

MIKULSKA Aneta

## KSZTAŁTOWANIE WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNYCH STALIWA

### *Streszczenie*

*W opracowaniu przedstawiono ilościowe i jakościowe relacje między geometrią struktury dendrytycznej staliwa typu Cr-Mo-V-Cu-Ni, a jego zużyciem w procesie tarcia w temperaturze 293K i 233K. Analizę ilościową struktury wykonano, opierając się na stereologicznej metodzie metalografii ilościowej, przyjmując do opisu: średnią liniową grubość dendrytów, wskaźnik ich dyspersji oraz objętość względną dendrytów i przestrzeni międzidendrytycznych. Przedstawiono wybrane, graficzne elementy zależności zużycia  $I_z$  od parametrów opisujących geometrię struktury staliwa.*

### WSTĘP

Odporność na ścieranie części maszyn i urządzeń często stanowi o żywotności, awaryjności, kosztach eksploatacji i skali szkodliwości urządzeń technicznych wobec środowiska naturalnego. Tak jest w eksploatacji maszyn i urządzeń: wydobywczych, geologicznych, budowlanych, transportowych. Znane są problemy zużywania: zębów koparek, koronek sprzętu wiertniczego, ogni w gaśnicach, rolek, kół biegowych. Wszystkie te części są wykonywane ze staliwa. Staliwo, z charakterystyczną: budową dendrytyczną, segregacją pierwiastków i faz, posiada jemu tylko właściwą naturalną heterogeniczność struktury. Jest ona korzystna, między innymi, w warunkach termicznego osłabienia i zużycia poprzez tarcie, zwłaszcza w podwyższonej temperaturze. Niestety, struktury eksploatacyjnie korzystne w temperaturze dodatniej, najczęściej nie spełniają wymagań, jakie stawiane są materiałom do pracy w niskiej temperaturze [1÷4]. Materiały do pracy w warunkach ujemnych temperatur powinny być odporne na kruche niskotemperaturowe pękanie. W strukturze nie mogą zatem występować koncentratory naprężeń, a w heterogenicznej budowie wewnętrznej staliwa ich udział jest znaczny. Najlepsze pod tym względem są stopy jednofazowe, ale te nie odznaczają się odpowiednią odpornością na ścieranie.

W Instytucie Budowy Maszyn Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego w Radomiu opracowano liczną grupę gatunków staliwa odpornego na ścieranie, zawierającego kompleks stopowy Cr-Mo-V-Cu-Ni. Dotychczasowe badania [5, 6, 7] sugerują, że istnieją ilościowe i jakościowe relacje między geometrią struktury dendrytycznej staliwa i jego właściwościami eksploatacyjnymi. Wydaje się, iż można przedstawić taki zestaw wskaźników stereologicznych struktury, dla których staliwo wykazuje najwyższą odporność na destrukcję powierzchni i struktury. Takie uogólnienie byłoby na tyle wartościowe, że pozwoliłoby odstąpić od niekiedy nieracjonalnego stopowania staliwa deficytowymi pierwiastkami.

## 1. METODYKA I WARUNKI BADAŃ

Do badań użyto próbek ze staliwa typu Cr-Mo-V-Cu-Ni o średnicy 10 mm wykonanych metodą wytapianych modeli, które wyżarzano w temperaturze 1103K w okresie 3 godzin, a następnie studzono z piecem. Takie wyżarzanie miało na celu usunięcie austenitu szczytkowego, pozostawiając podstawową, pierwotną istotę budowy dendrytycznej w staliwie. Skład chemiczny staliwa wynikał z przyjętej metodologii planowania doświadczeń z zastosowaniem pełnoczynnikowej macierzy planowania  $2^3$ . Zmiennymi niezależnymi była zawartość: węgla, chromu i molibdenu. Koncepcja stopowania tymi pierwiastkami została opracowana ze względu na ich znaczące oddziaływanie na strukturę stopów, od której zależą właściwości eksploatacyjne. W badaniach zastosowano program komputerowy do obliczania współczynników regresji. Aby możliwe było wnioskowanie o skuteczności oddziaływania: węgla, chromu i molibdenu na zużycie ściernie oraz parametry opisujące geometrię struktury, czyniąc to na podstawie współczynników regresji. Zawartości tych pierwiastków zostały zakodowane według schematu (1) i sprowadzone do wartości  $\pm 1$ .

