

Roman KUZIĄK, Ryszard MOLENDĄ, Piotr GŁOWACKI

Institut Metalurgii Żelaza

PÓŁPRZEMYSŁOWA INSTALACJA DO PRZYŚPIESZONEGO, KONTROLOWANEGO CHŁODZENIA STAŁOWYCH WYROBÓW KSZTAŁTOWYCH DLA PROJEKTOWANIA PRZEMYSŁOWYCH TECHNOLOGII UMACNIANIA CIEPLNEGO

W artykule przedstawiono charakterystykę techniczną półprzemysłowej instalacji do przyspieszonego chłodzenia stalowych wyrobów kształtowych. Skuteczność funkcjonowania stanowiska sprawdzono w procesie umacniania ciepłego kształtownika górniczego V-29 i szyny kolejowej typu UIC60.

Słowa kluczowe: austenit, bainit, cementyt, ferryt, dysza wodno-powietrzna, kształtownik, martenzyt, szyna kolejowa, termopara

SEMI-INDUSTRIAL INSTALLATION FOR ACCELERATED CONTROLLED COOLING OF STEEL SHAPES FOR THE DESIGN OF INDUSTRIAL THE HEAT TREATMENT TECHNOLOGIES

This article presents technical characteristics of semi-industrial installation for accelerated cooling of steel shapes. The efficiency of the workstation was checked during the heat treatment of the mining section V-29 and the railway rail UIC60.

Key words: austenite, bainite, cementite, ferrite, water and air nozzle, section, martensite, railway rail, thermocouple

1. WPROWADZENIE

Właściwości mechaniczne i użytkowe profili kształtowych można podwyższyć poprzez zaprojektowanie odpowiedniego składu chemicznego stal lub poprzez zastosowanie obróbki cieplnej, po ponownym nagrzewaniu, bądź z wykorzystaniem ciepła walcowania. Szczególne znaczenie w procesie obróbki cieplnej przypisuje się etapowi przyspieszonego – kontrolowanego chłodzenia. Szczególnie ważne są dwa aspekty tego procesu, mianowicie, selektywny odbiór ciepła z chłodzonego elementu oraz zastosowanie warunków chłodzenia umożliwiających uzyskanie pożądanej mikrostruktury wyrobu. Konieczność selektywnego chłodzenia wynika ze złożonej geometrii wyrobów kształtowych, w tym zmieniającej się grubości na przekroju poprzecznym.

Do projektowania technologii obróbki cieplnej wyrobów kształtowych wykorzystuje się metody symulacji fizycznej i numerycznej procesów technologicznych. W przypadku skomplikowanych procesów obróbki cieplnej, ostateczną weryfikację warunków chłodzenia przeprowadza się z wykorzystaniem instalacji półprzemysłowych.

W Instytucie Metalurgii Żelaza skonstruowano uniwersalne urządzenie do umacniania ciepłego szyn ko-

lejowych w skali półprzemysłowej. Celem tego projektu było rozszerzenie możliwości badawczych Zakładu Symulacji Procesów Przemysłowych w obszarze badań dotyczących szyn charakteryzujących się podwyższoną trwałością eksploatacyjną.

2. ZAŁOŻENIA FUNKCJONALNE

Rosnące zapotrzebowanie na szyny normalnotorowe skłoniło Zakład Symulacji Procesów Technologicznych do podjęcia badań procesów obróbki cieplnej szyn ze stali o strukturze perlitycznej. W wyniku tych prac opracowano nową metodę umacniania ciepłego główki szyn normalnotorowych, a następnie zaprojektowano i wykonano przemysłową instalację w Wydziale Walcowni Szyn w Hucie Królewska Sp. z o.o. [1].

Proces umacniania ciepłego główki szyny za pomocą opracowanej metody polegał na cyklicznym zanurzeniu i wynurzaniu główki szyny w wodnym roztworze polimerowym. Wprowadzanie, jak również odprowadzanie roztworu chłodzącego ze zbiornika głównego, w którym odbywał się proces umacniania realizowano za pomocą zespołu pomp i dysz, których funkcjonowanie sterowane było elektronicznie.

Przyspieszone-kontrolowane chłodzenie jest stosowane z dużym powodzeniem do kształtowania wysokich właściwości mechanicznych i użytkowych wyrobów długich i płaskich. W zależności od wymaganego poziomu wytrzymałości, stosuje się różne rozwiązania konstrukcyjne oraz różne media chłodzące. Na przykład, w instalacji do przyspieszonego chłodzenia prętów do betonu sprężonego, którą zainstalowano na chłodni Walcowni Małej Huty Królewska Sp. z o.o. jako medium chłodzące wykorzystano strugę powietrza. Kształtowana ona była przez 15 wentylatorów o regulowanej wydajności, a następnie równomiernie rozpraszana przez dysze skierowane na pręty rozmieszczone na chłodni. Przeprowadzone próby umacniania cieplnego prętów potwierdziły przydatność tej instalacji [2]. Wydajne systemy chłodzenia taśm stalowych w procesie ciągłego wyżarzania przedstawił autorzy prac [3–5]. Wykorzystując, jako medium chłodzące mieszaninę gazów azotu i wodoru rozpylaną za pomocą odpowiednio dobranych dysz na taśmę o grubości 1÷2 mm uzyskano szybkości chłodzenia mieszczące się w przedziale 120÷200°C/s.

Autorzy prac [6, 7] przedstawili wyniki badań dotyczących procesu kontrolowanego chłodzenia odcinków stalowych wlewków ciągłych. Stanowisko badawcze, na którym zrealizowano testy przyspieszonego chłodzenia było zaprojektowane głównie pod kątem badania procesu chłodzenia wlewków ciągłych. Badanie procesów chłodzenia innych wyrobów hutniczych, takich jak kształtowniki górnicze, rury, kształtowniki szynowe na tym stanowisku jest utrudnione lub wręcz niemożliwe. Większość dotychczas wykonywanych eksperymentów dotyczących tego zagadnienia prowadzono w IMŻ na prowizorycznie przygotowanych instalacjach chłodzących. Uniemożliwiało to wykonywanie eksperymentów chłodzenia w sposób powtarzalny. Będąc na wyposażeniu IMŻ symulator Gleeble 3800 umożliwia przeprowadzenie złożonych symulacji fizycznych procesów umacniania cieplnego wyrobów stalowych, jednak tylko na próbkach o stosunkowo niewielkich wymiarach. W związku z realizowaną tematyką badawczą dotyczącą technologii umacniania cieplnego kształtowników szynowych zaistniała konieczność budowy instalacji, za pomocą której ten proces można realizować w skali półprzemysłowej. W oparciu o wcześniej zdobyte doświadczenie z tego zakresu, zaprojektowano oraz wykonano instalację do umacniania główki szyn kolejowych.

