

Żeliwo z grafitem wermikularnym jako tworzywo przyszłościowe

Cast iron with vermicular graphite as a prospective material

Andrzej Pytel¹, Edward Guzik²

¹ Instytut Odlewnictwa, Zakład Stopów Żelaza, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków

² AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Odlewnictwa, ul. Reymonta 23, 30-059 Kraków

¹ Foundry Research Institute, Department of Ferrous Alloys, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Poland

² AGH University of Science and Technology, Faculty of Foundry Engineering, ul. Reymonta 23, 30-059 Kraków, Poland

E-mail: andrzej.pytel@iod.krakow.pl

Received: 28.04.2016. Accepted in revised form: 31.12.2016.

© 2016 Instytut Odlewnictwa. All rights reserved.

DOI: 10.7356/iod.2016.20

Streszczenie

W pracy przedstawiono ogólne dane na temat nowoczesnego i rozwijanego w kraju żeliwa z grafitem wermikularnym, które z powodzeniem nadaje się na odlewy elementów maszyn i urządzeń, szczególnie pracujących w warunkach zmęczenia cieplnego.

Żeliwo to, w porównaniu do żeliwa szarego z grafitem płatkowym, ma lepsze wybrane właściwości mechaniczne oraz zbliżone właściwości odlewnicze i użytkowe, a niektóre z nich nawet korzystniejsze od żeliwa z grafitem kulkowym, dlatego może być zamiennie stosowane do produkcji wielu elementów stosowanych w różnych gałęziach przemysłu. Przedstawiono zarys wybranych własnych badań tego żeliwa wysokojakościowego. Zaprezentowane w pracy zagadnienia, w tym właściwości materiału konstrukcyjnego, jakim jest żeliwo z grafitem wermikularnym, i przykłady jego zastosowania powinny przyczynić się do zainteresowania nim w większym stopniu odlewników i konstruktorów, a zatem do szerszego wykorzystania tego tworzywa na części maszyn i urządzeń.

Słowa kluczowe: żeliwo z grafitem wermikularnym, struktura, właściwości mechaniczne, zmęczenie cieplne żeliwa

Abstract

The study presents the general data on modern cast iron with vermicular graphite, developed in Poland, which can be successfully used for casts of machine and device elements, especially those working under the conditions of thermal fatigue.

The mentioned cast iron has better mechanical properties, and its casting properties are close to those of grey cast iron with flake graphite, some of which being more advantageous than those of nodular graphite. And so, it can be alternatively applied for casts in the production of many elements used in various branches of industry. An outline of the authors' selected own research of this high quality cast iron is presented. The issues discussed in the study, including the properties of cast iron with vermicular graphite as a construction material, as well as examples of its use, should stimulate interest in this material on the side of foundrymen and constructors, and thus, also, its wider application for machine and device components.

Keywords: cast iron with vermicular graphite, structure, mechanical properties, cast iron thermal fatigue

1. Wprowadzenie

Ciągły rozwój przemysłu, szczególnie motoryzacyjnego, maszynowego, hutniczego i pokrewnych branż, zmusza technologów i konstruktorów do opracowywania,

1. Introduction

The constant development of industry, especially the automotive, engineering and metallurgical industry as well as the related branches, is forcing the technologists and constructors to develop, produce and apply

wytwarzania oraz stosowania coraz lepszych tworzyw na różne elementy maszyn i urządzeń. Pozwalają one przede wszystkim zwiększyć trwałość elementów konstrukcyjnych, obniżyć ich masę oraz koszty produkcji, jak też polepszyć walory eksploatacyjne gotowych wyrobów. Materiałem konstrukcyjnym znajdującym obecnie szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu i najczęściej używanym spośród stopów odlewniczych jest żeliwo, które jest wytwarzane niezmiennie od wielu lat. Wraz z rozwojem techniki wzrosło zapotrzebowanie na żeliwo o coraz lepszych właściwościach. Powstało wiele odmian żeliwa, na przykład żeliwo stopowe, żeliwo ciągliwe, żeliwo sferoidalne, żeliwo hartowane z przemianą izotermiczną (ADI) [1–8], a także żeliwo z grafitem wermikularnym [9–13].

