

Sylwester Żak, Tomasz Zygmunt, Janusz Kasprowicz, Krzysztof Kozera

Nowy gatunek stali na szyny tramwajowe

W artykule omówiono genezę i uwarunkowania uruchomienia produkcji szyn tramwajowych naturalnie chłodzonych (bez obróbki cieplnej) w nowym gatunku stali. Przedstawiono także wyniki badań właściwości mechanicznych, twardości, oceny mikrostruktury, odporności na kruche pękanie i innych. Otrzymany poziom właściwości odniesiono do wymagań stawianych szynom obrobionym cieplnie w normie Europejskiej EN14811. Opisano także dobór technologii łączenia szyn przy użyciu spawania łukiem elektrycznym i spawania termitem.

Słowa kluczowe: gatunek B1000, szyny tramwajowe, właściwości mechaniczne, spawanie termitowe, spawanie elektrodą, wyniki badań eksploatacyjnych.

Geneza opracowania gatunku B1000 sięga roku 2000, kiedy to Huta Katowice S.A., obecnie ArcelorMittal Poland S.A., na zamówienie brazylijskiej firmy CVRD wyprodukowała szyny typu TR 68 (136RE), przeznaczone do zabudowy w łuki linii służącej do transportu rudy żelaza, której całkowita długość wynosi 891,5 km, przy czym 27% tej długości stanowią łuki [4]. Założono, że dla zachowania równowagi pomiędzy zużyciem w wyniku ścierania oraz zmęczeniem kontaktowym, twardość szyn ze stali o strukturze perlitycznej będzie ograniczona do zakresu 330–360 HB. Założenia te realizowano poprzez ograniczony dodatek składników stopowych chromu i wanadu do stali eutektoidalnej węglowo-manganowej, przy zachowaniu zdolności do łączenia szyn metodą zgrzewania iskrowego i spawania termitowego oraz odporności na kruche pękanie – współczynnik $K_{IC} = \min 34 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$ w temp. +20°C. W roku 2010 wyprodukowano partię szyn kolejowych normalnotorowych typu R65 do badań eksploatacyjnych w torze doświadczalnym w Szczerbince pod Moskwą, gdzie zostały zabudowane w łuki o promieniu $R = 990 \text{ m}$ i $R = 889 \text{ m}$. Badania trwały od 2010 do 2012 r., szyny przeniosły w tym czasie sumaryczne obciążenie 530 mln t brutto przy resursie 100% co oznacza, że żadna szyna nie została wyeliminowana ze względu na wady zagrażające bezpieczeństwu [3]. Łącznie wyprodukowano 13 800 t szyn kolejowych typu TR68 i R65 w gatunku B1000 dostarczonych głównie do Brazylii, Białorusi, Turkmenistanu.

Skład chemiczny i właściwości mechaniczne

Szyny tramwajowe w gatunku R260 według normy EN 14811 [2] stosowane obecnie do budowy torów tramwajowych ulegają stosunkowo szybkiemu zużyciu bocznemu, szczególnie w łukach o małych promieniach. Przeciwdziałać temu zjawisku można stosując szyny z obrobioną cieplnie główką lub przez modyfikację składu chemicznego (rozwiązanie znacznie tańsze w produkcji) w celu podniesienia twardości i co za tym idzie odporności na zużycie. We wrześniu 2013 r. ArcelorMittal Poland S.A. uzyskał w Instytucie Kolejnictwa Aprobata Techniczną AT/07-2013-0293-00 na szyny tramwajowe typu: 59R1, 59R2, 60R1 i 60R2 w gatunkach stali: R260V, AREMA SS i B1000, w której zostały określone podstawowe wymagania techniczne i produkcyjne dla szyn tramwajowych w nowych gatunkach stali oraz rodzaje i częstotliwość przeprowadzenia badań odbiorowych. Zakres składu chemicznego dla gatunku B1000 zgodnie

Tab. 1. Skład chemiczny stali w gatunku B1000

Gatunek stali	[%] masowy					[p.p.m]
	C	Mn	Si	P _{max}	S _{max}	H _{max}
B1000	0,75–0,82	1,05–1,20	0,30–0,60	0,020	0,020	2,0

