

Przydatność pomiarów odległości międzylamelarnej perlitu w ocenie jakości iglic ze stali R260

Małgorzata OSTROMĘCKA¹

Streszczenie

Artykuł przedstawia analizę przydatności pomiarów, odległości międzylamelarnej perlitu, w iglicach wykonanych ze stali R260 jako narzędzia wspomagającego ocenę jakości procesu kucia na gorąco. Badania przeprowadzono przy użyciu cyfrowego mikroskopu świetlnego. Artykuł przedstawia związek między morfologią perlitu a właściwościami mechanicznymi stali, wskazując na znaczenie ilościowej oceny mikrostruktury w kontekście kontroli procesu technologicznego iglic.

Słowa kluczowe: stal R260, perlit, odległość międzylamelarna, mikroskopia świetlna, twardość, kucie na gorąco

1. Wstęp

Stale szynowe gatunku R260 należą do grupy węglowych stali perlitycznych i znajdują szerokie zastosowanie w konstrukcjach kolejowych ze względu na korzystne połączenie wytrzymałości, twardości oraz odporności na zużycie [1]. Elementy infrastruktury kolejowej, takie jak szyny przejściowe i kształtowniki iglicowe, są wytwarzane w procesie kucia na gorąco obejmującym intensywne odkształcenie plastyczne w zakresie temperatur austenitycznych oraz kontrolowane chłodzenie po zakończeniu odkształcenia. Parametry tego procesu – w szczególności temperatura kucia, stopień odkształcenia oraz warunki chłodzenia, w istotny sposób determinują mikrostrukturę końcową, jej jednorodność oraz właściwości mechaniczne materiału, które bezpośrednio wpływają na trwałość eksploatacyjną elementów torowych [1, 15].

W praktyce kwalifikacyjnej iglic oraz szyn przejściowych rutynowo nie wymaga się bezpośredniej oceny mikrostruktury. Podstawowym narzędziem weryfikacji zgodności z wymaganiami normy PN-EN 16273 [14] są pomiary twardości, wykonywane na powierzchni tocznej, stopce oraz – w przypadku iglic – również na przekrojach poprzecznych [14]. Uzyskane wartości twardości umożliwiają ocenę jednorodności materiału, identyfikację lokalnych stref o zmienionych właściwościach mechanicznych oraz pośrednią ocenę poprawności przebiegu procesu technologicznego, w tym obróbki cieplno-plastycznej.

Jednocześnie powszechnie wiadomo, że twardość stali perlitycznych jest bezpośrednio powiązana z cechami mikrostrukturalnymi, w szczególności z odległością międzylamelarną perlitu, która zależy od warunków przemiany perlitycznej po zakończeniu odkształcenia plastycznego [1, 4, 18]. Zmiany tego parametru wpływają na mechanizmy umocnienia oraz odporność na zużycie, a jego wartość bywa wykorzystywana jako wskaźnik intensywności chłodzenia i jednorodności mikrostruktury po obróbce cieplno-plastycznej [15, 18].

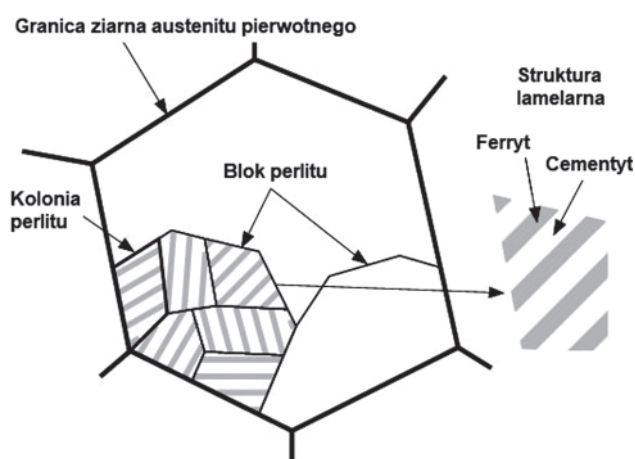
W typowym ujęciu metaloznawczym analiza mikrostruktury jest podstawą interpretacji właściwości mechanicznych wyrobów stalowych [1]. W przypadku elementów torowych, ze względów technologicznych i organizacyjnych, podejście to bywa jednak ograniczone do badań pośrednich – badań twardości. Z tego względu zasadne jest rozważenie, czy ilościowe pomiary odległości międzylamelarnej perlitu, wykonywane metodami mikroskopii świetlnej, która jest znacznie bardziej dostępna niż metoda mikroskopii skaningowej lub transmisyjnej, mogą stanowić uzupełniające narzędzie oceny prawidłowości procesu kucia na gorąco i przewidywalności właściwości mechanicznych stali R260, przy zachowaniu zgodności z wymaganiami normowymi dotyczącymi twardości [4, 14, 16].

Celem artykułu jest zatem analiza przydatności pomiarów odległości międzylamelarnej perlitu jako parametru mikrostrukturalnego wspomagającego ocenę jakości procesu wytwórczego iglic wykonanych ze stali R260, w odniesieniu do standardowo stosowanych badań twardości i kryteriów normowych.

¹ Dr inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Materiałów i Elementów Konstrukcji; e-mail: mostromecka@ikolej.pl.

