

**WŁAŚCIWOŚCI TERMOFIZYCZNE ŻELIWA PRZEZNACZONEGO
DO PRODUKCJI TARCZ HAMULCOWYCH****THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF CAST IRON USED
IN THE MANUFACTURE OF BRAKE DISCS**

*Dariusz Rudnik¹, Natalia Sobczak², Andrzej Gazda², Marta Homa²,
Aleksandra Siewiorek², Krystyna Pietrzak¹, Katarzyna Makowska¹*

*¹Instytut Transportu Samochodowego, Centrum Badań Materiałowych i Mechatroniki,
ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa*

*²Instytut Odlewnictwa, Centrum Badań Wysokotemperaturowych,
ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków*

Streszczenie

Praca przedstawia wyniki szczegółowych badań podstawowych właściwości termofizycznych tarcz hamulcowych wykonanych z żeliwa szarego. Próbki żeliwa badano przed i po procesie eksploatacji w układzie hamulcowym. Zmierzono współczynniki przewodnictwa temperaturowego w funkcji temperatury za pomocą jednego z najnowocześniejszych zestawów aparaturowych LFA 427 (Laser Flash Apparatus) firmy Netzsch. Wykorzystując różnicową kalorymetrię skaningową DSC i technikę dylatometryczną wyznaczono ciepło właściwe $c_p(T)$ i gęstość $d(T)$, co pozwoliło na obliczenie współczynników przewodzenia ciepła $\lambda(T)$ za pomocą oprogramowania Netzsch LFA Analysis. Badania właściwości termofizycznych pozwoliły na identyfikację przemian fazowych zachodzących w stanie stałym (przemiana eutektoidalna) i ciekłym (topnienie żeliwa, obecność eutektyki fosforowej). Porównanie właściwości termofizycznych dwóch próbek żeliwa oznaczonych ST i NT pozwoliło na stwierdzenie nieznacznego obniżenia parametrów termofizycznych stopu ST, wynikającego z procesu eksploatacji.

Słowa kluczowe: przewodnictwo temperaturowe, przewodnictwo cieplne, ciepło właściwe, różnicowa kalorymetria skaningowa DSC, metoda laserowa LFA, żeliwo szare

Abstract

This paper presents the results of measurements of thermophysical properties of automotive brake discs made from gray cast iron. The samples were tested before and after operation in the braking system. Thermal conductivity as a function of temperature was measured using one of the most advanced sets of apparatus LFA 427 (Laser Flash Apparatus) produced by Netzsch. Applying differential scanning calorimetry DSC and dilatometric technique the specific heat $c_p(T)$ and density $d(T)$ were determined and used for the calculation of coefficients of thermal conductivity $\lambda(T)$ using Netzsch LFA Analysis software. Investigations of thermophysical property allowed the identification of phase transformations occurring in solid state (eutectoidal reaction) and liquid (melting, the formation of phosphorus eutectic). Comparison of thermophysical properties for the two cast iron alloys (ST and NT) allowed to declare a slight reduction in thermophysical properties of ST, resulting from the exploitation process.

Key words: thermal diffusivity, thermal conductivity, specific heat, DSC, Laser Flash Method, gray cast iron

Wstęp

Przedmiot opracowania stanowią badania właściwości termofizycznych żeliwa przeznaczonego do produkcji tarcz hamulcowych stosowanych w pojazdach wojskowych. Jednym z istotnych czynników decydujących o mobilności wojskowego pojazdu opancerzonego i bezpieczeństwie jego załogi jest skuteczność hamowania na poziomie wymaganym z jednej strony przez dynamikę działań na współczesnym polu walki, a z drugiej przez międzynarodowe dokumenty normalizacyjne - parametry trakcyjne takich pojazdów są ściśle określone. Nowe konstrukcje kołowych transporterów opancerzonych wymagają układów hamulcowych zapewniających wystarczającą skuteczność hamowania, bezpieczeństwo, niezawodność i trwałość eksploatacji. Ponadto z uwagi na zwiększenie kierowalności tego typu pojazdów prowadzone są prace nad wykorzystaniem układów hamulcowych, jako wspomaganie układu kierowniczego. Uzyskuje się to poprzez umożliwienie hamowania kół tylko z jednej strony pojazdu, aby w ten sposób zmniejszyć promień skrętu.

Z uwagi na obniżenie kosztów wykonania i eksploatacji, a także dostępność i unifikację części oraz podzespołów obecnie często wykorzystywane są podwozia cywilnych pojazdów ciężarowych jako baza dla wojskowych pojazdów opancerzonych i innych pojazdów specjalnych, np. bankowozów. Należy jednak zauważyć, że obciążenie układu hamulcowego w samochodzie ciężarowym jest znacznie mniejsze niż w pojeździe opancerzonym. Różnice te wynikają z dwóch głównych przyczyn:

- 1) charakterystyki samego pojazdu związanej z jego znacznie większą masą własną, co powoduje, iż układ hamulcowy niemal cały czas pracuje tak jakby był obciążony dopuszczalną masą całkowitą pojazdu cywilnego, czyli na granicy swoich możliwości trakcyjnych;
- 2) warunków eksploatacji pojazdów wojskowych - pojazdy takie są wykorzystywane w różnych strefach klimatycznych świata i w związku z tym poddawane są działaniu np. bardzo wysokich/niskich temperatur, zapylenia, wilgoci itd.

