

Mirosław Witaszek, Kazimierz Witaszek

OKREŚLENIE PRZEWODNOŚCI CIEPLNEJ STALI P60

Słowa kluczowe: przewodność cieplna, stal gatunku P60, obręcze kół lokomotyw

Streszczenie. W literaturze dotyczącej stali stosowanych na obręcze kół kolejowych najczęściej podawane są ich własności mechaniczne. Natomiast zauważalny jest brak danych dotyczących własności cieplnych tych stali. W pracy zbudowano stanowisko do wyznaczania przewodności cieplnej metali metodą Angströma i wykonano na nim pomiary dla stali gatunku P60 stosowanej na obręcze kół lokomotyw.

Determination of P60 steel heat conductance

Key words: heat conductance, steel grade P60, wheel tyres of locomotives

Summary. Published data that concerns steels for rail wheels usually contains their mechanical properties. However visible lack of their thermal properties data can be noticed. In the current work an apparatus for heat conductance of metals measuring was built. It enables determination of the heat conductance with Angström method. Measurements for the P60 steel used for wheel tyres of locomotives manufacturing were carried out.

1. Wstęp

Koleje zapewniają efektywny energetycznie transport pasażerów i ładunków. Od wielu lat obserwuje się w licznych krajach trend do zwiększania prędkości pociągów pasażerskich lub obciążenia przypadającego na oś wagonów towarowych [1]. Stwarza to coraz trudniejsze warunki współpracy dla kół i szyn kolejowych. Obniża to ich trwałość i niezawodność. Znaczna złożoność problematyki współpracy kół i szyn kolejowych [2] sprawia, że nie wciąż stanowi ona wyzwanie dla nauki i przemysłu. Liczne, badania skojarzenia koło kolejowe – szyna poświęcone są mechanice kontaktu jego elementów. Natomiast niewiele uwagi poświęca się obciążeniom termicznym działającym w tym skojarzeniu.

W pracy [3] podano wyniki pomiarów temperatury koła podczas hamowania hamulcem klockowym. Np. podczas hamowania pojazdu o masie 22,5 t na oś, od prędkości 100 km/h do zatrzymania temperatura na powierzchni tocznej obręczy koła osiągnęła 209°C. Uwzględnienie obciążeń cieplnych kół przy analizie współpracy kół i szyn wydaje się więc

uzasadnione. Istotną przeszkodą w tej analizie jest niewielka ilość danych dotyczących własności cieplnych materiałów stosowanych na koła kolejowe. W pracy [4] wyznaczono takie własności dla stali gatunku P55A, stosowanej na obręcze kół kolejowych oraz wybranych materiałów stosowanych na klocki hamulcowe.

Przepływ ciepła może następować trzema sposobami, tj. przez: przewodzenie, konwekcję i promieniowanie [10]. Przewodzenie ciepła opisane jest prawem Fouriera, które wyraża się wzorem [10]:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}, \quad (1)$$

gdzie:

q – natężenie strumienia cieplnego, $W \cdot m^{-2}$,

λ – przewodność cieplna, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$,

T – temperatura, K,

x – współrzędna określająca odległość w kierunku przepływu ciepła, m.

Znak minus w równaniu wskazuje, że przepływ ciepła następuje od miejsc o wyższej temperaturze do tych o temperaturze niższej. Zdolność ośrodka do przewodzenia ciepła charakteryzuje współczynnik λ czyli przewodność cieplna. Należy ona do najważniejszych parametrów charakteryzujących przepływ ciepła różnych materiałów, jak np. cienkie włókna, w tym nanorurki węglowe [6, 7], materiały ogniotrwałe [8], metale [9] oraz ciecze czy proszki [10]. W niniejszej pracy określono przewodność cieplną dla stali gatunku P60, z której wykonywane są obręcze kół lokomotyw.

2. Badania

W celu określenia przewodności cieplnej badanej stali zbudowano stanowisko pomiarowe. Należało je wykonać tak, by zminimalizować przepływ ciepła przez konwekcję i promieniowanie. Ponieważ przepływ ciepła przez konwekcję, zwaną również unoszeniem, następuje wskutek przemieszczania się cząstek płynu (cieczy lub gazu) otaczającego badane ciało stałe, w celu jego ograniczenia należy utrudnić to przemieszczanie się [11]. Promieniowanie cieplne odgrywa istotną rolę w wysokich temperaturach [12]. Zatem stosowanie niezbyt wysokiej temperatury w połączeniu z zastosowaniem ekranu o temperaturze zbliżonej do temperatury badanego przedmiotu pozwala na pominięcie tego sposobu przepływu ciepła [11].

