

**Właściwości termofizyczne staliwa 30MCDB64-M oraz 30NSCDV86-M w stanie odlewanym****Thermophysical properties of 30MCDB64-M and 30NSCDV86-M cast steel in cast condition**

Marta Homa\*<sup>1</sup> , Zenon Pirowski<sup>1</sup> , Patrycja Turalska<sup>1</sup> , Adam Bitka<sup>1</sup> ,  
Krzysztof Jaśkowiec<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>ŁUKASIEWICZ – Instytut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Polska

<sup>1</sup>ŁUKASIEWICZ Research Network – Foundry Research Institute, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Poland

\*Corresponding author: [marta.homa@iod.krakow.pl](mailto:marta.homa@iod.krakow.pl)

Received: 04.04.2019. Accepted in revised form: 30.09.2019.

DOI: 10.7356/iod.2019.06

**Streszczenie**

W pracy przedstawiono wyniki kompleksowych badań właściwości termofizycznych staliwa 30MCDB64-M oraz 30NSCDV86-M w stanie odlewanym, w tym przewodnictwo temperaturowe, przewodność cieplną, ciepło właściwe, rozszerzalność cieplną oraz zmianę gęstości w funkcji temperatury. Pomiary przewodnictwa temperaturowego wykonano za pomocą Laserowej Analizy Impulsowej (LFA) w zakresie temperatury 25–1000°C. Badania kalorymetryczne w temperaturze od 25°C do 1300°C przeprowadzono metodą skaningowej kalorymetrii różnicowej (DSC), podczas gdy zmiany rozszerzalności cieplnej, współczynnika rozszerzalności cieplnej oraz pomiar zmiany gęstości w funkcji temperatury wyznaczono metodą dylatometryczną (DIL) w zakresie temperatury od 25°C do 900°C. Zmianę przewodności cieplnej w funkcji temperatury wyznaczono za pomocą algorytmów matematycznych oprogramowania Netzsch LFA Analysis 4.8.5.

**Słowa kluczowe:** staliwo odporne na ścieranie, właściwości termofizyczne, temperatury przemian, ciepło topnienia, rozszerzalność cieplna, współczynnik rozszerzalności cieplnej, przewodność cieplna

**Abstract**

This paper presents the results of complex investigations into the thermophysical properties of 30MCDB64-M and 30NSCDV86-M cast steel, including temperature conductivity, thermal conductivity, specific heat, thermal expansion and the change of density in the function of temperature. Measurements of temperature conductivity were performed using Laser Flash Analysis (LFA) in the temperature range 25–1000°C. Calorimetric investigations at temperatures from 25°C to 1300°C were performed by Differential Scanning Calorimetry (DSC), while changes in thermal expansion, thermal expansion coefficient and the measurement of density change in the temperature function were determined by the dilatometric method (DIL) in the temperature range from 25°C to 900°C. Changes in thermal conductivity in the temperature function were determined using mathematical algorithms of the Netzsch LFA Analysis 4.8.5 software.

**Keywords:** cast steel resistant to abrasion, thermophysical properties, transformation temperatures, melting heat, thermal expansion, thermal expansion coefficient, thermal conductivity

**1. Wstęp**

Rozwój nowych technologii, wzrost zapotrzebowania na nowe materiały oraz spełnienie zasad zrównoważonego rozwoju wymuszają wspólną integrację różnych zaawansowanych dziedzin nauki i technologii. Celem tej integracji jest osiągnięcie efektów synergicznych

**1. Introduction**

The development of new technologies, increased demand for new materials and the fulfilment of the principles of sustainable development necessitate the joint integration of different advanced scientific disciplines and technologies. The aim of this integration is

w opracowywaniu nowych technologii, w tym również tych dotyczących właściwości materiałów inżynierskich. Technologie wytwarzania materiałów, podobnie jak nowe materiały, stanowią bowiem kluczowy zakres badawczo-rozwojowy o zasadniczym znaczeniu dla przemysłu oraz innych obszarów ich zastosowań.

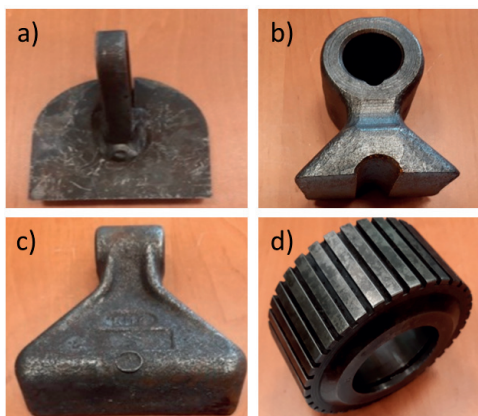
Taki efekt synergii zaobserwować można także pomiędzy takimi dziedzinami, jak: leśnictwo, inżynieria środowiska, inżynieria materiałowa oraz odlewnictwo. Jest to spowodowane stale wzrastającą w ostatnich latach zarówno w Polsce, jak i w krajach Unii Europejskiej potrzebą nowego zalesienia oraz zastosowania procesów rekultywacji istniejących nieużytków, która wynika z konieczności dbania o środowisko, dążenia do zmniejszenia efektu cieplarnianego, jak również z chęci poprawy jakości życia, szczególnie w rejonach wysoko zurbanizowanych.