Takie warunki pracy układów hamulcowych pojazdów wojskowych oraz brak możliwości ich normalnego serwisowania w warunkach pola walki powodują, iż często nie są one wystarczająco skuteczne oraz ich przebiegi międzyserwisowe są bardzo małe.

Niezbędne zatem stało się opracowanie i zaprojektowanie konstrukcji i technologii oraz wykonanie demonstratora układu hamulcowego nowej generacji, w którym materiały zastosowane na elementy cierne - tarcze i klocki hamulcowe - powinny charakteryzować się [1]:

- dużą wartością i stabilnością - niezależnie od warunków pracy - współczynnika tarcia,
- dużą odpornością na zużycie w różnych warunkach pracy,
- dużą odpornością na działanie wysokiej temperatury,
- dużą wytrzymałością mechaniczną,
- odpornością na zacieranie powierzchni trących oraz łatwością docierania się,
- małą higroskopijnością.

Materiałami spełniającymi tak sformułowane wymagania mogłyby być metalowe materiały kompozytowe, takie jak np. aluminium zbrojone cząsteczkami SiC lub aluminium zbrojone włóknami Al_2O_3 , które wykazują następujące właściwości [2]:

- dobre właściwości tribologiczne (w tym odporność na zatarcie i zużycie),
- korzystne właściwości mechaniczne, w tym zwłaszcza charakterystyki zmęczeniowe, również w podwyższonej temperaturze,

- mała gęstość,
- szereg właściwości kreatywnych, tj. poddających się projektowaniu według założonych wymagań, np. rozszerzalność i przewodnictwo ciepłe,
- zdolność do tłumienia drgań.

W celu uzyskania danych dotyczących wybranych właściwości, jakie nowe rozwiązanie materiałowo-konstrukcyjne powinno zapewnić, uznano za niezbędne przeprowadzenie szczegółowych badań podstawowych właściwości termofizycznych tarcz żeliwnych stosowanych obecnie w pojazdach wojskowych. Badania te postanowiono przeprowadzić zarówno na tarczach nowych, jak i po okresie eksploatacji. Wyniki tych badań powinno się traktować jako próbę odniesienia dla nowego rozwiązania materiałowo-konstrukcyjnego.

2. Materiał do badań

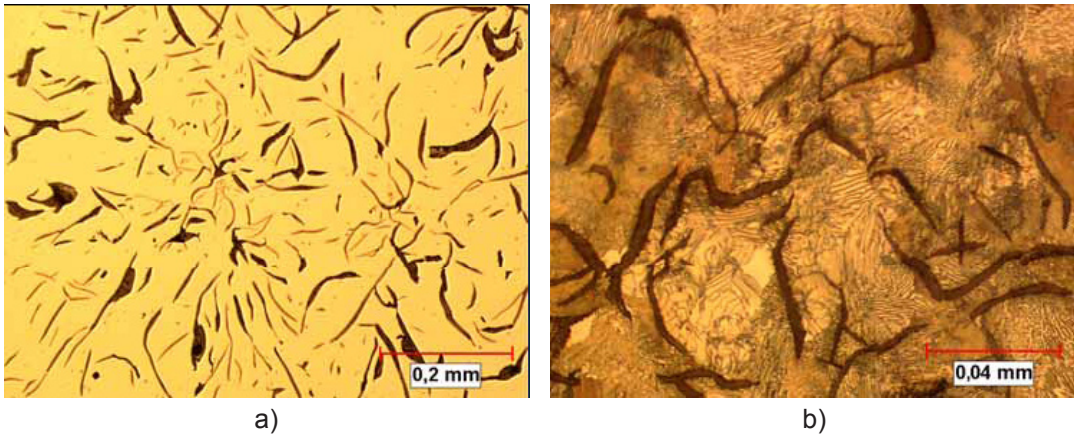
Materiał wyjściowy do badań stanowiły dwie próbki żeliwa szarego (próbka z tarczy przed eksploatacją tzw. NT oraz próbka z tarczy po eksploatacji tzw. ST) o następującym składzie chemicznym wyrażonym w % wag.:

- próbka NT: Fe-96,006; Sn-0,048; Mo-0,026; Cu-0,128; Ni-0,109; Mn-0,671; Cr-0,291; Ti-0,022; V-0,011; C - reszta.
- próbka ST: Fe-96,318; Nb-0,002; Mo-0,020; Cu-0,091; Ni-0,092; Mn-0,872; Cr-0,405; Ti-0,032; V-0,021; C - reszta.

Próbka żeliwa ST pochodziła z tarczy hamulcowej eksploatowanej w układzie hamulcowym kołowego transportera opancerzonego, który uczestniczył w działaniach na polu walki w warunkach wysokiej temperatury i dużego zapylenia.