Istnieją różne metody pomiaru przewodności cieplnej. Można je podzielić na dwie kategorie: przy stacjonarnym i niestacjonarnym przepływie ciepła [9]. Podczas pomiaru przy stacjonarnym przepływie ciepła, pole temperatury w próbce nie zmienia się w czasie. Po uzyskaniu takiego stanu przewodność cieplna jest określana przez pomiar strumienia ciepła przepływającego przez przekrój poprzeczny próbki i gradientu temperatury, czyli zmian temperatury próbki na jej długości $\Delta T/\Delta x$. Do jej obliczenia służy wzór:

$$\lambda = q \frac{\Delta x}{-\Delta T}. \quad (2)$$

Ujemny przyrost temperatury $-\Delta T$ można obliczyć odejmując temperaturę o niższej wartości od większej.

Metody oparte na niestacjonarnym przepływie ciepła polegają na pomiarze szybkości zmian temperatury zamiast określania strumienia ciepła [9]. Pozwala to wyznaczyć współczynnik przewodnictwa temperaturowego, związany z przewodnością cieplną następującą zależnością [11]:

$$k = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}, \quad (3)$$

gdzie:

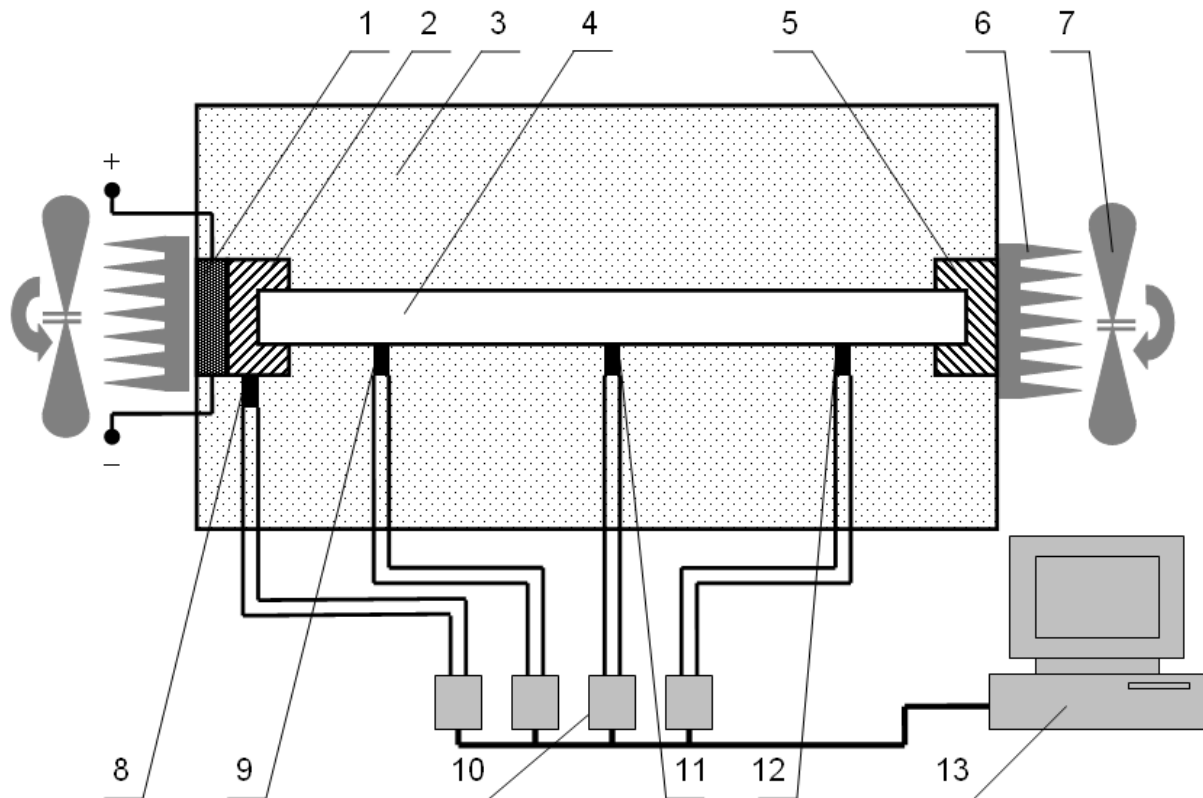
k - współczynnik przewodnictwa temperaturowego $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,

c - ciepło właściwe $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,

ρ - gęstość materiału próbki, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

W niniejszej pracy do wyznaczenia przewodności cieplnej zastosowano metodę z drugiej grupy, tzn. przy niestacjonarnym przepływie ciepła. Metoda ta nosi nazwę metody Angströma [11, 13, 14]. Układ pomiarowy przedstawiono schematycznie na rys. 1. Próbkę badanego materiału w kształcie pręta (4) umieszczono w izolacji termicznej 3. Do jednego końca próbki doprowadzono ciepło za pomocą grzejnika (1), wykonanego modułu Peltiera, a z drugiego końca odbierano je za pomocą radiatora (6) chłodzonego wentylatorem (7). W celu zapewnienia dobrego kontaktu termicznego grzejnika i pręta koniec próbki umieszczono w bloku aluminiowym (2). Zwiększono dzięki temu powierzchnię kontaktu pręta ze źródłem ciepła. Podobne rozwiązanie zastosowano również od strony radiatora. W celu pomiaru gradientu temperatury zastosowano trzy czujniki (8, 9, 11, 12). Sygnały elektryczne z czujników przetwarzano w przetwornikach (10), którymi były mierniki uniwersalne, na

postać cyfrową i zapisywano na dysku komputera (13). Próbkę badanej stali pokazano na rys. 2, natomiast na rys. 3 widok zbudowanego stanowiska pomiarowego.



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego

- 1 – grzejnik, 2 – blok aluminiowy grzejnika, 3 – izolacja termiczna, 4 - próbka,
- 5 – blok aluminiowy radiatora, 6 – radiator, 7 – wentylator, 8 – czujnik temperatury oznaczony jako „TEMP 1”, 9 - czujnik temperatury oznaczony jako „TEMP 2”
- 10 – przetwornik, 11 – czujnik temperatury oznaczony jako „TEMP 3”, 12 - czujnik temperatury oznaczony jako „TEMP 4”, 13 – komputer

Przeprowadzenie badań wymagało okresowego włączenia grzejnika przy stałe włączonym wentylatorze, oraz rejestracji wskazań czujników temperatury w funkcji czasu. Generowało to periodyczne zmiany temperatury w pręcie, zbliżone do sinusoidalnych. Wykresy tych funkcji uzyskane w punktach o różnych współrzędnych x na długości pręta mają różne amplitudy i są przesunięcie w czasie (rys. 4). Wyznaczenie przewodności cieplnej wymaga określenia amplitudy temperatury w punktach pręta oddalonych o Δx lub czasu Δt po upływie którego fazy uzyskanych przebiegów w tych punktach są zgodne. Przewodność cieplną można obliczyć ze wzoru [11, 13, 14]:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot c \cdot \rho \cdot (\Delta x)^2}{2 \cdot \left[\ln \left(\frac{T_1}{T_2} \right) \right]^2}, \quad (4)$$

gdzie:

ω – częstość zmian źródła ciepła $\omega = 2\pi/t_0$,

t_0 – okres przełączania źródła ciepła,

Δx – odległość punktów pomiaru temperatury na próbce,

T_1 – amplituda temperatury zmierzona w punkcie położonym bliżej źródła ciepła,

T_2 – amplituda temperatury zmierzona w punkcie położonym dalej od źródła ciepła,

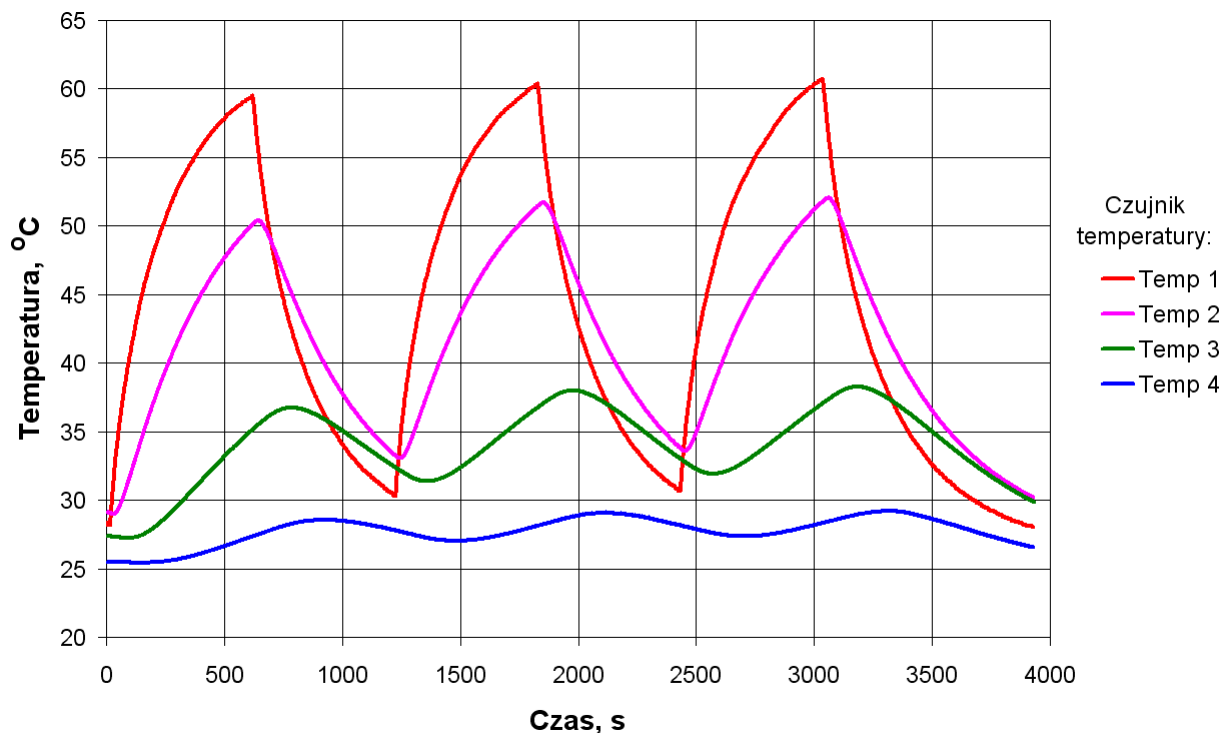
Δt – przesunięcie czasowe przebiegu temperatury.



Rys. 2. Próbką badanej stali P60



Rys. 3. Stanowisko pomiarowe przewodności cieplnej metali



Rys. 4. Wyniki pomiarów temperatury

3. Wyniki badań

Wyniki badań, niezbędne do wyznaczenia przewodności cieplnej stali gatunku P60 przedstawiono na rysunku 4. Widoczne są na nim przebiegi temperatury mierzonej w trzech punktach próbki położonych w odległościach o 70 mm. W tabeli 1. zamieszczono wyniki pomiarów amplitudy temperatury T_1 , T_2 czujników umieszczonych na próbce oraz obliczony na ich podstawie współczynnik przewodności cieplnej. Okres włączania źródła ciepła t_0 wynosił 1200 s.

Tabela 1

Wyniki badań przewodności cieplnej stali gatunku P60

$\Delta x, m$	t_0, s	T_1, K	T_2, K	$\lambda, W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
0,07	1200	9,339	3,305	43,035
0,14	1200	9,339	1,040	38,566
0,07	1200	9,071	3,035	38,752
0,07	1200	9,238	3,174	40,702

Jak wynika ze wzoru (4) w celu wyliczenia przewodności cieplnej konieczna jest znajomość gęstości i ciepła właściwego badanego materiału. Gęstość stali wyznaczono ważąc próbkę z

dokładnością 1 g oraz mierząc długość i średnicę próbki z dokładnością do 0,01 mm, ze wzoru:

$$\rho = \frac{4 \cdot m \cdot l}{\pi \cdot d^2}, \quad (5)$$

gdzie:

m – masa próbki, 0,388 kg,

l – długość próbki, 0,2183 m

d – średnica próbki, 0,0170 m.

Ciepło właściwe (właściwą pojemność cieplną) badanego stopu przyjęto jako $463 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ na podstawie danych literaturowych zawartych w pracy [4]

Na podstawie wyników pomiarów podanych w tabeli 1 obliczono wartość średnią λ_{SR} i odchylenie standardowe σ_λ otrzymanej przewodności cieplnej. Wynosiły one $\lambda_{SR} = 40,264 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ i $\sigma_\lambda = 4,239 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

4. Podsumowanie

W ramach pracy zbudowano stanowisko do wyznaczania przewodności cieplnej metali przy niestacjonarnym przepływie ciepła, metodą Angströma. Pozwala ono na uzyskanie periodycznie zmieniającego się rozkładu temperatury próbki w kształcie pręta. Pomiary amplitudy zmian temperatury lub ich przesunięcia w czasie, w co najmniej dwóch punktach próbki położonych w różnych odległościach od źródła ciepła, pozwala na wyznaczenie omawianej wielkości. Do tego celu konieczna jest jednak znajomość gęstości i ciepła właściwego badanego materiału.

Wykonane stanowisko wykorzystano do określenia przewodności cieplnej stali P60, wykorzystywanej do produkcji obręczy kół lokomotyw. Wartość średnia wyznaczonej przewodności wynosi $40,264 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, a odchylenie standardowe $4,239 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Wobec braku danych literaturowych dotyczących własności cieplnych stali stosowane do wytwarzania kół kolejowych i ich obręczy istnieje konieczność prowadzenia dalszych prac w tym zakresie.

Literatura

1. M.Sato, P.M. Anderson, D.A. Rigney: Rolling-sliding behavior of rail steels. Wear, 162-164 (1993), 159-172.

2. Ch. DellaCorte: Tribology at the Wheel-Rail Interface. An Old and Challenging Problem. <http://wenku.baidu.com/view/a86765c42cc58bd63186bd0a>
3. A. Hełka: Przewidywanie parametrów hamowania pojazdów szynowych wyposażonych w hamulce klockowe. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Wydział Transportu, Katowice 2005.
4. A. Mańka: Badania naprężeń mechanicznych i termicznych w układzie koło kolejowe - klocek hamulcowy. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Wydział Transportu, Katowice 2007.
5. B. Staniszewski: Wymiana ciepła. Podstawy teoretyczne. PWN Warszawa 1980.
6. X. Zhang, S. Fujiwara, M. Fujii: Measurements of Thermal Conductivity and Electrical Conductivity of a Single Carbon Fiber. *International Journal of Thermophysics*, Vol. 21, No. 4, 2000.
7. Yuan-Wei Li, Bing-Yang Cao: Thermal Conductivity of Single-Walled Carbon Nanotube with Internal Heat Source Studied by Molecular Dynamics Simulation. *Int J Thermophys* (2013) 34:2361–2370.
8. W. N. Dos Santos: Experimental investigation of the effect of moisture on thermal conductivity and specific heat of porous ceramic materials. *Journal of Materials Science* 35 (2000) 3977 – 3982.
9. S. Aksöz, Y. Ocaklı, K. Keleş, N. Maraşlı: Determination of Thermo-Electrical Properties in Sn Based Alloys. *Met. Mater. Int.*, Vol. 16, No. 3 (2010), pp. 507-515.
10. B. Chowdhury, S. C. Mojumdar: Aspects of Thermal Conductivity Relative to Heat Flow. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 81 (2005) 179–182.
11. P. Jaśkiewicz: Badanie przewodnictwa cieplnego i temperaturowego metali metodą Angströma. http://www.if.pw.edu.pl/~labfiz1p/cmsimple2_4/1instrukcje_pdf/38.pdf
12. W. F. Song • W. D. Yu: Study on radiative heat transfer property of fiber assemblies using FTIR. *J Therm Anal Calorim* (2011) 103:785–790.
13. <http://www.gdp.if.pwr.wroc.pl/pliki/pc.pdf>
14. M. Urbański: Pomiar przewodnictwa cieplnego metali metoda Angströma. http://www.if.pw.edu.pl/~murba/przewodnictwo_cieplne.pdf
15. www.uwm.edu.pl/kiap/dydaktyka/Tablice_Inz_%20proc_zsz.doc