$$x_1 = \frac{C-0,4}{0,2}; \quad x_2 = \frac{Cr-8}{5}; \quad x_3 = \frac{Mo-0,5}{0,2} \quad (1)$$

gdzie: C, Cr, Mo – zawartość w procentach: węgla, chromu i molibdenu w staliwie. Zawartości pozostałych pierwiastków wynoszą: V =  $0,19 \div 0,26\%$ ; Mn =  $0,32 \div 0,46\%$ ; Si =  $0,30 \div 0,55\%$ ; Cu =  $1,40 \div 1,70\%$ ; Ni =  $0,42 \div 0,78\%$ ; P =  $0,010 \div 0,020\%$ ; S =  $0,001 \div 0,02\%$ .

Intensywność zużywania  $I_z$  w warunkach tarcia suchego badano w próbce 3 wałeczki – stożek w temperaturze 293K i 233K. Kształt i wymiary próbek były zgodne z normą PN-83/H-04302-2. Ujemną temperaturę otoczenia pary trącej realizowano przez umieszczenie układu tarcia w obudowie z suchym lodem. Izolację stanowił płaszcz próżniowy. Próbkę do badań pobierano z naczynia Dewara, w którym znajdował się suchy lód. Badania prowadzono według metodologii planowania doświadczeń, stosując rotabilną macierz II rzędu  $2^3$ . Intensywność zużycia opisano ilościowo równaniami regresji - w funkcji zawartości: węgla, chromu i molibdenu w staliwie.

Badania strukturalne staliwa obejmowały ukazanie struktury dendrytycznej staliwa i wykonane zostały przy użyciu mikroskopu optycznego Neophot 21. Obserwacje struktury przeprowadzono na zglądach poprzecznych przy powiększeniu 50 $\times$ . Zglądy trawiono odczynnikami o składzie: 80 ml HCl, 80 g FeCl<sub>3</sub>, 6 g CuCl<sub>2</sub>, 1000 ml H<sub>2</sub>O. Stereologię struktury dendrytycznej staliwa wyznaczono z wykorzystaniem programu Aphelion. Obliczono następujące wskaźniki stereologii:

$V_d$  – względna objętość dendrytów, %,

$V_{m-d}$  – względna objętość międzydendrytycznej strefy węglkowej, %,

$D_d$  – wskaźnik dyspersji dendrytów, mierzony stosunkiem całkowitego obwodu fazy podstawowej do całkowitej powierzchni tej fazy (według programu Aphelion) na głębokości około  $1/3$  promienia próbki.

$D_{m-d}$  – wskaźnik dyspersji przestrzeni między dendrytycznych, mierzony stosunkiem całkowitego obwodu fazy podstawowej do całkowitej powierzchni tej fazy (według programu Aphelion), na głębokości około  $1/3$  promienia próbki,

