

## **Recenzja rozprawy doktorskiej**

### **“Effect of the chemical composition and processing parameters on the microstructure and mechanical properties of the bars subjected to innovative XTP process”**

**Autor: mgr inż. Radosław Rozmus**

#### **Uwagi ogólne**

Recenzowana praca powstała pod kierunkiem prof. Krzysztofa Radwańskiego na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej. Zespół badawczy Profesora od wielu lat prowadzi badania nad zastosowaniami nowoczesnych tworzyw metalicznych w przemyśle. Stale rosnące zapotrzebowanie na wysokiej jakości materiały konstrukcyjne pracujące w ekstremalnych warunkach stawia przed inżynierią materiałową nowe wyzwania związane z koniecznością opracowania nowych materiałów i technologii ich wytwarzania.

Tematyka niniejszej rozprawy dotyczy jednego z głównych kierunków badań prowadzonych na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej – poszukiwania nowych gatunków stali i technologii ich wytwarzania.

Autor rozprawy postawił sobie za cel opracowanie jednoetapowego procesu walcowania termomechanicznego (XTP – Xtrem Performance Technology) prętów ze stali bainitycznej 7MnB8 o zmodyfikowanym składzie chemicznym, która charakteryzowałaby się obniżoną temperaturą przejścia ze stany plastycznego w kruchy (ang. Ductile Brittle Transition Temperature - DBTT) bez istotnych zmian wartości innych właściwości mechanicznych w porównaniu z konwencjonalną stalą 7MnB8.

Aby osiągnąć cel pracy mgr inż. Radosław Rozmus opracował na wstępie program badawczy, który obejmował badania mikrostrukturalne stali 7MnB8 oraz symulację numeryczną różnych parametrów procesu XTP. Na podstawie uzyskanych wyników badań określił parametry procesu oraz przeprowadził testy przemysłowe z wykorzystaniem stali 7MnB8.

Pozwoliło to na opracowanie nowych składów chemicznych stali o zmodyfikowanej zawartości Mn, Mo, Ti, Nb i V, z których wykonano pręty z nowych stali jako wsad do procesu XTP. Następnie Doktorant przeprowadził badania przemysłowe nowych gatunków stali z wyznaczonymi parametrami procesowymi, dla których uzyskano najniższą temperaturę przejścia ze stanu plastycznego w kruchy dla stali 7MnB8. Po walcowaniu zbadał mikrostrukturę i właściwości mechaniczne prętów o zmodyfikowanym składzie chemicznym. Uzyskane wyniki zostały poddane analizie i na tej podstawie sformułowano ostateczne wnioski w postaci wytycznych technologicznych procesy wytwarzania stali bainitycznej o projektowanych właściwościach.

Moim zdaniem recenzowana praca dotyczy problemów o dużym znaczeniu, nie tylko naukowym, ale przede wszystkim praktycznym. Obejmuje bardzo aktualny wątek badawczy w inżynierii materiałowej - rozwój nowych materiałów i technologii ich wytwarzania.

### **Uwagi redakcyjne**

Recenzowana praca jest kompletna i napisana w sposób zrozumiały. Jej układ jest klasyczny. Po krótkim wstępie Autor rozprawy dokonał przeglądu aktualnego stanu wiedzy na podstawie obszernego przeglądu literatury. Następnie przedstawił motywację podjęcia badań, postawił tezę i sformułował cel pracy. Na koniec rozprawy przedstawił uzyskane wyniki badań i poddał je krytycznej analizie.

Rozprawę czyta się z zainteresowaniem, zwłaszcza że jest napisana dobrym językiem i nie zawiera istotnych błędów redakcyjnych. Warto zwrócić uwagę na liczne i aktualne powołania literaturowe.

### **Cele i tezy**

Technologia walcowania trójrolkowego prętów jest dobrze znana i opisana w literaturze. Zasada wytwarzania tą metodą prętów jest podobna do procesu XTP wdrożonego w firmie Swiss Steel. Pomimo powszechnej wiedzy na temat tego typu obróbki materiałów, w literaturze niewiele jest danych na temat walcowania stali o strukturze bainitycznej. W zakresie jednostopniowego walcowania XTP stali bainitycznych wiedza ta jest niewystarczająca i ogranicza się jedynie do pierwszych prac dotyczących stali 7MnB8, które powstały w wyniku współpracy firm Steeltec i Swiss Steel. Pierwsze wyniki testów XTP na tej stali były obiecujące i pokazały potencjał tego nowego rodzaju wyrobów stalowych.