3. CHARAKTERYSTYKA TECHNICZNA INSTALACJI

Najważniejsze podzespoły instalacji, zamocowane są na sztywnej ramie przestrzennej wykonanej ze stalowych profili zamkniętych. Należą do nich:

- cztery zespoły dysz chłodzących;
- układ jezdny;
- blok sterujący pracą silnika elektrycznego oraz elektrozaworów;
- dwa główne i cztery pomocnicze zbiorniki wody i powietrza wraz z elektrozaworami połączonymi z dyszami;
- cyfrowy rejestrator pomiaru temperatury;
- układ zabezpieczający ruch wózka transportowego.

System chłodzenia składa się z czterech sekcji dysz chłodzących, wodno-powietrznych. Użyto dysz wypro-

dukowanych przez firmę PNR ITALIA. W każdej sekcji w zależności od kształtu chłodzonego profilu i jego masy ilość zainstalowanych dysz może zmieniać się od jednej dyszy do ośmiu. Zastosowane rozwiązanie konstrukcyjne mocowania dysz umożliwia regulację ich położenia względem chłodzonego przedmiotu; zarówno kąta ustawienia dyszy względem przedmiotu jak i odległości, którą można zmieniać w przedziale od 5 do 200 mm. Właściwie zaprojektowany zestaw dysz, odpowiednio rozmieszczonych, zapewnia równomierny odbiór ciepła i zapobiega deformacji chłodzonego detalu. Każda sekcja dysz jest indywidualnie zasilana wodą i sprężonym powietrzem. Powietrze i woda poprzez zawory z regulacją ciśnienia, zasilające układ chłodzenia, dostarczane są w pierwszej kolejności do zbiorników głównych, które za pośrednictwem przewodów ciśnieniowych i elektrozaworów są połączone ze zbiornikami pomocniczymi, a te zasilają pojedyncze sekcje chłodzące. Zaprojektowany sposób zasilania sekcji chłodzących umożliwia szybką i wielokrotną zmianę intensywności chłodzenia podczas jednego pełnego cyklu. Sprężone powietrze do układu chłodzącego dostarczała sprężarka tłokowa o wydajności 40 l/s i maksymalnym ciśnieniu 784 kPa połączona ze zbiornikiem powietrza o pojemności 8600 l. Wstępne oszacowanie wydatku wody zasilającej dysze chłodzące instalacji dokonano posługując się wynikami badań przeprowadzonych w PNR ITALIA, które zamieszczono w raporcie No 110 127 [8]. Przy optymalnie dobranym ciśnieniu wody i powietrza, zasilających dysze uzyskuje się mgłę o dużej dyspersyjności cząstek wody, co powoduje, że skuteczność chłodzenia jest wysoka.

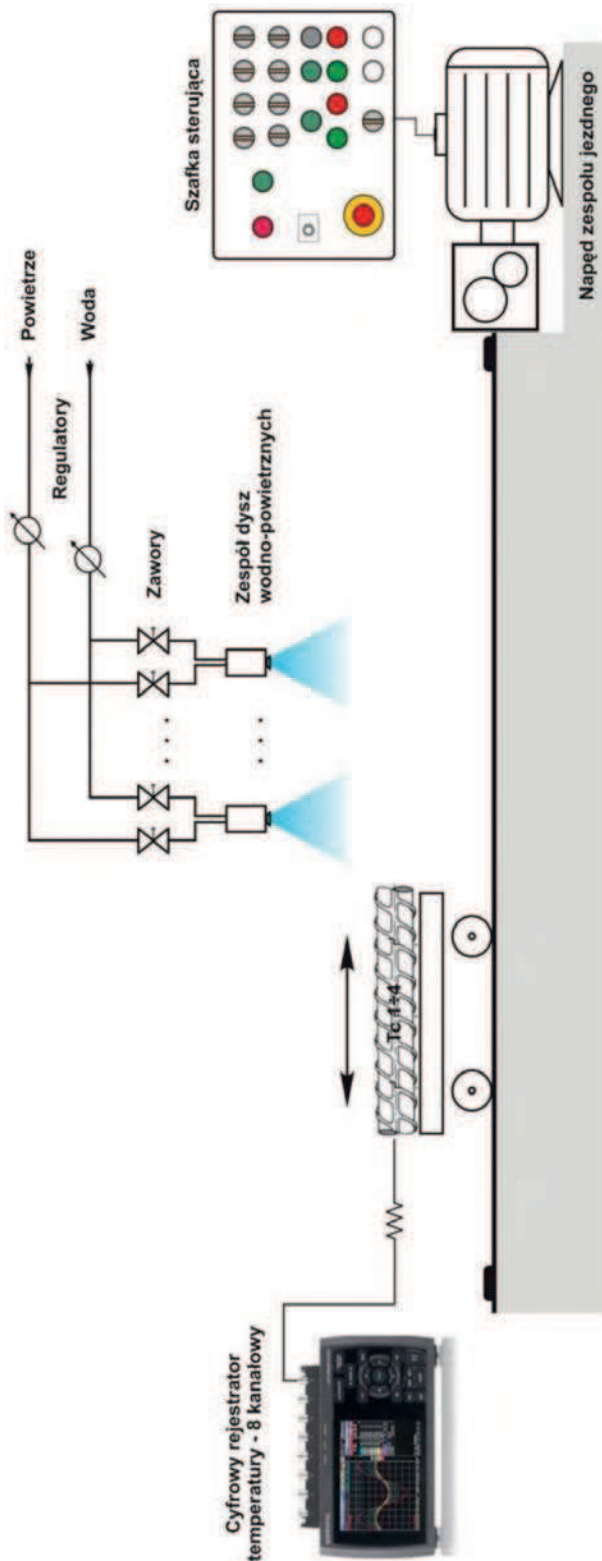
Na zbudowanym stanowisku można umacniać ciepłynie wyroby stalowe o maksymalnej długości 1000 mm, maksymalnej średnicy 200 mm i masie 100 kg.

Układ jezdny stanowiska badawczego składa się z wózka transportowego, szyn jezdnych, silnika elektrycznego o mocy 2 kW oraz przekładni redukcyjnej. Wózek połączony jest za pomocą łańcucha Galla z kołem zębatym przekładni. Porusza się on ruchem oscylacyjnym po szynach jezdnych usytuowanych w centralnej części instalacji. Praca silnika jest sterowana poprzez układ elektroniczny współpracujący z falownikiem. Zastosowane rozwiązanie sterowania silnikiem umożliwia zaprogramowanie dowolnego ruchu oscylacyjnego wózka transportowego. Prędkość wózka transportowego może być regulowana w przedziale 0,1 do 1 m/s. Na końcach toru jezdnych znajdują się indukcyjne czujniki krańcowe zapewniające bezkolizyjny ruch wózka. Zastosowanie modułu elektronicznego w bloku sterowania silnikiem elektrycznym umożliwia programowanie ruchu wózka z znajdującym się na nim umacnianym wyrobem stalowym, istnieje również możliwość ręcznego sterowania ruchem wózka.

