios in rails and rail joints made of R260 and R350HT were compared. The stress measurement method is based on the requirements of PN-EN 13674-1+A1:2017 standards.

**Keywords:** tension, rail joints, strain gauges

### Исследования внутренних напряжений в соединениях железнодорожных рельсов

#### Резюме

В статье представлены результаты исследований внутренних напряжений рельсов и внутренних напряжений, сделанных методом сварки и алюмотермической сварки. В исследованиях напряжений был употреблен метод тензометрический. Были сравнены зависимости напряжений в рельсах и соединениях рельсов сделанных из типа R260 и типа R350HT. Метод измерений был основан на требованиях описанных в норме PN-EN 13674-1+A1:2017.

**Ключевые слова:** напряжение, соединения рельсов, тензометрические датчики