Tab. 2. Maksymalna zawartość pierwiastków resztkowych

Gatunek stali	[%] masowy					[p.p.m]
	V _{max}	Cr _{max}	Mo _{max}	Al _{max}	Cu _{max}	(Cu + 10Sn) _{max}
B1000	0,10	0,80	0,02	0,004	0,10	0,35

Tab. 3. Podstawowe właściwości mechaniczne

Gatunek stali	Właściwości mechaniczne		
	Minimalna wytrzymałość R _m [MPa]	Minimalne wydłużenie A ₅ [%]	Twardość [HB]
B1000	1 080	9	325–360

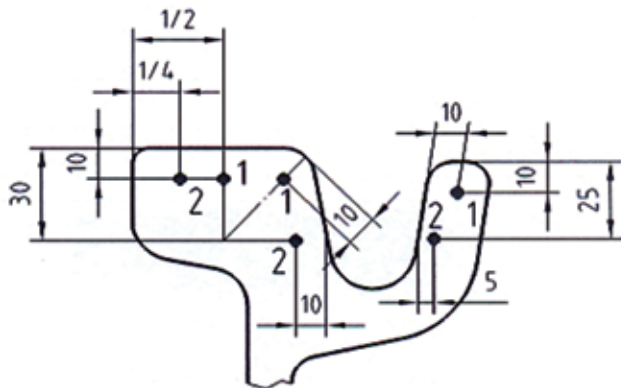
z aprobatą techniczną przedstawiono w tabeli 1, a dopuszczalny poziom pierwiastków szkodliwych w tabeli 2. Minimalny poziom podstawowych właściwości mechanicznych został zaprezentowany w tabeli 3.

Wyprodukowanie partii próbnej szyn tramwajowych typu 60R2

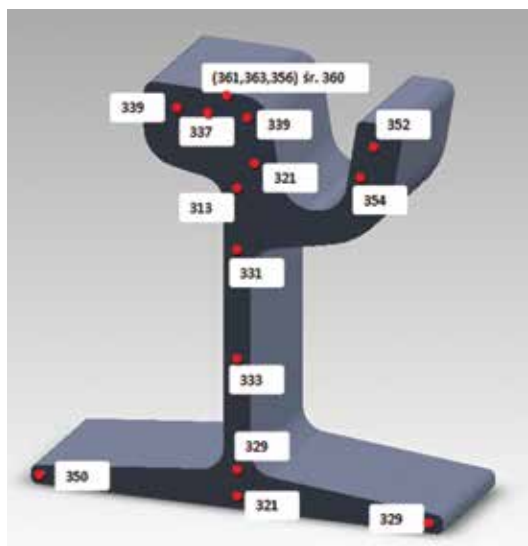
W ArcelorMittal Poland S.A. odwalcowano partię próbną szyn tramwajowych typu 60R2, na której wykonano badania odbiorowe zgodnie z normą europejską EN 14811:2009 (próba rozciągania, badanie twardości na powierzchni tocznej, kontrola wymiarów przekroju poprzecznego, jakości powierzchni i prostości). Otrzymany poziom właściwości mechanicznych na szynach tramwajowych 60R2 został zaprezentowany w tabeli 4. Norma EN14811 określa konieczność przeprowadzenia pomiaru twardości dla zwykłych gatunków stali (R200, R220G1 i R260) na powierzchni tocznej szyny, natomiast dla gatunków obrobionych cieplnie także na przekroju poprzecznym, w ściśle określonych punktach pomiarowych (rys. 1). Dla szyn tramwajowych w gatunku B1000 wykonano pomiar twardości na powierzchni tocznej (po zeszlifowaniu 0,5 mm warstwy powierzchni) oraz na przekroju poprzecznym (rys. 1). Dodatkowo zostały wykonane pomiary twardości w osi symetrii szynki i na krawędziach

Tab. 4. Poziom właściwości mechanicznych otrzymanych na partii próbnej szyn tramwajowych typu 60R2