Z przeglądu aktualnego stanu wiedzy przeprowadzonego przez Autora rozprawy wynika, że w żadnej z publikacji nie poruszono zagadnień związanych z badaniem wpływu modyfikacji struktury bainitycznej na udarność tego typu stali po procesie XTP. Było to bezpośrednią motywacją Doktoranta do podjęcia badań i postawienia hipotezy, że "dobór zawartości dodatków stopowych w stali bainitycznej w połączeniu z opracowaniem parametrów innowacyjnego jednostopniowego termomechanicznego procesu walcowania XTP umożliwia uzyskanie struktury gradientowej prowadzącej do obniżenia temperatury przejścia materiału ze stanu plastycznego w kruchy bez istotnych zmian wartości innych podstawowych właściwości mechanicznych prętów w porównaniu z konwencjonalną stalą 7MnB8".

Aby zweryfikować tę tezę, mgr inż. Radosław Rozmus opracował program badawczy, którego celem było otrzymanie stali o podwyższonej udarności w niskich temperaturach w porównaniu z konwencjonalną stalą 7MnB8 produkowaną przez partnera przemysłowego - firmę Swiss Steel w procesie XTP. Badania prowadzono w celu optymalizacji procesu walcowania tej stali o zmodyfikowanym składzie chemicznym (głównie zmiany składu pierwiastków takich jak Mn, Mo, Nb, V i Ti) w celu poprawy wartości DBTT przy zachowaniu właściwości wytrzymałościowych uzyskiwanych dla stali 7MnB8.

Autor rozprawy zrealizował bardzo bogaty program badawczy, który obejmował obliczenia termodynamiczne, symulację numeryczną różnych parametrów procesu XTP oraz badania eksperymentalne: mikroskopię świetlną i elektronową, badania dylatometryczne, badania właściwości mechanicznych (twardość, statyczna próba rozciągania, udarność) oraz badania przemysłowe procesu XTP.

Techniki badawcze zostały odpowiednio dobrane i pozwoliły Autorowi rozprawy zrealizować z sukcesem założony program badawczy, który obejmował trzy etapy:

1. Wstępne badanie stanu stali przemysłowej 7MnB8 (charakterystyka kinetyki wzrostu ziarna i określenie temperatury austenitizacji oraz symulacja badań przemysłowych w dylatometrze).
2. Optymalizacja parametrów procesu XTP (przeprowadzenie badań przemysłowych z proponowanymi parametrami procesu oraz charakterystyka mikrostruktury i właściwości mechanicznych produkowanych prętów).
3. Opracowanie zmodyfikowanego składu stali 7MnB8 (przygotowanie pięciu odlewów laboratoryjnych, badania przemysłowe procesu XTP dla nowych gatunków stali 7MnB8, badanie mikrostruktury i właściwości mechanicznych prętów o zmodyfikowanym składzie chemicznym).

Uzyskane wyniki badań zostały poddane wnikliwej analizie i na tej podstawie Doktorant sformułował wnioski końcowe.

Reasumując należy stwierdzić, że cel i zakres pracy spełniają wymagania stawiane pracom badawczym będących przedmiotem rozpraw doktorskich.

### **Najważniejsze wyniki**

Mgr inż. Radosław Rozmus zrealizował bardzo ambitny program badawczy i wnikliwie przeanalizował uzyskane wyniki. Należy podkreślić, że mają one bardzo dużą wartość poznawczą i potencjał wdrożeniowy. Doktorant badał wpływ składu chemicznego stali bainitycznej (jako punkt odniesienia wybrał stal 7MnB8) na kształtowanie się mikrostruktury i jej właściwości po procesie XTP. Zarówno optymalizacja składu chemicznego tej stali (badania prowadzono na pięciu wariantach stali), jak i dobór parametrów procesu XTP posłużyły do weryfikacji hipotezy badawczej, w której Autor rozprawy postulował, że kontrolowanie tych parametrów zapewni uzyskanie "struktury gradientowej prowadzącej do obniżenia temperatury przejścia materiału ze stanu plastycznego w kruchy bez istotnych zmian w wartości innych podstawowych właściwości mechanicznych walcowanych prętów w stosunku do konwencjonalnej stali 7MnB8". Eksperymenty przeprowadzone przez Doktoranta bardzo dobrze obrazuje schemat przedstawiony na Rysunku 187 (Rozdział 7 "Podsumowanie"). Przedstawiono na nim wpływ składu chemicznego stali na mikrostrukturę i uzyskane właściwości mechaniczne badanych stali po walcowaniu XTP (przy parametrach procesu:  $T_A = 980\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_R = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$  i przyspieszonym chłodzeniu  $\sim 7,6\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ).