Podążanie w tym kierunku kreuje w konsekwencji potrzebę projektowania nowych maszyn i urządzeń w oparciu o wiedzę materiałową i odlewniczą, zarówno do zastosowań w leśnictwie, jak i do produkcji biomasy, które będą charakteryzować się znacznie wyższą trwałością eksploatacyjną niż dotychczas istniejące. Elementy wyposażenia tych maszyn i urządzeń powinny zatem posiadać nowe, lepsze właściwości konstrukcyjne, trwałościowe i eksploatacyjne. Oczekuje się zatem, aby nowo wytworzone materiały posiadały zestaw właściwości pożądaných przez użytkowników produktów. Dlatego też z metodologią projektowania materiałowego łączą się liczne działania związane z modelowaniem i symulacją procesów wytwarzania oraz przewidywaniem właściwości eksploatacyjnych materiałów, ujednocnieniem procedury badań ich właściwości i opracowaniem sposobu przewidywania ich zachowania się podczas eksploatacji. Z tego punktu widzenia niezbędne jest pozyskanie wiarygodnych danych eksperymentalnych o właściwościach stosowanych materiałów, które stanowiąc będą podstawę procesów modelowania maszyn, urządzeń i nowych materiałów.

to achieve synergistic effects in the development of new technologies, including those related to the properties of engineering materials. Indeed, materials manufacturing technologies, like new materials, are a key research and development area of critical importance for industry and other areas of application.

Such synergies can also be found between areas such as forestry, environmental engineering, materials engineering and foundry engineering. It is caused by the need for new afforestation and the application of processes of reclamation of the existing wastelands, which has been constantly growing in recent years both in Poland and in European Union countries, which results from the need to take care of the environment, strive to reduce the greenhouse effect, as well as in order to improve the quality of life, especially in highly urbanised areas.

Moving in this direction consequently creates the need to design new machines and equipment based on material and foundry knowledge, both for forestry applications and for biomass production, which will be characterised by much higher operating life than the existing ones. The components of such machinery and equipment should therefore have new and better structural, durability and operational characteristics. At present, it is expected that newly manufactured materials will have a set of properties desired by the users of the products. Therefore, the material design methodology is combined with numerous activities related to modelling and simulation of manufacturing processes and predicting the exploitation properties of materials, unifying the procedure for testing their properties and developing a way of predicting their behaviour during operation. From this point of view, it is necessary to obtain reliable experimental data on the properties of the materials used, which will form the basis for the processes of modelling machines, equipment, etc. and new materials.



Rys. 1. Młotki bijakowe (a–c) oraz krążek paleciarki (d) wytworzone metodą kucia i spawania  
Fig. 1. Flail hammers (a–c) and palletiser's disc (d) produced by forging and welding

Z tej przyczyny w niniejszej pracy przeprowadzono badania wyznaczenia właściwości termofizycznych dwóch gatunków staliwa odpornego na ścieranie w stanie odlewanym: 30MCDB64-M oraz 30NSCDV86-M. Uzyskane dane eksperymentalne w połączeniu z wiedzą materiałową i odlewniczą stanowią podstawę nowoczesnego przedsięwzięcia, którego celem jest wykorzystanie metody odlewania materiałów do produkcji elementów, takich jak: młotki bijakowe w mulcerach i mulczarkach oraz krążniki w urządzeniach do przerobu biomasy, wykonywane obecnie jedynie w technologii kucia i spawania (rys. 1).

Dotychczasowe prace w tym zakresie wykazały, że wykorzystanie technologii odlewania do produkcji narzędzi daje bardzo obiecujące rezultaty. Analiza danych literaturowych oraz rozeznanie rynku wskazują bowiem wyraźnie, że istnieje duża potrzeba zarówno opracowania, jak i produkcji tych elementów o wysokich, wyższych niż obecne właściwościach eksploatacyjnych. Związane jest to głównie z faktem, iż w znacznym stopniu ulegają one procesom zużycia w trakcie użytkowania, wynikającym z kontaktu z różnymi materiałami.

## 2. Część eksperymentalna

### 2.1 Materiały do badań

Materiał do badań stanowiły dwa gatunki staliwa odpornego na ścieranie w stanie odlewanym: 30MCDB64-M\* oraz 30NSCDV86-M\* (\* – w oznaczeniu normatywnym gatunki te po różnych zabiegach cieplnych otrzymują odpowiednie końcówki oznaczeń -M-I lub -M-II). Wytopy tych materiałów wykonano w Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytucie Odlewnictwa w piecu indukcyjnym średniej częstotliwości Radyne AMF 45/150. Proces wytopu prowadzono w tyglu o wyłożeniu obojętnym. Jako wsad zastosowano żelazo Armco, złom stalowy, żelazostopy oraz technicznie czysty nikiel i miedź. Otrzymane w postaci wlewków staliwo poddano analizie składu chemicznego za pomocą emisyjnego optycznego spektrometru ze wzmocnieniem jarzeniowym ARL Metal Analyzer, a wyniki analizy składu chemicznego materiałów zamieszczono w tabeli 1.

For this reason, in this paper, investigations were carried out to determine the thermophysical properties of two grades of cast steel resistant to abrasion: 30MCDB64-M and 30NSCDV86-M. Experimental data obtained in combination with material and casting knowledge constitute the basis of a modern undertaking, the aim of which is to use the method of casting materials for the production of elements such as: hammers in mulchers and mulching machines and circulators in biomass processing equipment, currently performed only in forging and welding technology (Fig. 1).

Previous work on this topic has shown that the use of casting for tool making has yielded very promising results. The analysis of literature data and market knowledge clearly indicate that there is a great need for both the development and production of these elements with high, higher than the current, operating properties. This is mainly due to the fact that they are subject to wear and tear during use to a large extent, resulting from the nature and working conditions in various media, such as soil and wood.

## 2. Experimental part

### 2.1 Research materials

Two grades of wear-resistant cast steel are used: 30MCDB64-M\* and 30NSCDV86-M\* (\* – in the standard designation, these grades are given the appropriate ends of the -M-I or -M-II designation after various heat treatments). The melting of these materials was carried out in the Łukasiewicz Research Network – Foundry Research Institute in a medium frequency Radyne AMF 45/150 induction furnace. The melting process was carried out in a crucible with an inert lining. Armco iron, steel scrap, ferroalloys and technically pure nickel and copper were used as feedstock. Two steel grades obtained in the form of ingots were analysed by means of an optical emission spectrometer with glow strengthening ARL Metal Analyzer. The chemical composition of the materials was presented in Table 1.

Tabela 1. Skład chemiczny staliwa poddanego badaniom właściwości termofizycznych  
Table 1. Chemical composition of the steel tested for thermophysical properties

Stop Alloy	Skład chemiczny [% mas.] Content of alloying additives [% of mass]									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	B
30MCDB64-M	0,25	0,37	1,41	0,023	0,023	1,54	0,05	0,440	-	0,007
30NSCDV86-M	0,47	1,76	0,72	0,017	0,012	0,94	1,740	0,570	0,140	-

Do przeprowadzenia badań właściwości termofizycznych z otrzymanych wlewków wycięto próbki o wymiarach  $\phi = 3 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  i  $\phi = 10 \text{ mm} \times 2,5 \text{ mm}$  odpowiednio dla badań DIL i LFA. Do badań metodą DSC przygotowano próbki o masie  $m \leq 100 \text{ mg}$ .

## 2.2 Metody badawcze

Do wyznaczenia właściwości termofizycznych przygotowanych do badań materiałów zastosowano następujące techniki pomiarowe:

- a) Różnicową kalorymetrię skaningową – do pomiaru ciepła właściwego ( $C_p$ );

Pomiar ciepła właściwego przeprowadzono za pomocą różnicowego kalorymetru skaningowego Netzsch DSC 404 C/3/G Pegasus w atmosferze gazu przepływowego Ar (70 ml/min) w zakresie temperatury 25–1100°C z szybkością nagrzewania 10 K/min, stosując jako wzorzec szafir oraz tygiel z  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Obliczenia  $C_p$  wykonano metodą RatioMethod za pomocą oprogramowania Netzsch Proteus Thermal Analysis 4.8.5. Pomiar strumienia ciepła (*heat flux*) rejestrowano za pomocą zestawu STA 449 F3 Jupiter® Netzsch wyposażonego w nośnik typu *heat-flux* Pt-Rh DSC- $C_p$  w atmosferze gazu przepływowego Ar (70 ml/min) w zakresie temperatury 25–1550°C z szybkością nagrzewania/studzenia wynoszącą 10 K/min w tyglach z  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Temperatury krytyczne oraz ciepło przemian fazowych wyznaczono za pomocą oprogramowania Netzsch Proteus Thermal Analysis 6.1.0.

- b) Dylatometrię – do badania zmian rozszerzalności cieplnej (L/L0) oraz do obliczania współczynnika rozszerzalności cieplnej (CTE);

Pomiary te przeprowadzono za pomocą dylatometru wysokotemperaturowego Netzsch DIL 402C/4/G typu „push-rod” w atmosferze gazu przepływowego Ar (70 ml/min) w zakresie temperatury 25–1150°C oraz 25–900°C odpowiednio dla staliwa 30MCDB64-M i staliwa 30NSCDV86-M. Szybkość grzania wynosiła 5 K/min. Obróbkę danych wykonano wykorzystując oprogramowanie Netzsch Proteus Thermal Analysis 4.8.5.

- c) Metodę hydrostatyczną – do pomiaru gęstości;

Badania te wykonano za pomocą elektronicznej wagi analitycznej WAX 110 firmy Radwag i zestawu do wyznaczania gęstości ciał stałych metodą hydrostatyczną. Pomiar wykonano w powietrzu atmosferycznym w temperaturze 25°C w wodzie destylowanej, stosując wzorzec Au. Zależność gęstości w funkcji temperatury wyznaczono w oparciu o gęstość w temperaturze otoczenia ( $\rho^{30\text{MCDB64-M}} = 7,8520 \text{ g/cm}^3$  oraz  $\rho^{30\text{NSCDV86-M}} = 7,7273 \text{ g/cm}^3$ ).

For the investigations of thermophysical properties of the ingots obtained, samples of dimensions  $\phi = 3 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  and  $\phi = 10 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$  for DIL and LFA, respectively, were cut out. Samples weighing  $m \leq 100 \text{ mg}$  were prepared for DSC tests.

## 2.2. Research methods

The following measurement techniques were used to determine the thermophysical properties of the materials prepared for testing:

- a) Differential scanning calorimetry – for measurement of specific heat ( $C_p$ );

Specific heat was measured with a differential scanning calorimeter Netzsch DSC 404 C/3/G Pegasus in a flowing gas atmosphere Ar (70 ml/min) in the temperature range 25–1100°C at a heating rate of 10 K/min, using sapphire and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  crucible as a model.  $C_p$  calculations were performed by RatioMethod using Netzsch Proteus Thermal Analysis 4.8.5. The heat flux measurement was recorded using the STA 449 F3 Jupiter® Netzsch set with heat-flux Pt-Rh DSC- $C_p$  medium in a flow atmosphere Ar (70 ml/min) in the temperature range 25–1550°C with a heating/cooling rate of 10 K/min in  $\text{Al}_2\text{O}_3$  crucibles. Critical temperatures and phase transition heat were determined using Netzsch Proteus Thermal Analysis 6.1.0 software.

- b) Dilatometry – for testing changes in thermal expansion (L/L0) and for measuring the thermal expansion coefficient (CTE);

These measurements were performed with a high-temperature dilatometer Netzsch DIL 402C/4/G type “push-rod” in the atmosphere of flowing gas Ar (70 ml/min) in the temperature range of 25–1150°C and 25–900°C for cast steel 30MCDB64-M and cast steel 30NSCDV86-M, respectively. The heating rate was 5 K/min. Data processing was performed using Netzsch Proteus Thermal Analysis 4.8.5 software.

- c) Hydrostatic method – for density measurement;

These tests were performed with the use of WAX 110 electronic analytical scales from Radwag and a set for determining the density of solids using the hydrostatic method. The following measurements were made in atmospheric air at 25°C in distilled water, using the Au standard. The dependence of density in the function of temperature was determined on the basis of density at ambient temperature ( $\rho^{30\text{MCDB64-M}} = 7.8520 \text{ g/cm}^3$  and  $\rho^{30\text{NSCDV86-M}} = 7.7273 \text{ g/cm}^3$ ).