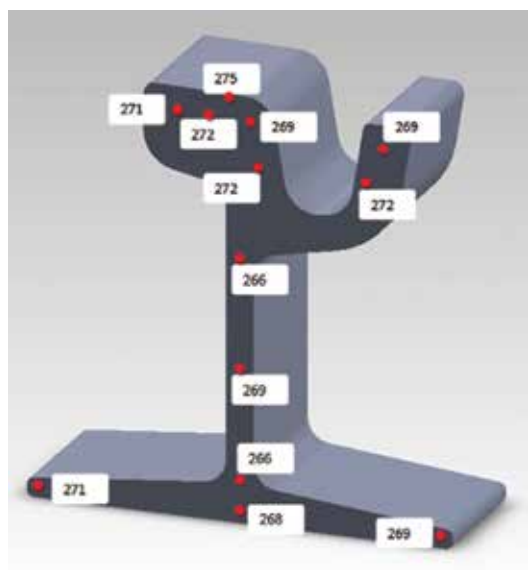
Oznaczenie próbki	R _m [MPa]	R _{0,2} [MPa]	A ₅ [%]	Z [%]	HB średnie
Y605	1 115	697	10,2	15	351
C505	1 097	652	10,1	14	342
B404	1 160	754	10	15	345
B305	1 100	691	9,6	14	346
A204	1 101	670	9,6	14	341
A103	1 101	681	9,6	15	341



Rys. 1. Rozmieszczenie punktów pomiarowych twardości na przekroju poprzecznym (wszystkie wymiary w milimetrach)



Rys. 2. Rozkład twardości na powierzchni toczonej i przekroju poprzecznym szyny 60R2 w gat. B1000



Rys. 3. Rozkład twardości na powierzchni toczonej i przekroju poprzecznym szyny 60R2 w gat. R260



Rys. 4. Odbitka Baumanna

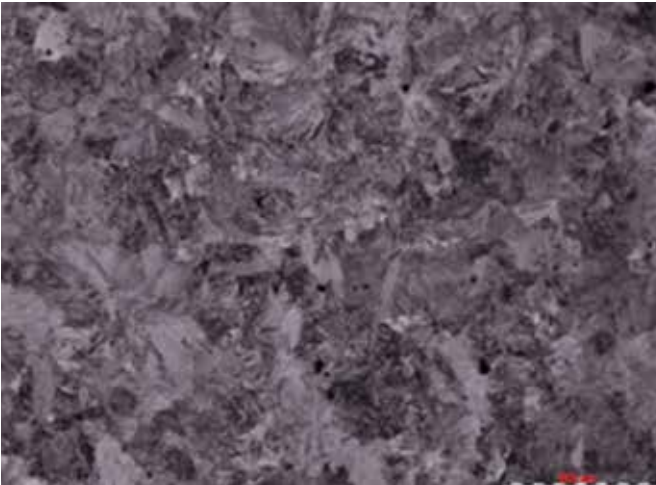
stopki (rys. 2). Porównawczo w tych samych punktach pomiarowych określono twardość HB dla gatunku stali R260 (rys. 3). Dla szyn gatunku B1000 średnia wartość twardości na powierzchni toczonej odpowiadała 360 jednostkom HB, natomiast w punktach pomiarowych oznaczonych numerem 1 wynosiła 337–352 HB, a w punktach oznaczonych jako 2 zawierała się w przedziale 321–354 HB, zaobserwowano równomierny rozkład twardości w osi szyjki i porównywalne wartości twardości na krawędziach stopki. Zauważalny jest spadek twardości na przekroju szyny w stosunku do powierzchni toczonej o max 40 jednostek HB, co sprawia, iż wewnętrzna część materiału główki jest bardziej plastyczna. Porównanie rozkładu twardości na próbkach w gatunku B1000 i R260 pokazuje, że stal gatunku B1000 charakteryzuje się wyższą średnią twardością na powierzchni toczonej o około 85 jednostek HB, odpowiednio 72 jednostek HB w punktach pomiarowych oznaczonych numerem 1 oraz 65 jednostek HB w punktach oznaczonych numerem 2.