Żeliwo z grafitem wermikularnym odgrywa w tej grupie tworzyw istotną rolę, gdyż ma wiele niezaprzeczalnych zalet w porównaniu z żelivem modyfikowanym z grafitem płatkowym i żelivem sferoidalnym, a właściwości jego lokują się w zakresie dobrych właściwości mechanicznych i użytkowych między tymi dwoma rodzajami żeliwa. Celem pracy jest zaprezentowanie tych właściwości na podstawie analizy literatury i badań własnych.

2. Ogólna charakterystyka żeliwa z grafitem wermikularnym

Z historycznego punktu widzenia żeliwo z grafitem wermikularnym (z ang. *vermicular*) lub inaczej w ujęciu amerykańskim *compacted* – „zwarty”, znane jest od 1948 roku, w którym po raz pierwszy zostało wytworzone [14, 15]. Stosowanie na większą skalę tego żeliwa na skomplikowane części, takie jak bloki i głowice cylindrów, ze względu na wąski zakres ustabilizowanej produkcji odlewniczej, nie było możliwe do momentu, kiedy dostępne stały się zaawansowane technologie kontroli procesu oraz zastosowano nowoczesne elektroniczne systemy pomiarowe i systemy komputerowe [14]. W 2006 roku opublikowano nową normę ISO 16112 dla żeliwa z grafitem wermikularnym, w której zastosowano połączone nazewnictwo: „Żeliwo z grafitem zwartym (wermikularnym)” [16]. Wyróżniono pięć odmian tego żeliwa w oparciu o minimalną wartość wytrzymałości na rozciąganie próbek wykonanych z wlewków osobno odlewanych, przy założonych wartościach wydłużenia A. Norma rozróżnia następujące gatunki żeliwa: ISO 16112/JV/300 (ferrytyczne); ISO 16112/JV/350; ISO 16112/JV/400; ISO 16112/JV/450 (perlityczne); ISO 16112/JV/500 (stopowe). Dopiero w 2012 roku zaproponowano dla tego rodzaju wysokojakościowego żeliwa europejską normę PN-EN 16079 pt. „Odlewnictwo – Żeliwo z grafitem zwartym (wermikularnym)” [17].

Żeliwo to jest wykorzystywane w coraz większym stopniu, jako materiał konstrukcyjny wielu różnych

increasingly better materials for various elements of machines and devices. These materials mostly make it possible to increase the durability of construction elements, lower their mass and production costs, as well as improve the performance values of ready products. A construction material which is currently widely used in many industrial branches and the one which is the most frequently applied of all the casting alloys is cast iron, which has been consistently produced for many years now. Together with the development of technology, the demand for cast iron of increasingly better properties has escalated. Many types of cast iron have been created, such as alloy cast iron, malleable cast iron, spheroidal cast iron, quenched cast iron with isometric transition, (ADI) [1–8], as well as cast iron with vermicular graphite [9–13].

In this group of materials, cast iron with vermicular graphite plays an important role, as it has many undeniable advantages in comparison to flake or spheroidal cast iron, and its properties are within the scope of good mechanical and functional properties between the other two mentioned types. The aim of the study is to present these properties based on literature analysis and the authors' own research.

2. General characteristics of cast iron with vermicular graphite

From the historical point of view, cast iron with vermicular graphite or, in the American nomenclature, compacted graphite, has been known since 1948, when it was produced for the first time [14, 15]. A larger scale application of this cast iron for complicated elements, such as cylinder blocks and heads, due to a narrow range of stabilized casting production, was not possible until advanced process control technologies became available and modern electronic measurement and computer systems started to be applied [14]. In 2006, a new standard for cast iron with vermicular graphite was issued, ISO 16112, in which a combined nomenclature was used: “cast iron with compacted (vermicular) graphite” [16]. Five types of this cast iron were distinguished based on the minimal value of tensile strength of samples made from separately cast ingots, with assumed values of elongation A. The standard differentiates between the following cast iron types: ISO 16112/JV/300 (ferritic); ISO 16112/JV/350; ISO 16112/JV/400; ISO 16112/JV/450 (perlite); ISO 16112/JV/500 (alloy). Only in 2012, a European standard was proposed for this high-quality cast iron, PN-EN 16079, entitled “Foundry engineering – cast iron with compact (vermicular) graphite” [17].