Przebieg procesu chłodzenia uprzednio nagrzanego stalowego wyrobu jest śledzony za pomocą elektronicznego osmiokanałowego rejestratora temperatury o częstotliwości próbkowania 100 Hz. Pomiar temperatury dokonywany za pomocą termopar płaszczowych typu K w ośmiu dowolnie wybranych punktach chłodzonego wyrobu pozwala na szybką korektę szybkości chłodzenia. Dokonywana jest ona bądź to poprzez wyłączenie lub włączanie odpowiedniej liczby sekcji chłodzących albo poprzez zmianę ciśnienia powietrza lub wody zasilającej dysze.

Na rys. 1 przedstawiono schemat instalacji do przyspieszonego chłodzenia, a jej widok rzeczywisty na rys. 2.

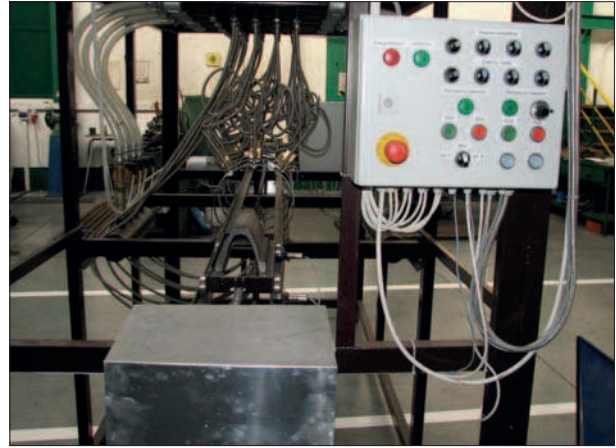
Zbudowana w skali półprzemysłowej instalacja do przyspieszonego chłodzenia wyrobów hutniczych w procesie umacniania cieplnego jest zaprojektowana



Rys. 1. Schemat półprzemysłowej instalacji do przyspieszonego chłodzenia wyrobów stalowych

Fig. 1. Schematic sketch of the semi-industrial installation for accelerated cooling of steel products

spół zapewniający jej bezpieczne użytkowanie, zgodnie z wymogami BHP. Zainstalowany system czujników w strefie chłodzenia, jak również w bramkach znajdujących się w strefie załadunku prób powoduje wyłączenie zasilania, w chwili gdy znajdzie się tam przypadkowo pracownik obsługujący instalację.



Rys. 2. Widok instalacji do przyspieszonego chłodzenia wyrobów stalowych w procesie umacniania cieplnego

Fig. 2. View of the installation for accelerated cooling of steel products during heat treatment

4. OCENA MOŻLIWOŚCI EKSPERYMENTALNYCH PÓLPRZEMYSŁOWEJ INSTALACJI DO PRZYSPIESZONEGO CHŁODZENIA WYROBÓW HUTNICZYCH

Skuteczność funkcjonowania zbudowanego stanowiska przetestowano w doświadczeniach umacniania następujących profili kształtowych:

- kształtowników górniczych typu V-29;
- szyn kolejowych typu UIC60.

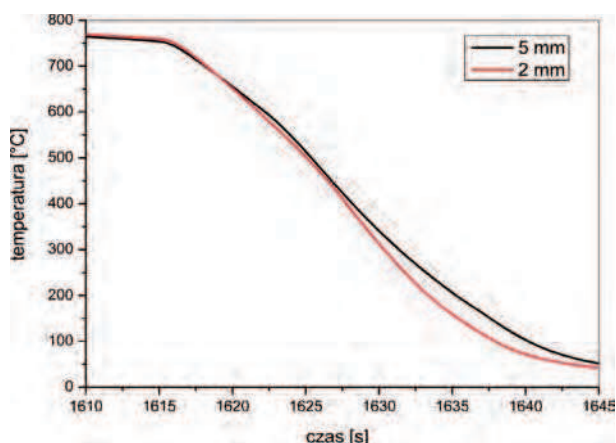
Uzyskane wyniki wstępnych prób opisano poniżej:

4.1. STRUKTURA I WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE Kształtownika GÓRNICZEGO V-29 ZE STALI 25G2 PO ZABIEGACH UMACNIANIA CIEPLNEGO

W stanie wyjściowym, to jest po walcowaniu na gorąco, kształtownik V-29 miał strukturę ferrytyczno-perlityczną i wykazywał następujące właściwości mechaniczne: $R_{p0.2} = 396$ MPa; $R_m = 628$ MPa i $A_5 = 24,3\%$. Celem doświadczenia było utworzenie dwufazowej struktury ferrytyczno-martenzytycznej kształtownika, typu DP. Zakładaną strukturę uzyskano poprzez zastosowanie obróbki cieplnej polegającej na nagraniu kształtownika do temperatur mieszczących się w zakresie międzykrytycznym, a następnie szybkim chłodzeniu do temperatury otoczenia. Temperaturę wygrzewania w zakresie międzykrytycznym dobrano tak, aby uzyskać zakładany udział ferrytu i austenitu. Szybkość chłodzenia stali z zakresu międzykrytycznego ustalono tak, aby austenit powstały podczas wyzarcia w zakresie międzykrytycznym uległ w czasie chłodzenia przemianie na martenzyt. Uzyskanie struktury ferrytyczno-martenzytycznej, z ferrytem jako dominu-

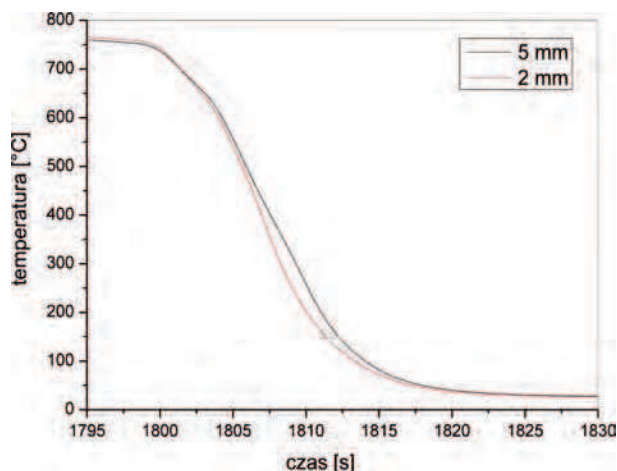
jącym składnikiem, powoduje wzrost wytrzymałości na rozciąganie oraz zapewnia uzyskanie korzystnej relacji między wytrzymałością na rozciąganie R_m a umowną granicą plastyczności $R_{p0,2}$.

Eksperyment polegał na nagraniu kształtownika do temperatur wynoszących odpowiednio 740 i 760°C, wytrzymaniu w tej temperaturze przez okres 20 minut, a następnie chłodzeniu z szybkością (około 40°C/s w przedziale temperatur 800÷50°C), zapewniającą powstrzymanie dyfuzyjnych przemian austenitu. W trakcie nagrzewania do zakresu międzykrytycznego następuje przemiana perlitu i ferrytu w austenit. W zależności od zastosowanej temperatury, zmieniają się proporcje między udziałami austenitu i ferrytu. Ponieważ austenit utworzony w zakresie międzykrytycznym zawiera więcej węgla, niż średnia zawartość tego składnika w stali, jego hartowność jest stosunkowo wysoka. Dla określenia optymalnej temperatury i intensywności chłodzenia zrealizowano dwa warianty chłodzenia kształtownika. W pierwszym wariantcie chłodzenia załączono dwie sekcje dysz wodno-powietrznych zasilanych powietrzem i wodą odpowiednio pod ciśnieniem 392 i 196 kPa. W otworach wywierconych w ściance łuku kształtownika umieszczono dwie termopary płaszczowe typu K, oddalone od powierzchni odpowiednio o 2 i 5 mm. Zmiany temperatury podczas chłodzenia w dwu określonych obszarach łuku kształtownika przedstawiono na rys. 3. Układ dysz zapewniał chłodzenie zarówno zewnętrznej, jak i wewnętrznej powierzchni kształtownika. Średnia szybkość chłodzenia w środku ścianki łuku kształtownika zmierzona w przedziale temperatur 760÷50°C wyniosła 24°C/s. W zrealizowanym drugim wariantcie chłodzenia pracowały cztery sekcje dysz wodno-powietrznych zasilanych powietrzem i wodą o takim samym ciśnieniu wynoszącym 392 kPa. Spowodowało to wzrost średniej szybkości chłodzenia kształtownika do 40°C/s. (Rys. 4) W trakcie wszystkich realizowanych wariantów chłodzenia kształtownik poruszał się ruchem oscylacyjnym w strefie sekcji chłodzących z prędkością wynoszącą 0,5 m/s.



Rys. 3. Krzywe chłodzenia zarejestrowane w dwu różnych obszarach łuku kształtownika górniczego typu V-29 oddalonych o 2 i 5 mm od powierzchni. Chłodzenie przeprowadzono przy załączonych czterech strefach chłodzenia. Dysze zasilano wodą i powietrzem odpowiednio o ciśnieniu 392 i 196 kPa

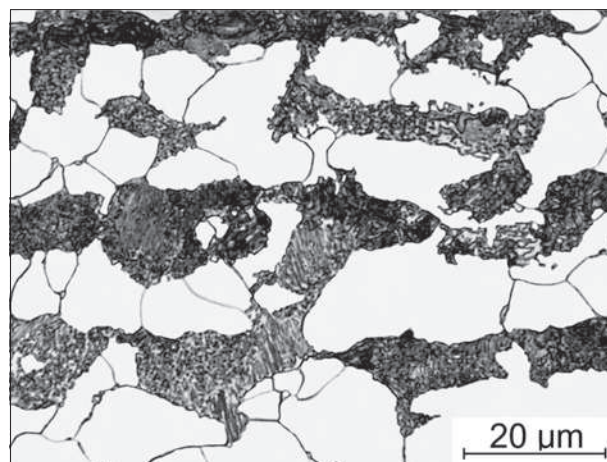
Fig. 3. Cooling curves recorded at two different areas of the V-29 mining section arches at a distance of 2 and 5 mm from the surface. The cooling was carried out with four cooling zones enabled. Nozzles were supplied with water and air at 392 and 196 kPa, respectively



Rys. 4. Krzywe chłodzenia zarejestrowane w dwu różnych obszarach łuku kształtownika oddalonych o 2 i 5 mm od powierzchni. Chłodzenie przeprowadzono przy włączonych czterech strefach chłodzenia. Dysze zasilano wodą i powietrzem o ciśnieniu 392 kPa

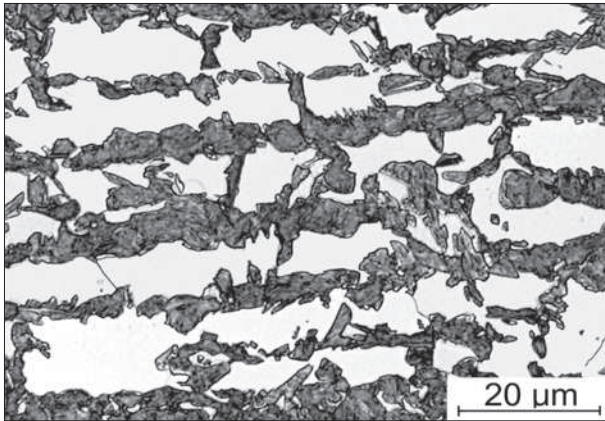
Fig. 4. Cooling curves recorded at two different areas of the section arches at a distance of 2 and 5 mm from the surface. The cooling was carried out with four cooling zones enabled. Nozzles were supplied with water and air of 392 kPa

Nagrzenie kształtownika do temperatury 740°C w czasie 20 min. a następnie szybkie schłodzenie z szybkością 40°C/s do temperatury otoczenia spowodowało jedynie proces koagulacji cementytu w obszarach byłego perlitu (Rys. 5). Wyznaczone w statycznej próbie rozciągania właściwości mechaniczne próbki pobranej z kształtownika były następujące: $R_{p0,2} = 423$ MPa; $R_m = 621$ MPa i $A5 = 9,2\%$. Podwyższenie temperatury wyżarzania kształtownika do 760°C i następnie chłodzenie z szybkością 40°C/s do temperatury 50°C spowodowało utworzenie struktury typu DP z ferrytem jako główną fazą i martenzytem o udziale około 40% (Rys. 6). Jak przypuszczano, spowodowało to wzrost wytrzymałości stali 25G2 – $R_{p0,2m} = 548$ MPa, $R_m = 1189$ MPa oraz spadek plastyczności – $A5 = 3,7\%$.