Dla wszystkich szyn z próbnej partii wykonano ocenę segregacji siarki na przekroju poprzecznym metodą próby Baumanna. Na badanych szynach ujawniono nieznaczną segregację dodatnią w obszarze pod główką szyny typową dla szyn walcowanych z wsadu odlanego w procesie COS. Nie stwierdzono natomiast śladów segregacji punktowej siarki na przekroju poprzecznym szyny, co jako przykład zostało zilustrowane na rysunku 4.

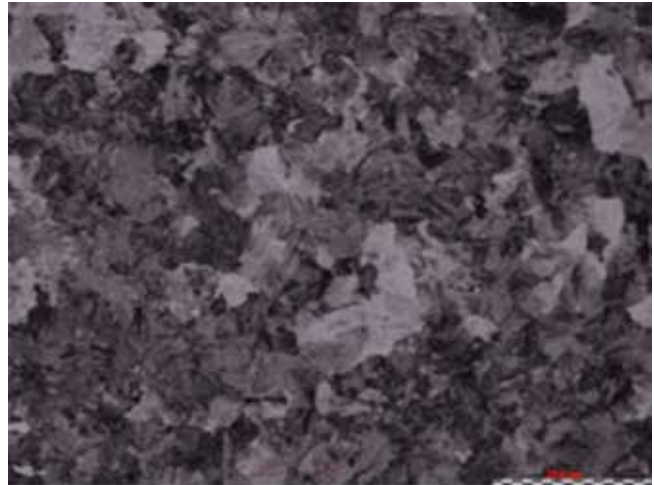
Badania eksploatacyjne

Pierwszą próbą użytkową szyn tramwajowych w gatunku B1000 w warunkach przemysłowych było sprawdzenie możliwości gięcia szyn w łuki o zadanym promieniu. Polegała ona na wygięciu szyn w promień 18 m, zarówno od strony główki, jak i kierownicy, a następnie wyprostowaniu i ponownym wygięciu w promień 25 m w celu zabudowy w torze zajezdni tramwajowej Warszawa Żoliborz. Kolejnym etapem było opracowanie dla gatunku B1000 technologii spawania elektrodą oraz spawania termitowego. Mieszanek termitową uwzględniającą podwyższoną zawartość chromu i wanadu w stali dobrała firma Railtech Plotz. Dodatek składników stopowych podwyższających hartowność do stali może powodować problemy z uzyskaniem odpowiednich właściwości spawów, dlatego konieczne jest zastosowanie zmniejszonej szybkości chłodzenia, przy której powstają niekorzystne struktury martenzytyczne i bainityczne. Przeprowadzone badania na próbkach ze spoin termitowych ujawniły strukturę perlityczną w osi złącza (rys. 5) taką samą jak w materiale rodzimym (rys. 6) oraz strukturę perlityczną lub perlityczno-sorbityczną w strefie wpływu ciepła (rys. 7 i 8) [1].

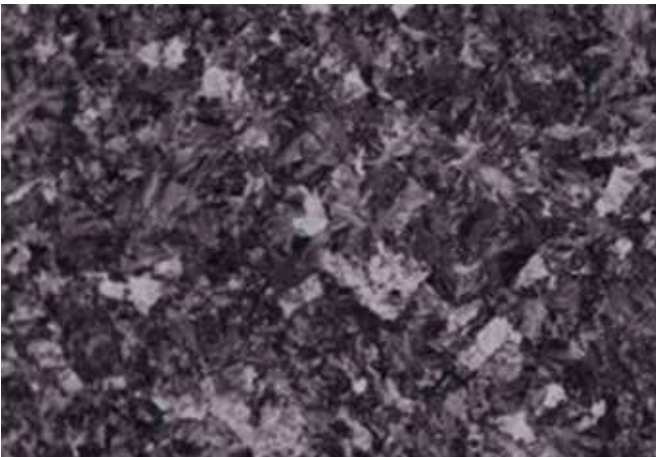
Wykonano ponadto badanie rozkładu twardości HV30 na przekroju wzdłużnym spoiny w główce, szyjce i stopce szyny. Przykłado-