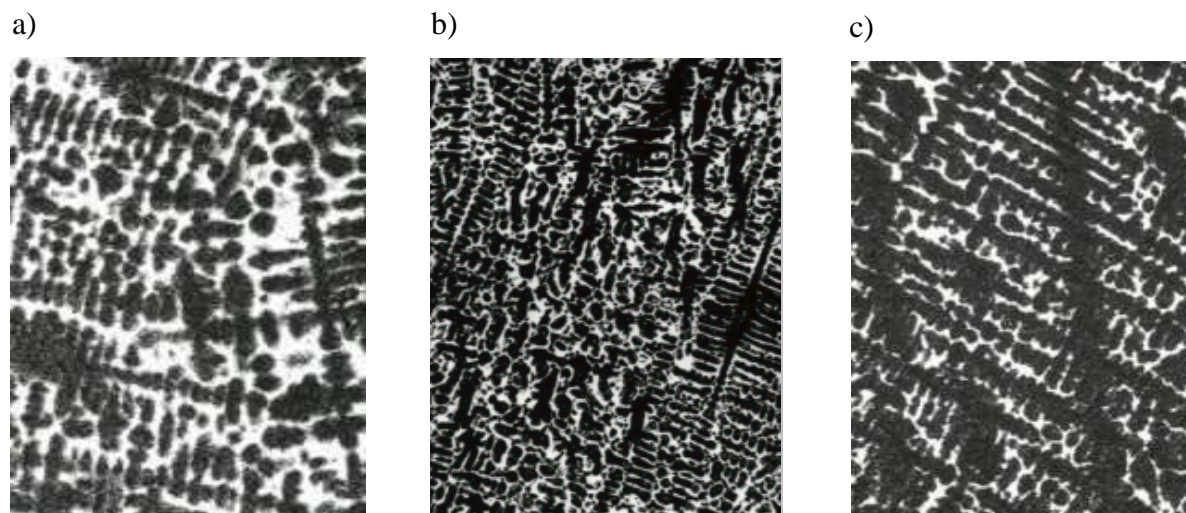
$L_d$  – liniowy, poprzeczny wymiar dendrytów,  $\mu\text{m}$ .

Wszystkie wyniki badań strukturalnych poddano analizie komputerowej, celem ustalenia zależności zużycia ściernego od uzyskanych wskaźników stereologii.

## 2. WYNIKI BADAŃ

Przykładowe struktury badanych gatunków staliwa pokazano na rys. 1.

W strukturze zaobserwować można charakterystyczne dla staliwa dendryty i wzbogacone w węgliki przestrzenie międzydendrytyczne.



**Rys. 1.** Struktura staliwa: a – wytop nr 2, b – wytop nr 4, c – wytop nr 5. Trawienie odczynnikami o składzie: 80 ml HCl, 80 g FeCl<sub>3</sub>, 6 g CuCl<sub>2</sub>, 1000 ml H<sub>2</sub>O. Pow. 50×

Wyniki badań intensywności zużywania oraz badań stereologicznych staliwa, po opracowaniu statystycznym, testowaniu istotności w oparciu o kryterium t – Studenta i adekwatności według F – Fishera, na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  opisano zależnościami (2) ÷ (8). Wybrane elementy graficznych postaci tych zależności przedstawiono na rys. 2÷5.

Zużycie w temperaturze 293K, [mm/m]:

$$I_Z(293) = (6,21 - 1,46x_1 - 0,29x_2 + 0,10x_3 + 0,12x_1x_2 - 0,27x_1x_3 - 0,04x_1^2 + 0,15x_2^2 - 0,09x_3^2) \cdot 10^{-2} \quad (2)$$

Zużycie w temperaturze 233K, [mm/m]:

$$I_Z(233) = (8,07 - 2,15x_1 - 0,25x_2x_3 - 0,39x_1^2 - 0,28x_2^2 - 0,10x_3^2) \cdot 10^{-2} \quad (3)$$

Średnia liniowa, wielkość dendrytów, [ $\mu\text{m}$ ]:

$$L_d = 28,11 - 13,6x_1 - 0,95x_2 - 2,54x_3 - 6x_1x_2 + 1,5x_1x_3 + 0,75x_2x_3 + 4,45x_1^2 + 0,38x_2^2 - 1,2x_3^2 \quad (4)$$

Względna objętość dendrytów, [%]:

$$V_d = 0,78 - 0,09x_1 + 0,02x_2 - 0,01x_3 - 0,03x_1x_2 - 0,03x_1x_3 + 0,002x_1^2 - 0,01x_2^2 + 0,002x_3^2 \quad (5)$$

