

## Szyny o mikrostrukturze bainitycznej

Michał SZYMAŃSKI<sup>1</sup>

### Streszczenie

W artykule będącym przeglądem literatury opisano bainit jako przykład mikrostruktury stali, która z powodzeniem może być stosowana do produkcji szyn kolejowych. Porównano kluczowe parametry, jakie muszą spełniać szyny kolejowe: odporność na zużycie ścierne, odporność na złuszczenie, obecność białej warstwy dla stali bainitycznej i perlitycznej. Opisano istotną rolę austenitu szczątkowego i procesu odpuszczania w kształtowaniu właściwości mechanicznych szyn o mikrostrukturze bainitycznej.

**Słowa kluczowe:** bainit, szyny kolejowe, biała warstwa, zużycie ścierne, austenit szczątkowy, odpuszczanie

### 1. Wstęp

Intensywny rozwój kolejnictwa wymaga zastosowania infrastruktury o coraz lepszych parametrach wytrzymałościowych i zwiększenia m.in. wytrzymałości szyn, co umożliwi jazdę coraz cięższych pociągów z coraz większą prędkością. Tradycyjne szyny stosowane w kolejnictwie mają mikrostrukturę perlityczną. Dobór odpowiedniego składu chemicznego i procesu obróbki umożliwia uzyskanie wytrzymałości wynoszącej około 1300 MPa, niestety przy obciążeniach przekraczających 1180 MPa odporność na kruche pękanie jest bardzo mała [1].

Rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie szyn o mikrostrukturze bainitycznej (szyny tego typu po raz pierwszy zastosowano w 1980 roku). Szyny bainityczne mogą osiągnąć dużą wytrzymałość (wynoszącą do 1400 MPa) oraz ciągliwość (od 15 do 18%) bez spadku odporności na kruche pękanie. Cechują się także większą odpornością na zmęczenie, jednak mają mniejszą odporność na zużycie niż szyny perlityczne. Zwiększenie zawartości chromu lub innych dodatków stopowych pozwoli zwiększyć odporność na zużycie ścierne szyn bainitycznych, dzięki czemu mogą one zastąpić szyny perlityczne na liniach kolejowych wysoko obciążonych [1–4].

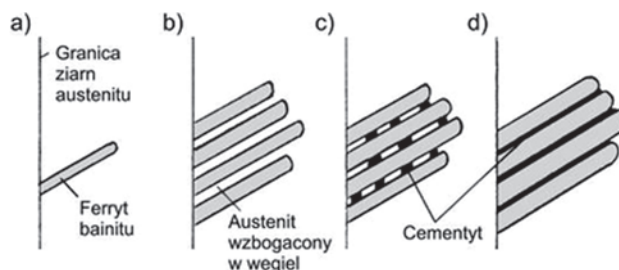
### 2. Mikrostruktura bainityczna

Bainit jest to mikrostruktura powstająca w wyniku przemiany bainitycznej. Ta przemiana zawiera

zarówno elementy przemiany dyfuzyjnej, jak i bezdyfuzyjnej. Bainit jest mieszaniną dyspersyjnych węglików oraz ferrytu przesyconego węglem. Tworzy się w temperaturach niższych niż temperatura najmniejszej trwałości austenitu. Początkiem przemiany jest utworzenie się zarodków ferrytu na granicy ziaren austenitu. Następnie z ferrytu wydzielają się dyspersyjne cząstki węglików. Wyróżnia się dwa rodzaje bainitu: górny i dolny [5–7].

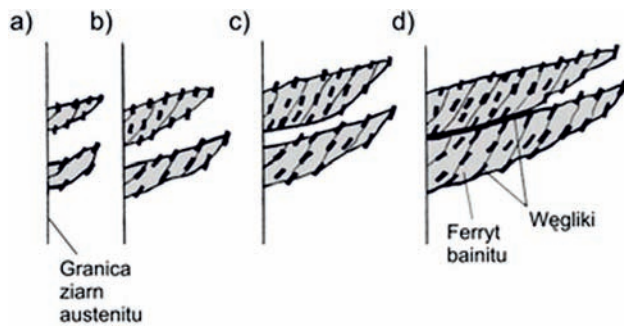
Bainit górny (rys. 1) powstaje w zakresie temperatur 550–400°C. Składa się z cienkich, równoległych płytek ferrytu z nieregularnymi wydzieleniami węglików i charakteryzuje się słabą wytrzymałością, ciągliwością i odpornością na pękanie [5–7].