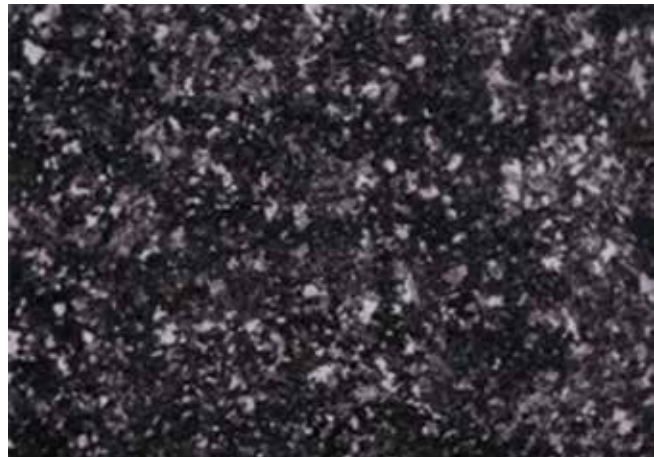
Rys. 5. Oś spawu – perlit pow. 100× (trawiono nitaliem)



Rys. 6. Struktura szyny – perlit pow. 100× (trawiono nitaliem)



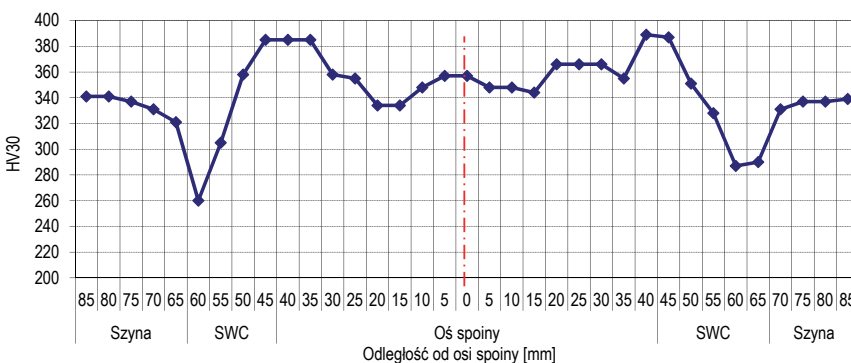
Rys. 7. SWC – perlit pow. 100× (trawiono nitaliem)



Rys. 8. SWC – perlit i sorbit pow. 100× (trawiono nitaliem)

we wyniki pomiaru twardości na przekroju wzdłużnym w odległości 3 mm pod powierzchnią toczną główki omawianego złącza przedstawiono na rysunku 9. Obserwacja strefy wpływu ciepła wskazuje, iż układa się ona symetrycznie względem osi spoiny, przebieg rozkładu twardości w badanych złączach jest typowy dla spoin termitowych. W osi zgrzeiny występuje podwyższenie twardości do około 357 HB, w obszarze 15–20 mm od osi zgrzeiny twardość spada do max 338 HB, następnie w strefie oddalonej o około 35–45 mm od osi zgrzeiny następuje wzrost twardości do około 385 HB, dalej w strefie wpływu ciepła następuje spadek twardości o 50–80 jednostek HB w odniesieniu do twardości zmierzonych w szynie.