Względna objętość międzydendrytycznej strefy węglikowej, [%]:

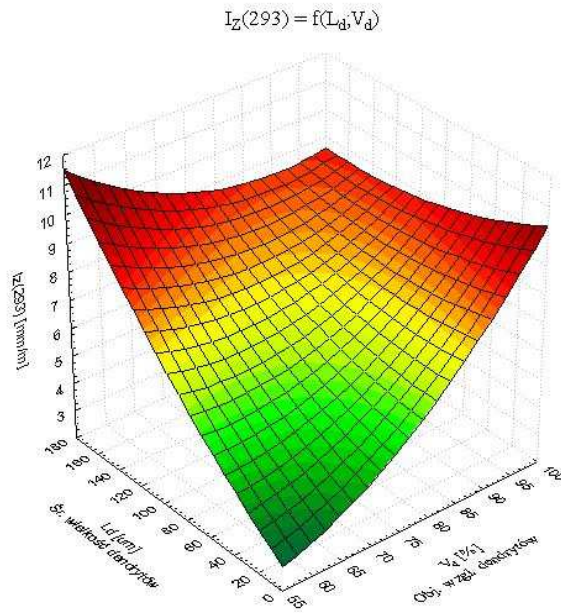
$$V_{m-d} = 22,2 + 9,01x_1 - 2,2x_2 + 1,4x_3 + 3,2x_1x_2 + 3,2x_1x_3 - 0,3x_1^2 + 1,5x_2^2 - 0,3x_3^2 \quad (6)$$

Wskaźnik dyspersji dendrytów, [ $\text{mm}^{-1} \cdot 10^{-3}$ ]:

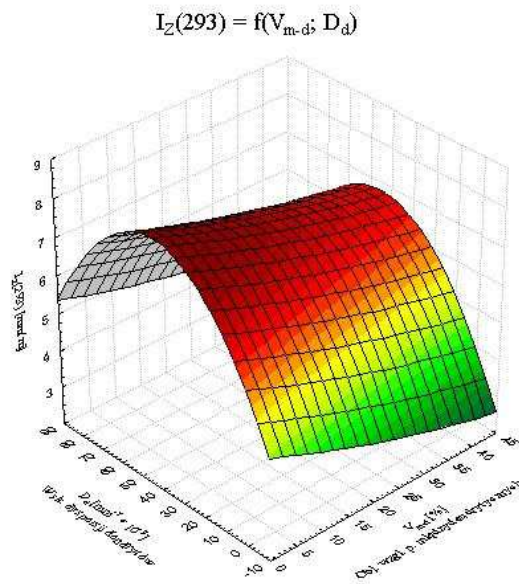
$$D_d = 0,07 + 0,03x_1 + 0,003x_2 + 0,004x_3 + 0,01x_1x_2 + 0,004x_1x_3 + 0,006x_1^2 - 0,002x_2^2 - 0,002x_3^2 \quad (7)$$

Wskaźnik dyspersji przestrzeni międzydendrytycznych,  $[\text{mm}^{-1} \cdot 10^{-3}]$ :

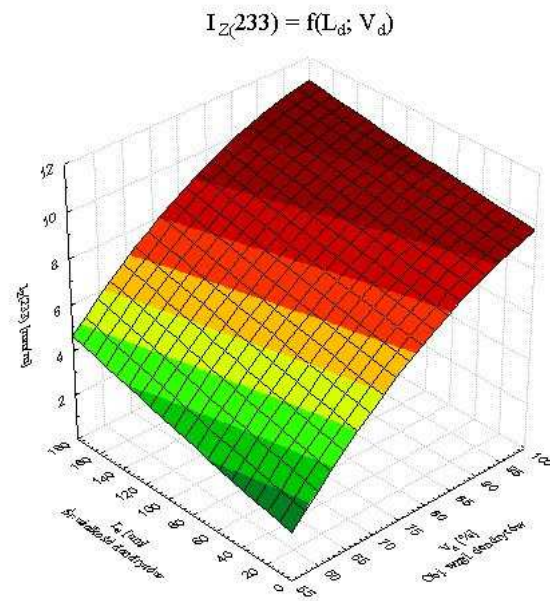
$$D_{m-d} = 0,3 + 0,02x_2 - 0,02x_1x_3 + 0,009x_1^2 - 0,03x_2^2 - 0,01x_3^2 \quad (8)$$



