

## Spis treści

PRZEDMOWA .....	7
1. WPROWADZENIE.....	8
2. UKŁAD RÓWNOWAGI FAZOWEJ ŻELAZO – WĘGIEL.....	9
3. PODSTAWOWE INFORMACJE O ŻELIWIE I JEGO RODZAJACH ....	15
4. KRYSTALIZACJA ŻELIWA Z GRAFITEM WERMIKULARNYM .....	44
4.1 Podstawowe informacje o graficie .....	44
4.2 Mechanizm krystalizacji grafitu wermikularnego.....	50
5. TECHNOLOGIA ŻELIWA WERMIKULARNEGO.....	59
5.1 Dobór optymalnego składu chemicznego żeliwa wyjściowego.....	60
5.2 Materiały wsadowe .....	62
5.3 Metody wermikularyzacji żeliwa.....	64
5.3.1 Obróbka ciekłego metalu specjalnymi zaprawami (metoda amerykańska) .....	65
5.3.2 Obróbka ciekłego metalu pierwiastkami ziem rzadkich (metoda austriacka) .....	68
5.3.3 Obróbka ciekłego żeliwa regulowaną ilością magnezu .....	70
5.3.4 Obróbka ciekłego żeliwa zaprawą magnezowo-cerową (metoda General Motors) .....	75
5.4 Modyfikacja grafityzująca .....	77
6. MIKROSTRUKTURA, GATUNKI I WŁAŚCIWOŚCI ŻELIWA Z GRAFITEM WERMIKULARNYM .....	80
7. ZASTOSOWANIE ŻELIWA WERMIKULARNEGO .....	86
8. WPŁYW WYBRANYCH DODATKÓW STOPOWYCH NA MIKROSTRUKTURĘ I WŁAŚCIWOŚCI ŻELIWA.....	90
8.1 Wpływ molibdenu.....	90
8.2 Wpływ chromu.....	97
8.3 Wpływ niklu.....	103

8.4	Wpływ miedzi.....	112
8.5	Wpływ cyny.....	119
8.6	Wpływ aluminium.....	124
9.	ŻELIWO WERMIKULARNE AUSFERRYTYCZNE.....	134
9.1	Żeliwo wermikularne ausferrytyczne hartowane z przemianą izotermiczną.....	134
9.2	Żeliwo wermikularne ausferrytyczne otrzymywane bez obróbki cieplnej odlewów .....	146
10.	ZAKOŃCZENIE .....	156
	BIBLIOGRAFIA.....	157
	Streszczenie .....	181
	Abstract .....	182

## PRZEDMOWA

W książce przedstawiono zwięźle stan wiedzy o żeliwie wermikularnym. Jako materiał odlewniczy o dużym potencjale użytkowym jest on obiektem zainteresowania badaczy i tematem wielu artykułów naukowych. Według danych zawartych w bazie Scopus w latach 2001–2011 pod hasłem: *compacted graphite iron* znajdowały się zaledwie 282 pozycje, natomiast w latach 2012–2022 odnaleźć można ich było już 1255. Tendencja zwyżkowa świadczy o dynamicznym wzroście zainteresowania tym niezwykle wartościowym i ciekawym z użytkowego punktu widzenia materiałem odlewniczym. Jednocześnie stop ten znajduje się w kręgu zainteresowań nauczycieli akademickich prowadzących zajęcia z zakresu odlewnictwa czy nauki o materiałach, a w efekcie żeliwo to staje się przedmiotem wielu prac dyplomowych.

Żeliwu wermikularnemu poświęcano też rozdziały w książkach, w tym monografiach. Cieszy się ono również wciąż wzrastającym zainteresowaniem producentów, spełniających wysokie wymagania klientów. Jednak, jak wykazała przeprowadzona analiza literatury, brak jest opracowania obejmującego szerszy zakres wiedzy dotyczącej tego rodzaju żeliwa.

Prezentowana publikacja stanowi uzupełnienie wspomnianej luki na rynku wydawniczym. Celem niniejszego opracowania jest zestawienie istotnych dla wskazanej problematyki informacji. W założeniu monografia stanowić ma obszerne kompendium wiedzy na temat wspomnianego rodzaju stopu, zawierając nie tylko podstawy dotyczące tego żeliwa, ale też obejmując wyniki najnowszych badań. Publikację przygotowano z myślą zarówno o naukowcach, jak i inżynierach oraz studentach zainteresowanych problematyką nowoczesnych stopów odlewniczych.

# 1. WPROWADZENIE

Pierwsze wzmianki o żeliwie z grafitem, znanym obecnie jako wermikularny, pochodzą z końca lat 40. XX wieku. Jakkolwiek taką postać grafitu otrzymywano już w odlewach wytwarzanych w roku 1948, to na współcześnie znaną nazwę trzeba było czekać kilkanaście następnych lat. Nazwę „grafit wermikularny” zawdzięcza się Robertowi Douglasowi Schellengowi, który jako pierwszy wprowadził wyraźny podział pomiędzy postaciami grafitu wermikularnego, kulkowego i zwartego na podstawie klasyfikacji z początku lat 60. XX wieku [1]. Etymologii nazwy szukać należy w języku angielskim (ang. *vermicular* – robaczkowy), bądź łacińskim (łac. *vermiculus* – robaczek), chociaż w literaturze angielskojęzycznej ten rodzaj grafitu często określa się mianem *compacted* – zwarty, a taki rodzaj żeliwa *Compacted Graphite Iron* (CGI). Ta postać grafitu, otrzymywana w wyniku zastosowania zbyt małej ilości sferoidyzatora lub zaniku efektu sferoidyzacji, traktowana była początkowo jako postać niepożądana w mikrostrukturze żeliwa sferoidalnego. Praktyczne zastosowanie dla takiego rodzaju stopu znaleziono dopiero w połowie lat 50. XX wieku. Było to efektem interesujących właściwości żeliwa wermikularnego, które łączy dobre właściwości wytrzymałościowe z odpornością na zmęczenie cieplne. Początek przemysłowego zastosowania tego stopu datuje się na koniec lat 60. XX wieku, kiedy w Austrii rozpoczęto seryjną produkcję części motoryzacyjnych z żeliwa wermikularnego ferrytycznego [2]. Kolejne lata przynosiły sukcesywny rozwój w produkcji odlewów z żeliwa z grafitem wermikularnym, powiązany z rozwojem zaawansowanych technik kontroli procesu wytwarzania [3].

Żeliwo wermikularne jest materiałem nowoczesnym o wysokim potencjale utylitarnym, który z powodzeniem stosuje się na szereg odlewów elementów maszyn i urządzeń, szczególnie pracujących w warunkach zmęczenia cieplnego [3–7]. Jego produkcja jest wciąż rozwijana i udoskonalana. Na przykład w Szwecji, w Södertälje, w 2021 roku uruchomiono, zbudowaną od podstaw, odlewnię wytwarzającą odlewy wyłącznie z żeliwa wermikularnego dla jednej z wiodących firm motoryzacyjnych w Skandynawii.