Rys. 5. Struktura kształtownika V-29 chłodzonego z temperatury międzykrytycznej 740°C do 50°C z szybkością 40°C/s. Mikroskop świetlny

Fig. 5. Structure of V-29 section cooled from intercritical temperature of 740°C to 50°C at a rate of 40°C/s. Light microscope

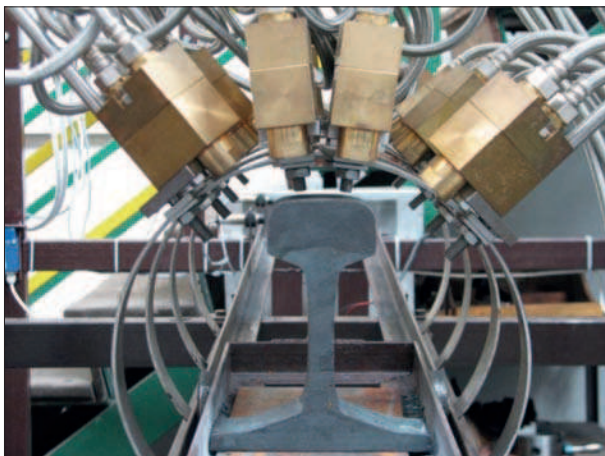


Rys. 6. Struktura kształtownika V-29 chłodzonego z temperatury międzykrytycznej 760°C do 50°C z szybkością 40°C/s. Mikroskop świetlny

Fig. 6. Structure of V-29 section cooled from intercrystalline temperature of 760°C to 50°C at a rate of 40°C/s. Light microscope

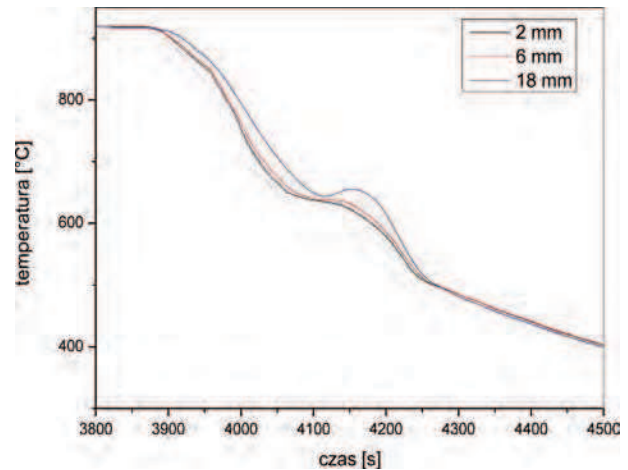
4.2. SYMULACJA FIZYCZNA PROCESU UMACNIANIA CIEPLNEGO SZYNY UIC60

Kolejne doświadczenia dotyczyły symulacji procesu umacniania cieplnego głowki szyny kolejowej wyprodukowanej ze stali perlitycznej. Przeprowadzono trzy eksperymenty przy różnych wartościach ciśnienia powietrza i wody zasilających dysze. Odcinki szyny o długości 400 m austenitizowano w piecu komorowym w temperaturze 950°C, a następnie chłodzono w powietrzu do temperatury 850°C. Przyspieszone chłodzenie głowki szyny realizowano w zakresie temperatur 850÷500°C. Na rysunku 7 przedstawiono rozkład dysz chłodzących w instalacji podczas prowadzonych doświadczeń. Proces chłodzenia monitorowano prowadząc pomiar temperatury w trzech różnych obszarach głowki szyny za pomocą termopar płaszczykowych typu K. Termopary umieszczono w głowce szyny w odległości 2, 6 i 18 mm od powierzchni toczonej. W pierwszym wariantcie chłodzenia szyny zastosowano cztery sekcje chłodzące zasilane wyłącznie sprężonym powietrzem o ciśnieniu 392 kPa. Na rysunku 8 przedstawiono krzywe chłodze-



Rys. 7. Widok rozmieszczenia dysz w sekcjach chłodzących w instalacji przystosowanej do umacniania głowki szyny kolejowej UIC60

Fig. 7. View of nozzle distribution in cooling sections of the installation for strengthening of UIC60 rail head



Rys. 8. Krzywe chłodzenia zarejestrowane w trzech różnych obszarach głowki szyny oddalonych o 2, 6 i 18 mm od powierzchni. Chłodzenie przeprowadzono przy włączonych czterech strefach chłodzenia. Dysze zasilano wyłącznie powietrzem o ciśnieniu 392 kPa

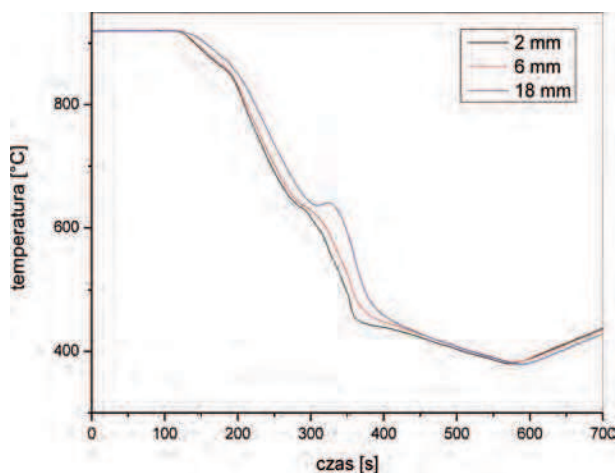
Fig. 8. Cooling curves recorded at three different rail head areas at a distance of 2, 6 and 18 mm from the surface. The cooling was carried out with four cooling zones enabled. Nozzles were supplied with air at 392 kPa only

nia głowki szyny w trzech określonych wyżej punktach pomiarowych.

Szybkość chłodzenia głowki szyny w obszarach oddalonych 2 i 6 mm od powierzchni toczonej zmierzona w przedziale temperatur 850÷650°C wyniosła 1,7°C/s. W trakcie dalszego chłodzenia szyny zaobserwowano, że w temperaturze wynoszącej około 620°C następuje wyraźny spadek szybkości chłodzenia związany z wydzieleniem ciepła w trakcie zachodzącej przemiany perlitycznej (tzw. efekt rekalescencji). Szybkość chłodzenia szyny w analizowanych obszarach w przedziale temperatur 650÷500°C wyniosła 0,9°C/s. W obszarze odległym o 18 mm od powierzchni toczonej szyny zarejestrowane szybkości chłodzenia w identycznych przedziałach temperaturowych są niższe o około 5%. Próbkę do badań właściwości mechanicznych oraz strukturalnych pobierano z głowki szyny zgodnie z Warunkami Technicznymi Wykonania i Odbioru Szyn Kolejowych [9]. Właściwości mechaniczne szyny po zastosowanym wariantcie chłodzenia były następujące: $R_{p0,2} = 703$ MPa, $R_m = 1064$ MPa, $A_{10} = 10,6\%$, $Z = 26,8\%$.

W drugim wariantcie umacniania szyny, włączono dwie sekcje chłodzące, w których dysze zasilane były wodą i powietrzem o ciśnieniu 392 kPa. Stwierdzono wyraźny wzrost szybkości chłodzenia szyny w wybranych obszarach. Szybkość chłodzenia głowki szyny w obszarach oddalonych 2 i 6 mm od powierzchni toczonej zmierzona w przedziale temperatur 850÷650°C była wyższa niż w pierwszym wariantcie chłodzenia i wyniosła 2,5°C/s. (Rys. 9). W trakcie dalszego chłodzenia szyny zaobserwowano, że w temperaturze wynoszącej około 620°C następuje wyraźny spadek szybkości chłodzenia związany z zachodzącą przemianą perlityczną. Szybkość chłodzenia szyny w omawianych obszarach w przedziale temperatur 650÷500°C wyniosła 1,6°C/s. W punkcie odległym o 18 mm od powierzchni toczonej szyny zarejestrowane szybkości chłodzenia w identycznych przedziałach temperaturowych są nieznacznie niższe.

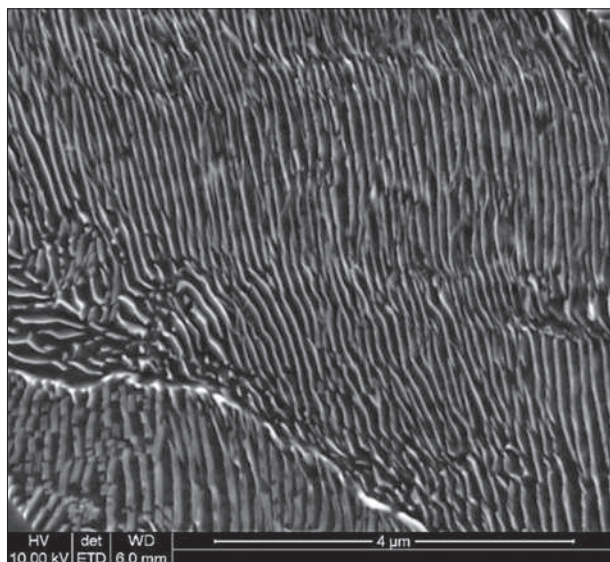
Po zrealizowanym wariantcie chłodzenia szyn wzrasta wytrzymałość na rozciąganie a maleje plastyczność



Rys. 9. Krzywe chłodzenia zarejestrowane w trzech różnych obszarach główki szyny oddalonych o 2, 6 i 18 mm od powierzchni. Chłodzenie przeprowadzono przy włączonych dwóch strefach chłodzenia. Dysze zasilano wodą i powietrzem o ciśnieniu 392 kPa

Fig. 9. Cooling curves recorded at three different rail head areas at a distance of 2, 6 and 18 mm from the surface. The cooling was carried out with two cooling zones enabled. Nozzles were supplied with water and air at 392 kPa

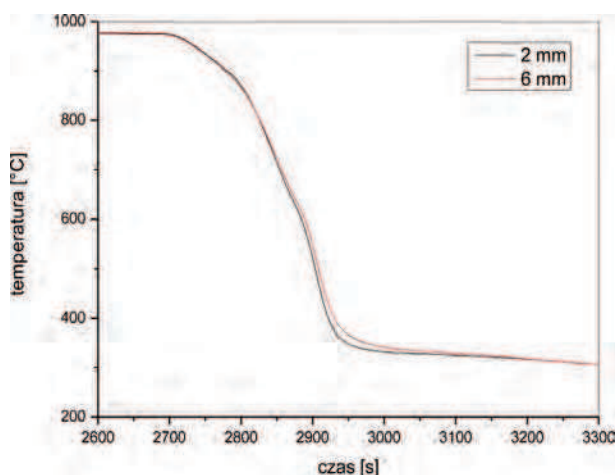
stali. Wyniki z pomiarów właściwości mechanicznych przedstawiają się następująco: $R_{p0,2} = 780$ MPa, $R_m = 1171$ MPa, $A_{10} = 9,1\%$, $Z = 25,2\%$. Umacnianie główki szyny zrealizowane według pierwszego i drugiego wariantu chłodzenia prowadzi do wytworzenia struktury perlitycznej (Rys. 10) różniące się jedynie odległością między płytkami cementytu w perlicie, która dla pierwszego i drugiego wariantu chłodzenia wynosi, odpowiednio, 0,14 i 0,12 μm .



Rys. 10. Struktura główki szyny UIC60 w miejscu odległym o 5 mm od powierzchni toczonej po umacnianiu cieplnym przeprowadzonym zgodnie z drugim wariantem chłodzenia. Chłodzenie przeprowadzono przy włączonych czterech strefach chłodzenia. Dysze zasilano wyłącznie powietrzem o ciśnieniu 392 kPa. Skaningowy mikroskop elektronowy

Fig. 10. Structure of UIC60 rail head at the point placed at a distance of 5mm from the rolling surface after toughening carried out in accordance with the second variant of cooling. The cooling was carried out with four cooling zones enabled. Nozzles were supplied with air at 392 kPa only. Scanning electron microscope

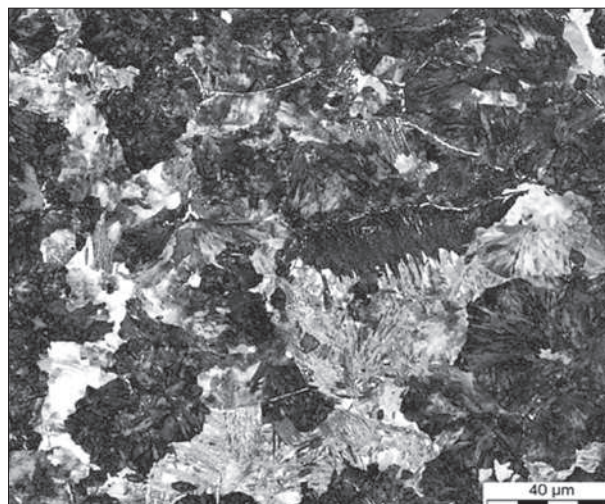
W trzecim wariantcie chłodzenia szyny zastosowano cztery sekcje chłodzące zasilane wodą i sprężonym powietrzem o ciśnieniu 392 kPa. Na rys. 11 przedstawiono krzywe chłodzenia główki szyny w dwóch punktach oddalonych o 2 i 6 mm od powierzchni toczonej.