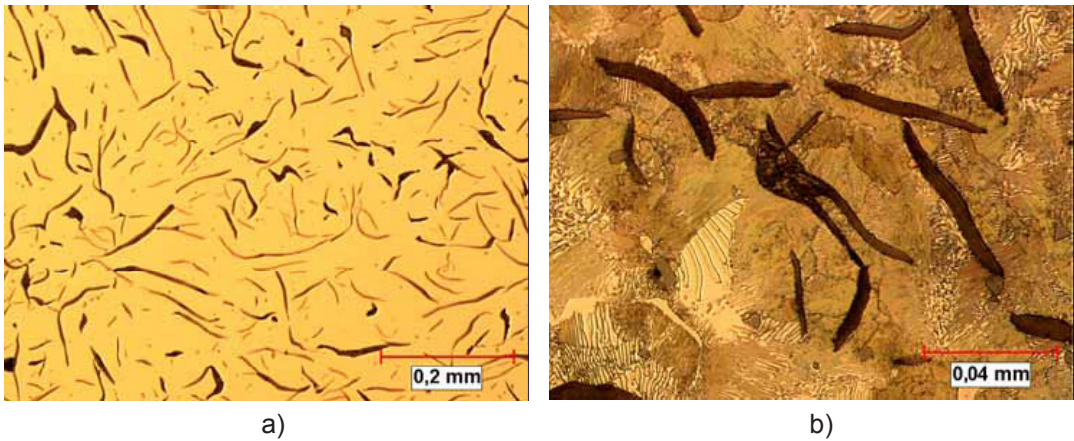
Badane próbki żeliwa poddano obserwacjom strukturalnym z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej. Wszystkie próbki szlifowano na automatycznej szlifierko-polerce ROTO-POL 21 (STRUERS), wyposażonej w automatyczny dozownik MULTIDOSER z zestawem zawieszin polerskich zapewniający optymalną i zarazem ekonomiczną ilość zawiesziny polerskiej w procesie polerowania próbek oraz w głowicę dociskową ROTOFORCE 4 zapewniającą stały docisk próbki do tarczy polerskiej.

W czasie procesu polerowania stosowano zawiesziny o kolejno malejącej granulacji: 9, 6, 3, 1 μm , a do ostatniego, końcowego etapu polerowania używano tlenku krzemu (OPS) - również w postaci zawiesziny. Próbki przygotowano zgodnie z metodą stosowaną dla żeliwa szarego według Przewodnika Metalog Guide [4]. Wyniki badań zaprezentowano na rysunkach 1 i 2.



Rys. 1. Mikrostruktura próbki żeliwa szarego przed eksploatacją (NT): a) światło konwencjonalne, pow. 100x, stan nietrawiony, b) światło konwencjonalne, pow. 500x, stan trawiony

Fig. 1. Microstructure of grey cast iron specimen before operation (NT): a) conventional light, 100x, unetched, b) conventional light, 500x, etched



Rys. 2. Mikrostruktura próbki żeliwa szarego po eksploatacji (ST): a) światło konwencjonalne, pow. 100x, stan nietrawiony, b) światło konwencjonalne, pow. 500x, stan trawiony

Fig. 2. Microstructure of grey cast iron specimen after operation (ST): a) conventional light, 100x, unetched, b) conventional light, 500x, etched

Z analizy obrazów mikrostruktury widać, że osnowę metalową żeliwa w obu tarczach (przed i po eksploatacji) stanowi perlit o zróżnicowanej dyspersji.

Wykonane dodatkowo badania parametrów geometrycznych wydzieliń grafitu (wyznaczone w stanie nietrawionym w jednakowych warunkach pomiarowych, przy powiększeniu 200x i analizowanych 200 polach widzenia o łącznej powierzchni równej 25,4 mm² i powierzchni pojedynczego pola pomiarowego wynoszącej 0,127 mm²) wykazały, że zarówno tarcza fabrycznie nowa, jak i po eksploatacji charakteryzują się niewielkim zróżnicowaniem w zakresie udziału objętościowego wydzieliń grafitowych, wielkości płatków grafitu oraz niewielkim zróżnicowaniem w zakresie wartości estymatora rozdziału grafit/osnowa metalowa.

2. Metodyka badań

Do badań właściwości termofizycznych wybranych materiałów zastosowano trzy metody badań wysokotemperaturowych: różnicową kalorymetrię skaningową (DSC), analizę dylatometryczną oraz pomiar przewodnictwa temperaturowego metodą LFA. Badania polegały na kontrolowanym nagrzewaniu próbek o określonym składzie fazowym i rejestracji efektów termofizycznych.

Przed i po badaniach wysokotemperaturowych wykonywano badania struktury próbek w celu wyjaśnienia zmian zachodzących w składzie fazowym materiału.

2.1. Różnicowa kalorymetria skaningowa (DSC)

Metoda pomiaru polega na jednoczesnym nagrzewaniu próbki badanej i próbki odniesienia z ciągłą rejestracją zmian różnicy strumienia cieplnego do próbki badanej i do próbki odniesienia, występujących pod wpływem narzuconych zmian temperatury.

Badania kalorymetryczne i pomiary ciepła właściwego wykonano za pomocą wysokotemperaturowego różnicowego kalorymetru skaningowego DSC 404 C/3/G Pegasus, pracującego w zakresie od temperatury otoczenia do 1500°C, o następujących możliwościach badawczych i parametrach:

- pomiary ciepła właściwego c_p metodą porównawczą z dokładnością $\pm 2,5\%$ w zakresie 50–1400°C oraz $\pm 4,0\%$ w zakresie 1400–1500°C,
- pomiary ciepła (entalpii) ΔH z dokładnością $\pm 4\%$ w zakresie od temperatury otoczenia do 1500°C.