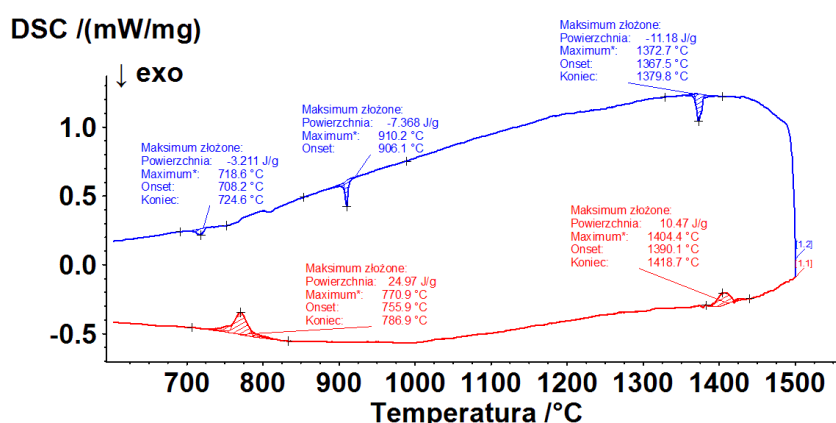
- d) Laserowa analizę impulsową – do pomiaru współczynnika przewodnictwa temperaturowego Pomiar te wykonano przy zastosowaniu zestawu aparaturowego Netzsch LFA 427 w próżni rzędu  $10^{-4}$  mbar w zakresie temperatury 25–1000°C z krokiem czasowym strzałów wynoszącym 200°C. Zasada działania urządzenia oraz metoda pomiaru współczynnika przewodnictwa temperaturowego została opisana w pracy [1]. Przewodność cieplną obliczono z uwzględnieniem strat radiacyjnych w oparciu o nieliniową regresję i model Cape-Lehmana [2] obliczono za pomocą oprogramowania Netzsch LFA Analysis 4.8.5.
- d) These measurements were performed using a Netzsch LFA 427 apparatus set in a vacuum of  $10^{-4}$  mbar in the temperature range 25–1000°C with a time step of 200°C. The principle of operation of the device and the method of temperature conductivity measurement are described in the paper [1]. Thermal conductivity was calculated taking into account radiation losses based on nonlinear regression and Cape-Lehman model [2] calculated with Netzsch LFA Analysis 4.8.5 software.

### 3. Wyniki badań

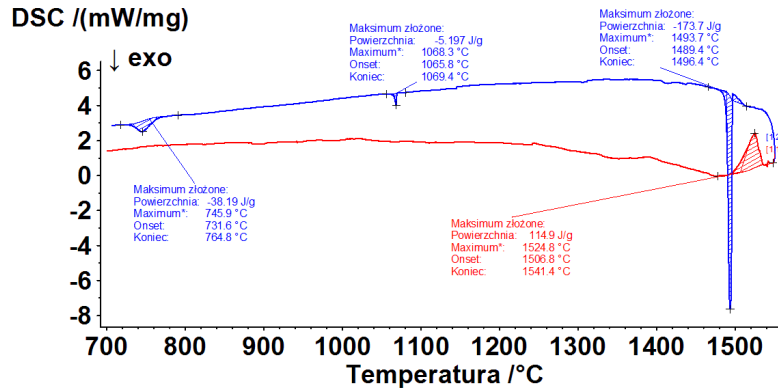
Na rysunkach 2–3 przedstawiono wyniki badań kalorymetrycznych staliwa gatunków w stanie surowym 30MCDB64-M oraz 30NSCDV86-M w postaci krzywych DSC ilustrujących przebieg procesu topienia badanych materiałów wraz z oznaczeniem charakterystycznych temperatur ich przemian fazowych. Na podstawie analizy krzywy DSC (rys. 2–3) wyznaczono wartości temperatury solidus ( $T_s$ ), temperatury liqwidus ( $T_l$ ), temperatury topnienia ( $T_m$ ), stopień przechłodzenia oraz zmiany entalpii  $\Delta H$  towarzyszącej topieniu badanych materiałów. Wszystkie otrzymane dane zebrano w tabeli 3. Na podstawie porównania zawartych w tabeli 2 danych eksperymentalnych dla obu staliw można stwierdzić, że staliwo 30NSCDV86-M w stanie odlewanym wykazuje wyższą o 115,3°C temperaturę topnienia niż staliwo 30MCDB64-M.

### 3. Research results

The results of calorimetric tests of cast steel of 30MCDB64-M and 30NSCDV86-M grades in the form of DSC curves illustrating the course of melting process of the tested materials together with the determination of characteristic temperatures of their phase transformations are presented in Figures 2–3. The values of solidus temperature ( $T_s$ ), liquidus temperature ( $T_l$ ), melting temperature ( $T_m$ ), degree of undercooling and changes of  $\Delta H$  enthalpy accompanying the melting of the materials investigated were determined on the basis of DSC curve analysis (Figs. 2–3). All data received are summarised in Table 3. Based on the comparison of experimental data for both cast steel contained in Table 2, it can be stated that cast steel 30NSCDV86-M shows a melting temperature higher by 115.3°C than cast steel 30MCDB64-M.



Rys. 2. Krzywa DSC staliwa 30MCDB64-M w stanie odlewanym  
Fig. 2. The DSC curve of cast steel 30MCDB64-M in cast condition



Rys. 3. Krzywa DSC staliwa 30NSCDV86-M w stanie odlewanym  
 Fig. 3. The DSC curve of cast steel 30NSCDV86-M in cast condition

Tabela 2. Temperatura topnienia oraz ciepło topnienia badanych staliw  
 Table 2. The melting point and melting heat of tested cast steel

Stop Alloy	Grzanie, EXO Heating, EXO				Studzenie, ENDO Cooling, ENDO				Obliczenia Calculations				
	T <sub>onset</sub> , °C	T <sub>max</sub> , °C	T <sub>end</sub> , °C	ΔH, J/g	T <sub>onset</sub> , °C	T <sub>max</sub> , °C	T <sub>end</sub> , °C	ΔH, J/g	T <sub>s</sub> , °C	T <sub>m</sub> , °C	T <sub>p</sub> , °C	Przechłodzenie: Undercooling: /ΔT <sub>u</sub> / = T <sub>m</sub> - T <sub>s</sub>	/ΔT/ = T <sub>l</sub> - T <sub>s</sub>
30MCDB64-M	1390,1	1404,4	1418,7	10,47	1379,8	1372,7	1367,5	11,18	1384,9	1388,5	1393,1	3,6	8,2
30NSCDV86-M	1506,8	1524,8	1541,4	114,9	1496,4	1493,7	1489,4	173,7	1500,2	1509,2	1515,4	9	15,2

T<sub>s</sub> – średnia z onset zarejestrowanego podczas grzania i studzenia / mean of onset recorded during heating and cooling  
 T<sub>l</sub> – średnia z end zarejestrowanego podczas grzania i studzenia / mean of ends recorded during heating and cooling  
 T<sub>m</sub> – średnia z maximum zarejestrowanego podczas grzania i studzenia / mean of the maximum recorded during heating and cooling

Krzywą zmiany ciepła właściwego w funkcji temperatury przedstawiono na rysunku 4. Wykres C<sub>p</sub>(T) wskazuje na zmienny charakter wydzielania się ciepła właściwego w trakcie badań oraz na jego wydzielanie się na skutek przemiany: ferryt + perlit → austenit (rys. 4). Wyznaczona na podstawie pomiarów C<sub>p</sub> do temperatury 400°C pojemność cieplna wynosi odpowiednio 0,37 J/g×K dla staliwa 30MCDB64-M oraz 0,42 J/g×K dla staliwa 30NSCDV86-M.

Krzywe dylatometryczne, krzywe zmian współczynnika rozszerzalności cieplnej oraz gęstości (rys. 5–6) w funkcji temperatury badanych gatunków staliwa mają zbliżony charakter przebiegu. W temperaturze ok. 750°C na krzywych zaobserwowano pik odpowiadający przemianie ferryt + perlit → austenit. Temperatury początku i końca przemiany A<sub>c1</sub> i A<sub>c3</sub> oraz wartość końcowego wydłużenia zestawiono w tabeli 3.

Krzywa zależności przewodnictwa temperaturowego od temperatury oraz obliczona na jej podstawie zgodnie z równaniem (1) przewodność cieplna λ zostały zaprezentowane na rysunku 7.

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

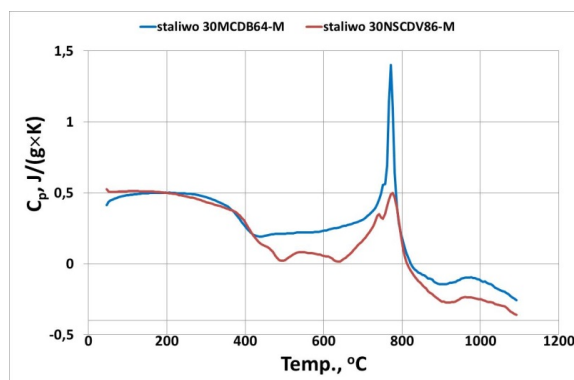
The curve of the change of specific heat as a function of temperature is shown in Figure 4. The C<sub>p</sub>(T) graph shows the variable character of the specific heat emission during the research and its emission as a result of the transformation: ferrite + perlite → austenite (Fig. 4). Thermal capacity determined on the basis of C<sub>p</sub> measurements up to 400°C is 0.37 J/gK for 30MCDB64-M cast steel and 0.42 J/gK for 30NSCDV86-M cast steel, respectively.

Dilatometric curves, thermal expansion coefficient and density curves (Figs. 5–6) in the function of temperature of the cast steel grades are similar in character.