Rys. 11. Krzywe chłodzenia zarejestrowane w dwóch różnych obszarach główki szyny oddalonych o 2 i 6 mm od powierzchni. Chłodzenie przeprowadzono przy włączonych czterech strefach chłodzenia. Dysze zasilano wodą i powietrzem o ciśnieniu 392 kPa

Fig. 11. Cooling curves recorded at two different rail head areas at a distance of 2 and 6 mm from the surface. The cooling was carried out with four cooling zones enabled. Nozzles were supplied with water and air at 392 kPa

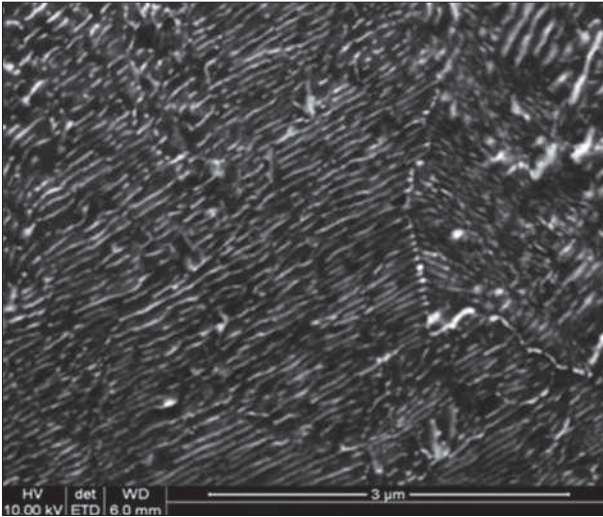
W zastosowanym wariantcie szybkość chłodzenia główki szyny w obszarach oddalonych 2 i 6 mm od powierzchni toczonej zmierzona w przedziale temperatur $850 \div 650^\circ\text{C}$ była najwyższa i wynosiła i $5,3^\circ\text{C/s}$. Efekt rekalescencji na krzywej chłodzenia jest słabo widoczny (Rys. 11). W przedziale temperatur $650 \div 500^\circ\text{C}$ szybkość chłodzenia w obszarach szyny była niższa



Rys. 12. Struktura główki szyny UIC60 w miejscu odległym o 5 mm od powierzchni toczonej po chłodzeniu z temperatury 850°C przeprowadzonym przy włączonych czterech strefach chłodzenia. Dysze zasilano wodą i powietrzem o ciśnieniu 392 kPa. Mikroskop świetlny

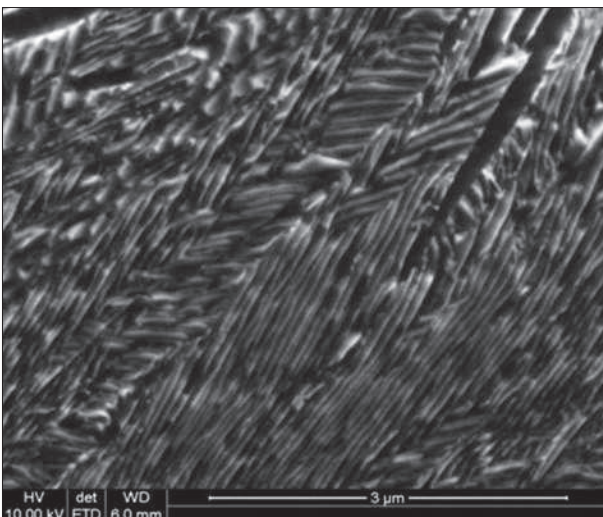
Fig. 12. Structure of UIC60 rail head at the point placed at a distance of 5mm from the rolling surface after cooling from 850°C carried out with four cooling zones enabled. Nozzles were supplied with water and air at 392 kPa. Light microscope

i wynosiła 2,9°C/s. Właściwości mechaniczne szyny po tym wariacie chłodzenia osiągają najwyższe wartości i przedstawiają się następująco: $R_{p0,2} = 917$ MPa, $R_m = 1322$ MPa, $A_{10} = 5,1\%$ i $Z = 12,5\%$. Zastosowany wariant chłodzenia główki szyny spowodował utworzenie wielofazowej struktury składającej się głównie z drobnego perlitu oraz bainitu i martenzytu (Rys. 12 i 15). Odległość między płytkami cementytu w perlacie wynosi 0,08 μm (Rys. 13 i 14). Sumaryczną zawartość bainitu i martenzytu oszacowano na około 25%.



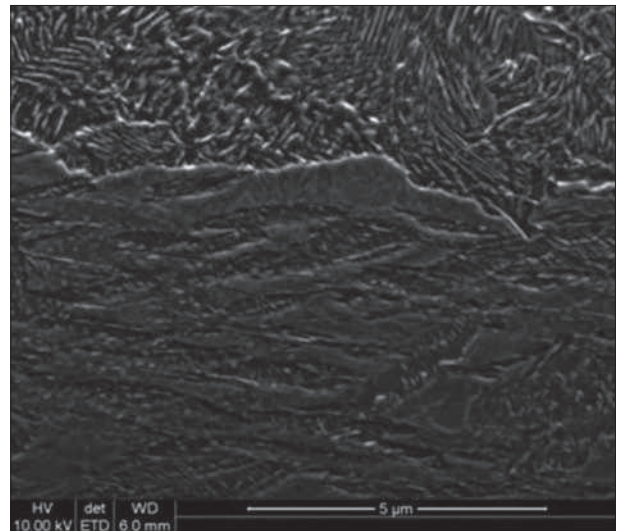
Rys. 13. Struktura główki szyny UIC60 w miejscu odległym o 5 mm od powierzchni tocznej po chłodzeniu z temperatury 850°C przeprowadzonym przy włączonych czterech strefach chłodzenia. Dysze zasilano wodą i powietrzem o ciśnieniu 392 kPa. Mikroskop świetlny

Fig. 13. Structure of UIC60 rail head at the point placed at a distance of 5 mm from the rolling surface after cooling from 850°C carried out with four cooling zones enabled. Nozzles were supplied with water and air at 392 kPa. Light microscope



Rys. 14. Struktura główki szyny UIC60 w miejscu odległym o 5 mm od powierzchni tocznej po chłodzeniu z temperatury 850°C przeprowadzonym przy włączonych czterech strefach chłodzenia. Dysze zasilano wodą i powietrzem o ciśnieniu 392 kPa. Skaningowy mikroskop elektronowy

Fig. 14. Structure of UIC60 rail head at the point placed at a distance of 5 mm from the rolling surface after cooling from 850°C carried out with four cooling zones enabled. Nozzles were supplied with water and air at 392 kPa. Scanning electron microscope



Rys. 15. Struktura główki szyny UIC60 w miejscu odległym o 5 mm od powierzchni tocznej po chłodzeniu z temperatury 850°C przeprowadzonym przy włączonych czterech strefach chłodzenia. Dysze zasilano wodą i powietrzem o ciśnieniu 392 kPa. Skaningowy mikroskop elektronowy

Fig. 15. Structure of UIC60 rail head at the point placed at a distance of 5 mm from the rolling surface after cooling from 850°C carried out with four cooling zones enabled. Nozzles were supplied with water and air at 392 kPa. Scanning electron microscope