This cast iron is more and more extensively used as a construction material for many various elements, especially in the automotive, agricultural machinery, railway, as well as the metallurgical and glass-making industry etc.

elementów, szczególnie w przemyśle motoryzacyjnym, maszyn rolniczych, kolejowym, szklarskim itp.

Żeliwo z grafitem wermikularnym w porównaniu do wysokojakościowego żeliwa z grafitem płatkowym wykazuje między innymi [18]:

- wyższą wytrzymałość na rozciąganie,
- lepszą plastyczność i wyższą odporność na obciążenia dynamiczne,
- mniejszą wrażliwość na grubość ścianki (zachowanie odpowiednich właściwości wytrzymałościowych w grubościennych odlewach),
- mniejszą skłonność do utleniania i pęcznienia w podwyższonej temperaturze,
- wyższą odporność na zmęczenie cieplne.

W porównaniu do ferrytycznego żeliwa z grafitem kulkowym żeliwo z grafitem wermikularnym ma następujące zalety:

- niższy moduł sprężystości,
- niższy współczynnik rozszerzalności cieplnej,
- wyższe przewodnictwo cieplne,
- wyższą odporność na zmęczenie cieplne (podczas bardzo szybkich zmian cykli temperatury nagrzewanie-chłodzenie),
- większą zdolność do tłumienia drgań,
- lepszą lejność i mniejszą skłonność do tworzenia jam skurczowych,
- mniejszą skłonność odlewów do odkształceń w podwyższonej temperaturze i lepszą stabilność wymiarową,
- mniejszą skłonność do zabielenia.

Nie bez znaczenia przy wyborze tego żeliwa jest mniejsze zanieczyszczenie środowiska podczas jego produkcji (mniejsze zapylenie i masa żużla w procesie wermikularyzacji).

3. Właściwości żeliwa z grafitem wermikularnym

Grafit wermikularny (grafit o kształcie „robaczkowym”) oznaczono w normie PN-H-04661:1975 pt. „Żeliwo szare, sferoidalne i ciągliwe. Badania metalograficzne” [19]

Cast iron with vermicular graphite, in comparison to high-quality cast iron with flake graphite, exhibits the following properties [18]:

- a higher tensile strength,
- a better plasticity and a higher resistance to dynamic loads,
- a lower sensitivity to wall thickness (maintenance of proper strength properties in thick-walled casts),
- a lower tendency for oxidation and growth at elevated temperatures,
- a higher thermal fatigue resistance.

As compared with ferritic cast iron with nodular graphite, cast iron with vermicular graphite has the following advantages:

- a lower modulus of elasticity,
- a lower coefficient of thermal expansion,
- a higher thermal conductivity,
- a higher thermal fatigue resistance (during very rapid changes of heating-cooling temperature cycles),
- a better vibration damping ability,
- a better castability and a lower tendency for contraction cavity formation,
- a lower cast tendency for deformation at elevated temperatures and a better dimensional stability,
- a lower tendency for hard spots.

In the selection of this cast iron, it is also important to consider lower environmental pollution during its production (lower dustiness and slag mass during vermicularization).

3. Properties of cast iron with vermicular graphite

In the standard from 1975, PN-H-04661:1975 entitled: “Grey, spheroidal and malleable cast iron. Metallurgical studies” [19], vermicular graphite is denoted as quasi-flake graphite. The occurrence of graphite of such shape was initially observed in thick-walled casts made of spheroidal cast iron, with a lowered spheroidizer mass, or after a partial reduction of the spheroidization effects. At that time, precipitations of this graphite

