

## 8. Podsumowanie

Głównym celem podjętych badań było opracowanie metodyki projektowania nowych stali szybko tnących o wymaganych własnościach użytkowych, w tym twardości oraz odporności na pękanie wyrażonej wartością współczynnika intensywności naprężeń, jako podstawowych własnościach gwarantujących wysoką trwałość i jakość narzędzi z nich wytwarzanych. Przyjęto, że kryterium przy projektowaniu stali szybko tnących, są twardość oraz odporność na rozprzestrzenianie się pęknięć wyrażona wartością współczynnika intensywności naprężeń  $K_{Ic}$ . W tym celu opracowano odpowiednie modele – twardości oraz odporności na pękanie wyrażone współczynnikiem  $K_{Ic}$ .

W przypadku twardości, opracowano dwa modele umożliwiające obliczanie twardości stali szybko tnącej wyłącznie na podstawie składu chemicznego stali oraz parametrów obróbki cieplnej, tj. temperatury austenitowania oraz odpuszczania. Pierwszy, model statystyczny, opracowano stosując metodę regresji wielokrotnej. Natomiast drugim jest model sieci neuronowej. W obydwu przypadkach do ich opracowania wykorzystano wyniki prac własnych nad wpływem pierwiastków stopowych na efekt twardości wtórnej, a także dane zawarte w katalogach oraz normach przedmiotowych dotyczących stali szybko tnących [62, 63, 110, 114, 134, 174, 216]. W wyniku wykonanych badań potwierdzono założenie, że możliwe jest wykorzystanie danych katalogowych oraz z norm, które uzupełnią zbiór danych niezbędnych do opracowania założonego modelu, zwiększając tym samym jego adekwatność oraz uniwersalność.

Opracowane modele poddano weryfikacji doświadczalnej, co opisano w p. 5.1 (tabela 17, rys. 37-39).

W drugim przypadku - odporności stali szybko tnących na pękanie, opracowano model sieci neuronowej pozwalający na obliczenie wartości współczynnika intensywności naprężeń na podstawie składu chemicznego stali oraz parametrów obróbki cieplnej bez konieczności wykonywania badań metaloznawczych. Wyniki weryfikacji modelu podano w p. 5.2 (tabela 18, rys. 43-53).

Opracowane modele materiałowe wykorzystano do projektowania składu chemicznego nowych stali szybko tnących, wykazujących pożądane własności, tj. twardość oraz odporność

na pękanie. Opracowano w tym celu metodykę, wykorzystującą algorytmy ewolucyjne, wielokryterialnej optymalizacji składu chemicznego stali szybko tnących. Postać przyjętej funkcji celu (równ. 11) oraz ograniczenia optymalizacji (tabela 19 i 20) przedstawiono w p. 6.

Opracowany własny program komputerowy umożliwia prowadzenia badań dotyczących projektowania składu chemicznego stali o wymaganej twardości oraz odporności na pękanie. Możliwe jest dowolne, w zakresie granic optymalizacji, definiowanie obszaru poszukiwań optymalnego składu chemicznego stali szybko tnącej. Ponadto w programie przewidziano możliwość zmiany parametrów optymalizacji, które też mogą mieć wpływ na wyniki obliczeń, czyli dowolny dobór zestawu parametrów związanych z zarządzaniem populacją. Należy wyraźnie podkreślić, że każdorazowe wykonanie obliczeń prowadzi do innych rezultatów, co jest wynikiem losowania populacji początkowej. Tak więc uzyskiwane wyniki są unikalne w całej przestrzeni poszukiwań optymalnego składu chemicznego. Z drugiej strony wskazać należy, że relacja skład chemiczny/parametry obróbki  $\Leftrightarrow$  własności, stanowiąca paradygmat inżynierii materiałowej, obowiązuje jednostronnie. Bowiem materiał o określonym składzie chemicznym w określonym stanie obróbki wykazuje ściśle określone własności. Natomiast istnieje wiele różnych materiałów różniących się składem chemicznym w różnych stanach obróbki wykazujących takie same własności.

Przedstawione w pracy rozwiązania, opierające się na wykorzystaniu adekwatnych modeli materiałowych, mogą stanowić interesującą alternatywę przy projektowaniu nowych materiałów o wymaganych własnościach. Szczególnego podkreślenia wymaga aspekt praktyczny, jaki stwarzają opracowane modele, mogące z powodzeniem zastępować wymienione próby technologiczne polegające na jednokrotnym doborze składu chemicznego oraz parametrów obróbki cieplnej i weryfikacji doświadczalnej nowo wytworzonego materiału pod kątem spełnienia oczekiwanych własności. Należy również zwrócić uwagę, na możliwość wykorzystania opracowanych modeli do symulacji wpływu pierwiastków stopowych na własności stali szybko tnących, w tym analizę synergii oddziaływania poszczególnych składników stopowych (rys. 64-80), co stanowi interesujące narzędzie badawcze i dydaktyczne.

Ponadto wykazano, że zastosowanie narzędzi komputerowych pozwala na szczególnie efektywne wykorzystanie istniejących zasobów danych materiałowych zawartych w

publikacjach, normach, katalogach i bazach danych i ich zintegrowanie w postaci modeli materiałowych. Obecnie korzyści wynikających ze stosowania metod komputerowego wspomaganie w projektowaniu i wytwarzaniu nie da się negować. Czynnikiem czasu decydujący o powodzeniu wielu przedsięwzięć, jak również aspekt ekonomiczny przy projektowaniu nowych produktów jednoznacznie wskazuje na konieczność rozwijania i wdrażania metod komputerowego wspomaganie, również w obszarze inżynierii materiałowej, a wykonane badania wychodzą naprzeciw tym oczekiwaniom.