2. Perlit – wprowadzenie teoretyczne

Aby właściwie ocenić właściwości mechaniczne stali torowych, istotne jest zrozumienie mikrostruktury perlitu, jego budowy oraz parametrów determinujących twardość i wytrzymałość materiału. Perlit jest mikrostrukturą eutektoidalną w stalach węglowych, złożoną z naprzemiennych lamel ferrytu i cementytu, tworzących kolonie o zróżnicowanej orientacji krystalograficznej. Kluczowymi parametrami kształtującymi właściwości stali perlitycznych są: odległość międzylamelarna (λ), wielkość kolonii oraz rozmiar ziaren austenitu pierwotnego, które w znacznym stopniu determinują twardość, wytrzymałość oraz odporność na zużycie elementów torowych [1]. Lamelną strukturę perlitu ilustruje rysunek 1 [19].



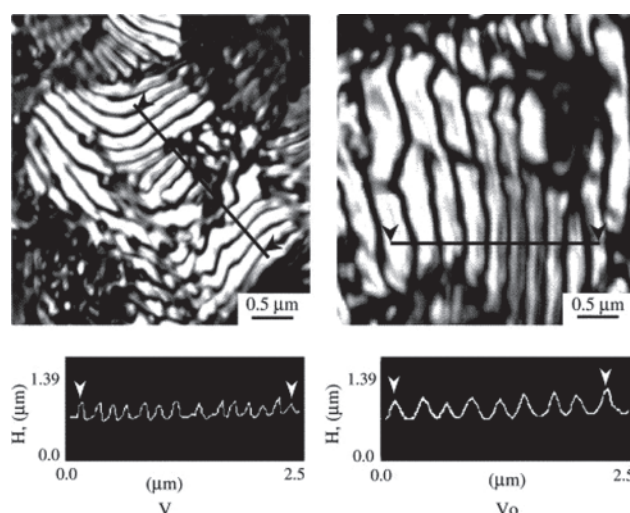
Rys. 1. Schemat mikrostruktury stali perlitycznej [19]

Morfologia perlitu w dużej mierze zależy od warunków kinetycznych przemiany austenitu podczas chłodzenia [10]. Przy niższej temperaturze przemiany i szybszym chłodzeniu powstają drobniejsze lamelle o mniejszej odległości międzylamelarnej, co wiąże się ze wzrostem twardości i wytrzymałości stali [1, 4, 11, 15]. Odległość międzylamelarna λ jest silnie skorelowana z twardością: większe λ oznacza rzadsze rozmieszczenie lameli cementytu, co osłabia blokowanie ruchu dyslokacji i prowadzi do niższej twardości [1].

Chociaż skład chemiczny stali, a w szczególności zawartość węgla, wpływa na udział cementytu, to w stalach bliskich eutektoidalnym, głównym czynnikiem kształtującym właściwości mechaniczne pozostaje geometria perlitu, a nie niewielkie różnice składu [8]. Istotny wpływ na odległość międzylamelarną λ i wielkość kolonii ma obróbka termomechaniczna: odkształcenie austenitu zwiększa gęstość dyslokacji i zmienia warunki zarodkowania, co przy odpowiednim chłodzeniu prowadzi do uzyskania drobniejszej morfologii perlitu i lepszych właściwości mechanicznych [8, 13]. W procesie kucia elementów torowych

kluczowe są trzy etapy – austenitizacja, odkształcenie i kontrolowane chłodzenie, a właściwe dobranie parametrów pozwala uzyskać jednorodny perlit o niskiej wartości λ , podczas gdy nieoptymalne warunki skutkują powstawianiem obszarów o grubszym perlicie i obniżonej twardości [8].

Ze względu na nanoskalowy charakter lameli, wiarygodny pomiar odległości między nimi (λ) wymaga technik o wysokiej rozdzielczości, takich jak SEM, TEM czy stereologia 3D [3, 4, 7] (rys. 2). Klasyczna mikroskopia optyczna o ograniczonej rozdzielczości pozwala głównie na identyfikację kolonii perlitu, natomiast precyzyjne wyznaczenie λ jest możliwe jedynie lokalnie, w obszarach o grubszej morfologii lamelarnej. Zastosowanie mikroskopii cyfrowej KEYENCE w powiększeniach 1000x i więcej umożliwia pomiar odległości lameli w najgrubszej części perlitu, co może stanowić wartościowy wskaźnik do oceny mikrostruktury szyny wspierając dalsze analizy porównawcze.



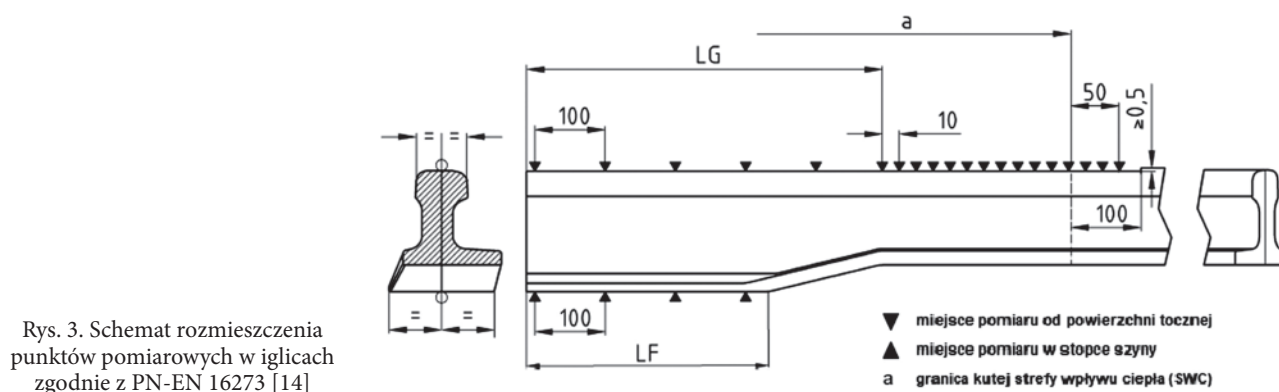
Rys. 2. Pomiar średniej odległości międzylamelarnej (λ) przedstawiony w artykule [4]

3. Metodyka badań

3.1. Badania twardości

Badania twardości przeprowadzono na przekuciach ze stali R260 obejmujących kształtowniki iglicowe, zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 16273 [14], określającej lokalizację i sposób pomiarów twardości w elementach torowych otrzymywanych w procesie kucia na gorąco.