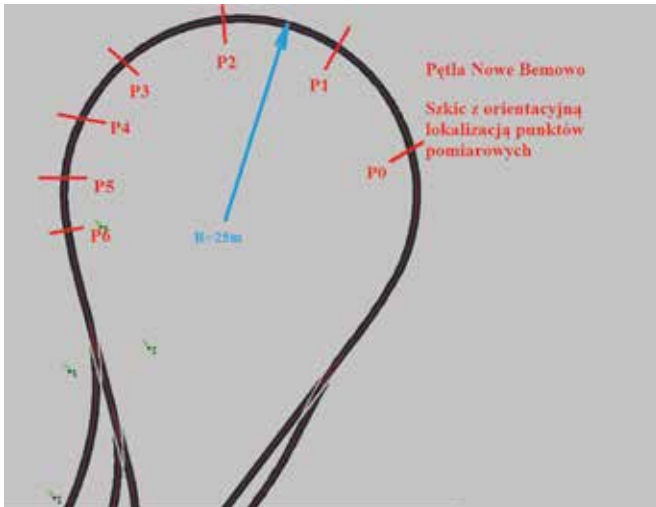
W kwietniu 2016 r. na łuku objazdowym pętli Warszawa Nowe Bemowo została zabudowana pierwsza przemysłowa partia szyn typu 60R2 w gatunku B1000. Łączenie szyn w torze zostało dokonane za pomocą spawania łukiem elektrycznym a także spawania termitowego. Miejsca łączeń oznakowano i prowadzona jest ich regularna obserwacja, dodatkowo zostało wyznaczonych 7 punktów pomiarowych, gdzie w ustalonych odstępach czasu mierzone jest zużycie pionowe i boczne na główce szyny w obu tokach toru (rys. 10). Po rocznym okresie eksploatacji szyn zmierzona wartość zużycia bocznego główki szyny w toku lewym zawierała się w przedziale 1,99–4,41 mm natomiast dla szyny w toku prawym zużycie boczne wynosiło 3,92–6,81



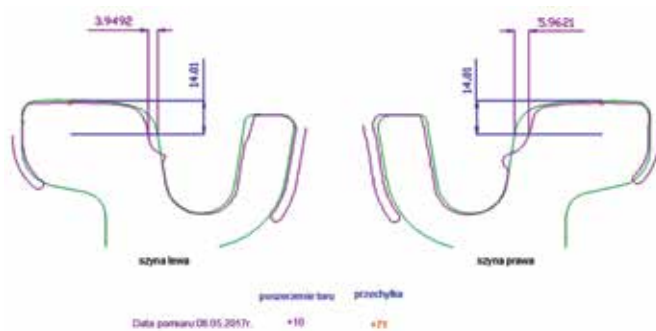
Rys. 9. Rozkład twardości w główce spawanej szyny

mm. Rysunek 11 przedstawia przykładową graficzną ilustrację wyników pomiarów zużycia szyny w gatunku B1000 dla punktu P3. Wielkość zużycia bocznego dla szyn tramwajowych w gatunku B1000 jest znacznie mniejsza niż dla standardowego gatunku stali R260 i porównywalna z szynami obrobionymi cieplnie w gatunku R340GHT.

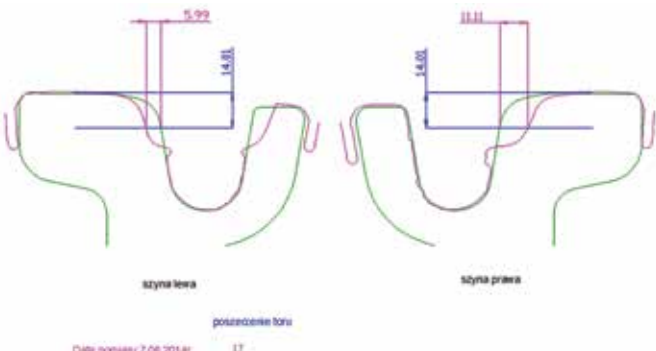
Wcześniej stosowane w tej lokalizacji szyny w gatunku R260 musiały być wymieniane po około dziesięciu miesiącach ze względu na przekroczenie zużycia bocznego. Dla porównania na rysunku 12 i 13 pokazano zużycie szyny w gatunku R260 i B1000 po dziesięciomiesięcznym okresie eksploatacji w tym samym punkcie pomiarowym.



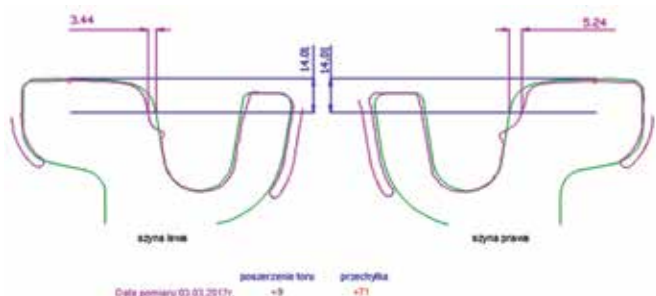
Rys. 10. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych zużycia szyn



Rys. 11. Pomiar zużycia szyny w gatunku B1000 w punkcie pomiarowym P3 po roku eksploatacji



Rys. 12. Pomiar zużycia szyny w gatunku R260 w punkcie pomiarowym P3 po dziesięciomiesięcznym okresie eksploatacji



Rys. 13. Pomiar zużycia szyny w gatunku B1000 w punkcie pomiarowym P3 po dziesięciomiesięcznym okresie eksploatacji

Podsumowanie

Wyprodukowane w ArcelorMittal Poland S.A. szyny tramwajowe w gatunku stali B1000 charakteryzują się właściwościami znacznie przewyższającymi standardowe gatunki stali R200, R220G1 i R260 zawarte w normie EN14811 oraz gatunki obrobione cieplnie R260GHT i R290GHT i o zbliżonych właściwościach użytkowych jak gatunek R340GHT. Wykonane badania laboratoryjne oraz dotychczasowe próby eksploatacyjne potwierdziły wysokie właściwości mechaniczne, korzystny rozkład twardości na przekroju poprzecznym oraz jednolitą strukturę perlityczną w szynie bez wydzieliń martenzytu czy bainitu. Opracowane technologie spawania łukiem elektrycznym i termitem pozwalają na bezpieczne łączenie szyn w torze, przy zachowaniu dobrych właściwości spoin. Dotychczasowe badania zużycia szyn w torze potwierdzają zakładaną trwałość eksploatacyjną, na ich podstawie przewiduje się jeszcze około roczny okres eksploatacji szyn w gatunku B1000 w lokalizacji Warszawa Nowe Bemowo, co stanowiłoby prawie dwu i półkrotne zwiększenie czasu użytkowania szyn w nowym gatunku stali w stosunku do standardowego gatunku R260. Ważnym czynnikiem mogącym decydować o zapotrzebowaniu rynkowym na szyny tramwajowe w gatunku B1000 są niższe koszty wytworzenia w warunkach polskiego hutnictwa w porównaniu do szyn obrabianych cieplnie. W oparciu o wstępne wyniki pomiarów eksploatacyjnych szyn tramwajowych zakłada się kontynuację współpracy z Tramwajami Warszawskimi S.A. polegającą między innymi na wprowadzeniu dalszych rozwiązań materiałowych mogących mieć zastosowanie w infrastrukturze torowisk.

Bibliografia

1. Sprawozdanie z badań Nr GJ-8/D/106/2013 – niepublikowane.
2. Polska Norma PN-EN 14811 – *Kolejnictwo. Tor. Szyny specjalne. Szyny rowkowe i związane z nimi profile konstrukcyjne*, marzec 2010.
3. Zygmunt T., Kasprowicz J., Żak S., *Stal szynowa w gatunku B1000 produkowana przez ArcelorMittal Poland S.A.*, „Hutnik” 2013, nr 10.
4. Żak S., Bartyzel J., Kasprowicz J., *Szyny kolejowe do torów o dużych obciążeniach produkowane w Hucie Katowice S.A.*, „Hutnik” 2001, nr 11.

Autorzy:

mgr inż. **Sylwester Żak** – ArcelorMittal Poland S.A.
 dr inż. **Tomasz Zygmunt** – ArcelorMittal Poland S.A.
 mgr inż. **Janusz Kasprowicz** – ArcelorMittal Poland S.A.
 inż. **Krzysztof Kozera** – Tramwaje Warszawskie

Novel steel grade for groove rail

In this article the origin and conditionings of the start of production grooved rails naturally cooled (without heat treatment) in a new steel grade are discussed. Results of mechanical properties, hardness, evaluation of microstructure, fracture toughness and others are presented. Received level of properties is related to the requirements of heat treated rails described in European standard EN14811. Selection of connection technology of rails using arc and thermite weld is also described.

Keywords: steel grade B1000, grooved rails, mechanical properties, thermite welding, electric arc welding, exploitation results