Przeprowadzona przez mgr inż. Radosława Rozmusa analiza aktualnego stanu wiedzy pozwoliła scharakteryzować najważniejsze parametry obróbki z punktu widzenia uzyskania specyficznej struktury zapewniającej wymagane właściwości mechaniczne badanej stali.

Autor rozprawy rozpoczął weryfikację tezy od symulacji numerycznej procesu walcowania w celu określenia optymalnych parametrów procesu. W kolejnym etapie badań zoptymalizował parametry procesu XTP. Po walcowaniu uzyskano mikrostrukturę gradientową. Doktorant zaobserwował, że odkształcenie kumulują się głównie w obszarze przypowierzchniowym, gdzie zidentyfikował największe rozdrobnienie ziarna.

Z praktycznego punktu widzenia bardzo ważnym spostrzeżeniem Doktoranta było to, że ograniczenie szybkości chłodzenia do  $\sim 2,3\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ , zmniejsza grubość drobnoziarnistej strefy przypowierzchniowej około czterokrotnie, dzięki czemu struktura pręta na przekroju charakteryzuje się większą jednorodnością. Autor rozprawy określił również wpływ

parametrów procesu walcowania stali 7MnB8 na jej udarność – najniższą wartość DBTT = -120 °C uzyskano dla parametrów: TA = 980 °C, TR = 700 °C oraz przyspieszonego chłodzenia ~ 7,6 °C/s.

Ważnym osiągnięciem mgr inż. Radosława Rozmusa było wykonanie analizy porównawczej mikrostruktury i właściwości mechanicznych stali o różnej zawartości Mn, Mo, Nb, V i Ti poddanych obróbce z wykorzystaniem parametrów technologicznych, dla których uzyskano najniższą wartość DBTT. Autor rozprawy udowodnił, że zmniejszenie zawartości Ti prowadzi do eliminacji w mikrostrukturze wydzieleni Ti<sub>2</sub>CS i gruboziarnistych cząstek TiN. Obecność tych faz jest niepożądana w stali, gdzie wymagana jest wysoka wytrzymałość na obciążenia dynamiczne.

Doktorant wykazał, że rola innych pierwiastków stopowych jest nie mniej ważna. Odmianą mikrostrukturę prętów uzyskano w stali o podwyższonej zawartości Mn do 2,9% wag. Zwiększenie hartowności poprzez zwiększenie Mn z ~ 1,9 do 2,9% wag. prowadzi do złożonej morfologii bainitu. Z kolei wyższa zawartość Mo poprawia udarność stali. Natomiast wanad w stali po procesie walcowania zastąpił Ti i Nb w wydzieleniach typu MC i M<sub>2</sub>N. Badania mgr inż. Radosława Rozmusa wykazały, że najniższe wartości DBTT występują w stalach, w których obniżono zawartość Ti poniżej 0,03% wag. oraz zastosowano dodatek Nb. Uzyskano wartość DBTT -150°C przy wysokiej zawartości Nb i -180°C przy niskiej.

Moim zdaniem ważnym osiągnięciem badawczym Doktoranta jest opracowanie parametrów technologicznych jednoetapowego procesu walcowania XTP, a także optymalizacja doboru składu chemicznego stali 7MnB8 pod kątem uzyskania poprawy wartości DBTT, przy zachowaniu właściwości wytrzymałościowych uzyskanych początkowo dla tej stali. Przeprowadzone przez Doktoranta badania pozwalają na stwierdzenie, że teza rozprawy: "Dobór zawartości dodatków stopowych w stali bainitycznej w połączeniu z opracowaniem parametrów innowacyjnego jednostopniowego termomechanicznego procesu walcowania XTP umożliwia uzyskanie struktury gradientowej prowadzącej do obniżenia temperatury przejścia materiału ze stanu plastycznego w kruchy bez istotnych zmian wartości innych podstawowych właściwości mechanicznych prętów w porównaniu z konwencjonalną stalą 7MnB8", została pozytywnie zweryfikowana.