Fragmenty reprezentatywne dla poszczególnych typów przekuć odcięto, a następnie zeszlifowano i wypolerowano, zapewniając odpowiednią jakość po-



Rys. 3. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych w iglicach zgodnie z PN-EN 16273 [14]

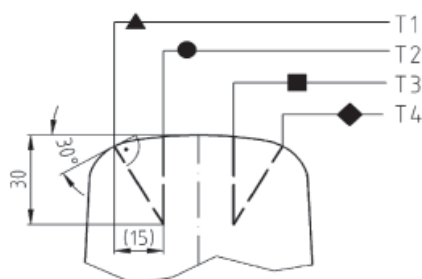
wierzchni pomiarowej. Pomiar twardości Brinella (HBW) wykonano w dwóch obszarach: na powierzchni tocznej oraz w obrębie stopki, przy użyciu twardościomierza Nexus 3200 (obciążenie 7355 N, czas 10 s, średnica kulki 5 mm).

Dodatkowo wykonano pomiary na przekrojach poprzecznych metodą Vickersa (HV) przy użyciu twardościomierza Falcon 459, co pozwoliło ocenić zmiany twardości w głąb przekroju i zidentyfikować potencjalne efekty procesu kucia na gorąco. Obciążenie wynosiło 294,3 N, czas 10 s.

Rozmieszczenie punktów pomiarowych określono zgodnie z PN-EN 16273, co zapewniło powtarzalność i porównywalność wyników między badanymi elementami (rys. 3).

Otrzymane wyniki twardości zestawiono z wymaganiami normy PN-EN 16273 oraz wartościami referencyjnymi dla stali perlitycznych typu R260. Interpretację danych przeprowadzono w kontekście wpływu procesu kucia na rozkład twardości oraz w odniesieniu do zależności między twardością a odległością międzylamelarną perlitu opisanych w literaturze mikrostrukturalnej.

Iglice również poddano pomiarom na przekrojach poprzecznych, gdzie stosowano metodę Vickersa (HV) (rys. 4), co umożliwiło ocenę zmian twardości w głąb przekroju oraz identyfikację potencjalnych efektów wynikających z procesu kucia na gorąco.



Rys. 4. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych na przekroju poprzecznym iglicy zgodnie z PN-EN 16273 [14]

4. Metodyka badań mikroskopowych i pomiarów

Mikrostruktura próbek iglic stali kolejowej R260 została zbadana za pomocą cyfrowego mikroskopu wielkoogniskowego Keyence VHX-900F przy powiększeniu 1000×. Próbki zostały przygotowane zgodnie z ogólnymi zasadami preparatyki zglądów metalograficznych: cięcie, szlifowanie, polerowanie i trawienie (nital 4%) w celu uwidocznienia struktury perlitu. Badaniom poddano wyłącznie obszary, w których lamelarna struktura perlitu była wyraźna przy zastosowanym powiększeniu – tj. miejsca umożliwiające jednoznaczne odczytanie kolejnych granic lameli cementytu i ferrytu. Oznacza to, że pomiary dotyczą lokalnych, najlepiej widocznych fragmentów mikrostruktury, a nie reprezentatywnej średniej dla całego przekroju.

Odległość międzylamelarną perlitu (*interlamellar spacing*, λ) obliczono metodą liniowej liczby przecięć lamel (*test line method*) [4, 18], zgodnie z powszechnie przyjętą procedurą w analizie mikrostrukturalnej materiałów perlitycznych. Uzyskane wartości lokalne posłużyły do określenia rozkładu oraz wartości średniej odległości międzylamelarnej perlitu w badanym materiale. W każdej analizowanej mikrostrukturze narysowano linię prostą do lameli perlitu o zmierzonej długości L , a następnie policzono liczbę N przeciętych granic lamel. Odległość międzylamelarną obliczono ze wzoru:

$$\lambda_m = L / N,$$

gdzie λ_m jest lokalną, zmierzoną odległością międzylamelarną perlitu w danym polu pomiarowym. Taka metoda – polegająca na liczbie przecięć lamel przez linię testową – jest analogiczna do klasycznych metod analizujących mikrostrukturę perlitu i była szeroko opisana w literaturze metaloznawczej. Dokładność wyznaczania średniej odległości międzylamelar-

nej metodami stereologicznymi oraz źródła błędów pomiarowych zostały szeroko omówione m.in. w [2].

Ze względu na losową orientację kolonii perlitu względem linii pomiarowej, zmierzone wartości odległości międzylamelarnej λ_m zostały skorygowane współczynnikiem zaproponowanym przez Vander Voorta [18], zgodnie z zależnością:

$$\lambda = \lambda_m / 2.$$

Skorygowane wartości λ są traktowane jako przybliżenie rzeczywistej odległości międzylamelarnej.