z 1975 roku jako grafit krętkowy. Występowanie grafitu o takim kształcie stwierdzono początkowo w odlewach grubościennych odlanych z żeliwa sferoidalnego, z obniżoną masą sferoidyzatora, względnie po częściowym zaniku efektów zabiegu sferoidyzowania. Wydzielenia tego rodzaju grafitu w odlewie traktowano wówczas jako niepożądane. Praktyczne wykorzystanie żeliwa z tym grafitem datuje się od 1955 roku. Nieco później (1966 r.) Schelleng przyjął dla tego rodzaju grafitu nazwę „grafit wermikularny”. Zbadał on też wpływ różnych pierwiastków na postać grafitu w żeliwie oraz dokonał rozróżnienia pomiędzy grafitem kulkowym, płatkowym i wermikularnym [20]. W tym też czasie termin ten został zaakceptowany w literaturze naukowo-technicznej. Aktualnie system oznaczania żeliwa uwzględnia Polska Norma PN-EN 16079:2012 [17], natomiast określenie cech wydzielań grafitu, w tym wzorce kształtu grafitu, norma PN-EN ISO 945:2009 [21] (wzorec kształtu wydzielań grafitu, w normie jako typ III). Są też instrukcje wydane w poszczególnych krajach, które dokładniej definiują i precyzują żeliwo z grafitem wermikularnym, np. w Niemczech VDG – Merkblatt W50 [22]. W USA znana jest specyfikacja ASTM A842-85 [23]. W tabeli 1 przedstawiono gatunki żeliwa wermikularnego i wymagane właściwości mechaniczne na podstawie najnowszej Polskiej Normy PN-EN 16079:2012 [17].

type were treated as undesirable in the cast. A practical use of cast iron with this graphite dates from 1955. Slightly later, in 1966, Schelleng assumed the name of “vermicular graphite” for this type of graphite. He also examined the effect of different elements on the graphite form in cast iron and differentiated between nodular, flake and vermicular cast iron [20]. That was the time when this term became accepted in the scientific and technological literature. At present, the cast iron denotation system is included in the Polish Standard PN-EN 16079:2012 [17], whereas a description of graphite precipitation characteristics, also contour masters, are included in the standard PN-EN ISO 945:2009 [21] (graphite precipitation contour master in the standard – as type III). There are also instructions published in particular countries, which more precisely define and specify cast iron with vermicular graphite, e.g. in Germany, VDG – Merkblatt W50 [22]. In the USA, the specification ASTM A842-85 [23] is recognized. Table 1 shows the types of vermicular cast iron and the required mechanical properties based on the recent Polish Standard PN-EN 16079:2012 [17].

Tabela 1. Gatunki i właściwości mechaniczne żeliwa z grafitem wermikularnym [17]

Table 1. Types and mechanical properties of cast iron with vermicular graphite [17]

| Materiał/Material | | Grubość ścianki / Wall thickness | Umowna granica sprężystości / Yield strength | Wytrzymałość / Strength | Wydłużenie / Elongation |
|-------------------|--------------|----------------------------------|--|-------------------------|-------------------------|
| Symbol/Symbol | Numer/Number | t, mm | $R_{p0,2}$, MPa min. | R_m , MPa min. | A, % min. |
| EN-GJV-300 | 5.2100 | t ≤ 30 | 210 | 300 | 2,0 |
| | | 30 < t ≤ 60 | 195 | 275 | 2,0 |
| | | 60 < t ≤ 200 | 175 | 250 | 2,0 |
| EN-GJV-350 | 5.2200 | t ≤ 30 | 245 | 350 | 1,5 |
| | | 30 < t ≤ 60 | 230 | 325 | 1,5 |
| | | 60 < t ≤ 200 | 210 | 300 | 1,5 |
| EN-GJV-400 | 5.2201 | t ≤ 30 | 280 | 400 | 1,0 |
| | | 30 < t ≤ 60 | 260 | 375 | 1,0 |
| | | 60 < t ≤ 200 | 230 | 325 | 1,0 |
| EN-GJV-450 | 5.2300 | t ≤ 30 | 315 | 450 | 1,0 |
| | | 30 < t ≤ 60 | 280 | 400 | 1,0 |
| | | 60 < t ≤ 200 | 260 | 375 | 1,0 |
| EN-GJV-500 | 5.2301 | t ≤ 30 | 350 | 500 | 0,5 |
| | | 30 < t ≤ 60 | 315 | 450 | 0,5 |
| | | 60 < t ≤ 200 | 280 | 400 | 0,5 |

4. Wybrane badania, wyniki badań i ich analiza

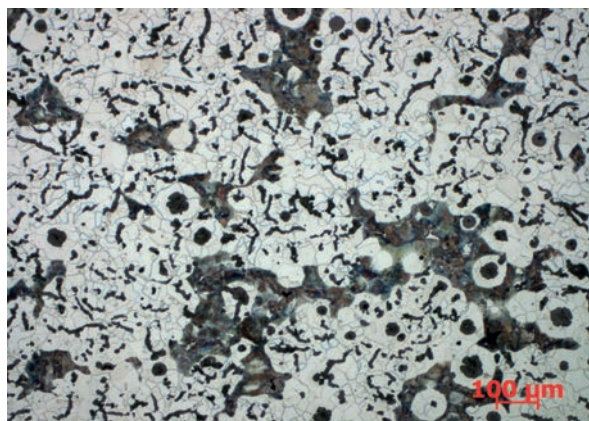
Podstawowy skład chemiczny żeliwa wermikularnego mieści się przeważnie [% wag.] w następujących granicach: C = 3,2–3,8; Si = 2,0–3,2; Mn = 0,1–0,7; P do 0,06; S do 0,02. W zależności od sposobu wytwarzania żeliwo zawiera odpowiednie zawartości takich pierwiastków, jak: Mg, Ce, Ca, Al, Ti, Y, La. W celu uzyskania wymaganych właściwości użytkowych stosuje się pierwiastki stopowe, jak np.: Cu, Sn, Mo, V, Cr i Sn. Struktura osnowy metalowej może być zróżnicowana, np. ferrytyczna, ferrytyczno-perlityczna, perlityczna, ale także ausferrytyczna (żeliwo AVCI z grafitem wermikularnym). Na [rysunkach 1–3](#) przedstawiono struktury żeliwa z grafitem wermikularnym o osnowie ferrytyczno-perlitycznej, perlitycznej i ausferrytycznej, natomiast na [rysunku 4](#) strukturę żeliwa z grafitem wermikularnym o osnowie perlitycznej wykonaną na skaningu.

Właściwości mechaniczne, fizyczne i technologiczne żeliwa z grafitem wermikularnym sytuują się pomiędzy właściwościami żeliwa z grafitem kulkowym i płatkowym. Ważniejsze wskaźniki mechaniczne, fizyczne i odlewnicze żeliwa z różnymi rodzajami grafitu i osnowy metalowej zebrano w [tabeli 2](#) [24,25].

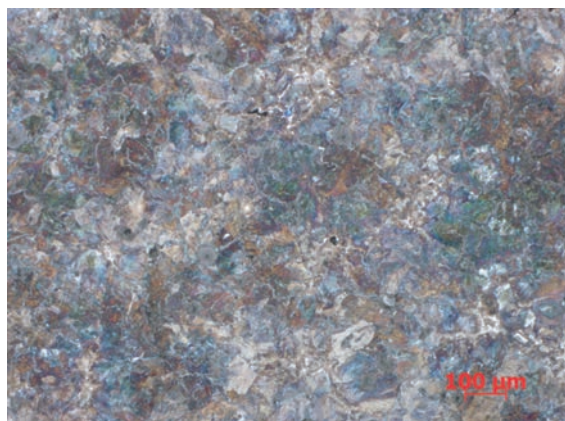
4. Selected studies, test results and analysis

The basic chemical composition of vermicular cast iron is usually within the following scope [wt. %]: C = 3.2–3.8; Si = 2.0–3.2; Mn = 0.1–0.7; P up to 0.06; S up to 0.02. Depending on the production manner, cast iron contains appropriate amounts of such elements as: Mg, Ce, Ca, Al, Ti, Y and La. In order to obtain the required functional properties, alloy elements are used, such as: Cu, Sn, Mo, V, Cr and Sn. The metal matrix structure can be diversified, e.g. ferritic, ferritic-perlite, perlite or ausferritic (AVCI cast iron with vermicular graphite). [Figures 1–3](#) show the structures of cast iron with vermicular graphite and a ferritic-perlitic, perlitic and ausferritic matrix, whereas [Figure 4](#) presents the structure of cast iron with vermicular graphite and a perlitic matrix, obtained by way of scanning.

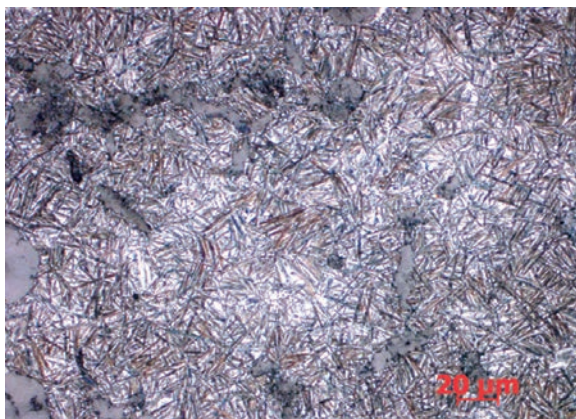
The mechanical, physical, and technological properties of cast iron with vermicular graphite are located between the properties of cast iron with nodular graphite and flake graphite. The major mechanical, physical and casting indicators of cast iron with different types of graphite and metal matrix are compiled in [Table 2](#) [24,25].