Pomiary DSC przeprowadzono w atmosferze ochronnej argonu w zakresie temperatury od 20 do 1300°C z szybkością nagrzewania równą 5 K/min. Pomiary ciepła właściwego przeprowadzono w zakresie od 20 do 1000°C, zgodnie z normą ASTM E 1269 5 z szybkością nagrzewania 20 K/min, przy użyciu szafiru jako wzorca.

2.2. Badania zmian rozszerzalności cieplnej

Metoda dylatometryczna pozwala na określenie wartości zmian wymiarowych $\Delta L/L$ materiału i współczynników rozszerzalności cieplnej w stanie stałym w funkcji temperatury, umożliwia również wyznaczanie temperatury przemian fazowych (punktów charakterystycznych).

Pomiary wykonano za pomocą wysokotemperaturowego (do 1600°C) dylatometru DIL 402C/4/G firmy NETZSCH, charakteryzującego się następującymi parametrami pracy:

- próżnia 10^{-4} mbar (pomiary w trybie statycznym/dynamicznym) w atmosferze pomiarowej: obojętnej, redukującej lub utleniającej;
- możliwość wyznaczenia współczynnika rozszerzalności cieplnej z dokładnością $0,03 \times 10^{-6}$ 1/K, przy powtarzalności $0,01 \times 10^{-6}$ 1/K;
- możliwość wyznaczenia zmian gęstości materiału w funkcji temperatury.

Pomiary przeprowadzono w atmosferze ochronnej argonu w zakresie temperatury od 20 do 1000°C przy szybkości nagrzewania wynoszącej 5 K/min.

2.3. Badanie przewodnictwa temperaturowego

Do wykonania pomiarów przewodnictwa temperaturowego wykorzystano urządzenie typu laser-flash LFA 427/4/G firmy Netzsch, służące do pomiaru przewodnictwa temperaturowego i określenia przewodnictwa cieplnego metali i stopów w stanie stałym i ciekłym, materiałów ceramicznych oraz materiałów proszkowych.

Zastosowana technika impulsowa pozwala na pomiar współczynnika przewodzenia temperatury a w zakresie 0,001–10 m²/s, w przedziale temperatury 20–1500°C.

Pomiar przewodnictwa temperaturowego jest możliwy z dokładnością $\pm 3\%$, a wyznaczenie przewodnictwa cieplnego z dokładnością $\pm 5\%$ w całym zakresie pomiarowym.

W urządzeniu zastosowano laser Nd:YAG wysokiej mocy o długości fali 1064 nm wraz z detektorem IR InSb oraz oprogramowanie, zawierające standardowe modele matematyczne służące do opracowania sygnałów pomiarowych i modele oparte na nieliniowej regresji i ulepszonym modelu Cape-Lehmana.

Metoda pomiaru współczynnika przewodnictwa temperaturowego metodą laser-flash w urządzeniu LFA 417 polega na ogrzaniu czołowej powierzchni próbki w kształcie dysku lub kwadratu krótkim impulsem laserowym (*laser shot*), w wyniku czego następuje wzrost temperatury próbki na przeciwległej powierzchni próbki, mierzony w funkcji czasu za pomocą detektora podczerwieni (IR). Zmierzony sygnał pozwala na wyznaczenie przewodnictwa temperaturowego a i obliczenie przewodnictwa cieplnego λ na podstawie zależności (1).

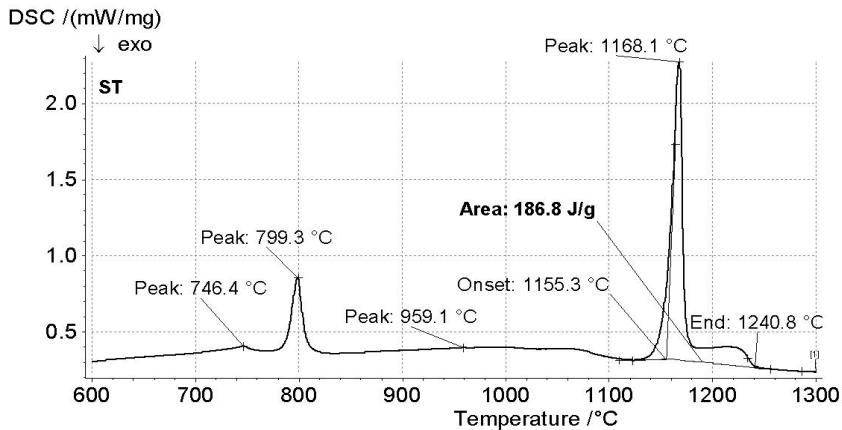
$$\lambda(T) = a(T) c_p(T) d(T) \quad (1)$$

Dokładny opis urządzenia do pomiaru przewodnictwa temperaturowego i wyznaczenia przewodnictwa cieplnego przedstawiono w pracach [5, 6].