5. Wyniki

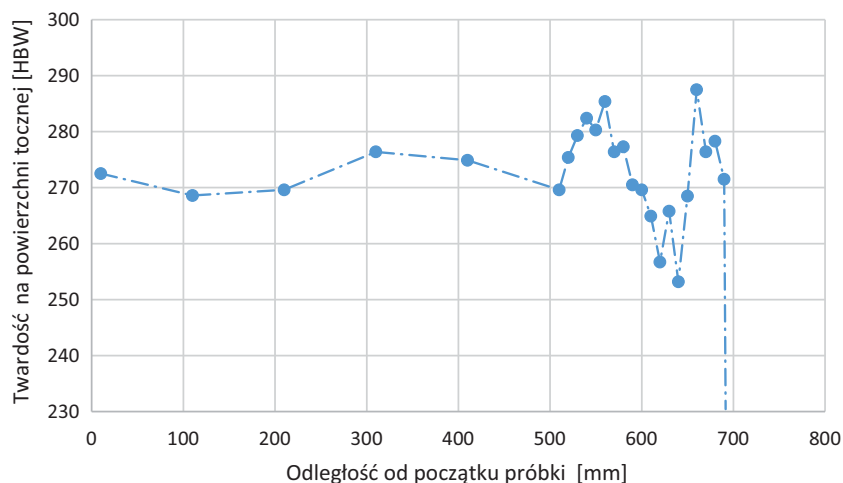
5.1. Wyniki badań twardości

Rozkład twardości na powierzchni tocznej iglicy wykazuje pewne fluktuacje wzdłuż próbki, przy czym wartości twardości HBW mieszczą się w zakresie od około 253 do 283 HBW. W stopce iglicy średnia twar-

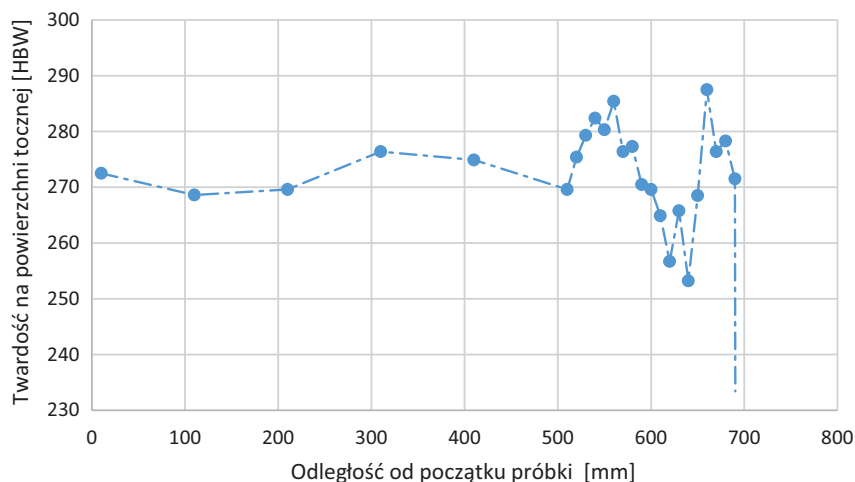
dość wyniosła odpowiednio 275,13 oraz 274,17 HBW dla dwóch badanych próbek. Pomiar twardości metodą Vickersa na przekrojach poprzecznych ujawnił zróżnicowanie wartości w poszczególnych punktach pomiarowych, przy czym największe twardości obserwowano w okolicy powierzchni tocznej, osiągając wartości do około 289 HV30, natomiast najniższe wyniki, rzędu 259 HV30, zarejestrowano w rejonach bliżej rdzenia główki szyny próbki. Ogólne rozkłady twardości wykazują względną jednorodność z lokalnymi spadkami i wzrostami, co wskazuje na pewną heterogeniczność materiału wzdłuż iglicy. Szczegółowe wyniki przedstawiono na rysunkach 5–9.

5.2. Wyniki pomiarów odległości międzylamelarnej perlitu

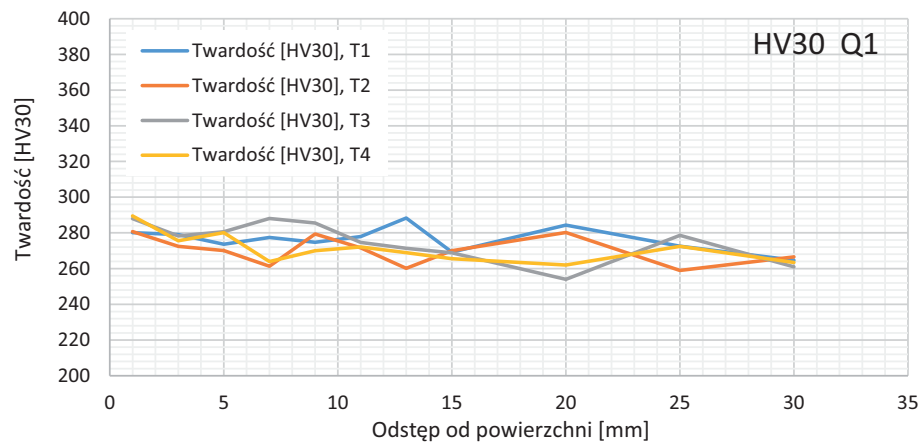
Wybrane i obserwowane mikrostruktury przedstawiono na rysunku 10. Tablica 1 zaś zawiera wyniki pomiarów długości linii L, liczby przeciętych naniesionych granic lamel N i obliczone lokalne odległości międzylamelarne perlitu λ .