Rys. 1. Żeliwo z grafitem wermikularnym o strukturze ferrytyczno-perlitycznej, trawione nitałem; gatunek EN-GJV-300
Fig. 1. Cast iron with vermicular graphite and a ferritic-perlitic structure, etched in nital; type EN-GJV-300

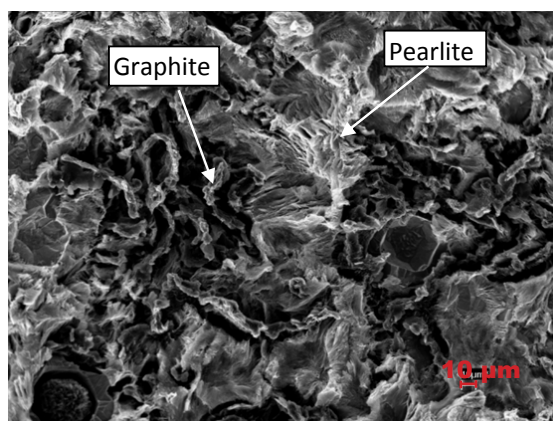


Rys. 2. Żeliwo z grafitem wermikularnym o strukturze perlitycznej, trawione nitałem; gatunek EN-GJV-450
Fig. 2. Cast iron with vermicular graphite and a perlitic structure, etched in nital; type EN-GJV-450



Rys. 3. Próbkę nr 3, żeliwo z grafitem wermikularnym (AVCI); mikrostruktura żeliwa po obróbce cieplnej; trawione nital, mieszanina ausferrytu

Fig. 3. Sample no. 3, cast iron with vermicular graphite (AVCI); cast iron microstructure after thermal treatment; etched in nital, ausferritic mixture



Rys. 4. Żeliwo z grafitem wermikularnym o strukturze perlitycznej; zdjęcie skaningowe; (SEM)

Fig. 4. Cast iron with vermicular graphite and a perlitic structure; scan image; (SEM)

Tabela 2. Charakterystyczne wskaźniki mechaniczne, fizyczne i odlewnicze żeliwa z grafitem płatkowym, wermikularnym i kulkowym [24,25]

Table 2. Characteristic mechanical, physical and casting indicators of cast iron with flake, vermicular and nodular graphite [24,25]

| Wybrane wskaźniki / Selected indicators | Jednostka / Unit | Żeliwo szare / Grey cast iron | Żeliwo wermikularne ferrytyczne / Ferritic vermicular cast iron | Żeliwo wermikularne perlityczne / Perlitic vermicular cast iron | Żeliwo sferoidalne / Spheroidal cast iron |
|--|------------------|-------------------------------|---|---|---|
| Wytrzymałość na rozciąganie, R_m / Tensile strength, R_m | MPa | 100–400 | min. 300 | 400–500 | 350–900 |
| Umowna granica sprężystości, $R_{p0.2}$ / Yield strength, $R_{p0.2}$ | MPa | – | min. 240 | 340–440 | 250–600 |
| Wydłużenie, A_5 / Elongation, A_5 | % | max. 1,5 | min. 2 | 1 | 3–30 |
| Wytrzymałość na zginanie / Bending strength | MPa | 300–600 | 600 | 700 | 800–1200 |