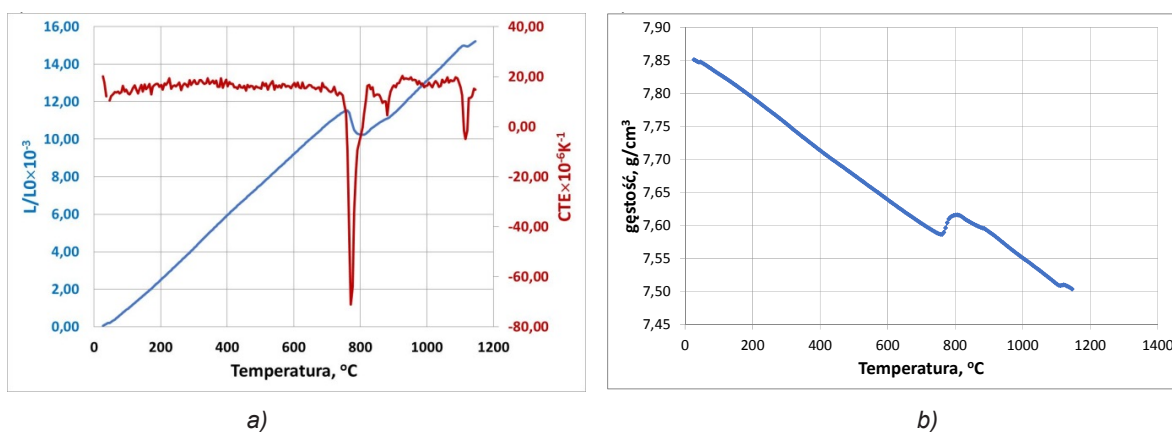
At the temperature of about 750°C a peak corresponding to the transformation of ferrite + perlite → austenite was observed in the curves. The temperatures at the beginning and end of A<sub>c1</sub> and A<sub>c3</sub> transformation as well as the value of the final elongation are presented in Table 3.

The temperature conductivity curve and the thermal conductivity λ calculated from it according to Equation (1) are shown in Figure 7.

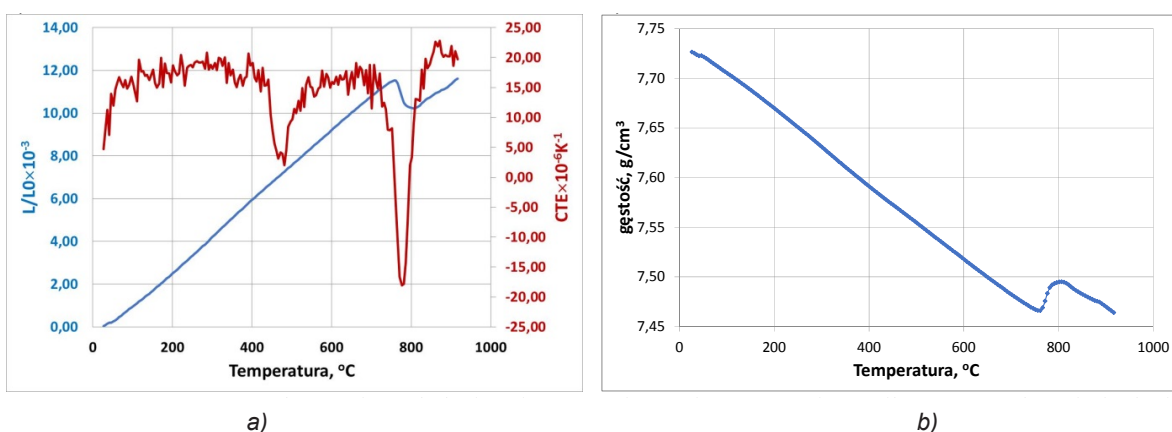
$$\lambda(T) = a(T)c_p(T) \rho(T) \quad (1)$$



Rys. 4. Krzywa zmiany ciepła właściwego ( $C_p$ ) badanych materiałów funkcji temperatury  
 Fig. 4. Specific heat ( $C_p$ ) change curve of the tested temperature function materials



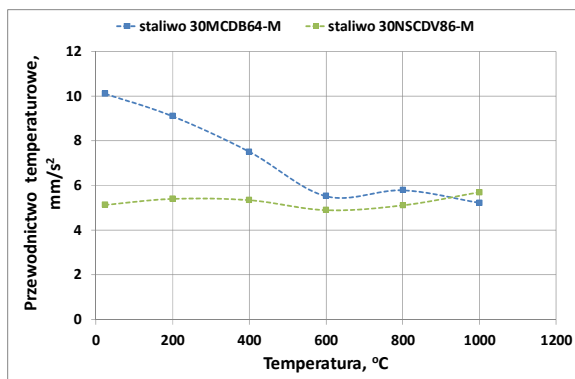
Rys. 5. Temperaturowe zależności względnej zmiany wymiarowej oraz współczynnika rozszerzalności cieplnej (a) i gęstości (b) staliwa 30MCDB64-M  
 Fig. 5. Temperature dependence of relative dimensional change and thermal expansion coefficient (a) and density (b) of cast steel 30MCDB64-M