Badania współczynnika przewodnictwa temperaturowego i cieplnego wykonano w wysokiej próżni, w zakresie temperatury od 100 do 900°C. Bezpośrednio przed włożeniem do komory pieca, próbki oczyszczono w płuczce ultradźwiękowej najpierw w acetonie, a następnie w alkoholu etylowym. Tak przygotowane materiały napyłono grafitem w celu wyeliminowania zjawiska rozpraszania ciepła przez radiację. Obliczenia współczynnika przewodnictwa temperaturowego wykonano według modelu matematycznego Cape-Lehmana.

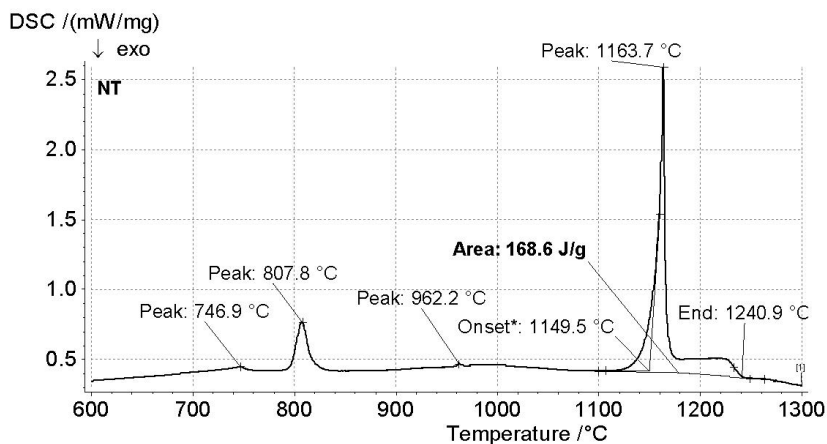
3. Wyniki badań i dyskusja wyników

Na podstawie przeprowadzonych badań kalorymetrycznych określono charakterystyki topnienia badanych stopów - temperaturę solidus, likwidus i ciepło (zmianę entalpii) topnienia. Fragmenty krzywych DSC przedstawiono na rysunkach 3 i 4.



Rys. 3. Fragment krzywej DSC materiału ST

Fig. 3. Fragment of DSC curve of ST material



Rys. 4. Fragment krzywej DSC materiału NT

Fig. 4. Fragment of DSC curve of NT material

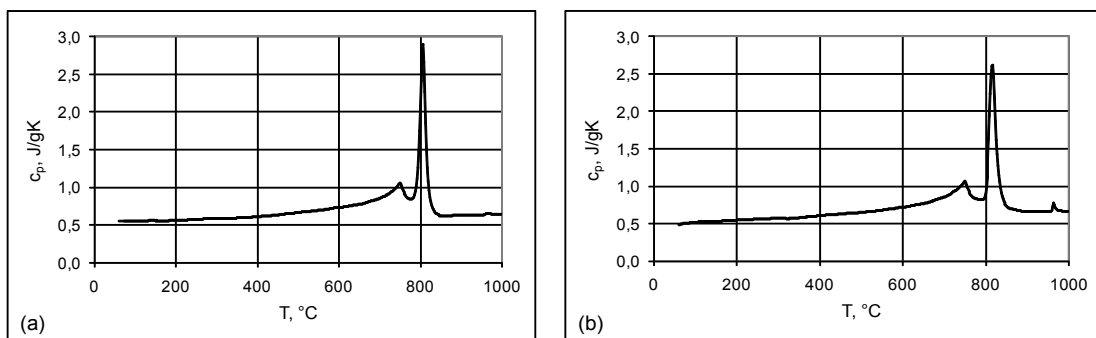
Z analizy wykresów DSC (próbka ST) wynika, że w przypadku żeliwa szarego topnienie odbywa się w zakresie temperatury 1155–1240°C. Dodatkowo zaobserwowano niewielki pik w temperaturze około 960°C odpowiadający prawdopodobnie występowaniu eutektyki fosforowej (rys. 3) [7].

Podobne zjawiska zaobserwowano dla drugiego z badanych tworzyw (próbka NT). Topnienie stopu zachodzi w zakresie 1150–1240°C, a eutektyka fosforowa występuje w nieco większej ilości (rys. 4).

Na obu wykresach widać przemianę eutektoidalną perlit + ferryt → austenit. Można wyróżnić dla niej dwa etapy:

- w temperaturze około 745°C na obu krzywych są widoczne piki, które odpowiadają za przemianę perlit → austenit. Na tę przemianę nakłada się jeszcze przemiana ferromagnetyczna (punkt Curie), która dla Fe zachodzi w temperaturze około 770°C, ale temperatura ta może być obniżona przez dodatek pierwiastków stopowych,
- w temperaturze około 800°C można zaobserwować piki, które są wynikiem wystąpienia efektu cieplnego związanego z przemianą ferryt → austenit.

Na rysunkach 5a i 5b przedstawiono ciepło właściwe badanych materiałów wyznaczone za pomocą DSC metodą porównawczą.

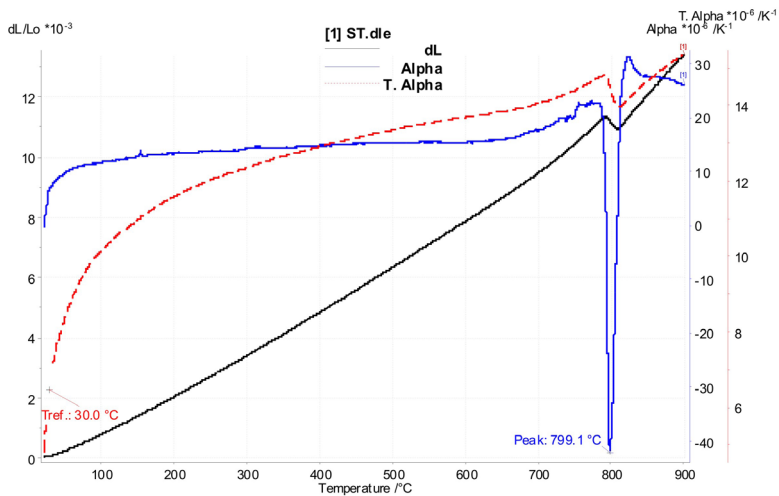


Rys. 5. Wykres zależności ciepła właściwego od temperatury materiału (a) ST oraz (b) NT

Fig. 5. Specific heat vs material temperature for (a) ST material and (b) NT material

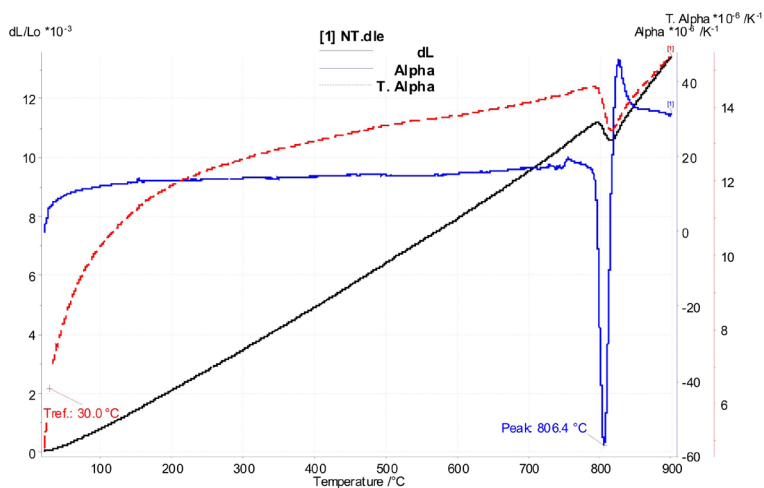
Na podstawie wykresów zależności ciepła właściwego od temperatury można stwierdzić, że dla obu badanych materiałów wartości ciepła właściwego są porównywalne i zbliżone do wartości literaturowych [4]. Na wykresie 5b w temperaturze 962,2°C widoczne są również niewielkie ilości eutektyki fosforowej.

Wyniki pomiarów dylatometrycznych - zmian wymiarowych $\Delta L/L$ i współczynników rozszerzalności cieplnej w stanie stałym w funkcji temperatury - przedstawiono na zbiorczych rysunkach 6 i 7.



Rys. 6. Wykresy zależności rozszerzalności cieplnej (dL), współczynnika liniowej rozszerzalności cieplnej (Alpha) i średniego współczynnika rozszerzalności cieplnej (T.Alpha) od temperatury dla materiału ST

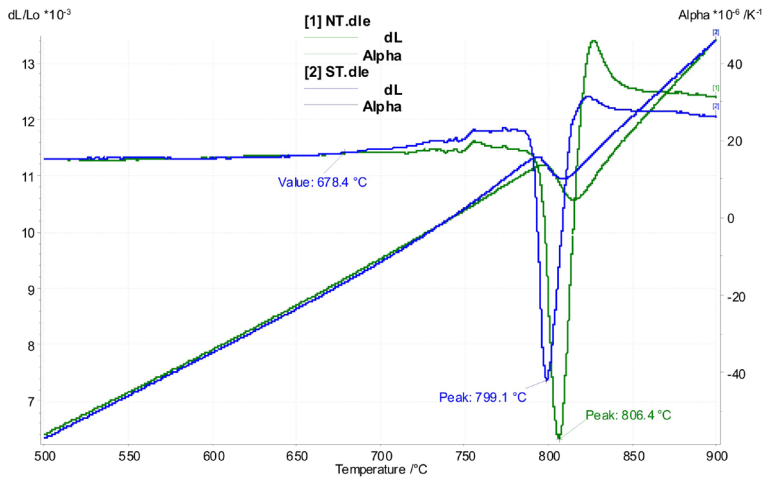
Fig. 6. Plotted relationships between the thermal expansion (dL), the linear thermal expansion coefficient (Alpha), the average thermal expansion coefficient (T.Alpha) and temperature for ST material



Rys. 7. Wykresy zależności rozszerzalności cieplnej (dL), współczynnika liniowej rozszerzalności cieplnej (Alpha) i średniego współczynnika rozszerzalności cieplnej (T.Alpha) od temperatury dla materiału NT

Fig. 7. Plotted relationships between the thermal expansion (dL), the linear thermal expansion coefficient (Alpha), the average thermal expansion coefficient (T.Alpha) and temperature for NT material

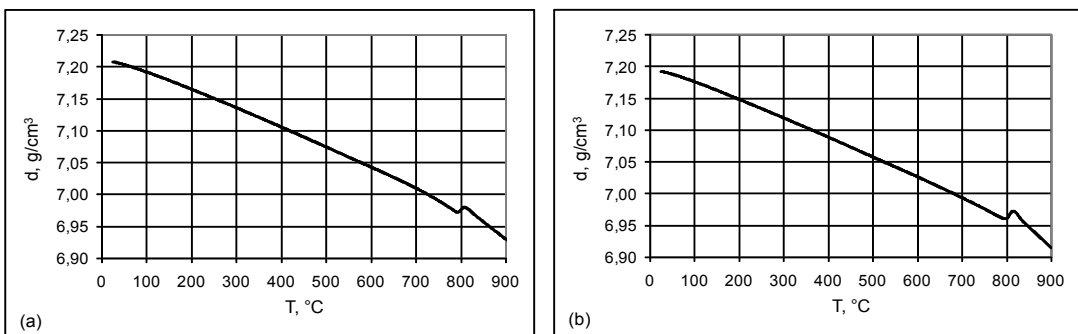
Analiza zależności współczynników rozszerzalności cieplnej obu badanych tworzyw (rys. 8) pozwala na stwierdzenie, że próbka ST wykazuje nieco mniejszą stabilizację cieplną w wysokiej temperaturze (>680°C) ze względu na wyraźne występowanie procesu grafityzacji.



Rys. 8. Porównanie zależności współczynnika rozszerzalności liniowej obu badanych materiałów

Fig. 8. Comparison of relationships between the linear expansion coefficients of both the examined materials

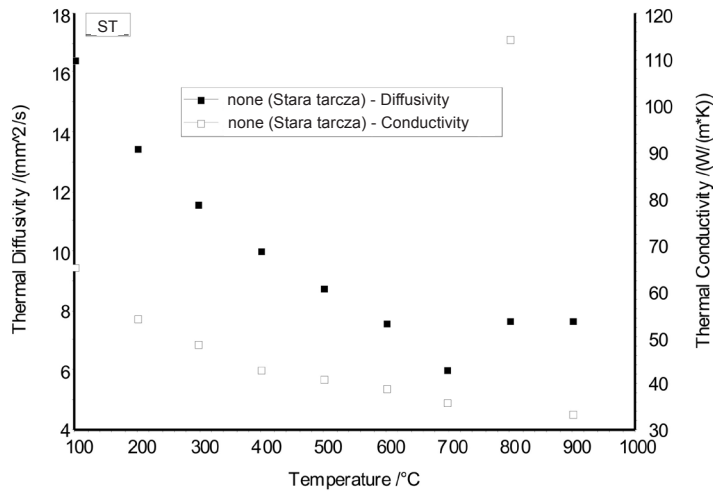
Na rysunku 9a,b przedstawiono zmiany gęstości badanych tworzyw obliczone na podstawie wyznaczonych dylatometrycznie zmian objętości i pomiarów gęstości w temperaturze otoczenia za pomocą wagi hydrostatycznej.



Rys. 9. Wykres zależności gęstości materiałów od temperatury (a) ST, (b) NT

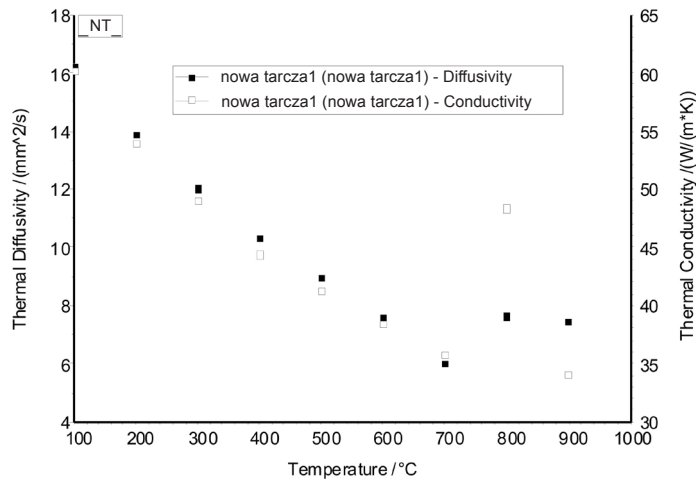
Fig. 9. Plotted relationship between the density and temperature of material in condition (a) ST and (b) NT

Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono wykresy zależności współczynnika przewodnictwa temperaturowego i cieplnego w funkcji temperatury, a w tabeli 1 zestawiono ich wartości liczbowe.