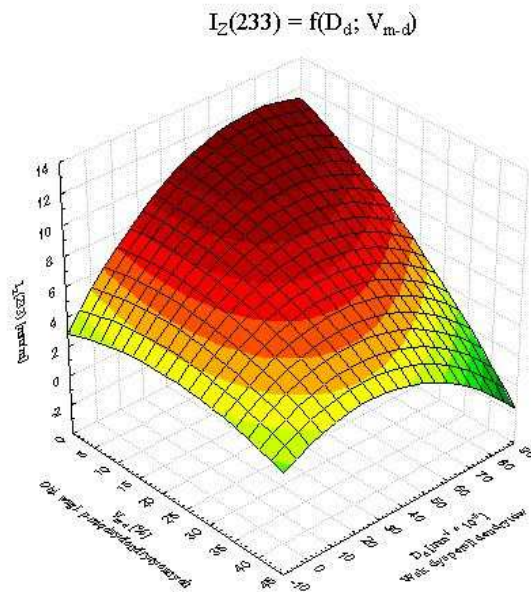
**Rys. 2.** Wpływ średniej liniowej wielkości dendrytów  $L_d$  i objętości względnej  $V_d$  na zużycie ścierne  $I_Z$  w temperaturze 293K



**Rys. 3.** Wpływ objętości względnej przestrzeni międzydendrytycznych  $V_{m-d}$  i wskaźnika dyspersji dendrytów  $D_d$  na zużycie ścierne  $I_Z$  w temperaturze 293K



**Rys. 4.** Wpływ średniej liniowej wielkości dendrytów  $L_d$  i objętości względnej  $V_d$  na zużycie ścierne  $I_Z$  w temperaturze 233K



**Rys. 5.** Wpływ objętości względnej przestrzeni międzydendrytycznych  $V_{m-d}$  i wskaźnika dyspersji dendrytów  $D_d$  na zużycie ścierne  $I_Z$  w temperaturze 233K

### 3. ANALIZA WYNIKÓW

Analizując równania (2) i (3) należy mieć na względzie, że staliwo w badanym stanie było najbliższe stanu **surowego – wejściowego**, a więc jego struktura wynikała z bezpośredniego wpływu składu chemicznego, zmiennego dla 20 gatunków staliwa. Z zamieszczonych danych wynika, że zużycie staliwa w temperaturze 233K jest znacząco wyższe, niż w temperaturze 293K. Uzyskany wynik niskiej odporności staliwa na zużycie ściernie w temperaturze ujemnej można tłumaczyć zmniejszeniem różnicy mikrotwardości dendrytów i strefy węglkowej. Twardość staliwa po obniżeniu temperatury do 233K wzrasta średnio o 5 jednostek HRC. Jest przy tym prawdopodobne, że silniejsze zamocowanie węglików w umocnionej osnowie, w takich warunkach tarcia jest niekorzystne.

Decydujący, korzystny wpływ na zmniejszenie zużycia staliwa po wyżarzaniu wywiera węgiel, a chrom i molibden mają znaczenie drugorzędne.

Zależności między stereologią struktury dendrytycznej i zużyciem na skutek tarcia, badanego staliwa, są zbliżone w temperaturach: 293K i 233K.

Niskie zużycie staliwa w temperaturze 293K występuje przy dendrytach o niskiej dyspersji oraz wielkości wynoszącej  $20 \div 30 \mu\text{m}$ , których objętość względna wynosi poniżej 70%.