5. PODSUMOWANIE

Wyniki z przeprowadzonych eksperymentów przyspieszonego chłodzenia kształtownika typu V-29 z temperatur zakreśu międzykrytycznego świadczą o dużym potencjale metody przyspieszonego chłodzenia do uzyskiwania wysokich właściwości wytrzymałościowych wyrobów kształtowych wytwarzanych ze stali. Zaprojektowany system chłodzenia składający się z dysz umożliwił uzyskanie szybkości chłodzenia wynoszącej 40°C/s w środku ścianki kształtownika górniczego V29. Zastosowanie metody przyspieszonego chłodzenia stwarza nowe możliwości opracowania technologii produkcji kształtowników górniczych ze stali podutektoidalnych o strukturze ferrytyczno-martenzytycznej. Kształtownik górniczy wyprodukowany ze stali o strukturze ferrytyczno-martenzytycznej charakteryzuje się korzystną relacją między umowną granicą plastyczności a wytrzymałością na rozciąganie. Uzyskana wartość $R_{p0,2}/R_m$ wynosi 0,46, ponadto wartość umownej granicy plastyczności stali jest bardzo wysoka (548 MPa). Obniżając zawartość węgla w stali 25G2 w ten sposób by mieściła się w przedziale 0,12÷0,15% i stosując powyższą technologię można uzyskać strukturę ferrytyczno-martenzytyczną z obniżoną zawartością martenzytu, co przy spadku wytrzymałości, spowoduje podwyższenie ciągliwości stali. W oparciu o wyniki badań zamieszczonych w pracach [10, 11] można przypuszczać, że spowoduje to spadek granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie, odpowiednio, do wartości 400 i 800 MPa, przy wzroście wydłużenia do wartości około 12%. Struktura ferrytyczno-martenzytyczna stali z której będzie wykonany kształtownik górniczy spowoduje, że przebieg procesu odkształcania elementów obudowy ściany będzie zachodził przy wyższym poziomie naprężeń oraz w sposób jednorodny.

Wyniki badań doświadczalnych dotyczących procesu umacniania cieplnego główki szyny pokazały, że optymalną strukturę perlitu drobnego, w której odległość między płytkami cementytu wyniosła $0,12 \mu\text{m}$, uzyskano w drugim wariantcie chłodzenia, tzn. przy wykorzystaniu dwóch sekcji chłodzenia zawierających łącznie osiem dysz wodno-powietrznych zasilanych wodą i powietrzem o tym samym ciśnieniu wynoszącym 392 kPa . W główce szyny chłodzonej z szybkością wynoszącą $2,9^\circ\text{C/s}$ wytworzono strukturę drobnego perlitu, którego właściwości mechaniczne były następujące: $R_{p0,2} = 780 \text{ MPa}$, $R_m = 1171 \text{ MPa}$, $A_{10} = 9,1\%$, $Z = 25,2\%$. Wzrost szybkości chłodzenia główki szyny do wartości $5,3^\circ\text{C/s}$ powoduje, że w trakcie przemian fazowych austenitu oprócz przemiany perlitycznej zachodzi również przemiana bainityczna i martenzytyczna. W efekcie następuje wzrost właściwości mechanicznych stali przy równoczesnym spadku właściwości plastycznych ($A_{10} = 5,1\%$, $Z = 12,5\%$).

Obecnie, prowadzone są prace modernizacyjne opisanego stanowiska, zmierzające do zwiększenia zarówno równomierności, jak również intensywności chłodzenia wyrobów hutniczych o skomplikowanych kształtach, polegające na wprowadzeniu sterowania pracą pojedynczych dysz wchodzących w skład sekcji, jak również modyfikacji zasilania dysz wodno-powietrznych. W drugim etapie modernizacji rozważany jest wariant doposażenia stanowiska do przyspieszonego chłodzenia w urządzenie do nagrzewania indukcyjnego. Prowadzone są ponadto prace zmierzające do zautomatyzowania procesu chłodzenia wybranych wyrobów hutniczych, jak również opracowania schematów chłodzenia wybranych wyrobów hutniczych w celu uzyskania założonych właściwości mechanicznych. Efektem tych prac będzie zarówno poprawa równomierności, jak również wzrost intensywności chłodzenia wyrobów hutniczych o skomplikowanych kształtach.

LITERATURA

1. Kuziak R., Molenda R., Pietryka J.: Nowa metoda umacniania cieplnego główki szyny, *Hutnik nr 2*, 2003, s. 53-59
2. Kuziak R., Molenda R., Pietryka J., Zygmunt T.: Metoda umacniania cieplnego prętów do betonu sprężonego, *Prace Instytutu Metalurgii Żelaza*, t. 55, nr 2, 2003, s. 49-54
3. Tragl E., Strutzenberger J., Angeli G., Pichler A.: Simulators for product-and process development of new steel grades, *Metal 2005 – 24-26.05.2005 Hradec nad Moravici, C27*
4. Balunowa A., Gburik R., Hunady J., Zimovcak P.: Optimalization of continuous annealing processes on hot-dip process simulator, *Metal 2005 – 24-26.05.2005 Hradec nad Moravici*, s. 1-6
5. Pichler A., Hribering G., Tragl E., Angerer R., Radlmayr K., Stiaszny P.: Aspect of production of dual phase and multiphase steel strips, *41st Mechanical working and steel processing conference proceedings*, vol. 37, Baltimore – October 24-27. 1999., s. 37-59
6. Marcisz J., Mazur A., Adamczyk M.: Modyfikacja struktury w celu poprawy plastyczności warstwy przypowierzchniowej stalowych wlewków ciągłych metodą kontrolowanego chłodzenia natryskowego. *Prace Instytutu Metalurgii Żelaza*, t. 62, nr 1, 2010, s. 83-89
7. Marcisz J., Mazur A., Zdonek B., Burian W., Wittchen W.: Opracowanie półprzemysłowych technologii chłodzenia natryskowego, w oparciu o symulacje laboratoryjne i próby przemysłowe w celu ograniczenia pęknięć powierzchniowych na wlewkach COS, *Prace Instytutu Metalurgii Żelaza*, nr 1, 2009, s. 53-57
8. Materiał informacyjny firmy PNR ITALIA S.r.l., s. 32
9. Warunki Techniczne Wykonania i Odbioru Szyn Kolejowych, Nr WTWiO-ILK3-5181-2/2004E.P
10. Pushareva I, rozprawa doktorska: Evolution microstructurale d'un acier dual phase. Optimisation de la resistance a l'endommagement. Ecole des Mines de Nancy. 2009
11. Speer J.G., Matlock D.K.: Constitutive behavior of high strength multiphase sheet steels under high strain rate deformation conditions. Final Report AISI/DOE Project 9904, Colorado – March 31, 2005