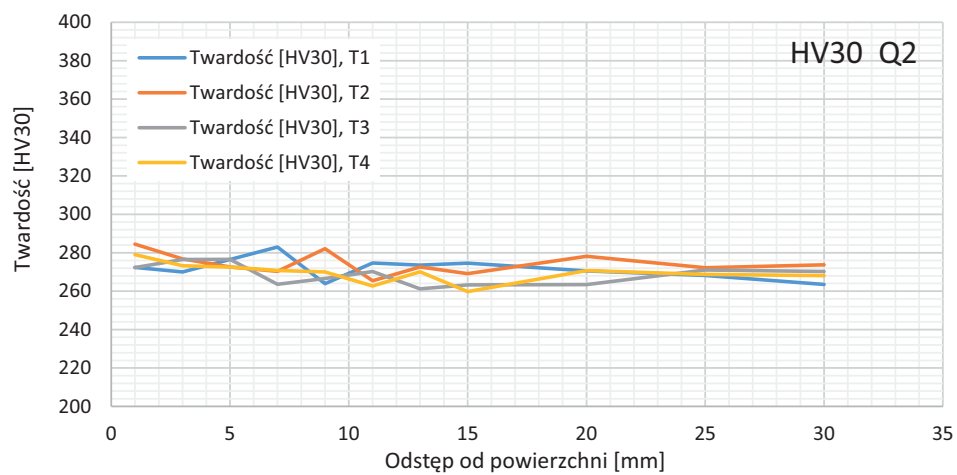
Rys. 5. Rozkład twardości na powierzchni tocznej w Iglicy 1 [opracowanie własne]



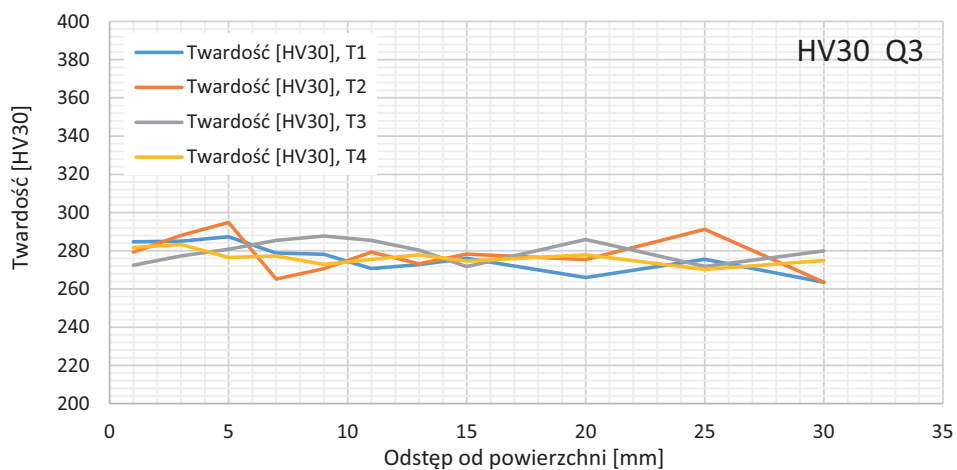
Rys. 6. Rozkład twardości na powierzchni tocznej w Iglicy 2 [opracowanie własne]



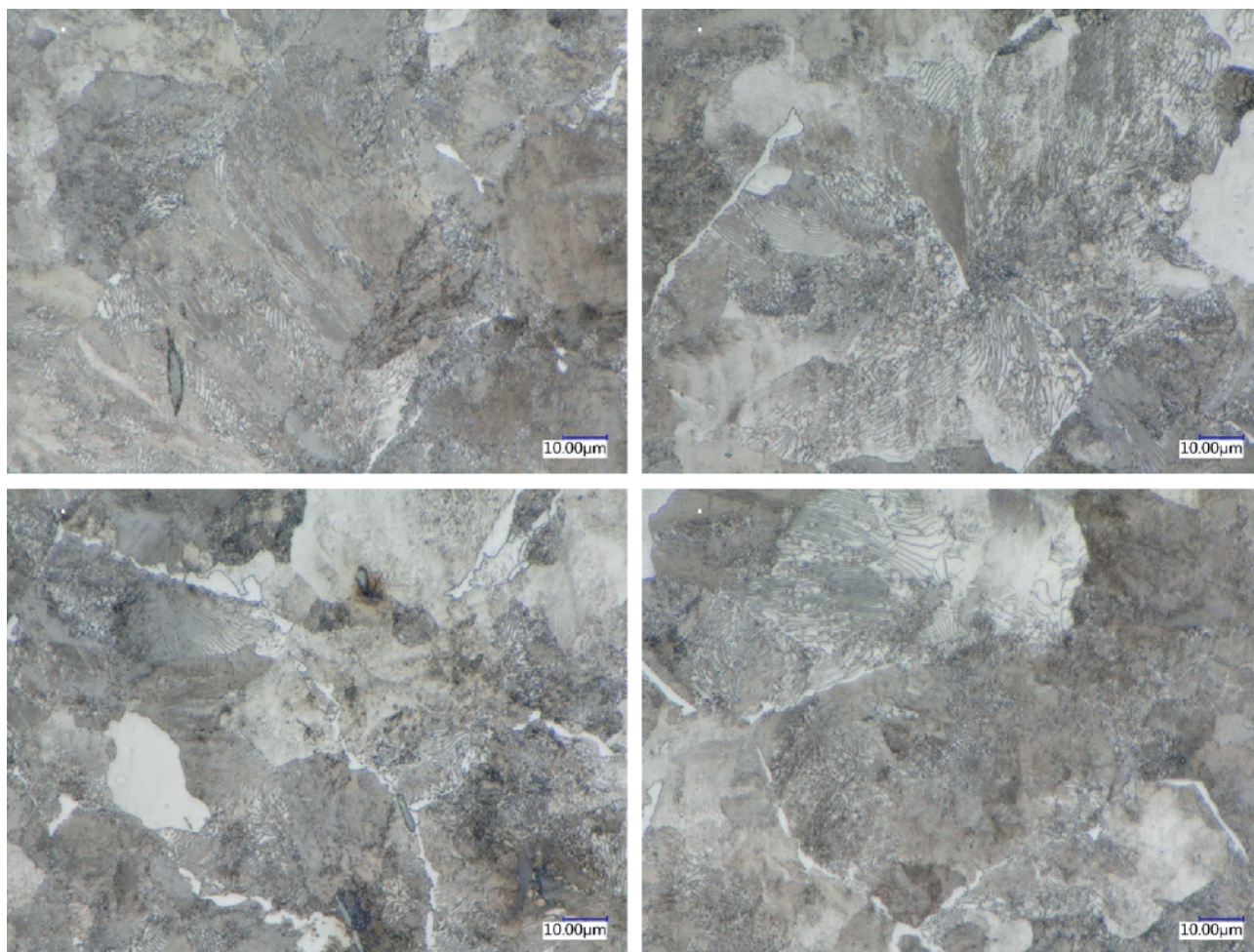
Rys. 7. Pomiar twardości w przekroju Q1 Iglicy 1 [opracowanie własne]