| Wybrane wskaźniki / Selected indicators | Jednostka / Unit | Żeliwo szare / Grey cast iron | Żeliwo wermikularne ferrytyczne / Ferritic vermicular cast iron | Żeliwo wermikularne perlityczne / Perlitic vermicular cast iron | Żeliwo sferoidalne / Spheroidal cast iron |
|--|--------------------------|-------------------------------|---|---|---|
| Wytrzymałość na ścislenie / Compression strength | MPa | 500–1400 | min. 500 | min. 600 | 600–1200 |
| Twardość / Hardness | HB | 140–300 | 130–190 | 200–280 | 120–350 |
| Udarność (próbka bez karbu) / Impact resistance (sample without a notch) | J | 6–19 | max. 10 | – | 9–196 |
| Udarność (próbka z karbem) / Impact resistance (sample with a notch) | J | – | max. 7 | – | max. 21 |
| Moduł sprężystości, E_0 / Modulus of elasticity, E_0 | GPa | 75–155 | 130–160 | 130–170 | 165–185 |
| Gęstość / Density | g/cm ³ | 7,0–7,5 | 7,0 | 7,1 | 7,1–7,3 |
| Przewodność cieplna λ (20–200°) / Thermal conductivity λ (20–200°) | W/m·K | 46–59 | 38–46 | 34 | 25–38 |
| Współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej, α (20–200°C) / Coefficient of linear thermal expansion, α (20–200°C) | $\mu\text{m/mK}$ | 11–12 | 11 | 13 | 11,3–13 |
| Oporność elektryczna (20°C) / Electrical resistance (20°C) | $\mu\Omega\cdot\text{m}$ | 0,5–1,0 | 0,7 | 0,8 | 0,5–0,7 |
| Skurcz liniowy / Linear contraction | % | 1,0–1,2 | 0,9–1,1 | 0,9–1,1 | 0,7–1,1 |
| Skurcz objętościowy / Volume contraction | % | 1,0–3,0 | 1,0–5,0 | 1–5 | 7–10 |

4.1. Zakres badań

Praca obejmuje wybrane wyniki badań wpływu mikrododatków, takich jak: Mo, Cu, V, Sn i Sb (suma zawartości pierwiastków max. 1,7% wag.) na zmęczenie cieplne żeliwa z grafitem wermikularnym w temperaturze 600°C. Wykonano 27 wtopów żeliwa z różnymi dodatkami pierwiastków stopowych.

Przyjęto następującą charakterystykę badań (wg Planu Hartleya PS/DS):

- ramię gwiazdne $\alpha = 1$,
- liczba układów planu $n = 27$,
- liczba różnych wartości każdej wielkości wejściowej $n_x = 3$.

4.1. Scope of research

The paper includes selected results of tests on the effect of microadditions, such as: Mo, Cu, V, Sn and Sb (total element content max. 1.7 wt. %) on the thermal fatigue of cast iron with vermicular graphite at 600°C. 27 cast iron melts were made with different alloy element additions.

The following test characteristics were assumed (according to Hartley's Plan PS/DS):

- star point distance $\alpha = 1$,
- number of plan systems $n = 27$,
- number of different values of each input quantity $n_x = 3$.

Podstawowy skład chemiczny żeliwa był nadeutektyczny. Uzyskana zawartość pierwiastków stopowych w żeliwie [% wag.] w przeprowadzonych wytopach wynosiła: Cu = 0,32–0,83; Mo = 0,23–0,75; V = 0,09–0,37; Sn = 0,04–0,12; Sb = 0,010–0,071.

Wytopy żeliwa z dodatkami pierwiastków stopowych przeprowadzono w piecu indukcyjnym o pojemności 60 kg, stosując surowkę specjalną, złom stalowy i żelazomangan, aby skład chemiczny żeliwa wyjściowego odpowiadał żeliwu nadeutektycznemu (Sc w granicach 1,02–1,12). Pierwiastki stopowe dodawano po częściowym roztopieniu surowki i złomu stalowego. Proces wermikularyzacji żeliwa przeprowadzono w piecu w temperaturze 1440–1450°C zaprawą magnezową o składzie chemicznym [% wag.]: Si = 44–48; Mg = 5,6–6,0; Ca = 1,8–2,3; Al = max. 1,0; RE = 5,5–6,5, umieszczoną w specjalnie przygotowanym dzwonie wykonanym ze stalowej rury, a modyfikację przy użyciu modyfikatora o składzie chemicznym [% wag.]: Si = 73–78; Ca = 0,75–1,25; Al = 0,75–1,25; Ba = 0,75–1,25.

Materiał do badań stanowiły odlane w temperaturze 1350°C wlewki próbne Y2 (temperaturę mierzono termoelementem PtRh-Pt). Wykonano 27 próbek do badania zmęczenia cieplnego. Kształt próbki i wymiary podano w punkcie 4.2.