Bainit dolny (rys. 2) powstaje w temperaturze poniżej 400°C i składa się z listwowego ferrytu (zbliżonego wyglądem do martenzytu) oraz węglików w kształcie równoległych płytek. Cechuje się wysoką twardością, odpornością na ścieranie i pękanie oraz ciągliwością [5–7].



Rys. 1. Schemat powstawania bainitu górnego: a), b), c), d) kolejne etapy przemiany [7]

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

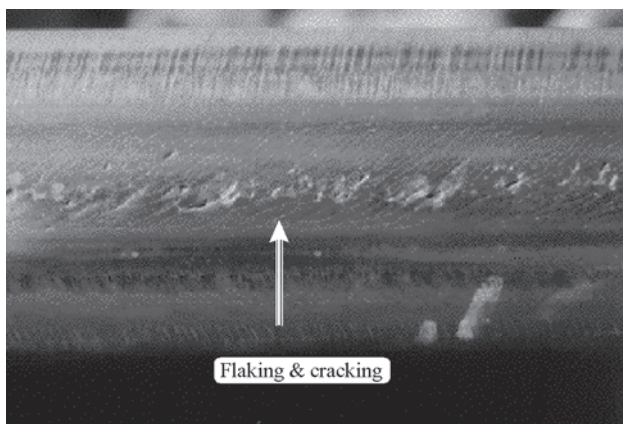


Rys. 2. Schemat powstawania bainitu dolnego: a), b), c), d) kolejne etapy przemiany [7]

Jeżeli stal o podwyższonej zawartości krzemu bądź aluminium będzie poddana izotermicznemu procesowi niskotemperaturowej bainityzacji, można otrzymać tzw. nanobainit, czyli materiał o strukturze nanokrystalicznego bainitu. Składa się on z nanometrycznych płytek ferrytu bainitycznego, które są rozdzielone cienkimi warstwami austenitu szcążkowego wzbogaconego w węgiel. Dodatek aluminium lub krzemu hamuje proces wydzielania cementytu podczas bainityzacji, dlatego struktura nanobainitu jest bezwęglkowa. Właściwości mechaniczne nanobainitu są zbliżone do stali po hartowaniu martenzytycznym i niskim odpuszczaniu [8–12].

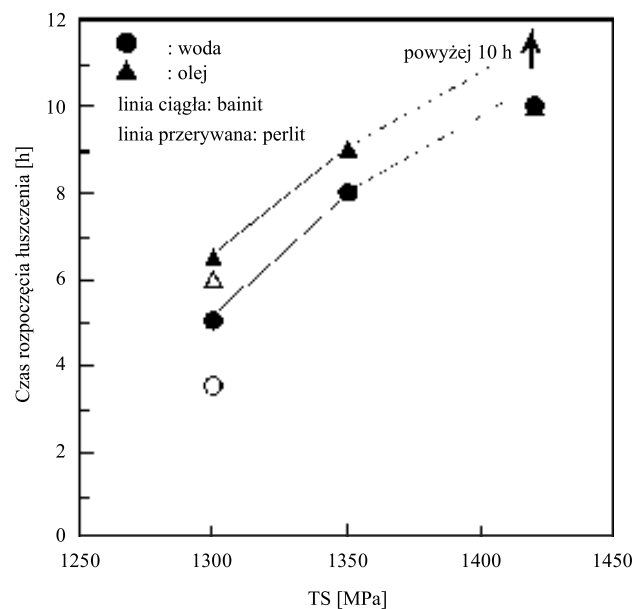
### 3. Odporność na złuszczenie się

W trakcie eksploatacji linii kolejowej mogą pojawić się złuszczenia na bocznej stronie główki szyny, w miejscu wygięcia szyny po wewnętrznej stronie toru kolejowego (rys. 3). Szyna złuszcza się z powodu zmęczenia wywołanego obecnością sił bocznych, które powstają, kiedy kierunek kół poruszającego się pociągu nie jest tożsamy z kierunkiem wygięcia się szyn na zakrętach – dochodzi wtedy do ześlizgu koła, co jest główną przyczyną łuszczenia [1].