Rys. 8. Pomiar twardości w przekroju Q2 Iglicy 1 [opracowanie własne]



Rys. 9. Pomiar twardości w przekroju Q3 Iglicy 1 [opracowanie własne]



Rys. 10. Obserwowane przykładowe mikrostruktury [opracowanie własne]

Tablica 1

Wyniki analizy odległości międzylamelarnej perlitu

Nr	L [μm]	N	λ_m [μm] = L / N	λ [μm] po korekcie
1	62,59	81	0,77	0,39
2	8,09	12	0,67	0,34
3	7,55	8	0,94	0,47
4	16,11	16	1,01	0,50
5	12,26	17	0,72	0,36
6	11,66	12	0,97	0,49
7	16,02	17	0,94	0,47
8	11,6	14	0,83	0,41
9	4,51	9	0,50	0,25
10	13,32	22	0,61	0,30
11	37,84	55	0,69	0,34
12	22,35	33	0,68	0,34

Nr	L [μm]	N	λ_m [μm] = L / N	λ [μm] po korekcie
13	36,34	59	0,62	0,31
14	13,32	21	0,63	0,32
15	21,27	31	0,69	0,34
16	5,78	9	0,64	0,32
17	15,16	22	0,69	0,34
18	37,46	53	0,71	0,35
19	3,5	6	0,58	0,29
20	3,28	6	0,55	0,27
21	8,24	13	0,63	0,32
22	10,46	19	0,55	0,28
23	6,66	10	0,67	0,33
24	10,28	18	0,57	0,29
25	5,81	9	0,65	0,32
26	26,96	29	0,93	0,47

Nr	L [μm]	N	λ_m [μm] = L / N	λ [μm] po korekcie
27	7,27	10	0,73	0,36
28	12,43	9	1,38	0,69
29	5,36	10	0,54	0,27
30	3,99	6	0,67	0,33
31	11,87	15	0,79	0,40
32	3,74	6	0,62	0,31
33	14,92	18	0,83	0,41
34	10,54	12	0,88	0,44
35	10,51	18	0,58	0,29
36	10,69	18	0,59	0,30
37	9,01	17	0,53	0,27
38	5,68	10	0,57	0,28
39	5,33	11	0,49	0,24
40	4,74	9	0,53	0,26
41	10,15	14	0,73	0,36

[Opracowanie własne].

Gdzie: L – długość linii pomiarowej [μm], N – liczba przeciętych lamel, λ_m – odległość międzylamelarna zmierzona metodą linii, λ – odległość międzylamelarna skorygowana według Vander Voorta.

Na podstawie wszystkich 41 indywidualnych pomiarów dokonano oceny statystycznej uzyskanych wyników (tabl. 2).

Tablica 2

Ocena statystyczna uzyskanych wyników

Statystyka	λ_m [μm]	λ [μm] (skorygowane)
Średnia wartość	0,71	0,35
Mediana	0,67	0,33
Minimum	0,49	0,24
Maximum	1,38	0,69

[Opracowanie własne].

6. Dyskusja wyników

6.1. Wyniki badań twardości i ich zgodność z normami

Uzyskane wyniki pomiarów twardości Brinella (253–283 HBW) oraz Vickersa (259–289 HV) wskazują, że większość wyników oraz wartości średnie mieszczą się w zakresie normowym, jednak lokalnie zarejestrowano pojedyncze obszary o obniżonej twar-

dości (do 253 HBW). Obserwowane lokalne obniżenie twardości może być związane z obecnością grubszych kolonii perlitu lub lokalnych niejednorodności mikrostruktury. Średnia twardość stopki wynosząca 274–275 HBW, potwierdza skuteczność procesu kucia na gorąco w osiągnięciu pożądanego poziomu umocnienia wynikającego z rozdrobnienia struktury perlitycznej w wyniku dynamicznej rekryształizacji austenitu oraz naturalnego chłodzenia.

Lokalne fluktuacje twardości (spadki do 253 HBW na powierzchni tocznej) wskazują na charakterystyczną heterogeniczność dla kształtowników kutek ze stali szynowej R260. Gradient twardości w przekroju poprzecznym – wyższe wartości HV w powierzchniowej warstwie (do 289 HV30) i niższe w rdzeniu (259 HV30), odzwierciedla naturalny profil termokinetyczny chłodzenia po odkuciu, gdzie zewnętrzne strefy szybciej tracą ciepło, sprzyjając tworzeniu drobniejszego perlitu [1, 4, 11].