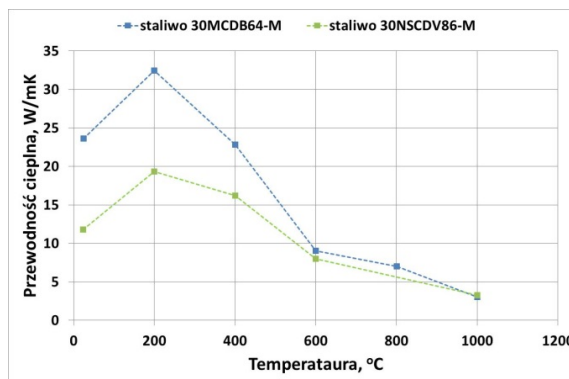
Rys. 6. Temperaturowe zależności względnej zmiany wymiarowej oraz współczynnika rozszerzalności cieplnej (a) i gęstości (b) staliwa 30NSCDV86-M  
 Fig. 6. Temperature dependence of relative dimensional change and thermal expansion coefficient (a) and density (b) of cast steel 30NSCDV86-M

Tabela 3. Zakres temperatury przemiany  $A_{c1}$ - $A_{c3}$  ferryt + perlit  $\rightarrow$  austenit oraz wartość końcowego wydłużenia próbki  
 Table 3.  $A_{c1}$ - $A_{c3}$  transformation temperature range ferrite + perlite  $\rightarrow$  austenite and final elongation value of the material

Staliwo Cast steel	Temperatura przemiany, °C Transformation temperature, °C		Końcowe wydłużenie, mm Final elongation, mm
	$A_{c1}$	$A_{c3}$	
30MCDB64-M	756,0	801,0	0,0152
30NSCDV86-M	751,0	811,0	0,0116



a)



b)

Rys. 7. Temperaturowe zależności: przewodnictwa temperaturowego (a) oraz przewodności cieplnej (b)  
 Fig. 7. Temperature dependence of temperature conductivity (a) and thermal conductivity (b)

Wyniki badań uzyskane na podstawie wykonanych pomiarów wskazują, że zarówno przewodnictwo temperaturowe, jak i przewodność cieplna zmieniają się wraz z temperaturą. W temperaturze ok. 200°C badane materiały osiągają maksymalną wartość przewodności cieplnej.

Test results obtained from these measurements indicate that both the temperature conductivity and the thermal conductivity change with the temperature. At a temperature of about 200°C the materials tested reach the maximum value of thermal conductivity.

#### 4. Wnioski

Kompleks właściwości termofizycznych staliwa 30MCDB64-M oraz 30NSCDV86-M wyznaczony w niniejszej pracy na podstawie przeprowadzonych badań stanowi zbiór informacji niezbędnych do opracowania wirtualnej i rzeczywistej technologii odlewania badanych materiałów. Wyznaczone eksperymentalnie właściwości mogą być wykorzystane podczas modelowania i symulacji procesów wytwarzania oraz przewidywania właściwości eksploatacyjnych materiałów do zastosowań w produkcji nowej generacji odlewanych młotków bijakowych stosowanych w mulcerach i mulczarkach oraz krążników stosowanych w urządzeniach do przerobu biomasy.

#### 4. Conclusions

The complex of thermo-physical properties of 30MCDB64-M and 30NSCDV86-M cast steel, determined in this paper on the basis of the research conducted, constitutes a set of information necessary for developing virtual and real casting technology of the materials studied. The properties determined experimentally can be used during modelling and simulating manufacturing processes and predicting the performance properties of materials for use in the manufacture of new generation cast flail hammers for use in mulchers and mulchers and rollers used in biomass processing equipment.

#### Podziękowania

Badania realizowano w ramach projektu pt. „Opracowanie innowacyjnych elementów roboczych maszyn sektora leśnego i przetwórstwa biomasy w oparciu

#### Acknowledgements

The research was carried out within the framework of a project entitled “The development of innovative working elements of forestry sector machinery and biomass



o wysokoenergetyczne technologie powierzchniowej modyfikacji warstwy wierzchniej elementów odlewanych”. Projekt realizowany w ramach Programu TECHMATSTRATEG „Nowoczesne technologie materiałowe” nr umowy TECHMATSTRATEG1/348072/2/NCBR/2017 z dnia 18.12.2017 r.

processing based on high-energy surface modification technologies of the surface layer of cast elements”. Project implemented within the TECHMATSTRATEG Programme “Modern material technologies” contract No. TECHMATSTRATEG1/348072/2/NCBR/2017 of 18.12.2017.

## Literatura/References

1. Holmgren D. 2005. „Review of thermal conductivity of cast iron”. *International Journal of Cast Metal Research* 18 (6) : 331–345.
2. Cape J.A., G.W. Lehman. 1963. „Temperature and finite pulse-time effect in the flash method for measuring thermal diffusivity”. *Journal of Applied Physics* 34 (7) : 1909–1913.



Open Access. This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0).