Rys. 10. Wykres zależności przewodnictwa temperaturowego ($a(T)$) i cieplnego ($\lambda(T)$) materiału ST

Fig. 10. Plotted relationship between temperature conductivity ($a(T)$) and thermal conductivity ($\lambda(T)$) for the ST material



Rys. 11. Wykres zależności przewodnictwa temperaturowego ($a(T)$) i cieplnego ($\lambda(T)$) materiału NT

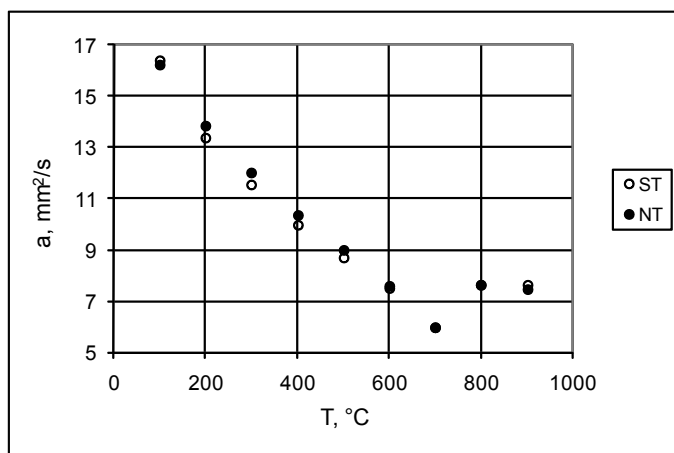
Fig. 11. Plotted relationship between temperature conductivity ($a(T)$) and thermal conductivity ($\lambda(T)$) for the NT material

W tabeli 1 i na rysunku 12 przedstawiono porównanie przewodnictwa temperaturowego i cieplnego obu badanych materiałów.

Tabela 1. Współczynniki przewodnictwa temperaturowego i cieplnego w funkcji temperatury dla materiałów ST i NT

Table 1. Temperature and thermal conductivity coefficients in function of temperature for the ST and NT materials

Temperatura, °C	100	200	300	400	500	600	700	800	900
ST									
Przewodnictwo temperaturowe, mm ² /s	16,36	13,38	11,53	9,39	8,70	7,51	5,96	7,61	7,62
Przewodnictwo cieplne, W/m·K	64,85	53,72	48,30	42,88	40,83	38,60	35,64	114,28	33,22
NT									
Przewodnictwo temperaturowe, mm ² /s	16,21	13,84	12,00	10,32	8,96	7,58	5,98	7,61	7,45
Przewodnictwo cieplne, W/m·K	60,18	53,87	48,97	44,32	41,16	38,29	35,78	48,29	34,02



Rys. 12. Porównanie przewodnictwa temperaturowego materiałów ST i NT

Fig. 12. Temperature conductivity values compared for the ST and NT materials

Analiza wartości liczbowych zależności $\alpha(T)$ i $\lambda(T)$ zestawionych w tabeli 1 oraz wykres 12 pozwalają na stwierdzenie, że stop NT charakteryzuje się nieznacznie lepszym przewodnictwem temperaturowym (1–3%) w zakresie 200–500°C.

W temperaturze powyżej 500°C różnice dla badanych materiałów nie są istotne, ponieważ odchylenie standardowe mieści się w grubości punktu naniesionego na wykres.

Wnioski

1. Uzyskane dla badanych materiałów temperaturowe zależności przewodnictwa temperaturowego i cieplnego są zgodne z danymi literaturowymi dla żeliwa szarego [4].
2. Nieznaczna różnica właściwości termofizycznych zaobserwowana dla materiałów ST i NT znajduje potwierdzenie w badaniach strukturalnych.
3. Materiały NT i ST mają zbliżone wartości przewodnictwa temperaturowego w badanym zakresie temperaturowym.
4. Materiał NT wykazuje lepszą stabilizację cieplną w wysokiej temperaturze (>680°C) w porównaniu do próbki ST, w której można – na podstawie badań dylatometrycznych – zaobserwować występowanie procesu grafityzacji w wysokiej temperaturze.

Podziękowanie

Wyniki przedstawione w niniejszej pracy zostały uzyskane w ramach projektu badawczego rozwojowego nr O R00 0061 06.

Literatura

1. Wojciechowski A., Sobczak J.: Kompozytowe tarcze hamulcowe pojazdów drogowych, Wydawnictwa ITS, 2001, s. 162, ISBN 83-913045-6-6.
2. Rudnik D., Sobczak J.: Tłoki kompozytowe do silników spalinowych, Wydawnictwa ITS, 2001, s. 119, ISBN 83 913045-7-4.
3. PN-82/H-04332 Badanie zużycia metali lub ich warstw dyfuzyjnych w procesie tarcia ślizgowego przy stałym nacisku na maszynie Amslera.
4. Pietrzak K., Uszyński G.: Przewodnik Metalog Guide, Struers, wyd. 3, Warszawa, 2001.
5. Gazda A., Homa M.: Określenie przewodnictwa cieplnego wybranych gatunków żeliwa sferoidalnego za pomocą pomiaru przewodnictwa temperaturowego metodą laser-flash, Prace Instytutu Odlewnictwa, 2009, T. 49, nr 2, s. 5–18.
6. Moskal G., Rozmysłowska A., Gazda A., Homa M.: Wybrane termofizyczne właściwości proszków cyrkonianowych na bazie pierwiastków ziem rzadkich typu RE₂Zr₂O₇ (RE- Gd, La, Sm, Nd) przeznaczonych do natrykiwania cieplnego powłokowych warstw barierowych, Prace Instytutu Odlewnictwa, 2009, T. 49, nr 4, s. 15–26.
7. Madej W., Gazda A.: Badanie termofizycznych właściwości wysokofosforowego żeliwa P30 stosowanego na nowego typu wstawki hamulcowe dla kolejnictwa, Odlewnictwo Współczesne – Polska i Świat, 2009, T. 2, nr 4, s. 3–6.