Rys. 3. Widok złuszczenia się szyny kolejowej [1]

Jak wykazały badania [1], szyny o mikrostrukturze bainitycznej odznaczają się lepszą odpornością na złuszczenie się, w porównaniu do szyn o mikrostrukturze perlitycznej, zarówno wtedy, kiedy lubrykantem jest woda, jak i olej (rys. 4). Im większa wytrzymałość szyn, tym dłuższy czas inicjowania złuszczenia. Szyna bainityczna o wytrzymałości 1400 MPa cechuje się ponad dwukrotnie większą odpornością na złuszczenie niż szyna perlityczna o wytrzymałości 1300 MPa [1].

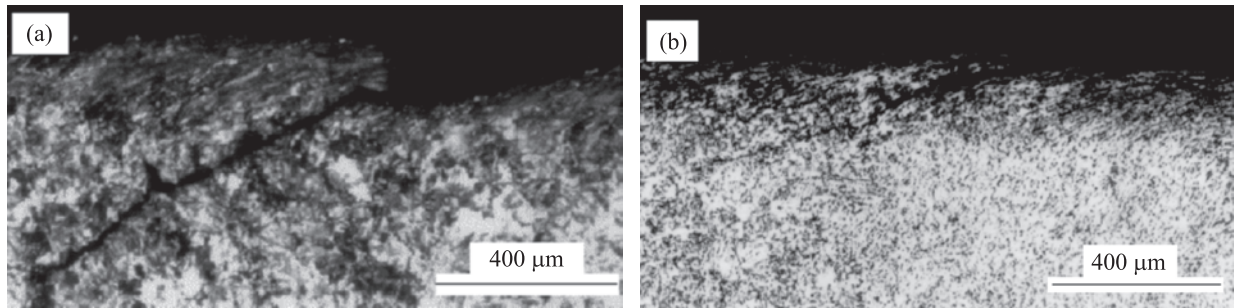


Rys. 4. Odporność na złuszczenie się stali bainitycznej i perlitycznej [1]

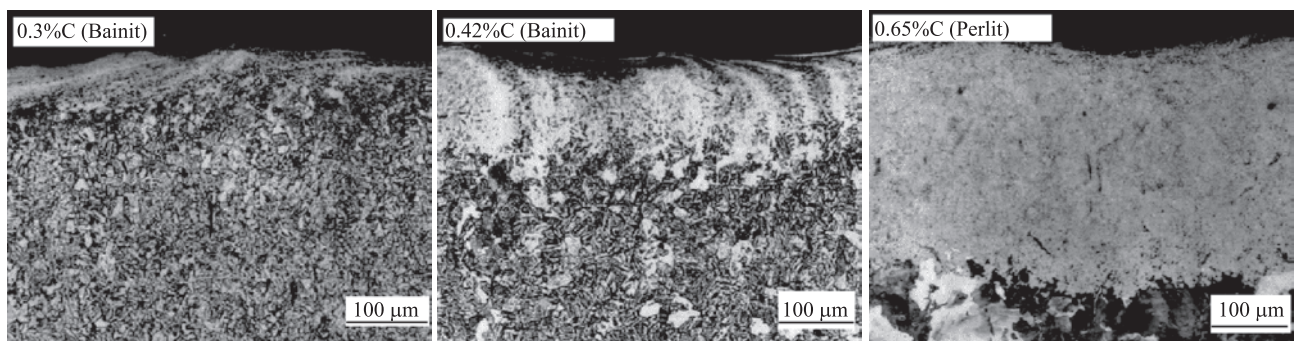
Jak wykazały badania mikrostruktury przekrojów po badaniu odporności na złuszczenie, stal perlityczna uległa plastycznemu płynięciu – wyraźnie widoczne są pęknięcia, stal bainityczna zaś tylko w nieznacznym stopniu uległa plastycznemu płynięciu – nie zauważono żadnego istotnego pęknięcia (rys. 5).