Postęp w obszarze inżynierii materiałowej jest nierozzerwalnie związany ze stosowaniem i rozwojem metod modelowania matematycznego, metod numerycznych, metod inteligencji obliczeniowej i sztucznej inteligencji. Modelowanie i symulacja komputerowa umożliwiają poprawę własności materiałów inżynierskich oraz przewidywanie ich własności nawet przed wyprodukowaniem materiałów, przy znaczącym zmniejszeniu nakładów i czasu niezbędnych dla ich badania i wdrożenia. Modelowanie staje się więc nieodzownym narzędziem w nauce o materiałach i inżynierii materiałowej

Przedstawione podejście do projektowania nowych materiałów, będące nową filozofią projektowania materiałowego, zakłada maksymalne możliwe ograniczenie wykonywanie niezbędnych eksperymentów na rzecz wykorzystania istniejących zasobów wiedzy eksperymentalnej w postaci baz danych oraz najefektywniejszych narzędzi informatycznych, w tym sieci neuronowych oraz algorytmów ewolucyjnych. Wskazać należy, że wiedza materiałoznawcza, dotycząca niejednokrotnie wieloaspektowych zagadnień klasycznych i opisana, albo raczej zapisana w istniejących - szeroko rozumianych - bazach danych, stanowi nieocenione źródło informacji do wykorzystania przy odkrywaniu niepoznanych dotychczas zależności opisujących relacje struktura materiału – własności. Kluczowym przy tym jest zagadnienie integracji wiedzy materiałoznawczej oraz narzędzi informatycznych dla odkrywania nowych, niepoznanych dotychczas zależności, oraz budowania modeli materiałowych w oparciu o tę wiedzę, która została na przestrzeni wielu lat pozyskana w wyniku badań eksperymentalnych. Zastosowanie adekwatnych modeli materiałowych umożliwia wykonywanie symulacji komputerowych pozwalających na przewidywanie własności materiałów w różnych konfiguracjach zarówno np. składu chemicznego, stanu przetworzenia (np. obróbki cieplnej) czy postaci produktu.

## Metodologia projektowania stali szybkołnących z wykorzystaniem narzędzi sztucznej inteligencji

### Streszczenie

Głównym celem wykonanych badań było opracowanie metodyki projektowania nowych stali szybkołnących o wymaganych własnościach, w tym twardości oraz odporności na pęknięcie wyrażonej wartością współczynnika intensywności naprężeń. W pierwszej kolejności opracowano adekwatne modele umożliwiające obliczanie twardości stali szybkołnącej oraz odporności na pęknięcie wyłącznie na podstawie składu chemicznego stali oraz parametrów obróbki cieplnej, tj. temperatury austenizowania oraz odpuszczania. W wyniku wykonanych badań potwierdzono, że możliwe jest wykorzystanie danych katalogowych oraz z norm, które uzupełniając zbiór danych eksperymentalnych niezbędnych do opracowania założonego modelu, zwiększają jego adekwatność oraz uniwersalność. Do projektowania składu chemicznego nowych stali szybkołnących, wykazujących wymaganą twardość oraz odporność na pęknięcie opracowano metodykę wielokryterialnej optymalizacji składu chemicznego stali szybkołnących, z wykorzystaniem algorytmów ewolucyjnych. Zastosowano ją we własnym programie komputerowym, który umożliwia projektowanie składu chemicznego stali o wymaganej twardości oraz odporności na pęknięcie w definiowanym zakresie obszaru poszukiwań optymalnego składu chemicznego stali szybkołnącej. Przedstawione w pracy rozwiązania, opierające się na wykorzystaniu adekwatnych modeli materiałowych, mogą stanowić alternatywę przy projektowaniu nowych materiałów o wymaganych własnościach. Szczególnego podkreślenia wymaga aspekt praktyczny, jaki stwarzają opracowane modele, mogące z powodzeniem zastępować wymienione próby technologiczne polegające na jednokrotnym doborze składu chemicznego oraz parametrów obróbki cieplnej i weryfikacji doświadczalnej nowo wytworzonego materiału pod kątem spełnienia oczekiwanych własności. Wykazano również, że zastosowanie narzędzi komputerowych pozwala na szczególnie efektywne wykorzystanie istniejących zasobów danych materiałowych zawartych w publikacjach, normach, katalogach i bazach danych i ich zintegrowanie w postaci modeli materiałowych.

## **Methodology of high-speed steels design using the artificial intelligence tools**

### **Abstract**

The main goal of the research carried out was developing the design methodology for the new high-speed steels with the required properties, including hardness and crack resistance expressed by the fracture toughness. The adequate models were developed first, making computation possible of the high-speed steel hardness and its crack resistance solely based on chemical composition of the steel and its heat treatment parameters, i.e., austenitizing- and tempering temperature. The research carried out confirmed that using the catalogue data and standards is possible, which - supplementing the set of experimental data indispensable to develop the assumed model - improve its adequacy and versatility. Methodology of the multicriteria optimization of the high-speed steel chemical composition, using the evolutionary algorithms, was developed to design the chemical composition of the new high-speed steels, demonstrating the required hardness and fracture toughness. It was used in the own computer program, which makes design possible of the chemical composition of steel with the required hardness and fracture toughness in the specified search area for the optimum high-speed steel chemical composition. Solutions presented in the work, based on using the adequate material models may feature an alternative in designing of the new materials with the required properties. The practical aspect has to be noted, resulting from the developed models, which may successfully replace the above mentioned technological investigations, consisting in one time selection of the chemical composition and heat treatment parameters and experimental verification of the newly developed materials to check of its properties meet the requirements. It was also demonstrated that employment of computer tools makes especially efficient use possible of the existing materials data resources contained in publications, standards, catalogues, and data bases, and their integration in the material models form.