Należy podkreślić, że wyniki eksperymentów i analiz przeprowadzonych przez mgr inż. Radosława Rozmusa mają bardzo duży potencjał wdrożeniowy i wnoszą nową wiedzę w obszarze doboru składu chemicznego nowoczesnych stali konstrukcyjnych oraz sterowania procesami cieplno-mechanicznymi w celu optymalizacji ich właściwości użytkowych.

## Uwagi

W rozdziale 3 "Cel pracy" Doktorant pisze, że wiedza o procesie kształtowania stali bainitycznych metodą XTP jest niewystarczająca i ogranicza się jedynie do pierwszych prac, które zostały wykonane w wyniku współpracy firm Steeltec i Swiss Steel z wykorzystaniem stali 7MnB8. Stwierdza dalej, że „pierwsze wyniki badań nad stalą bainityczną 7MnB8 XTP są obiecujące i pokazują potencjał tej nowej klasy wyrobów stalowych”. W związku z tym wydaje się uzasadnione, że do badań weryfikujących postawioną w rozprawie tezę Doktorant wybrał stal 7MnB8.

Pojawia się jednak pytanie – czy zastosowana w eksperymencie metodologia badawcza jest na tyle uniwersalna, aby można ją zastosować do optymalizowania wybranych właściwości użytkowych innych rodzajów stali, w tym bainitycznych?

Dobór parametrów procesu XTP oraz modyfikacja składu chemicznego stali 7Mn8B miały wykazać, że "możliwe jest uzyskanie w procesie XTP struktury gradientowej prowadzącej do obniżenia temperatury przejścia materiału ze stanu plastycznego w kruchy bez istotnych zmian wartości innych podstawowych właściwości mechanicznych prętów, w stosunku do konwencjonalnej stali 7MnB8”.

Dlaczego wybrano parametr DBTT? Czy opracowane parametry procesu XTP oraz optymalizacja składu chemicznego badanej stali mogą przyczynić się do poprawy innych parametrów wytrzymałościowych (np. wytrzymałości zmęczeniowej)?

## Opinia końcowa

Uważam, że rozprawa doktorska "Effect of the chemical composition and processing parameters on the microstructure and mechanical properties of the bars subjected to innovative XTP process" przedstawiona przez mgr inż. Radosława Rozmusa ma dużą wartość naukową i potencjał wdrożeniowy. Autor pracy wybrał bardzo aktualny problem badawczy o charakterze aplikacyjnym, umiejętnie sformułował cel i zakres pracy oraz wnikliwie przeprowadził analizę otrzymanych wyników badań. Uzyskane przez Doktoranta wyniki badań dowiodły, że poprzez dobór pierwiastków stopowych w stali bainitycznej (modyfikacja składu chemicznego stali

7MnB8) oraz optymalizację procesu XTP możliwe jest uzyskanie struktury prowadzącej do obniżenia temperatury przejścia tego materiału ze stanu plastycznego w kruchy bez istotnych zmian wartości innych podstawowych właściwości mechanicznych, w stosunku do konwencjonalnej stali 7MnB8.

Na podstawie przeprowadzonej oceny pracy doktorskiej mgr inż. Radosława Rozmusa pt. „Effect of the chemical composition and processing parameters on the microstructure and mechanical properties of the bars subjected to innovative XTP process” stwierdzam, że spełnia ona warunki określone w art. 187. Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. (Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce, Dz. U. 2022, poz. 574) i wnioskuję do Rady Naukowej Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej o dopuszczenie mgr inż. Radosława Rozmusa do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk Inżynieryjno-Technicznych w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa.

W mojej ocenie wyniki eksperymentów i analiz przeprowadzonych przez mgr inż. Radosława Rozmusa w przedstawionej rozprawie doktorskiej wnoszą istotny wkład w rozwój wiedzy w obszarze nowoczesnych stali konstrukcyjnych.

W związku z tym wnioskuję do Rady Naukowej Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej o wyróżnienie rozprawy pt. "Effect of the chemical composition and processing parameters on the microstructure and mechanical properties of the bars subjected to innovative XTP process" autorstwa mgr inż. Radosława Rozmusa.

*Jaworski Mirosław*