### 4. Biała warstwa

Tarcie kół o szyny może spowodować wzrost temperatury w szynie powyżej temperatury austenitizacji żelaza. W wyniku tego procesu na powierzchni szyny może dojść do powstania tzw. białej warstwy o strukturze martenzytycznej (rys. 6). Krucha biała warstwa jest przyczyną wielu wad w szynach kolejowych, w szczególności pęknięć między warstwą a rdzeniem materiału. Grubość białej warstwy zależy od zawartości węgla w stali (im więcej węgla, tym grubsza warstwa) i nie zależy od mikrostruktury [1, 13].

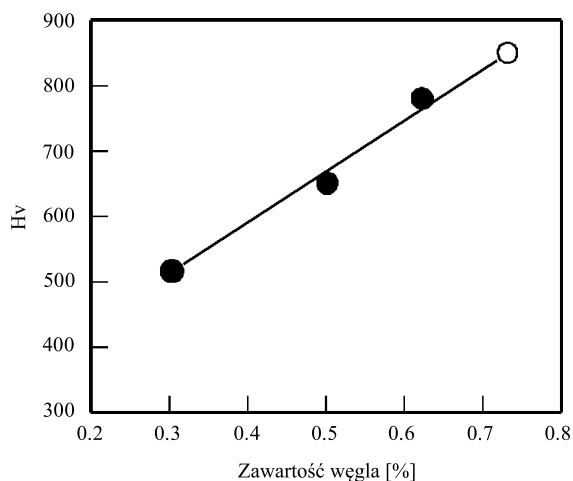


Rys. 5. Mikrostruktura przekrojów próbek po badaniu odporności na złuszczenie [1]; a) perlit, b) bainit



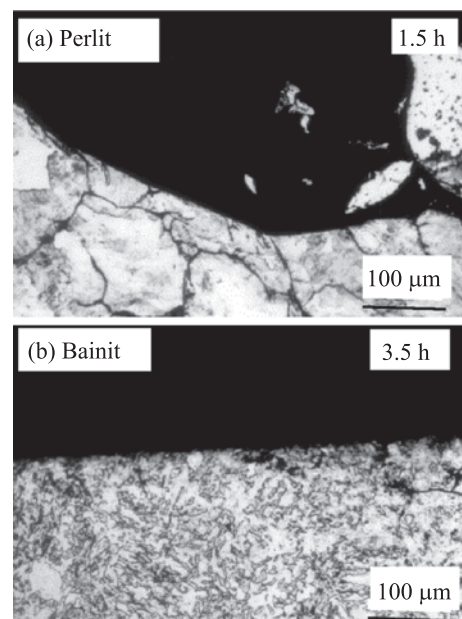
Rys. 6. Mikrostruktura przekrojów próbek w zależności od zawartości węgla z widoczną białą warstwą [1]

Stale o niższej zawartości węgla charakteryzują się wyższą temperaturą austenitizacji żelaza, a co za tym idzie – cieńszą białą warstwą. Szyny o mikrostrukturze bainitycznej i niskiej zawartości węgla tworzą cienką białą warstwę o niskiej twardości (twardość martenzytu w dużym stopniu zależy od zawartości węgla, co pokazuje rysunek 7). Z tego względu propagacja pęknięć zmęczeniowych powstałych w takiej stali w miejscu styku białej warstwy i rdzenia szyny jest tłumiona [1, 13].



Rys. 7. Zależność między zawartością węgla w białej warstwie a jej twardością [1]

Rysunek 8 przedstawia mikrostrukturę przekrojów próbek po badaniu odporności na łuszczenie. W przypadku stali perlitycznej widoczne są pęknięcia na styku białej warstwy i rdzenia materiału, w stali bainitycznej zaś pęknięć jest zdecydowanie mniej.