Jednoznacznie niekorzystny - podczas próby tarcia w temperaturze 293K - jest liniowy wymiar dendrytów większy od  $100 \mu\text{m}$ , przy ich objętości względnej  $85 \div 98\%$ .

Wysoka odporność na zużycie ściernie w temperaturze 233K przypada na dendryty o grubości  $20 \div 40 \mu\text{m}$ , przy ich objętości względnej  $65 \div 75\%$  oraz dużej dyspersji.

### PODSUMOWANIE

Staliwo typu Cr-Mo-V-Cu-Ni po wyżarzeniu w temperaturze 1103 K odznacza się niską odpornością na zużycie podczas tarcia suchego w niskiej temperaturze. Decydujący, najsilniejszy wpływ na zużywanie wyżarzonego staliwa typu Cr-Mo-V-Cu-Ni wywiera węgiel. Wzrost jego udziału w staliwie powoduje zmniejszenie zużycia tego stopu. Natomiast chrom i molibden przy wysokich udziałach i nieodpowiednich relacjach ilościowych z węglem, odporność tę w niewielkim stopniu zmniejszają.

Wyniki badań wskazują, że wymagana przy zużyciu ściernym heterogeniczność struktury staliwa jest znacząca, ale jej ilościowy stopień nie ma charakteru uniwersalnego. Zmiana temperatury otoczenia pary trącej zmieniała charakter niektórych zależności oraz położenie ekstremalnych obszarów zużycia - w warunkach tarcia suchego.

Na obecnym etapie badań, trudno jest o jednoznaczną ocenę, który ze wskaźników (mierników) heterogeniczności odgrywa rolę wiodącą.

Przedstawione wyniki i ich analiza odnoszą się do przedstawionych warunków badań. Procesy tarcia i zużycia są na tyle złożone, że przy zmianie warunków tribologicznych mogą ulegać – i ulegają – zmianie zależności ilościowe, a nawet jakościowe [4].

### BIBLIOGRAFIA

1. Głownia J. *Charakterystyka stali na odlewy*. Wyd. AGH, Kraków 2010.
2. Wojtkun F.: *Materiałoznawcze problemy eksploatacji urządzeń technicznych w niskich temperaturach*. Problemy Eksploatacji, Wyd. ITE, Radom, nr 4, 2001, s. 337 ÷ 344.
3. Wojtkun F.: *Staliwo w budowie maszyn*. VIII Posiedzenie KBM PAN. Prace naukowe. Wyd. Mechaniczny. Wyd. Politechniki Radomskiej, Radom, 2002, s. 84 ÷ 106.
4. Wojtkun F., Sołncew Ju. P.: *Materiały specjalnego przeznaczenia*. Wyd. Politechniki Radomskiej, Radom, 2001.

5. Wojtkun F., Mikulska A.: *Wpływ C, Cr i Mo na stereologię struktury dendrytycznej w staliwie stopowym*. Polska metalurgia 1998 ÷ 2002. Monografia KMPAN Kraków, Wyd. AKAPIT, Kraków 2002, s. 82 ÷ 86.
6. Mikulska A.: *Wpływ składu chemicznego na udarność staliwa typu Cr-Mo-V-Cu-Ni w niskiej temperaturze*. Logistyka 2010, nr 7.
7. Mikulska A.: *Wpływ składu chemicznego i obróbki cieplnej na zużycie tribologiczne staliwa typu Cr-Mo-V-Cu-Ni w niskiej temperaturze*. Logistyka 2012, nr 9.

## **SHAPING THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF CAST STEEL**

### *Abstract*

*The paper presents quantitative and qualitative influence of stereological structure parameters on abrasive wear of alloy cast steel Cr-Mo-V-Cu-Ni type at temperature of 293K and 233K. The dependence between frictional wear and structural parameters – i.e.: interdendritic space, mean linear size, relative volume and dispersion index of the dendrites – has been estimated.*

*Autor:*

dr **Aneta Mikulska** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu