

LABORATORIUM BADAŃ MATERIAŁÓW I ELEMENTÓW KONSTRUKCJI

Badania kwalifikacyjne szynowych złączy zgrzewanych w zgrzewalni

**Wpływ materiału i procesu wytwórczego złączy szynowych ze stali R260,
R350HT i R400HT na twardość i kryteria jej oceny**

Dr inż. Małgorzata Ostromęcka

13.01.2026

Znaczenie badań kwalifikacyjnych złączy szynowych

1. Złącze jest najsłabszym miejscem w torze bezстыkowym.
2. W trakcie eksploatacji podlega:
 - a. ogromnym obciążeniom kontaktowym koło - szyna,
 - b. obciążeniom zmęczeniowym,
 - c. wpływom środowiskowym (temperatura, wilgoć).
3. Złącze nie spełniające wymagań normowych = ryzyko:
 - a. pęknięcia szyny,
 - b. ograniczenia prędkości,
 - c. zagrożenia bezpieczeństwa ruchu.



422

*Poziome pęknięcie w szyjce złącza
Źródło: UIC Code 712-R_2002 Rail Defects*

Dlatego:

 **każda technologia zgrzewania musi być kwalifikowana, a produkcja nadzorowana zgodnie z PN-EN 14587.**

Na czym polega kwalifikacja procesu zgrzewania?

Kwalifikacja procesu zgrzewania oznacza udokumentowane potwierdzenie, że:

- dana **technologia**,
- na danej **maszynie**,
- dla danego **gatunku stali**,

pozwała wytwarzać **złącza spełniające wymagania normowe**.

PN-EN 14587-1:2019-03 „Kolejnictwo - Infrastruktura - Zgrzewanie iskrowe nowych szyn - Część 1: Zgrzewanie szyn ze stali gatunku R220, R260, R260Mn, R320Cr, R350HT, R350LHT, R370CrHT oraz R400HT w zgrzewalni

Id-112:2013 - Warunki techniczne wykonania i odbioru zgrzein w szynach kolejowych nowych łączonych zgrzewarkami stacjonarnymi Wymagania i badania



[illegible]

Zakres badań kwalifikacyjnych złączy szynowych zgrzewanych

- analiza procesu zgrzewania,
- badania wizualne złączy szynowych,
- badanie geometrii zgrzein: uskok, prostoliniowość,
- badanie ultradźwiękowe,
- badanie penetracyjne,
- próba statycznego zginania oraz badanie przełomów po złamaniu,
- badanie twardości,
- badanie makrostruktury,
- badanie mikroskopowe,
- badanie wytrzymałości zmęczeniowej.



Zakres badań kwalifikacyjnych złączy szynowych zgrzewanych

Pomiary geometryczne



Pomiary uskoku i wypływki realizowane przez pracowników IK
na terenie zakładu Producenta



Zakres badań kwalifikacyjnych złączy szynowych zgrzewanych

BADANIA NIENISZCZĄCE



Szyny po badaniu penetracyjnym



Złącze podczas badania dwiema głowicami kątowymi techniką tandem

Zakres badań kwalifikacyjnych złączy szynowych zgrzewanych

Próba statycznego zginania



Próba zginania



Maszyna wytrzymałościowa Schenck LFV

Zakres badań kwalifikacyjnych złączy szynowych zgrzewanych

Preparatyka próbek do badań
mikroskopowych



Szlifowanie na szlifierko-polerce RotoPol-22 formy
Struers

Stanowisko do badań makroskopowych



Badania mikroskopowe



mikroskop optyczny firmy KEYENCE VHX-900F



Zakres badań kwalifikacyjnych złączy szynowych zgrzewanych

Badania zmęczeniowe



Rola twardości w ocenie jakości złącza zgrzewanego

Co komunikuje twardość?

Twardość jest pośrednim wskaźnikiem:

- mikrostruktury (perlit, bainit, martenzyt, ferryt),
- wielkości ziarna,
- stopnia przegrzania i szybkości chłodzenia,
- poziomu wytrzymałości i odporności na zużycie.



👉 **Jednym pomiarem „czytamy” stan metalurgiczny materiału.**

Rola badania twardości w ocenie jakości złącza zgrzewanego

Złącze zgrzewane nie jest jednorodne:

Zawiera strefy:

- zgrzeinę - miejsce, gdzie materiał uległ całkowitemu stopieniu,
- kilka podstref SWC,
- materiał rodzimy.

Każda z tych stref ma:

- inną historię cieplną,
- inną mikrostrukturę,
- inną twardość.

 **Dlatego mierzymy nie punkt, lecz profil (rozkład) twardości.**



Rola twardości w ocenie jakości złącza zgrzewanego

W jaki sposób rozkład twardości decyduje o trwałości złącza?

- lokalne zmiękczenia powodują koncentrację odkształceń, zużycie faliste, pęknięcia zmęczeniowe,
- lokalne utwardzenia powodują kruchość, inicjację pęknięć,
- gwałtowne gradienty twardości powodują koncentracja naprężeń.

 **O trwałości złącza decyduje nie poziom twardości, lecz jej ciągłość i przebieg przestrzenny.**



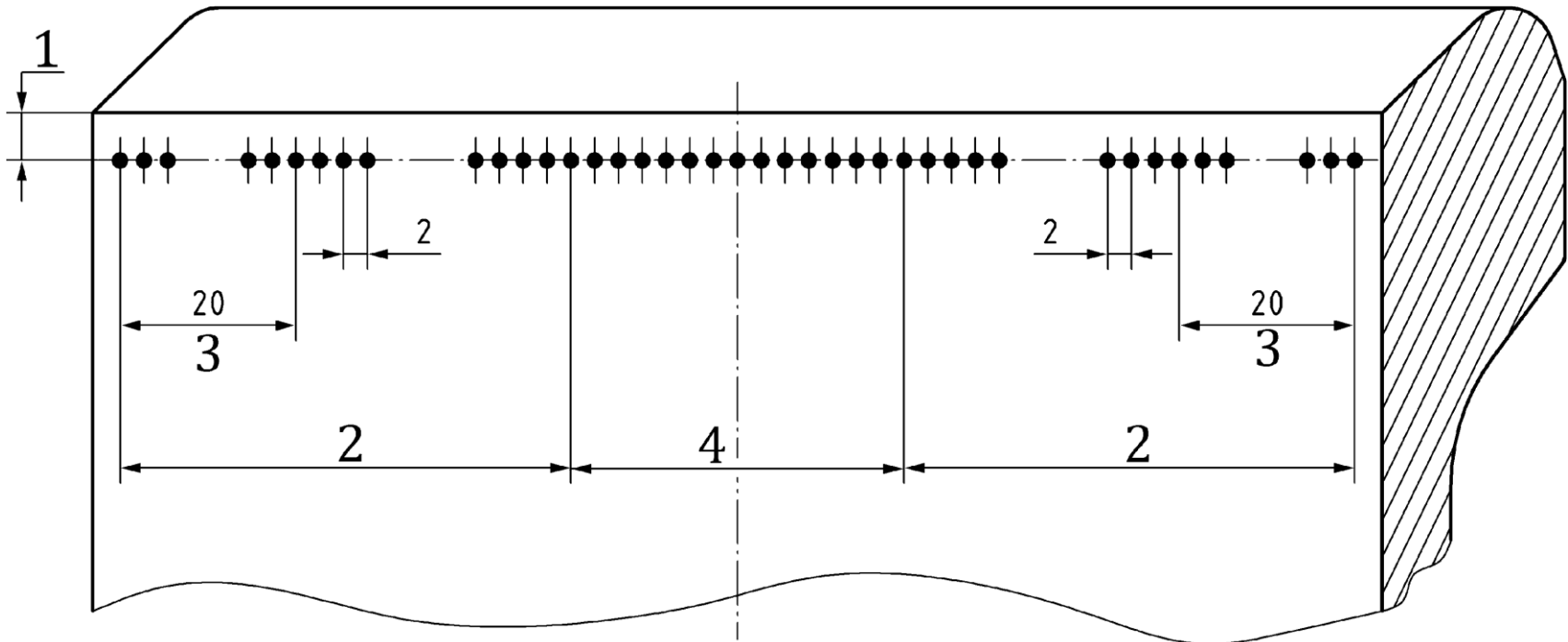
Różnica w sposobie oceny: R260 vs R350HT

Cecha	R260	R350HT
Zasięg pomiarów	≥ 20 mm w materiał rodzimy	Tylko ± 8 mm od osi zgrzeiny
Kryterium	Względne: $P-30 \leq HV \leq P+60$	Bezwzględne wartości: 325–410 HV lub
Co jest krytyczne	Cała SWC	Wąska strefa tuż przy osi zgrzeiny
Filozofia normy	Kontrola „profilu”	Kontrola „rdzenia krytycznego”

👉 **Stale HT wymagają ostrzejszych limitów i precyzyjniejszej kontroli, bo ich krytyczna strefa degradacji jest wąska, ale bardzo niebezpieczna eksploatacyjnie.**



Pomiary twardości zgodnie z normą PN-EN 14587-1



1. głębokość między 3 mm a 5 mm
2. materiał rodzimy szyny poza widoczną strefą wpływu ciepła
3. nienaruszony materiał rodzimy szyny
4. widoczna strefa wpływu ciepła na próbce makroskopowej

Źródło: PN-EN 14587-1

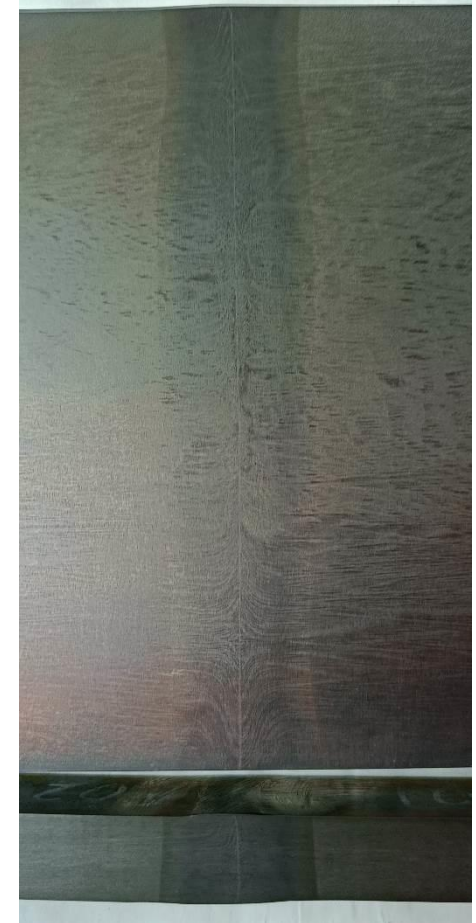
Pomiary twardości zgodnie z normą PN-EN 14587-1

Dlaczego badamy rozkład twardości na głębokości 3–5 mm od powierzchni tocznej?

1. To jest strefa rzeczywistej pracy zmęczeniowej szyny.
W eksploatacji maksymalne naprężenia styczne i kontaktowe (Hertzowskie) nie występują na samej powierzchni, lecz kilka milimetrów pod nią.
2. To jest najbardziej krytyczna część SWC (strefy wpływu ciepła).
W zgrzewaniu iskrowym maksimum przegrzania i przemian strukturalnych zachodzi nie na samej powierzchni, lecz kilka mm poniżej, gdzie nie było chłodzenia powietrzem i kumulowało się ciepło z objętości materiału.

Czyli:

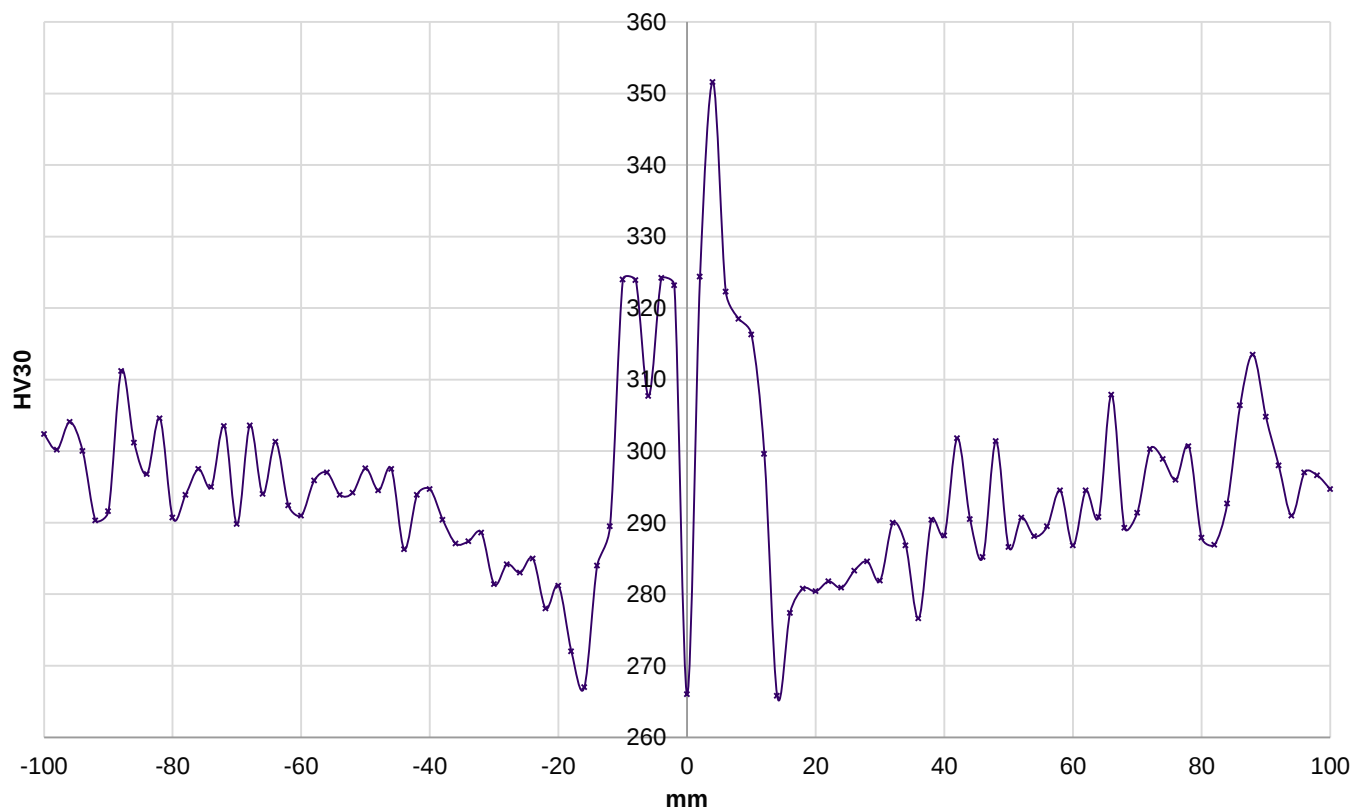
👉 jest to krytyczna strefa nośna złącza i najczulsza na błędy procesu zgrzewania.



Pomiary twardości zgodnie z normą PN-EN 14587-1

Średnia twardość w złączu P = 294,7 HV₃₀
Minimalna twardość w złączu: 265,8 HV₃₀
Maksymalna twardość w złączu: 351,6 HV₃₀

R260

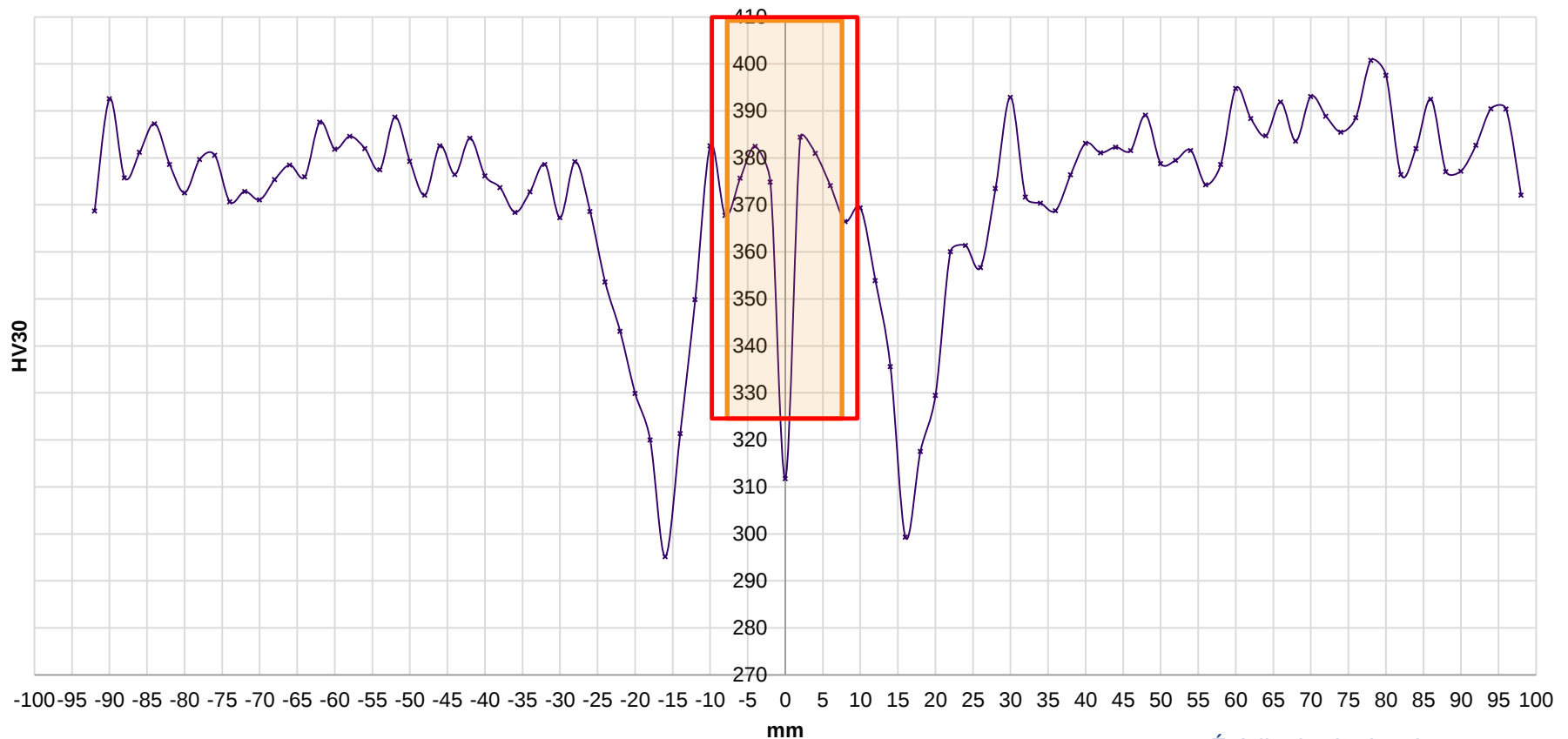


P – wynika z twardości
szyny rodzimej

Źródło: badania własne

Pomiary twardości zgodnie z normą PN-EN 14587-1

R350HT



Źródło: badania własne

Kwalifikowanie wyników twardości zgodnie z normą PN-EN 14587-1

5.4.8.3 Rail grades R320Cr, R350HT, R350LHT, R370CrHT and R400HT

For the rail grades R320Cr, R350HT, R350LHT, R370CrHT and R400HT the minimum and maximum hardness values obtained within 8 mm each side from the weld line shall conform to the requirements stated in Table 3.

An isolated hardness value falling outside of the stated minima and maxima is permitted only when found at the weld centre line.

Table 3 — Minimum and maximum hardness requirements for individual rail steel grades

Hardness HV30	R320Cr	R350HT	R350LHT	R370CrHT	R400HT
Min	290	325	325	350	350
Max	380	410	410	425	440

Źródło: PN-EN 14587-1

Pomiary twardości zgodnie z wytycznymi PKP PLK Id -112

Tabela 6a. Minimalne i maksymalne wartości twardości*

Twardość	w odległości do 10 mm od linii zgrzeiny
Minimalna twardość	$> 325 \text{ HV}_{30}$
Maksymalna twardość	$\leq 410 \text{ HV}_{30}$

Uwaga: Pojedyncza wartość twardości nie mieszcząca się w podanym powyżej przedziale jest dopuszczalna, ale tylko wtedy, gdy występuje w osi zgrzeiny.

Składy chemiczne stali szynowych wg PN-EN 13674-1 (zakresy % masowe)

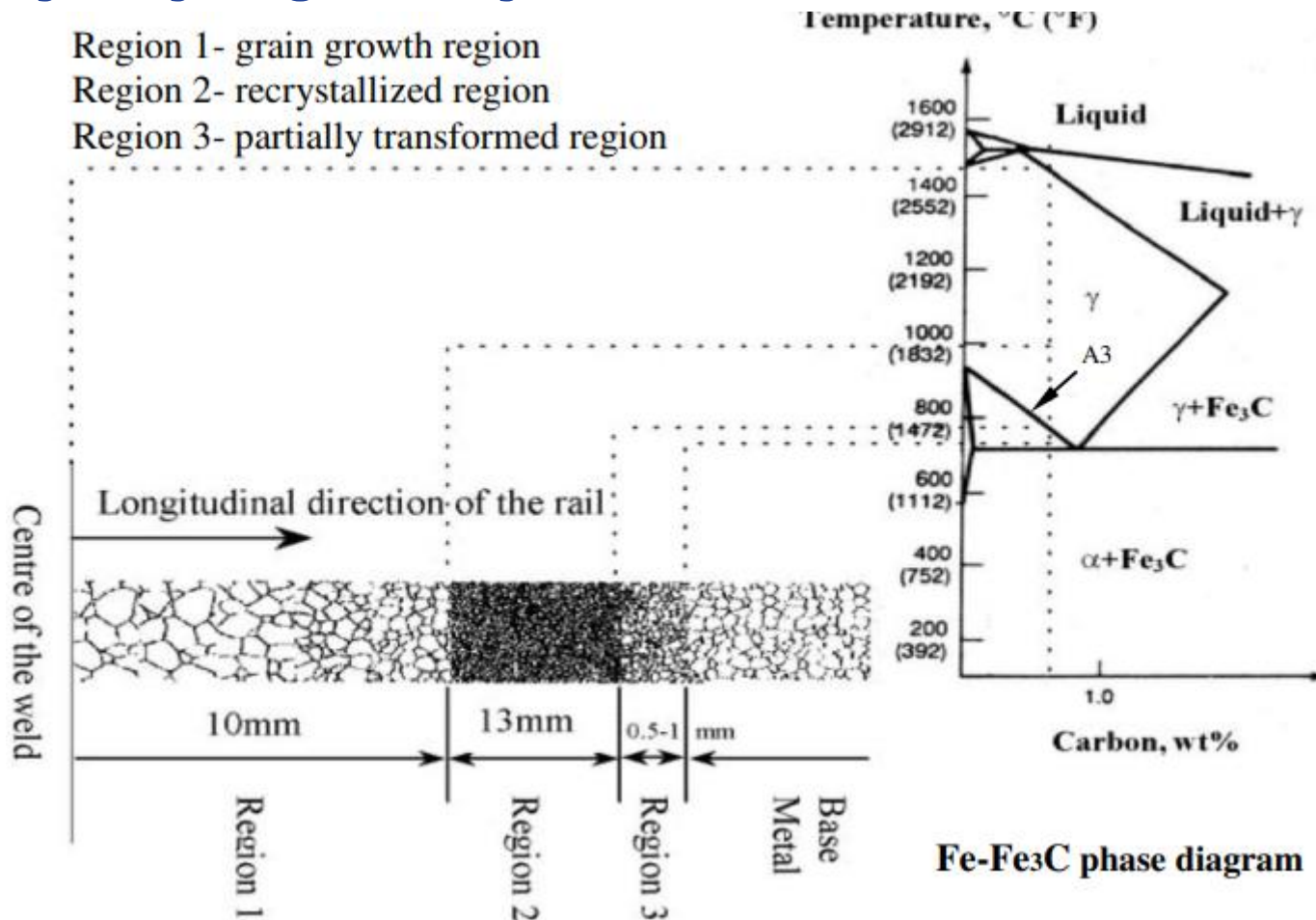
Gatunek stali	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	V	Inne
R260	0.62–0.80	0.15–0.58	0.70–1.20	≤ 0.025	≤ 0.025	≤ 0.15	≤ 0.004	≤ 0.03	śladowe
R350HT	0.72–0.80	0.15–0.58	0.70–1.20	≤ 0.020	≤ 0.025	≤ 0.15	≤ 0.004	≤ 0.03	śladowe
R400HT	0.90–1.05	0.20–0.60	0.80–1.30	≤ 0.020	≤ 0.020	0.20–0.60	≤ 0.004	≤ 0.03	śladowe

👉 Wzrost zawartości węgla i chromu od R260 do R400HT oznacza rosnącą hartowność, większą wrażliwość na cykl cieplny zgrzewania oraz ostrzejsze wymagania normowe dotyczące twardości w HAZ.

Norma **EN 13674-1** podaje **przedziały dopuszczalne**.

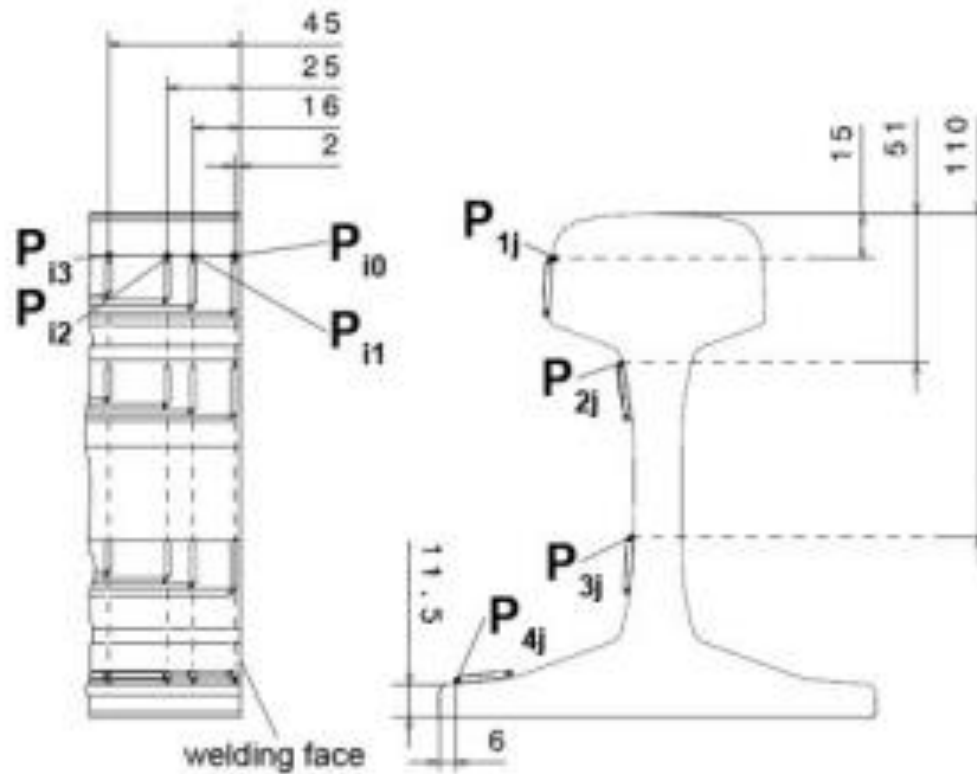
Rzeczywiste szyny od producentów mają zwykle **węższe okna składu**, a czasem **mikrododatki (Nb, Mo)**.

Ogólna ilustracja wpływu cyklu cieplnego na budowę SWC w złączu szynowym zgrzewanym



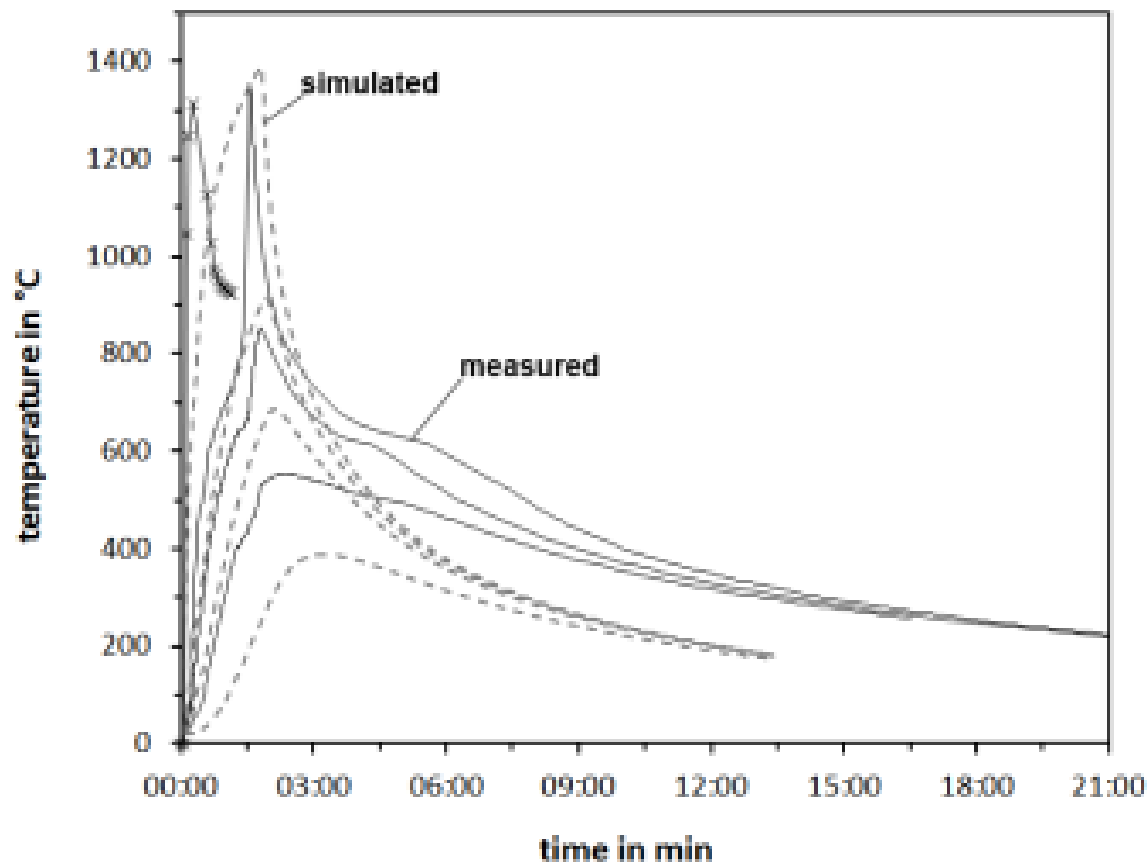
Źródło [7]

Rozkład temperatury w złączu podczas zgrzewania iskrowego

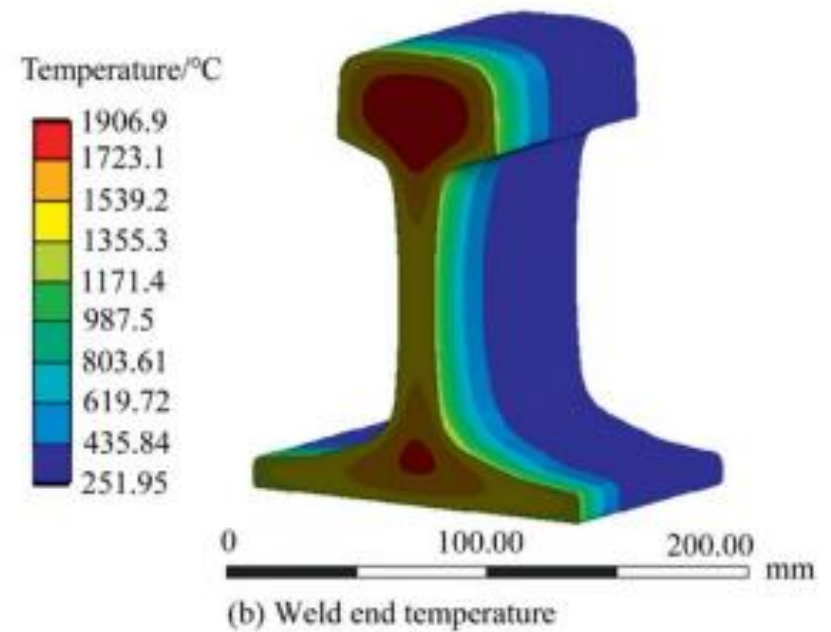
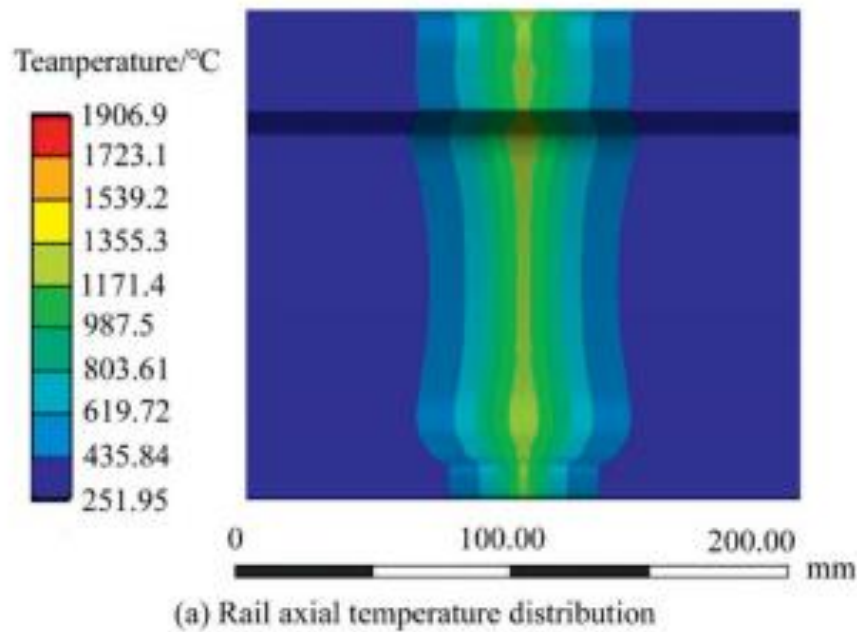


Źródło [3]

Rozkład temperatury w złączu podczas zgrzewania iskrowego



Rozkład temperatury w złączu podczas zgrzewania iskrowego



Źródło [4]

Rozkład temperatury w złączu podczas zgrzewania iskrowego

Strefa	Oznaczenie	Przybliżona $T_{\max}$	Co się dzieje	Efekt strukturalny
Oś zgrzewania	FZ	$> 1400\text{--}1500^{\circ}\text{C}$	Uplastycznienie / lokalne nadtopienie	Rekrystalizacja, silne rozdrobnienie
SWC – strefa gruboziarnista	CGHAZ	$\sim 1100\text{--}1350^{\circ}\text{C}$	Pełna austenitizacja + silny rozrost ziarna	Gruby perlit / lokalna kruchość
SWC – strefa drobnoziarnista	FGHAZ	$\sim 900\text{--}1050^{\circ}\text{C}$	Pełna austenitizacja	Drobny perlit
SWC – strefa międzykrytyczna	ICHAZ	$\sim 720\text{--}900^{\circ}\text{C}$	Częściowa austenitizacja	Mieszana struktura, zmękczenie
SWC – strefa podkrytyczna	SCHAZ	$\sim 500\text{--}720^{\circ}\text{C}$	Brak przemiany fazowej	Odprężenie, sferoidyzacja cementytu
Materiał rodzimy	BM	$< 500^{\circ}\text{C}$	Brak wpływu cieplnego	Perlit bazowy

Kluczowe temperatury graniczne

$Ac_1 \approx 720\text{--}740^{\circ}\text{C}$ (początek austenitizacji)

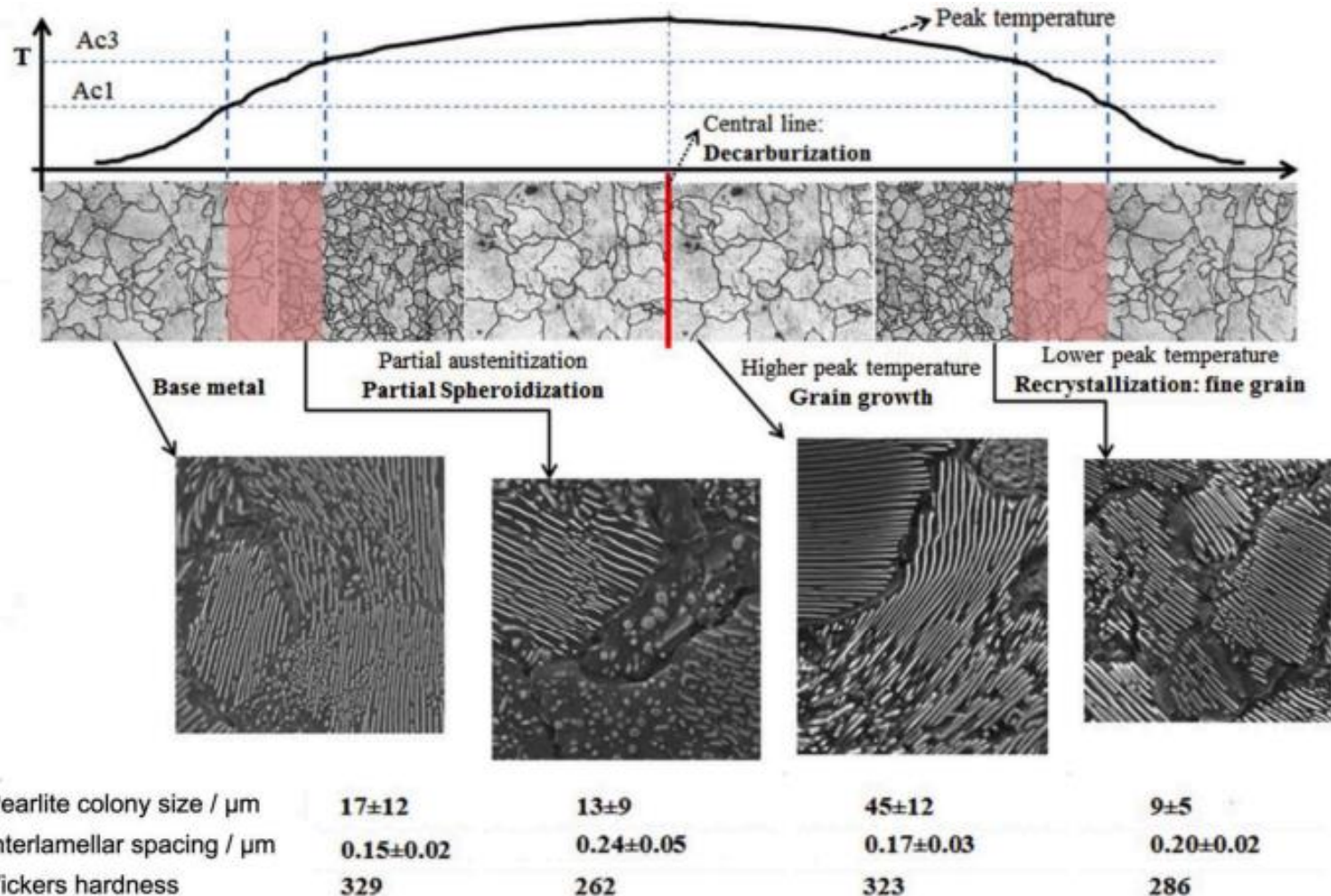
$Ac_3 \approx 880\text{--}910^{\circ}\text{C}$ (koniec austenitizacji dla R260)

Temperatura topnienia $\approx 1450^{\circ}\text{C}$

Źródło [3,5,6]

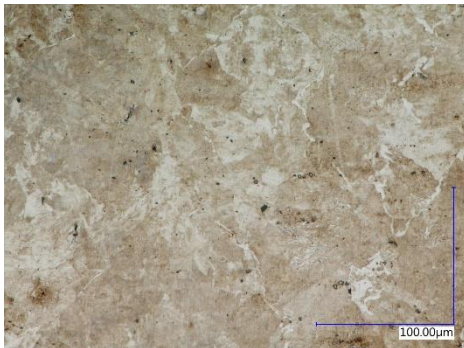
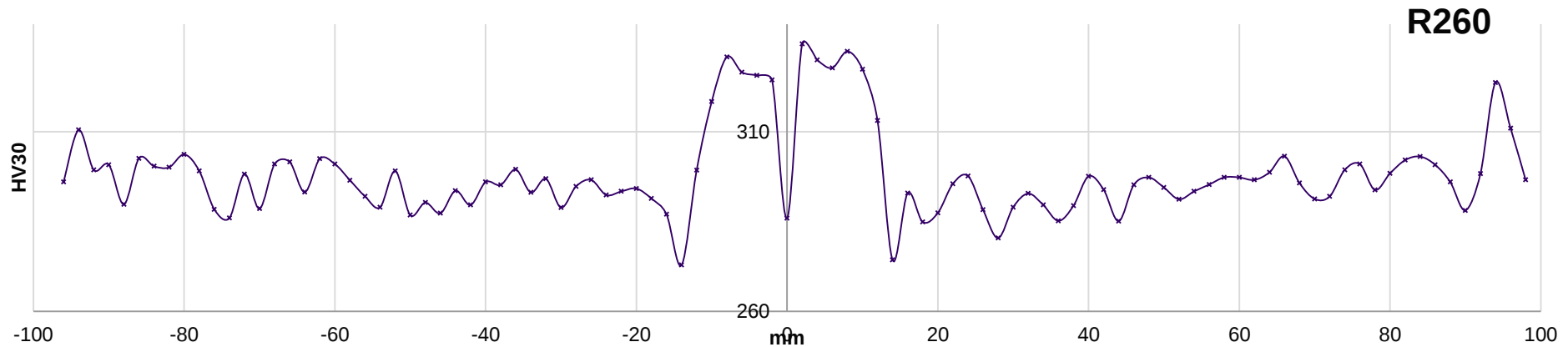


Mikrostruktura szynowego złącza zgrzewanego a twardość

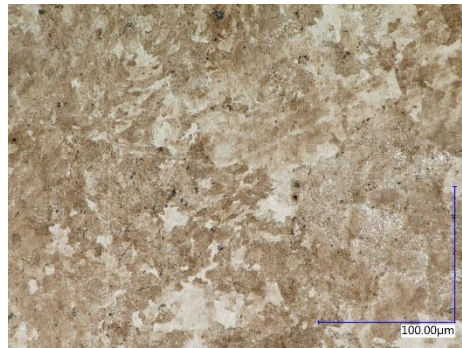


Źródło [5] stal o składzie Fe-0.72C-0.84Mn-0.24Si-0.08Cr%

Twardość a mikrostruktura



Mikrostruktura w linii
zgrzewania w stali R260 w
główce (pow. x1000)



Mikrostruktura w strefie wpływu
ciepła w stali R260 w główce
(pow. x1000)

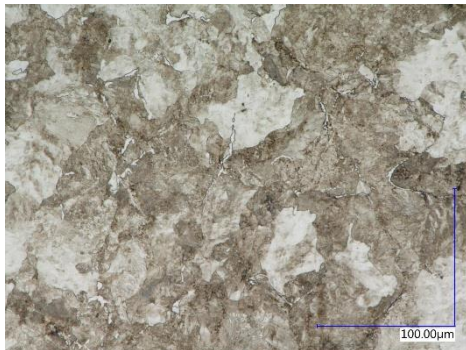
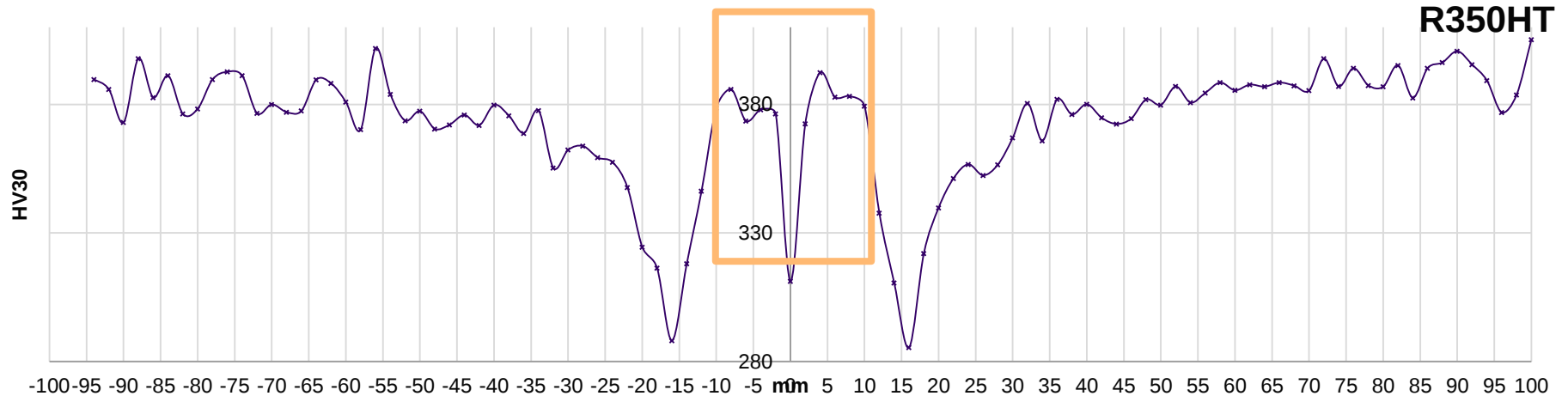


Mikrostruktura w linii
zgrzewania w stali R260 w
stopce (pow. x1000)

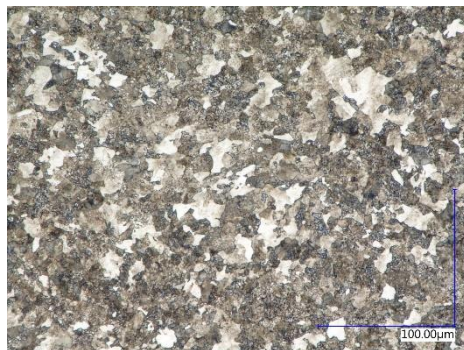


Mikrostruktura w strefie wpływu
ciepła w stali R260 w stopce
(pow. x1000)

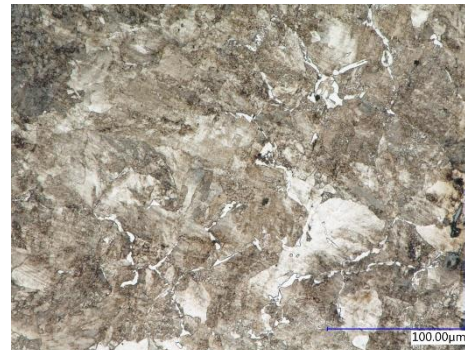
Twardość a mikrostruktura



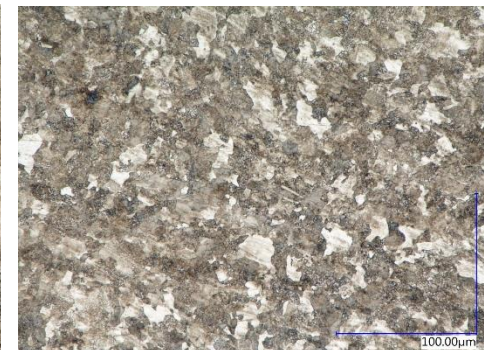
Mikrostruktura w linii zgrzewania w stali R350HT w główce (pow. x1000)



