

Nowoczesne stale o strukturze zapewniającej kombinację wysokich właściwości wytrzymałościowych i plastycznych

mgr inż. Karol Janus

Streszczenie

Niewątpliwie jest, że w celu wytworzenia nanostrukturalnej stali bainitycznej o relatywnie tanim składzie chemicznym, które zalicza się do stali AHSS trzeciej generacji, konieczne jest zastosowanie hartowania izotermicznego w bardzo niskich temperaturach (125 - 350°C). Temperatury te powodują, że czas potrzebny do całkowitej bainityzacji stali wysokowęglowych w temperaturze 200°C sięga nawet 10 dni, co uniemożliwia jej szerokie zastosowanie komercyjne. Dlatego też istotnym staje się zaprojektowanie procesu technologicznego, który pozwoli na skrócenie tego czasu bez konieczności wprowadzania zwiększonej ilości drogich pierwiastków stopowych, jak Ni, Mn czy Cr. Jedną z najbardziej obiecujących metod jest wspomaganie naprężeniem zewnętrznym poniżej granicy plastyczności austenitu pierwotnego przemiany bainitycznej, co przyspieszy jej kinetykę i w konsekwencji spowoduje zredukowanie całkowitego czasu bainityzacji. Należy jednak zauważyć, że badania nad tego typu technologią jest ograniczona do wpływu naprężenia generowanego w próbie jednoosiowego rozciągania oraz ściskania w skali laboratoryjnej. Dlatego też w pracy skupiono się nad określeniem wpływu naprężenia poniżej granicy plastyczności austenitu wygenerowanego w próbie skręcania w skali laboratoryjnej i przeniesienie tych wyników do skali półprzemysłowej umożliwiając wstępną komercjalizację wysokowęglowych niskostopowych stali nanobainitycznych.

W tym celu zaprojektowano skład chemiczny stali pozwalający na otrzymanie mikrostruktury nanobainitycznej wolnej od wydzielań węglików oraz obróbkę cieplno- mechaniczną pozwalającą na zredukowanie całkowitego czasu bainityzacji. Aby zrealizować zadanie, zostały wytworzone dwie stale, różniące się od siebie przeprowadzoną obróbką cieplną. Pierwsza z nich (stal nB1), traktowana jako materiał referencyjny, została wytworzona stosując izotermiczną konwencjonalną obróbkę cieplną w temperaturze 280°C przez 72 h. Druga (stal nB2) została wytworzona stosując w pierwszej fazie przemiany bainitycznej, tuż po schłodzeniu stali z temperatury austenizacji, przez 10 s dodatkowe odkształcenie sprężyste. Odkształcenie to zostało zaprojektowane w próbie skręcania poprzez wyznaczenie granicy plastyczności

austenitu pierwotnego. Naprężenie, które zostało zastosowane do przeprowadzenia obróbki cieplno-mechanicznej w skali laboratoryjnej wyniosło 250 MPa. Do oceny wpływu odkształcenia sprężystego na kinetykę przemiany bainitycznej przeprowadzono badania dylatometryczne, szczegółową obserwację mikrostruktury za pomocą skaningowej i transmisyjnej mikroskopii elektronowej, jak również badania strukturalne oraz badania tekstury krystalograficznej stosując promieniowanie rentgenowskie, oraz synchrotronowe. Aby określić wpływ wytworzonej w ten sposób mikrostruktury na właściwości mechaniczne, przeprowadzono próbę jednoosiowego rozciągania z prędkością 1 s⁻¹, badania twardości metodą Vickersa oraz badania udarności w przypadku stali nB2 metodą Charpy'ego.

Wyniki badań wykazały, że przeprowadzenie hartowania izotermicznego, w ramach którego przemiana bainityczna wspomagana była odkształceniem sprężystym przez 10 s zaraz po osiągnięciu temperatury 200 °C ma bezpośredni wpływ na mikrostrukturę otrzymanej stali. Zastosowanie odkształcenia sprężystego ($\epsilon=0,03$) w pierwszej kolejności wpływa na średnią szerokość nanolistów ferrytu bainitycznego, jak i austenitu szczątkowego, które wynoszą odpowiednio 64 ± 40 nm oraz 34 ± 17 nm i są mniejsze w odniesieniu do stali referencyjnej. Analizując zawartość węgla w austenicie szczątkowym obu wytworzonych stali, stwierdzić można, że zastosowanie zewnętrznego naprężenia przesunęło temperaturę T₀' w kierunku niższych zawartości węgla, co spowodowało skrócenie całkowitego czasu bainityzacji. Badania tekstury krystalograficznej w połączeniu z badaniami dylatometrycznymi bezpośrednio wskazują na selekcję wariantów krystalograficznych ferrytu bainitycznego wywołaną dodatkowym naprężeniem poniżej granicy plastyczności. Jest tak dlatego, że w przypadku stali nB2 obserwowany obraz tekstury jest mocny, a zmiana długości podczas badań dylatometrycznych osiąga wartości ujemne w czasie przemiany bainitycznej, co świadczy o kierunkowym układaniu się składników mikrostruktury. Oddziaływanie obróbki cieplno-mechanicznej na strukturę badanego materiału bezpośrednio generuje również jej wysokie właściwości mechaniczne. I tak wspomaganie przemiany bainitycznej odkształceniem sprężystym przyczyniło się do otrzymania nanostrukturalnej stali bainitycznej o wytrzymałości na rozciąganie równej 1862 ± 140 MPa oraz granicy plastyczności na poziomie 1287 ± 90 MPa. Dodatkowo wysoka granica plastyczności oraz wydłużenie równe $11,8 \pm 0,7\%$ w stali nB2 związane jest z zaobserwowanym podczas próby jednoosiowego rozciągania efektu TRIP oraz TWIP.