6.2. Wyniki pomiarów odległości międzylamelarnej perlitu (λ)

Statystyczna analiza 41 lokalnych pomiarów odległości międzylamelarnych po zastosowaniu korekty Vander Voort'a ujawniła średnią wartość $\lambda = 0,35 \mu\text{m}$ (mediana $0,33 \mu\text{m}$), z zakresem od $0,24 \mu\text{m}$ do $0,69 \mu\text{m}$. Szeroki rozrzut wartości świadczy o istotnej heterogeniczności morfologii perlitu, typowej dla stali R260 po kuciu na gorąco i swobodnym chłodzeniu. Najgrubsze kolonie ($\lambda = 0,69 \mu\text{m}$) zlokalizowane w centralnych strefach próbek odzwierciedlają wolniejsze chłodzenie rdzenia.

Metoda liniowa (liczba przecięć lameli na jednostkę długości linii testowej prostopadłej do lameli) zapewniła wiarygodność danych. Wyniki odnoszą się do struktur możliwych do analizy przy powiększeniu $1000\times$ i pozostają spójne z danymi literaturowymi uzyskiwanymi dla stali szynowych zbliżonych składem do stali R260 (tabl. 3). W zestawieniu ujęto również dane dla stali o wyższej klasie wytrzymałości w celu pokazania skali wpływu rozdrobnienia perlitu na twardość [17].

Tablica 3 przedstawia zestawienie wybranych danych literaturowych dotyczących zależności odległości międzylamelarnej perlitu (λ) i twardości dla stali kolejowych i podobnych stopów. Porównanie własnych wyników z danymi literaturowymi pozwala ocenić skalę rozdrobnienia perlitu i jego wpływ na właściwości mechaniczne.

Wyniki Herian [9] wskazują, że dla stali szynowej po walcowaniu, średnia λ wynosi $0,278 \mu\text{m}$ przy twardości $\approx 296 \text{ HV}$ (285–290 HB), co jest nieco mniejsze od obserwowanej w niniejszych badaniach wartości $\lambda = 0,35 \mu\text{m}$. Badania Fei [6] na stali U75V wykazały $\lambda = 0,263 \mu\text{m}$ przy twardości $\approx 330 \text{ HV}$ (315–320 HB),

co odzwierciedla wyższy stopień rozdrobnienia perlitu i wyższą twardość stali.

Tablica 3

Porównanie skorygowanych wartości odległości międzylamelarnej perlitu (λ) z danymi literaturowymi

Źródło / Stan materiału	λ średnia	Zakres λ	Twardość (HB/HV)
Własne / R260, kucie na gorąco	0,35	0,24–0,69	259–289 HV
Herian [9]/ stal szynowa, po walcowaniu	0,278	–	≈ 296 HV (285–290 HB)
Fei [6] / U75V rail	0,263	–	≈ 330 HV (315–320 HB)
Modi [12] / C0,65% steel,	0,54–0,79	–	220–270 HV
Toribio [17] / eutektoid wire/rail-like	0,12	0,08–0,20	350–400 HV
Ferreira [5]/R260Mn badania laboratoryjne	0,15	–	292 HV

[Opracowanie własne].

Ferreira oraz współautorzy [5] podają dla R260Mn średnią $\lambda = 0,15 \mu\text{m}$ przy twardości około 292 HV. Należy jednak podkreślić, że materiały badane przez tych autorów były poddawane specyficznym, kontrolowanym warunkom szybkiego nagrzewania i chłodzenia w warunkach laboratoryjnych, co różni się od klasycznego procesu kucia na gorąco i może wpłynąć na mikrostrukturę oraz wartości twardości i odległości międzylamelarnej.

Modi O.P. [12] oraz Toribio J. [17] przedstawiają inne klasy stali, wykazując szeroki zakres λ (0,12–0,79 μm) przy różnym stopniu wytrzymałości i twardości, co potwierdza wpływ rozdrobnienia perlitu na właściwości mechaniczne. Porównanie własnych wyników z literaturą pokazuje, że lokalne fluktuacje twardości i heterogeniczność mikrostruktury w badanych iglicach R260 są zgodne z obserwacjami dla stali perlitycznych w innych pracach naukowych.

7. Podsumowanie

W artykule przeanalizowano przydatność pomiarów odległości międzylamelarnej perlitu jako parametru mikrostrukturalnego wspomagającego ocenę jakości procesu kucia na gorąco iglic wykonanych ze stali R260. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej oraz standardowych pomiarów twardości zgodnych z wymaganiami normy PN-EN 16273.

Uzyskane wyniki twardości Brinella i Vickersa potwierdziły zgodność badanych iglic z wymaganiami normy PN-EN 16273 dla stali R260 oraz wykazały

charakterystyczny gradient twardości w przekrojach poprzecznych, wynikający z niejednorodnych warunków chłodzenia po procesie kucia na gorąco. Równoległe obserwacje mikrostruktury ujawniły zróżnicowaną morfologię perlitu, obejmującą obszary o drobniejszym oraz grubszym układzie lamel.

Pomiary odległości międzylamelarnej perlitu wykonano metodą liniową wyłącznie w tych obszarach mikrostruktury, w których lamelarna budowa była jednoznacznie rozpoznawalna przy zastosowanym powiększeniu mikroskopii świetlnej. Skorygowane wartości λ należy zatem traktować jako charakterystykę lokalnych fragmentów mikrostruktury, a nie jako reprezentację średniej odległości międzylamelarnej całego przekroju materiału.

Pomimo tych ograniczeń, zestawienie wyników pomiarów mikrostrukturalnych z rozkładem twardości wskazuje na spójność obserwowanych trendów i potwierdza istnienie zależności pomiędzy morfologią perlitu a właściwościami mechanicznymi iglic kutek ze stali R260.