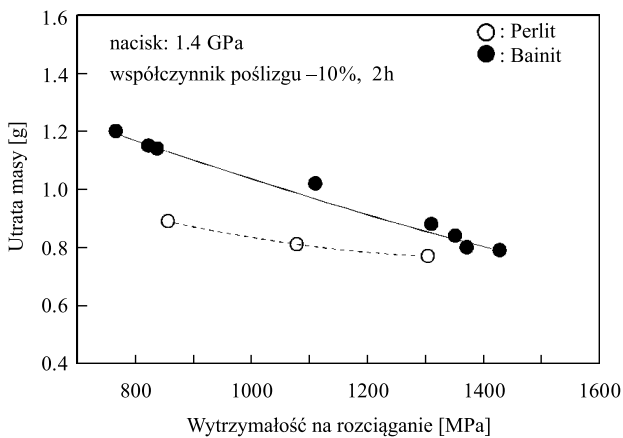


Rys. 8. Mikrostruktura próbek z białą warstwą po badaniu odporności na łuszczenie [1]



## 5. Odporność na zużycie przez tarcie

Przeprowadzone badania [1] dotyczące odporności na zużycie przez tarcie pokazały, że szyny perlityczne mają wyraźnie lepszą odporność od szyn bainitycznych o takich samej wytrzymałości (rys. 9). Im większa wytrzymałość, tym różnice w odporności ściernej między dwoma rodzajami stali maleją. Stal bainityczna o wytrzymałości 1400 MPa ma bardzo podobną odporność jak stal perlityczna o maksymalnej możliwej wytrzymałości 1300 MPa.



Rys. 9. Zależność odporności na zużycie przez tarcie a wytrzymałością [1]

## 6. Austenit szczątkowy

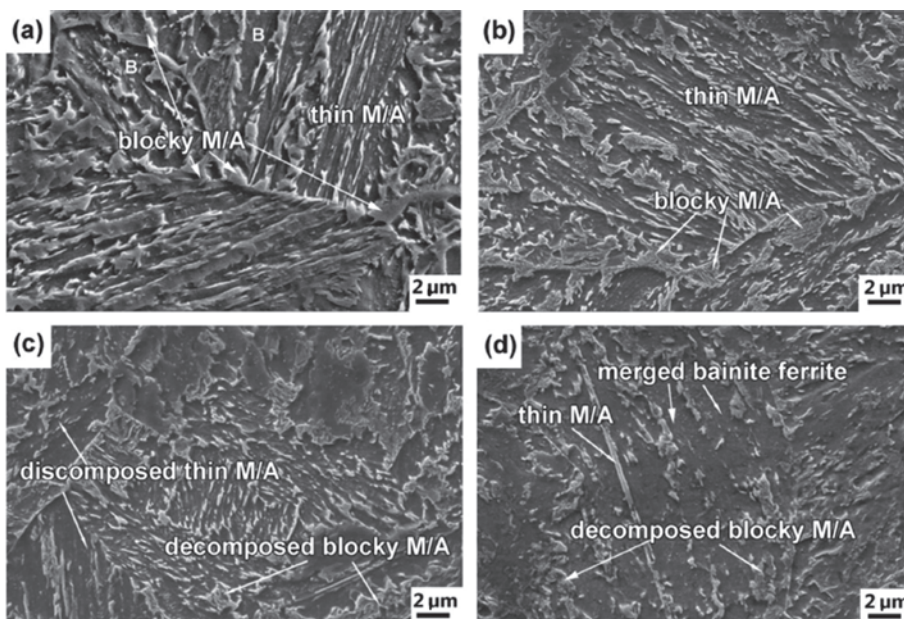
W szynach o strukturze nanobainitycznej, ilość, a także stabilność austenitu szczątkowego odgrywają

kluczową rolę, jeśli chodzi o właściwości mechaniczne. Stabilność austenitu szczątkowego zależy od jego rozmiaru, morfologii oraz zawartości węgla. Obecność w stali bainitycznej austenitu o dużej stabilności jest powodem dobrych właściwości plastycznych (tzw. efekt TRIP – plastyczność wywołana przemianą). Listwowy austenit odznacza się zdecydowanie większą stabilnością niż austenit masywny – stanowi także blokadę w propagacji pęknięcia [2].