Abstract

It is undeniable that in order to produce nanostructured bainitic steels with relatively low- cost chemical composition, which are classified as third-generation AHSS, it is necessary to use isothermal holding at very low temperatures (125 - 350 °C). These temperatures cause the time required to complete the bainitic transformation of high-carbon steels at 200 °C to reach up to 10 days, which prevents its wide commercial use. Therefore, it becomes important to design a

technological process that will reduce this time without introducing increased amounts of expensive alloying elements, such as Ni, Mn, or Cr. One of the most promising methods is to support external stress below the yield stress of prior austenite for the bainitic transformation, accelerating its kinetics and consequently reducing the total time of bainitic transformation. However, it should be noted that the study of this type of technology is limited to the effect of stress generated in tensile or compressive tests on the laboratory scale. Therefore, this paper focuses on determining the effect of stress below the austenite yield stress generated in a laboratory-scale torsion test and transferring these results to a semi-industrial scale, enabling the initial commercialization of high-carbon, low-alloy nanobainitic steels.

For this purpose, the chemical composition of the steel was designed to obtain a nanobainitic free-carbides microstructure and a thermo-mechanical treatment to reduce the total bainitic transformation time. Two steels were produced to achieve these goals, differing in the heat treatment performed. The first (nB1 steel), taken as a reference material, was produced using isothermal conventional heat treatment at 280 °C for 72 h. The second (nB2 steel) was produced by applying additional elastic strain at the beginning of the bainitic transformation, just after the steel cooled from the austenitizing temperature, for 10 s. This strain was designed in a torsion test by determining the yield strength of the parent austenite. The stress applied to carry out the thermo-mechanical treatment was 250 MPa on the laboratory scale. To evaluate the effects of the elastic strain on the kinetics of the bainitic transformation, dilatometric studies, detailed observation of the microstructure by scanning and transmission electron microscopy, as well as structural and crystallographic texture studies were carried out using X-ray and synchrotron radiation. Uniaxial tensile testing at 1 s⁻¹, Vickers hardness tests, and Charpy impact tests in the case of nB2 steel were carried out to determine the effect of the obtaining microstructure on mechanical properties.

The results showed that carrying out isothermal holding, where the bainitic transformation was assisted by elastic strain for 10 s immediately after reaching 200 °C, directly affects the microstructure of the obtained steel. Applying the elastic strain ($\epsilon=0.03$) first affects the average thickness of bainitic ferrite and residual austenite, which are 64 ± 40 nm and 34 ± 17 nm, respectively, and are smaller with respect to the reference steel. Based on the analysis of the carbon concentration of the retained austenite in the case of both produced steels, it can be concluded that the application of external stress shifts the temperature T_0 'towards lower carbon contents, which resulted in a shorter total bainitic transformation time. Crystallographic texture studies combined with dilatometric studies directly indicate the selection of crystallographic variants of bainitic ferrite caused by additional stress below the yield stress. This is because, in the case of nB2 steels, the observed texture is strong, and the change in length during dilatometric testing reaches negative values during the bainitic transformation, indicating a directional arrangement of the microstructure components. The applied thermo-mechanical treatment also immediately affects the obtained microstructure, directly generating its high mechanical properties. Thus, supporting the bainitic transformation with elastic deformation contributed to obtaining nanostructured bainitic steel with a tensile strength

of 1862 ± 140 MPa and a yield strength of 1287 ± 90 MPa. In addition, the high yield strength and good elongation equal to $11.8 \pm 0.7\%$ in the nB2 steel is related to the TRIP and TWIP effects observed during a uniaxial tensile test.

[Recenzja dr. hab. inż. Magdaleny Jabłońskiej](#)

[Recenzja prof. dr. hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego](#)

[Recenzja dr. hab. inż. Wiesława Świątnickiego](#)