

Tadeusz Szymczak

tadeusz.szymczak@its.waw.pl

Instytut Transportu Samochodowego

Zbigniew L. Kowalewski

zbigniew.kowalewski@its.waw.pl

Instytut Transportu Samochodowego

Instytut Podstawowych Problemów Techniki

WYBRANE MATERIAŁY STOSOWANE W UKŁADACH HAMULCOWYCH I ICH WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE

W pracy omówiono wybrane materiały stosowane w układach hamulcowych, jak: żeliwo szare, kompozyty ceramiczne oraz metalowe o osnowie ze stopu aluminium. Zaprezentowano ich zasadnicze właściwości mechaniczne oraz parametry fizyczne. Ponadto, omówiono zmiany granicy plastyczności i wytrzymałości doraźnej żeliwa szarego w warunkach rozciągania prowadzonego przy dziewięciu poziomach temperatury w zakresie od 20 °C do 700 °C.

SELECTED MATERIALS APPLIED IN BREAKING SYSTEMS AND ITS MECHANICAL PROPERTIES

The paper reports selected materials applied in breaking systems, i.e.: grey cast iron, ceramic and metallic composites with aluminium alloy matrix. Their mechanical and physical properties are presented. Variations of the yield point and ultimate tensile strength determined from tensile tests carried out at nine levels of temperature within a range from 20 °C up to 700 °C are discussed.

1. Wprowadzenie

Rozwój materiałów stosowanych w układach hamulcowych jest determinowany rodzajem środka transportu i jego takimi parametrami technicznymi, jak: prędkość nominalna/maksymalna oraz masa. Obie te wielkości stanowią podstawę do wyznaczenia czasu wymaganego do zatrzymania pojazdu. Początki wykorzystywania najprostszych układów hamulcowych sięgają połowy XIX wieku, w którym powszechnym środkiem transportu były pojazdy typu bryczka, wyposażane w hamulec ręczny [10]. Poruszały się one dzięki drewnianym kołom, mającym na swym obwodzie metalowy pierścień, który miał bezpośredni kontakt z podłożem oraz był jednym z dwóch elementów pary ciernej układu hamulcowego. Drugim z nich był wyprofilowany gumowy klocek, który był bezpośrednio połączony z dźwignią hamulca ręcznego. Działanie tego układu hamulcowego polegało na dociskaniu, przy użyciu dźwigni, gumowego klocka do obręczy metalowej koła jezdnego.

W przypadku samochodowych pojazdów silnikowych zasadniczymi elementami układu hamulcowego były tarcza i klocek. Materiałem podstawowym tarcz hamulcowych, którego stosowanie rozpoczęło się w końcu XIX wieku i trwa do dnia dzisiejszego, jest żeliwo szare [8]. Wykorzystywano je jako materiał bazowy, do którego wprowadzano celem wzmocnienia azbest, druty stalowe lub cząstki brązu. Rozwój przemysłowy na początku XX wieku przyczynił się do zastosowania materiałów na bazie żywicy, które stały się pierwszymi kompozytami. Do ich zbrojenia wykorzystywano zarówno włókna szklane, metalowe, syntetyczne, jak i węglowe, tab. 1.

Tabela 1

Rozwój materiałów stosowanych w układach hamulcowych [8]

Table 1

Development of materials applied in breaking systems [8]

| Opis materiału | Zastosowanie | Rok zastosowania |
|--|--|------------------|
| Żeliwo szare na stali | Tarcze hamulcowe samochodów osobowych | 1870 |
| Bawełna i włosy | Pasy opasujące koła drewniane | 1897 |
| Azbest i druty stalowe | Samochody ciężarowe i osobowe | 1908 |
| Cząstki brązu oraz popiół z węgla kamiennego | | 192 |
| Wytworzony z suchej mieszaniny materiałów | Klocki hamulcowe w pociągach elektrycznych | 1930 |
| Materiał na bazie żywicy zbrojony | Bębny hamulcowe | 1930 |
| Stal stopowa oraz żywica | Branża lotnicza | 1950 |
| Szkło, metal, włókna węglowe i syntetyczne | Samochody ciężarowe i osobowe | 1960 |
| Materiały pozbawione azbestu | | 1980 |
| Kompozyty zbrojone włóknem węglowym | Pojazdy sportowe i specjalne | 1991 |

Współcześnie, szczególnie w pojazdach sportowych oraz osobowych klasy „premium”, na materiały tarczy hamulcowej stosuje się połączenie ceramiki (SiC lub Si) oraz włókien węglowych. W efekcie otrzymuje się odporny na zużycie cierne, wytrzymały i charakteryzujący się niewielką rozszerzalnością cieplną kompozyt. Jediną wadą tego rodzaju tarcz hamulcowych jest ich wysoka cena. Innymi rodzajami materiałów znajdujących zastosowanie w układach hamulcowych są kompozyty na bazie stopów tytanu (np: 10TiC; 5TiB; WTiC; 30TiB), które w porównaniu do kompozytów o osnowie z ceramiki mają mniejszy ciężar właściwy, podobnie jak kompozyty o osnowie ze stopu aluminium zbrojone węglikiem krzemu (SiC) [1, 7, 9, 16, 17]. Zbrojenie SiC jest również często wykorzystywane do produkcji kompozytu na bazie stopu aluminium o przeznaczeniu na tłoki silników spalinowych, [11].

Typowe cechy żeliwa wysokowęglowego (HC – High Carbon) to przede wszystkim mikrostruktura perlityczna w 99% objętości oraz wytrzymałość na rozciąganie na poziomie 250 MPa tab. 2 [2]. Zawartość perlitu i ferrytu odpowiednio 85% i 15% prowadzi do wytworzenia żeliwa sferoidalnego (CGi – Compact Graphite Iron) charakteryzującego się prawie dwukrotnie wyższą wytrzymałością na rozciąganie niż jego odmiana HC.

Tabela 2

Mikrostrukturalne cechy oraz właściwości mechaniczne żeliw [2, 17]

Table 2

Microstructural and mechanical properties of cast iron [2, 17]

| Parametry mikrostrukturalne | | | | |
|---|--------------|-------------|----------------|------------|
| Składnik w objętości | GI250 | GIHC | GI250Ti | CGi |
| Płatki grafitu [%] | 12 | 12.5 | 10 | 12 |
| L/D (L – długość i D – szerokość płatka grafitu) | 5 | 4.7 | 6.5 | 2.8 |
| Dane dla osnowy | | | | |
| Udział perlitu w osnowie żeliwa [%] | 99 | 99 | 99 | 85 |
| Udział ferrytu w osnowie żeliwa [%] | <1 | <1 | <1 | 15 |
| Parametry mechaniczne | | | | |
| Twardość HB [MPa] | 195 | 180 | 195 | 220 |
| Wytrzymałość na rozciąganie [MPa] | 255 | 240 | 255 | 460 |

Kompozyty na bazie stopu aluminium zbrojone węglikiem krzemu mają przede wszystkim wysoką przewodność cieplną, wynoszącą 180 W/(m K) oraz niski ciężar właściwy równy 2.76 g/cm³, tab. 3. Są to dwa główne parametry tego rodzaju materiałów, decydujące o ich stosowaniu w układach hamulcowych. W przypadku kompozytów wytworzonych na bazie stopu aluminium graniczną temperaturą pracy jest 300 °C, [15]. Kompozyty ceramiczne C/SiC wykazują małe wydłużenie oraz wysoką odporność na szoki cieplne – do 46000 W/m. Podobnie jak kompozyty wytworzone na bazie stopu

aluminium mają przewodność cieplną rzędu 150 W/(m K). Stosunkowo dużą ich zaletą jest możliwość wykorzystywania w temperaturze do 1400 C, tab. 4. Zawartość SiC wpływa również na moduł Younga, granicę plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie kompozytu na bazie stopu aluminium (A356) [12]. Wzrost tego dodatku w zakresie od 0 do 20 % prowadzi do zwiększenia wartości tych parametrów odpowiednio o 30 %, 65 % i 30 %, niezależnie do procesu ich wytwarzania. Wzrost parametrów mechanicznych obserwowano również w przypadku kompozytu o matrycy ze stopu aluminium 2014 oraz 6061.

Tabela 3

Właściwości mechaniczne oraz fizyczne żeliwa i kompozytu na bazie stopu aluminium stosowanych na tarczy hamulcowe [2]

Table 3

Mechanical and physical properties of cast iron and aluminum composites for break discs [2]

| Właściwości | Rodzaj materiału | | | |
|---|------------------|--|---------|---------|
| | Żeliwo szare | Kompozyt na bazie stopu aluminium zbrojony SiC | | |
| | | 0% SiC | 10% SiC | 20% SiC |
| Moduł Younga [GPa] | 120 | 73 | 85 | 100 |
| Granica plastyczności [MPa] | 330 | 200 | 290 | 320 |
| Gęstość [g/cm ³] | 7.25 | 2.8 | 2.73 | 2.76 |
| Przewodność cieplna [W/(m K)] | 48 | 155 | 175 | 180 |
| Współczynnik rozszerzalności cieplnej [10 ⁻⁶ /K] | 12 | 23 | 19 | 19 |

Tabela 4

Właściwości mechaniczne oraz fizyczne żeliwa i kompozytów ceramicznych zbrojonych włóknami węglowymi, stosowanych na tarczy hamulcowe [17]

Table 4

Mechanical and physical properties of cast iron and ceramic composite reinforced by carbon fibers for break discs [17]

| Parametr | C/SiC | C/SiC dla tarcz hamulcowych zbrojonych włóknami węglowymi | Żeliwo szare (GG-20) |
|-----------------------------------|---------------|---|----------------------|
| Gęstość [g/cm ³] | 1.8...2.9 | 2.45 | 7.25 |
| Wytrzymałość na rozciąganie [MPa] | 10...240 | 20...40 | 200...250 |
| Moduł Younga [MPa] | 20...240 | 30 | 90...110 |
| Wytrzymałość na zginanie [MPa] | 20...210 | 50...80 | 150...250 |
| Wydłużenie względne [%] | 0.05...0.8 | 0.3 | 0.3...0.8 |
| Odporność na szoki cieplne [W/m] | 26500...46000 | > 27000 | < 5400 |
| Maksymalna temperatura pracy [°C] | 1400 | 900 | 700 |
| Przewodność cieplna [W/(m K)] | 20...150 | 40 | 54 |

Oprócz parametrów fizycznych, istotnych ze względu na eksploatację materiałów w węzłach tarcia, duże znaczenie odgrywiają parametry mechaniczne, a w szczególności wytrzymałość na ściskanie, gdyż bezpośrednio stanowi ona o niszczącym nacisku klocków hamulcowych na tarczę hamulcową. Największe wartości tego parametru mechanicznego mają żeliwo szare oraz kompozyty o osnowie ze stopu tytanu. Kompozyty na bazie stopu aluminium mają o ok. 500 MPa niższą wytrzymałość na ściskanie niż oba z wymienionych materiałów, tab. 5.

Tabela 5

Wytrzymałość na ściskanie materiałów tarcz hamulcowych [7]

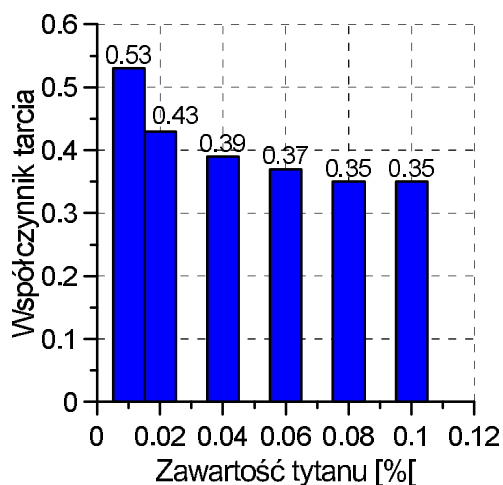
Table 5

Ultimate tensile strength of materials for brake discs [7]

| Rodzaj materiału | Wytrzymałość na ściskanie [MPa] |
|---|---------------------------------|
| GCI (Grey Cast Iron) – żeliwo szare | 1 293 |
| Ti-6Al-4V | 1 070 |
| TMC (Titanium Matrix Composite); | 1 300 |
| AMC1 (Aluminium-Metal Matrix Composite); Stop aluminium zbrojony 20% SiC | 406 |
| AMC2 (Aluminium-Metal Matrix Composite); Stop Al-Cu zbrojony 20% SiC | 761 |

Materiały kompozytowe zostały zastosowane w węzłach tarcia układów hamulcowych pojazdów samochodowych przez wytwórców krajowych (Instytut Odlewnictwa, Instytut Transportu Samochodowego), którzy wytworzyli kompozytowe tarcze hamulcowe na bazie stopu aluminium, [15].

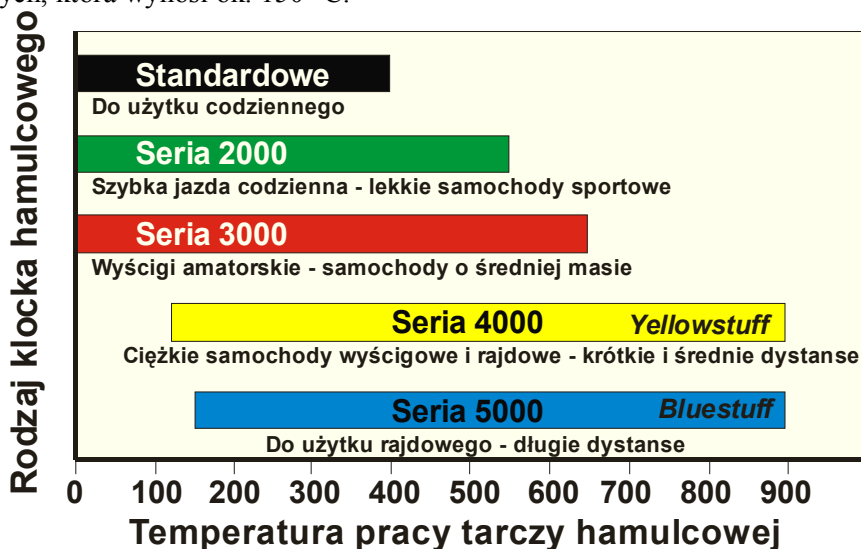
Oprócz wykorzystywania nowych rodzajów materiałów w węzłach tarcia prowadzi się również prace związane z domieszkowaniem materiału tarczy hamulcowej różnymi pierwiastkami, na przykład tytanem [5]. Wykorzystanie tego pierwiastka w tarczy hamulcowej z żeliwa szarego w zakresie od 0.01% do 0.1% przyczynia się do 33% redukcji współczynnika tarcia, rys. 1.



Rys. 1. Wpływ zawartości tytanu w tarczy hamulcowej wykonanej z żeliwa szarego na współczynnik tarcia [5]

Fig. 1. Influence of titanium content in grey cast iron brake disc on wear coefficient [5]

Drugim ważnym podzespołem układu hamulcowego jest klocek, składający się z okładziny i podłoża. Materiały stosowane na okładziny hamulcowe stanowią mieszankę wielu składników: cząstek miedzi, stali oraz innych, których wyznaczenie, ze względu na różnorodność i przypadkowe rozłożenie jest stosunkowo trudne. Przegląd dotychczasowo produkowanych klocków hamulcowych uwidacznia ich różne zastosowania w zależności od użytkowania, rys. 2. Wyróżniającą cechą eksploatacyjną klocków jest różnica w zakresie temperatury ich pracy wyrażająca nawet 500 °C. Warto jednocześnie zwrócić uwagę na minimalną wartość temperatury pracy klocków hamulcowych do zastosowań specjalnych, która wynosi ok. 150 °C.



Rys. 2. Rodzaje okładzin hamulcowych w zależności od temperatury tarczy hamulcowej [16]

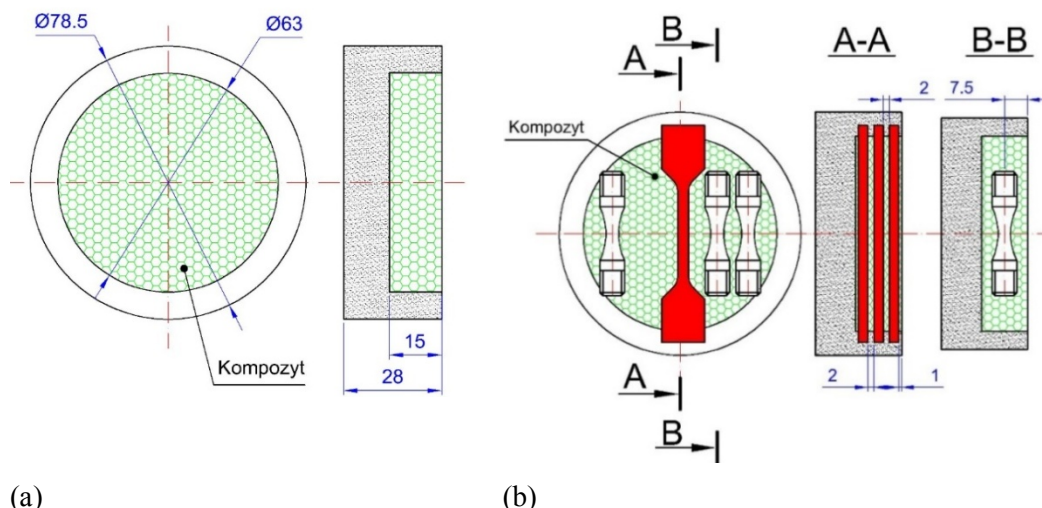
Fig. 2. Types of break lining for various application with respect to temperature of break disc [16]

2. Proponowane rozmieszczenie próbek do prowadzenia oceny właściwości mechanicznych materiałów w układach hamulcowych

Badania mechaniczne materiałów stosowanych w układach hamulcowych są prowadzone przy wykorzystaniu zarówno próbek walcowych, jak i płaskich. Ich wybór zależy od cech geometrycznych obiektu badań. Gdy grubość podzespołu jest niewielka wówczas wykorzystywane są przede wszystkim próbki płaskie. Zastosowanie próbki walcowej zależy od średnicy strefy chwytowej, która powinna być tak dobrana, aby można ją było wpisać w szerokość obiektu badań. Niezależnie od rodzaju próbki obowiązują te same zasady projektowania jej geometrii. Powinny uwzględniać zapewnienie jednorodnego rozkładu naprężenia w strefie pomiarowej.

Prawidłowe wyznaczenie parametrów mechanicznych materiału elementu konstrukcyjnego zależy od odpowiedniego rozmieszczenia stref poboru próbek, rys. 3. Ich typowanie powinno odbywać się w taki sposób, by można było uzyskać rozkład wartości parametrów mechanicznych w różnych obszarach obiektu badań i tym samym wnioskować o ich zróżnicowaniu. Taki sposób postępowania powinien obowiązywać we wszystkich rodzajach badań, w tym mikrostrukturalnych, tarciovych czy udarowościowych.

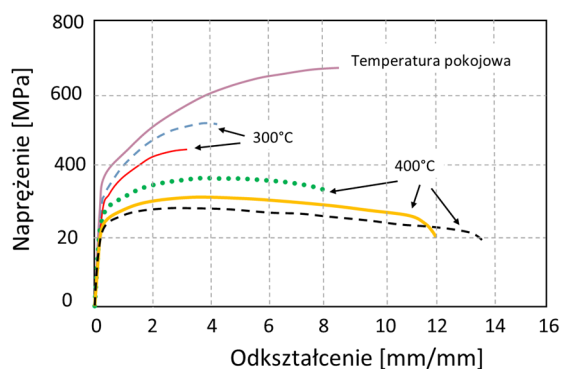
W przypadku obiektów badań o niewielkich rozmiarach, do których należą na przykład okładziny hamulcowe, w testach można wykorzystywać próbki w skali mini rys. 4. Jednak



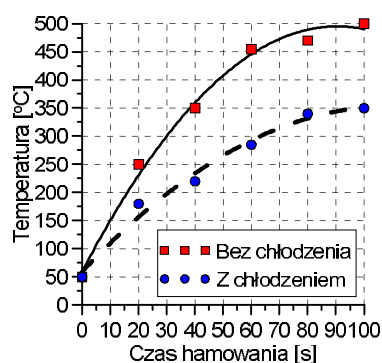
(a) (b)
 Rys. 4. Kształt i wymiary kompozytowego klocka hamulcowego (a); (b) rozmieszczenie próbek do badań zmęczeniowych (klepsydryczne) oraz rozciągania (płaskie) w klocku z (a) [13]
 Fig. 4. Shape and geometry of composite brake block (a); (b) distribution of specimens used for fatigue (hourglass) and tensile (flat) tests [13]

3. Wpływ temperatury na zachowanie i właściwości materiałów tarcz hamulcowych

Układy hamulcowe eksploatowane są w szerokim zakresie temperatury definiowanym przez rodzaj pojazdu. W przypadku typowych samochodów graniczna wartość temperatury pracy zespołu hamulcowego wynosi ok. 400 °C, natomiast samochodów sportowych jest bliska 900 °C, rys. 2. W obu przypadkach materiały układów hamulcowych są poddawane działaniu wysokich lub bardzo wysokich wartości temperatury oraz szoków cieplnych, które prowadzą w efekcie do obniżenia ich właściwości mechanicznych (rys. 5) i cech eksploatacyjnych, rys. 6.

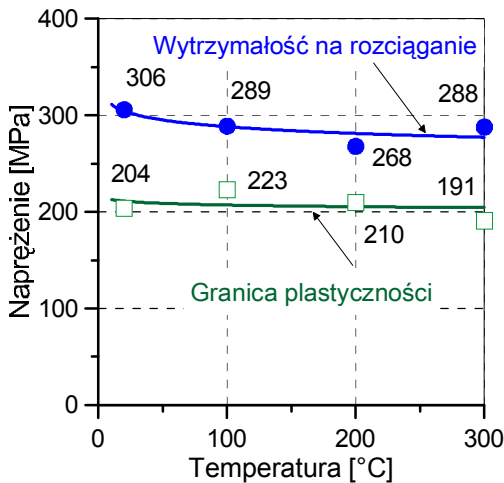


Rys. 5. Zmiany charakterystyki rozciągania żeliwa EN-GJS-500-7 w zależności od temperatury [14]
 Fig. 5. Variations of tensile characteristic of the EN-GJS-500-7 cast iron versus temperature [14]



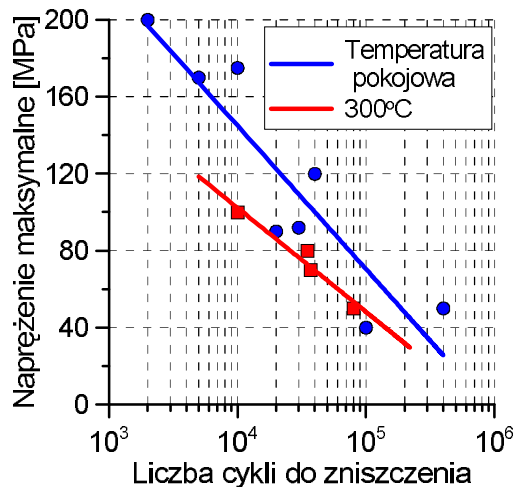
Rys. 6. Wpływ chłodzenia na temperaturę tarczy hamulcowej wykonanej ze stopu aluminium 6061 zbrojonego SiC [4]
 Fig. 6. Influence of cooling on temperature in brake disc made of the 6061 aluminium alloy reinforced by SiC [4]

Z tego właśnie względu, prowadzone są badania mechaniczne poświęcone wyznaczaniu zmian zależności naprężenie-odkształcenie w warunkach działania temperatury. Badaniem tego rodzaju można wyznaczać zmiany charakterystyki materiałowej oraz wartości istotnych z inżynierskiego punktu widzenia parametrów mechanicznych jak na przykład: granica plastyczności, wytrzymałość doraźna oraz wydłużenie rys. 5, 7. W ten sposób można wytypować żeliwo mniej (rys. 5) lub bardziej odporne (rys. 7) na działanie temperatury.



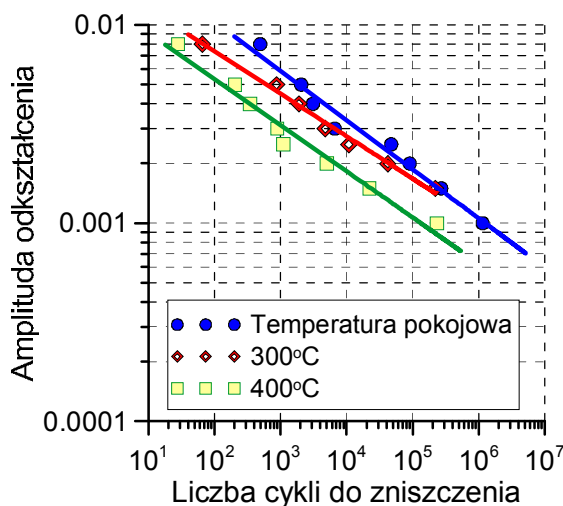
Rys. 7. Wpływ temperatury na granicę plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie żeliwa szarego [3]

Fig. 7. Influence of temperature on yield point and ultimate tensile strength of grey cast iron [3]



Rys. 8. Zmiany linii ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej na rozciąganie żeliwa GC25 wskutek działania temperatury [6]

Fig. 8. Variations of tensile fatigue limit curve of the GC25 resulted by temperature [6]



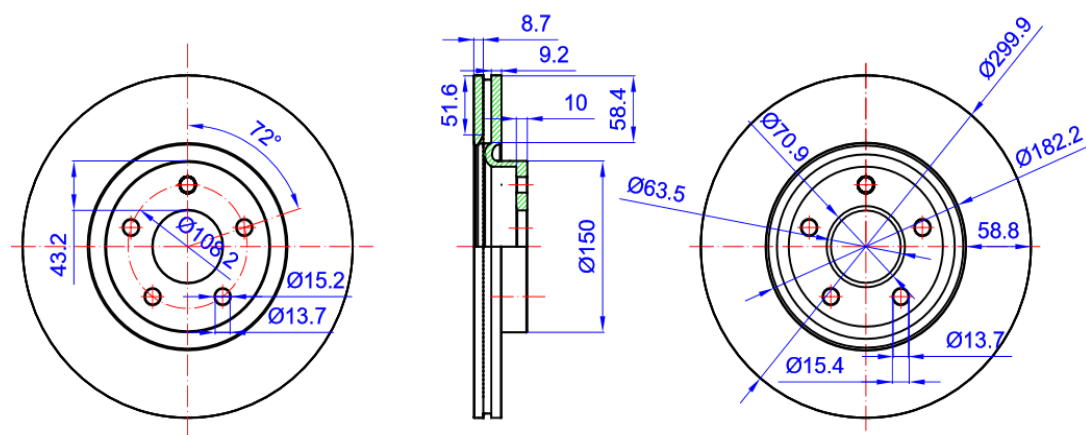
Rys. 9. Linia ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej żeliwa sferoidalnego the EN-GJS-500-7 stosowanego w transporcie kolejowym [14]

Fig. 9. Limited fatigue line of the EN-GJS-500-7 nodular cast iron used in railway transport [14]

Wpływ temperatury na zachowanie żeliwa badany jest również w próbach zmęczeniowych rys. 8, 9. Realizowane są dwa typy testów różniące się rodzajem sterowania, tj. przy użyciu sygnału naprężenia (rys. 8) lub odkształcenia rys. 9. Rezultatem tych prób jest linia ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej. Porównanie jej przebiegu w temperaturze pokojowej i 300 °C wskazuje na 10-krotną redukcję liczby cykli do zniszczenia. Ponadto, na podstawie tej zależności można wyznaczyć liczbę cykli do zniszczenia, dla danego poziomu naprężenia i temperatury, co umożliwia przewidywanie czasu bezpiecznej eksploatacji podzespołu.

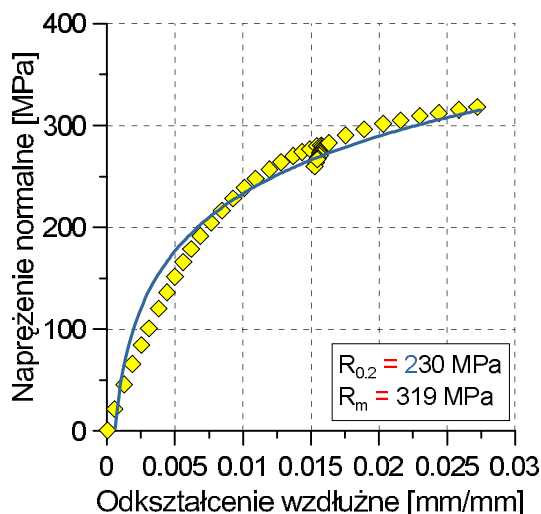
4. Empiryczna ocena wpływu temperatury w badaniach żeliwa szarego

W ramach pracy przeprowadzono również badania mechaniczne dotyczące oceny wpływu temperatury w zakresie 20 °C od 700 °C na parametry mechaniczne żeliwa tarczy hamulcowej wentylowanej, rys. 10. Tego rodzaju tarczę wytypowano ze względu na jej powszechne zastosowanie w układach hamulcowych pojazdów samochodowych. Z punktu widzenia realizacji programu badań tarcza hamulcowa wentylowana ma zaletę w postaci możliwości pozyskania próbek z obu jej połówek.

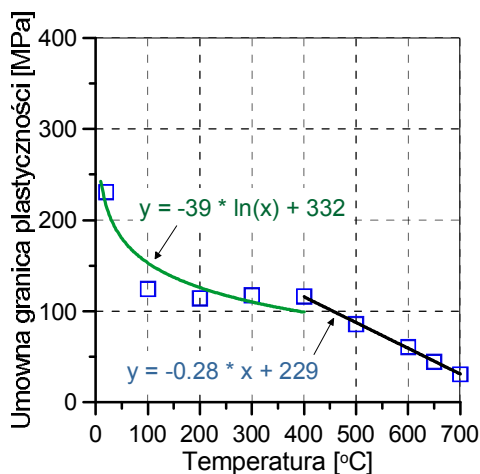


Rys. 10. Kształt i wymiary tarczy hamulcowej wykorzystanej w badaniach mechanicznych
 Fig. 10. Shape and dimensions of the brake disc selected for mechanical testing

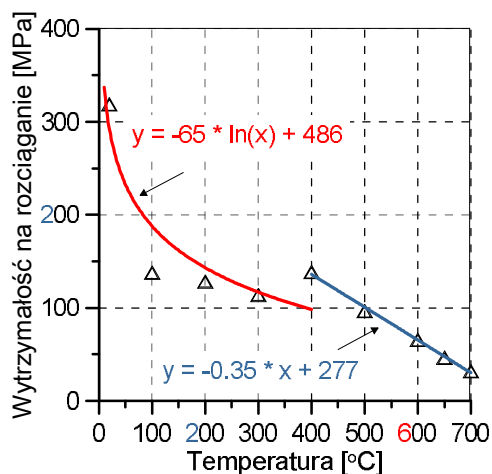
Krzywa rozciągania żeliwa, z którego była wykonana tarcza hamulcowa, reprezentuje zachowanie typowego materiału wykazującego cechy sprężyste i sprężysto-plastyczne, ze wzmocnieniem rys. 11. Wyznaczone na jej podstawie parametry: granica plastyczności oraz wytrzymałość na rozciąganie potraktowano jako punkty odniesienia pozwalające ustalić wpływ temperatury na ich wartości w badaniach rozciągania w podwyższonej temperaturze, rys. 12.



Rys. 11. Charakterystyka rozciągania typowego żeliwa szarego stosowanego na tarczach hamulcowych
 Fig. 11. Tensile characteristic of grey cast iron used for brake disc



(a)



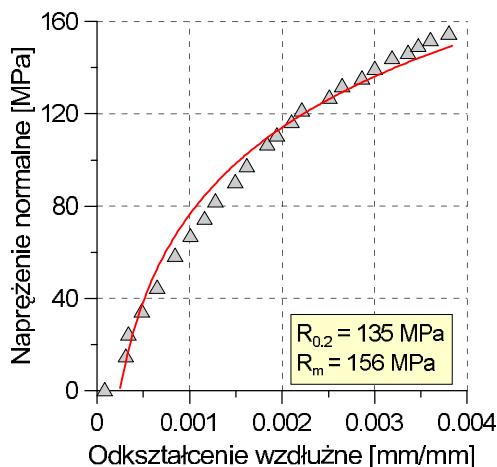
(b)

Rys. 12. Zmiana wybranych parametrów mechanicznych żeliwa szarego o charakterystyce z rys. 11 w funkcji temperatury: (a) granica plastyczności, (b) wytrzymałość na rozciąganie

Fig. 12. Variations of selected mechanical properties of grey cast iron from Fig. 11 as temperature function: (a) yield point, (b) ultimate tensile strength

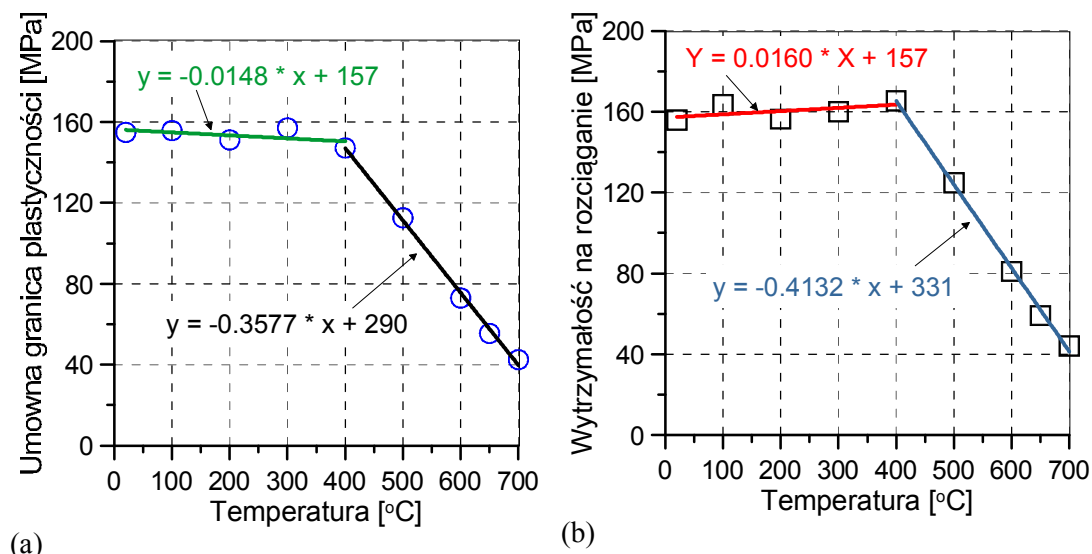
Badania przeprowadzono dla dziewięciu poziomów temperatury: 20 °C, 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C, 650 °C oraz 700 °C. Przy każdym z nich prowadzono próbę rozciągania do zerwania rejestrując charakterystykę oraz wyznaczając na jej podstawie poszukiwane wartości parametrów mechanicznych. Ich zmiany zdefiniowały dwa zasadnicze obszary wartości. Pierwszy dla temperatury 400 °C, drugi natomiast dla 700 °C. Zmiany wartości granicy plastyczności w zakresie temperatury do 400 °C były wyraźne w zestawieniu z wynikiem dla materiału badanego w temperaturze pokojowej, rys. 12a. Jednak różnice w wartościach granicy plastyczności dla temperatur 100 °C, 200 °C, 300 °C i 400 °C były stosunkowo niewielkie. Dalszy wzrost temperatury powodował liniowy spadek tego parametru. Podobny efekt można zaobserwować dla

zmian wytrzymałości na rozciąganie, przy czym różnica w wartościach tego parametru w temperaturze pokojowej i podwyższonej była jednak większa, rys. 12b.



Rys. 13. Charakterystyka rozciągania typowego żeliwa szarego stosowanego na bębny hamulcowe
 Fig. 13. Tensile characteristic of grey cast iron used in brake drums

Materiał bębna hamulcowego miał charakterystykę rozciągania podobną w kształcie do krzywej rozciągania materiału tarczy hamulcowej, rys. 13. Granica plastyczności ulegała niewielkim zmianom ze wzrostem temperatury do 400 °C, rys. 14a. W przypadku wytrzymałości na rozciąganie stabilność wartości tego parametru uzyskano w zakresie temperatury od 20 °C do 400 °C rys. 14b.



Rys. 14. Zmiana wybranych parametrów mechanicznych żeliwa szarego o charakterystyce z rys. 13 w funkcji temperatury: (a) granica plastyczności, (b) wytrzymałość na rozciąganie
 Fig. 14. Variations of selected mechanical parameters of grey cast iron represented by characteristic in Fig. 13 versus temperature: (a) yield point, (b) ultimate tensile strength

5. Podsumowanie

W pracy omówiono zmiany parametrów mechanicznych wybranych materiałów stosowanych w układach hamulcowych.

Wyniki uzyskane dla materiałów tarczy hamulcowej i bębna hamulcowego pokazały, że graniczną temperaturą, w której mogą być one stosowane jest 400 °C. Powyżej tej temperatury podstawowe parametry mechaniczne ulegają istotnemu obniżaniu.

W zakresie temperatury od 0 °C do 400 °C wartości parametrów mechanicznych materiału tarczy hamulcowej ulegały obniżeniu. Natomiast w przypadku materiału bębna hamulcowego zmiany granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie były stosunkowo niewielkie.

LITERATURA:

- [1] Blau P.J., Jolly B.C., Qu J., Peter W.H., Blue C.A., (2007). Tribological investigation of titanium-based materials for brakes, *Wear* 263, p. 1202-1211.
- [2] Cueva G., Sinatora A., Guesser W.L., Tschiptschin A.P., (2003). Wear resistance of cast irons used in brake disc, *Wear* 255, p. 1256-1260.
- [3] Jae-Hoon K., Chan-Woo L., (2006). A study on the characteristic change of mechanical properties of cast iron for the braking disc due to the change of temperature. *KSME, Annual Spring Conference*, p. 1228-1233.
- [4] Jiang L., Jang L.-I., Yu L., Su N., Ding Y.-D., (2012). Thermal analysis for brake disks of SiC/6061 Al alloy co-continuous composite for CRH3 during emergency braking considering airflow cooling, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 22, p. 2783-2791.
- [5] Katalog Brembo 1997.
- [6] Kim D.J., Seok C.S., Koo J.M., We W.T., Goo B.C., Won J.I., (2010). Fatigue life assessment for brake disc of railway vehicle, *Fatigue Fract. Eng. Mater Struct.* 33, p. 37-42.
- [7] Maleque M.A., Dyuti S., Rahman M.M., Material Selection Method in Design of Automotive Brake Disc, *Proceedings of the World Congress on Engineering 2010 Vol. III WCE 2010, June 30 - July 2, 2010, London, U.K.*
- [8] Maluf O., M. Angeloni, M., Milan M.T., Spinelli D., Filho W.W.B., (2004). Development of materials for automotive disc brakes, *Minerva*, 4(2): p. 149-158.
- [9] m-power.com
- [10] Peter Martin et al. Braking systems, *Engineering Studies Preliminary Course, Stage 6ES/S6 – Prelim 41082.*
- [11] Rudnik D., Sobczak J., *Tłoki kompozytowe do silników spalinowych*, Instytut Transportu Samochodowego, Warszawa, 2001, 120 stron.
- [12] Sobczak J., *Kompozyty metalowe*, Instytut Odlewnictwa, Instytut Transportu Samochodowego, Kraków-Warszawa, 2001, 315 stron.
- [13] Szymczak T., Kowalewski Z.L., *Możliwości identyfikacji właściwości mechanicznych materiałów konstrukcyjnych na podstawie badań realizowanych na próbkach niestandardowych*, *Transport Samochodowy*, 4, 2008, s. 68-84.
- [14] Šamec B., Potrč I., Šraml M., (2011). Low cycle fatigue of nodular cast iron used for railway brake discs, *Engineering Failure Analysis*, 18, p. 1424-1434.
- [15] Wojciechowski A., Sobczak J., *Kompozytowe tarcze hamulcowe pojazdów drogowych*, Instytut Transportu Samochodowego, Warszawa, 2001, 162 strony.
- [16] ebcbrakes.com.
- [17] www.sglgroup.com.