Proces odpuszczania ma duże znaczenie w kształtowaniu właściwości mechanicznych stali nanobainitycznej (rys. 10). Zmiany w mikrostrukturze zachodzące podczas odpuszczania wpływają na stabilność austenitu szczątkowego. Stabilizację austenitu szczątkowego można uzyskać w wyniku dyfuzji węgla od martenzytu do austenitu szczątkowego. Badania [2] wykazały, że optymalną kombinację wytrzymałości i plastyczności stali o składzie chemicznym 0.22C-2.0Mn-1.0Si-0.8Cr-0.8(Mo+Ni) (procent masy) można uzyskać, odpuszczając tę stal w temperaturze 280°C z zastosowaniem chłodzenia na powietrzu (wytrzymałość: 1388 MPa, wydłużenie: 16%, udarność w temperaturze pokojowej: 130 J/cm<sup>2</sup>). Po odpuszczeniu stabilność austenitu szczątkowego jest zwiększona, co zapewnia doskonałe właściwości mechaniczne szyny o mikrostrukturze bainitycznej [2].

## 7. Podsumowanie

Szyny o mikrostrukturze bainitycznej z powodzeniem mogą zastąpić tradycyjne szyny o mikrostrukturze perlitycznej, w szczególności do budowy linii



Rys. 10. Mikrostruktura stali bainitycznej bez odpuszczania (a), po odpuszczeniu w temperaturach: 280°C (b), 350°C (c), 400°C (d) [2]

kolejowych o dużym obciążeniu. Szyny bainityczne mogą mieć wytrzymałość wynoszącą około 1400 MPa nieosiągalną dla stali perlitycznej. Stale bainityczne o dużej wytrzymałości nie odstają odpornością na zużycie ścierne od stali perlitycznej. Większa odporność na łuszczenie się oraz mniejsza tendencja do tworzenia się kruchych białych warstw to kolejne argumenty przemawiające za stosowaniem tego rodzaju stali do wyrobów szyn kolejowych. O niezawodności szyn bainitycznych niech świadczy przykład huty stali ArcelorMittal w Dąbrowie Górniczej, gdzie szyny głównego toru kolejowego prowadzącego do huty są wykonane ze stali bainitycznej – od powstania toru (4 lata) szyny funkcjonują bez zarzutów [3].

## Literatura

1. Hiroyasu Y. et.al.: *High strength bainitic steel rails for heavy haul railways with superior damage resistance*, NKK Technical Review, 2001.
2. Wang K.: *Ultra high strength-toughness combination in Bainitic rail steel: The Determining role of austenite stability during tempering*, Materials Science & Engineering A, 662, 2016.
3. Pacyna J.: *The microstructure and properties of the new bainitic rail steels*, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Volume 28, May 2008.
4. Hlavaty I. et.al.: *The bainitic steels for rails applications*, Materials Engineering, Vol. 16, 2009, No. 4.
5. Dobrzański L.: *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Gliwice, 2002.
6. Przybyłowicz K.: *Metaloznawstwo*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1999.
7. Blicharski M.: *Inżynieria materiałowa stal*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2013.
8. Wasiak K. et.al.: *Wytwarzanie struktury nanokryształicznej w warstwach wierzchnich stali po nawęglaniu próżniowym*, Piece Przemysłowe & Kotły, Tom 11–12, 2013.
9. Wasiluk K., Skołek E., Świątnicki W.: *Microstructure and properties of surface layer of carburized 38CrAlMo6-10 steel subjected to nanostructuring by a heat treatment process*, Archives of Metallurgy and Materials, 2014, No. 4.
10. Jezierska E. et.al.: *Characterization of nanobainitic structure obtained in 100CrMnSi6-4 steel after industrial heat treatment*, Archives of Metallurgy and Materials, 4, 2014.
11. Jezierska E., Dworska J., Roźniatowski K.: *Nanobainitic structure recognition and characterization using transmission electron microscopy*, Archives of Metallurgy and Materials, 2014, No. 4.
12. Świątnicki W. et.al.: *Otrzymywanie struktury nanokryształicznej w stalach z wykorzystaniem przemiany bainitycznej*, Inżynieria Materiałowa, 6, 2012.
13. Mikłaszewicz I.: *Odwęglenie a wady powierzchni główki szyny*, Problemy Kolejnictwa, 2014, z. 165.