Mikrostruktura w strefie wpływu ciepła w stali R350HT w główce (pow. x1000)

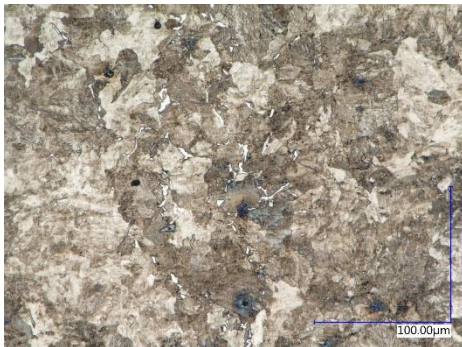
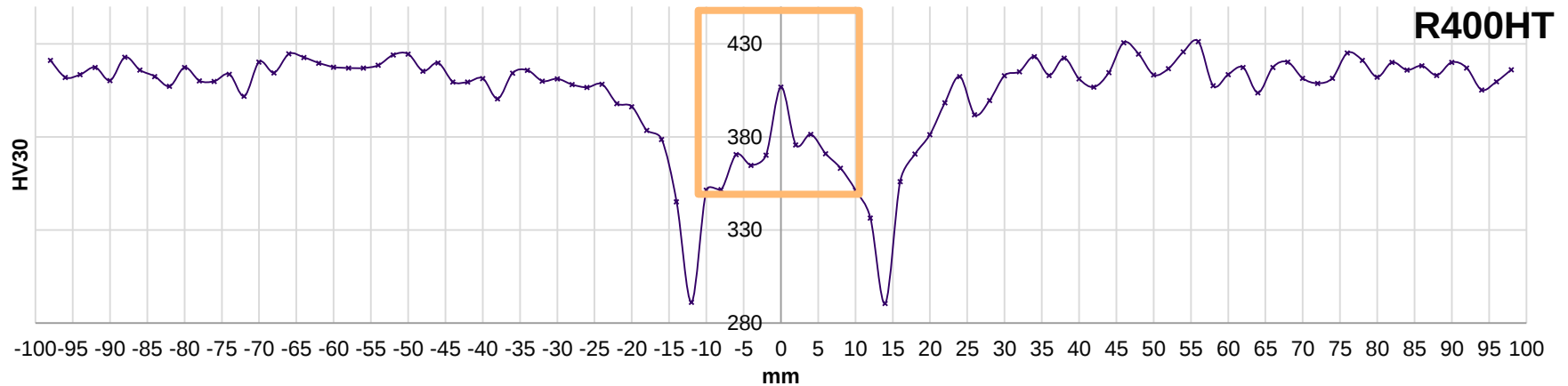


Mikrostruktura w linii zgrzewania w stali R350HT w stopce (pow. x1000)

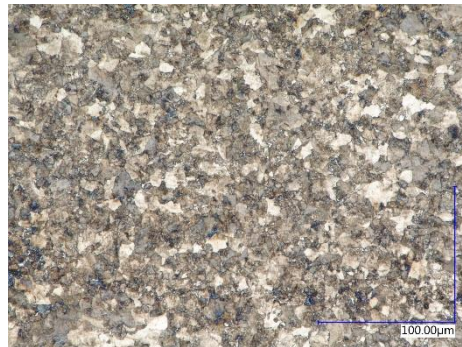


Mikrostruktura w strefie wpływu ciepła w stali R350HT w stopce (pow. x1000)

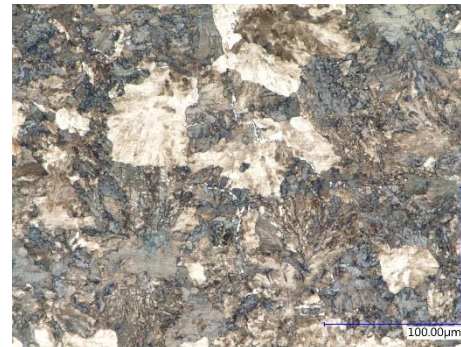
Twardość a mikrostruktura



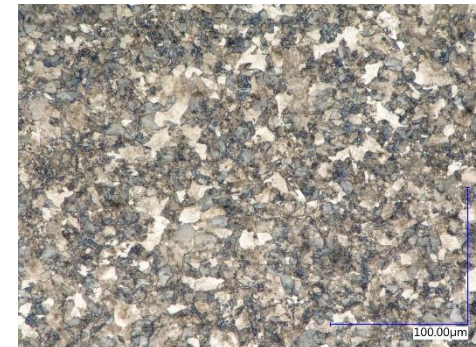
Mikrostruktura w linii zgrzewania w stali R400HT w główce (pow. x1000)



Mikrostruktura w strefie wpływu ciepła w stali R400HT w główce (pow. x1000)



Mikrostruktura w linii zgrzewania w stali R400HT w stopce (pow. x1000)



Mikrostruktura w strefie wpływu ciepła w stali R400HT w stopce (pow. x1000)

Dziękuję za uwagę



Literatura

1. PN-EN 14587-1:2019-03 „Kolejnictwo - Infrastruktura - Zgrzewanie iskrowe nowych szyn - Część 1: Zgrzewanie szyn ze stali gatunku R220, R260, R260Mn, R320Cr, R350HT, R350LHT, R370CrHT oraz R400HT w zgrzewalni
2. Id-112:2013 - Warunki techniczne wykonania i odbioru zgrzein w szynach kolejowych nowych łączonych zgrzewarkami stacjonarnymi Wymagania i badania, Załącznik do zarządzenia Nr 26/20013 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 12 listopada 2013 r.
3. WEINGRILL, L., KRUTZLER, J. i ENZINGER, N.
Temperature field evolution during flash-butt welding of railway rails.
Materials Science Forum. 2017, Vol. 879, s. 2088–2093.
ISSN 1662-9752.
4. ZHANG, H., WANG, P., LI, X. i in.
Temperature field calculation of rail flash welding.
High-Speed Railway. 2024, Vol. 2(2), s. 100–111
5. Solano-Alvarez, W.; Bhadeshia, H.K.D.H.
Steels for rails. Progress in Materials Science, 2024, vol. 146, art. 101313
6. Pereira H.B., Ariza Echeverri E.A.A., Alves L.H.D., Yildirimli K., Lewis R., Goldenstein H.
Influence of HAZ microstructure on RCF under twin-disc test of a flash-butt welded rail.
Wear. 2024; v. 546-547
7. Bhadeshia H.K.D.H. Welding of rail steels [dokument elektroniczny]. Dostępny pod: https://www.academia.edu/94533576/Welding_of_Rail_Steels (dostęp 11.01.2026)