8. Wnioski

1. Badania wykazały, że większość wyników oraz wartości średnie mieszczą się w zakresie normowym, jednak lokalnie występują pojedyncze obszary o obniżonej twardości (do 253 HBW), co wskazuje na istnienie lokalnych niejednorodności mikrostrukturalnych. W przypadku badania twardości metodą Vickersa, obserwowany w przekroju poprzecznym rozkład twardości jest typowy dla elementów kutych na gorąco i chłodzonych w sposób niekontrolowany, z wyższymi wartościami w strefach powierzchniowych i niższymi w rdzeniu.
2. Mikrostruktura perlitu wykazuje wyraźną heterogeniczność, co znajduje odzwierciedlenie zarówno w lokalnych zmianach twardości, jak i w zróżnicowaniu odległości międzylamelarnej.
3. Pomiary odległości międzylamelarnej perlitu wykonane metodą mikroskopii świetlnej odnoszą się wyłącznie do wybranych, najlepiej widocznych fragmentów mikrostruktury, najczęściej o grubszej morfologii lamelarnej i nie stanowią pełnej charakterystyki całego materiału. Uzyskane wartości należy interpretować jako wskaźnik lokalnych warunków chłodzenia po procesie kucia, a nie jako średnią globalną dla całej objętości iglicy.
4. Pomimo ograniczeń metody, pomiary λ mogą stanowić użyteczne narzędzie wspomagające ocenę jakości procesu kucia na gorąco. W szczególności umożliwiają porównania między seriami produkcyjnymi, identyfikację obszarów o potencjalnie niejednorodnej mikrostrukturze oraz interpretację lokalnych odchyleń twardości od wartości średnich.

5. Zastosowanie ilościowej oceny mikrostruktury perlitu jako uzupełnienia standardowych badań twardości zwiększa czułość kontroli jakości iglic kutek na gorąco i może pełnić rolę narzędzia porównawczego i diagnostycznego przy analizie wpływu zmian parametrów kucia i chłodzenia na jednorodność mikrostruktury stali R260.

Literatura

1. Bhadeshia H.K.D.H.: Honeycombe R.W.K.: *Steels: Microstructure and Properties*, 4th ed., Butterworth-Heinemann, 2017.
2. Czarski A., Matusiewicz P.: *Some aspects of estimation accuracy of mean true interlamellar spacing*, Metallurgy and Foundry Engineering, 38(2), 2012, WWW <https://doi.org/10.7494/mafe.2012.38.2.133> [dostęp 07.01.2026].
3. Dey I., Ghosh C., Saha S.: *Effects of cooling rate and strain on austenite decomposition during thermo-mechanical processed pearlitic steel*, JMR&T, 2019, 8, 2685–2698.
4. Elwazri A.M., Wanjara P., Yue S.: *Measurement of pearlite interlamellar spacing in hypereutectoid steels*, Materials Characterization, 54 (2005) 473–478, WWW <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2005.02.002> [dostęp 07.01.2026].
5. Ferreira V. Mattos et al.: *Microstructure development of pearlitic railway steels subjected to different thermomechanical treatments*, TU Delft Repository, 2022.
6. Fei J. et.al.: *Research on the effect of pearlite lamellar spacing on rolling contact wear behavior of U75V rail steel*, Metals, 2023, 13(2), art. 237.
7. García-Caballero F., Capdevila C., de Andrés C.: *Modeling of the interlamellar spacing of isothermally formed pearlite in a eutectoid steel*, Scripta Materialia, 2000, 42(6), 537–542.
8. Hamada D., Sasaki M., Ueda H.: *Noguchi. Fatigue limit evaluation considering crack initiation for lamellar pearlitic steel*, Procedia Engineering, 10. 2011, 1467–1472, WWW <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.245> [dostęp 07.01.2026].
9. Herian J., Aniolek K.: *The structure and properties of steel with different pearlite morphology and its resistance to abrasive wear*, Archives of Materials Science and Engineering, 2008, 31(2), 83–86.
10. Jabłońska M. et.al.: *Advanced heat treatment of pearlitic rail steel*, Materials, 2023, 16(19).
11. Khan, A.R. et.al.: *Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties in the CGHAZ of electroslag welded pearlitic rail steels*, Metals, 2019, 9(10), 1070.
12. Modi O.P. et al.: *Effect of interlamellar spacing on the mechanical properties of 0.65% C steel*. Materials Characterization, 46(4), 347–352 (2001). DOI: 10.1016/S1044-5803(00)00113.
13. Nikas D.: *Influence of combined thermal and mechanical loadings on pearlitic steel microstructure in railway wheels and rails*. PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, 2018.
14. PN-EN 16273: Railway applications – Measurement of hardness in rails and components.
15. Porter D. A., Easterling K.E., Sherif M.: *Phase Transformations in Metals and Alloys*, 3rd ed., CRC Press, 2009.
16. Solano-Álvarez W., Bhadeshia H. K.D.: *Rails – microstructure, toughness and fatigue*, Progress in Materials Science, 146 (2024), 101313.
17. Toribio J., Ovejero E.: *Microstructure evolution in pearlitic steels under fatigue*, Materials Science and Engineering A, 1997, 234–236, 579–582, WWW [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00257-5](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00257-5) [dostęp 07.01.2026].
18. Vander Voort G.F.: *The interlamellar spacing of pearlite*, Practical Metallography, 52 (2015) 466–475.
19. Zhang G., Enomoto M.: *Interlamellar spacing of pearlite in a near-eutectoid Fe-C alloy measured by serial sectioning*, ISIJ International, 2009, 49(1), 56–62.