4.2. Odporność żeliwa z grafitem wermikularnym na zmęczenie cieplne

Złożoność zjawisk występujących w czasie eksploatacji maszyn i urządzeń w zmiennym polu temperatury nie pozwala na opracowanie uniwersalnej metody teoretycznego i doświadczalnego badania odporności żeliwa na zmęczenie cieplne, a więc i jego trwałości, jak i jednoznaczne zdefiniowanie tego procesu.

Na ogół przyjmuje się, że zmęczenie cieplne materiału jest procesem powstawania i rozwoju pęknięć w materiale oraz zmiany jego właściwości, wywołane działaniem wielokrotnych zmian temperatury, prowadzących w efekcie, po pewnej liczbie cykli, do dekohezji materiału. Można przyjąć, że mechanizm tego zniszczenia związany jest z kumulacją odkształceń plastycznych, wywołanych poszczególnymi cyklami zmian temperatury.

Z ważniejszych należy wymienić [27]:

- zjawisko pełzania i relaksacji naprężeń oraz zwiększenie objętości materiału na skutek kumulacji mikroszczelin,
- tworzenie się przerw i porów powstających w czasie zmęczenia cieplnego w całym obszarze materiału, w przeciwieństwie do zmęczenia mechanicznego, gdzie powstawanie szczelin i pęknięć jest zlokalizowane,
- oddziaływanie chemicznie czynnych ośrodków (zmęczenie cieplno-chemiczne),

The basic chemical composition of cast iron was hypereutectic. The obtained content of alloy elements in cast iron [wt. %] in the performed melts equaled: Cu = 0.32–0.83; Mo = 0.23–0.75; V = 0.09–0.37; Sn = 0.04–0.12; Sb = 0.010–0.071.

The cast irons melts with alloy element additions were made in an inductive furnace, with a capacity of 60 kg, by means of alloy pig iron, steel scrap and ferromanganese, so that the chemical composition of the output cast iron would correspond to that of hypereutectic cast iron (Sc in the range of 1.02–1.12). The alloy elements were added after a partial melting of the pig iron and steel scrap. The cast iron vermicularization process was performed in a furnace at 1440–1450°C by means of a manganese master alloy of chemical composition [wt. %]: Si = 44–48; Mg = 5.6–6.0; Ca = 1.8–2.3; Al = max. 1.0; RE = 5.5–6.5, placed in a specially prepared bell made of steel pipe, and the modification was made with the use of a modifier of the chemical composition [wt. %]: Si = 73–78; Ca = 0.75–1.25; Al = 0.75–1.25; Ba = 0.75–1.25.

The test materials were sample ingots Y2 cast at 1350°C (the temperature was measured with a thermocouple PtRh-Pt). 27 samples were made for the thermal fatigue test. The shapes and sizes of the samples are given in section 4.2.

4.2. Thermal fatigue strength of cast iron with vermicular graphite

The complexity of the phenomena occurring during the performance of machines and devices in a changeable temperature field does not allow an elaboration of a universal method of theoretical and experimental testing of the cast iron thermal fatigue resistance and so, also its durability, or of a clear definition of this process.

Generally, it is assumed that a material's thermal fatigue is the process of formation and development of cracks and a change of its properties caused by multiple changes of temperature, leading to material decohesion after a certain number of cycles. It can be assumed that this failure mechanism is connected with the accumulation of plastic deformations caused by the particular cycles of temperature changes.

The most important include [27]:

- the phenomenon of creeping and relaxation of stresses as well as increased material volume as a result of microcrack accumulation,
- the formation of gaps and pores occurring during thermal fatigue in the whole material volume, as opposed to mechanical fatigue, when cracks and gaps are formed locally,
- the chemical effect of active media (thermo-chemical fatigue),

- przemiany fazowe.

Na przebieg zmęczenia cieplnego żeliwa wpływa wiele czynników, wśród których można wymienić:

- czynniki charakteryzujące wymianę ciepła między materiałem a otoczeniem (współczynniki przejmowania ciepła, rozszerzalności liniowej, przewodzenia ciepła, ciepło właściwe, gęstość),
- geometryczne (wymiary, kształt, stan powierzchni, stosunek powierzchni do objętości elementu),
- skład chemiczny, struktura oraz właściwości fizyczne i mechaniczne materiału.

Eksploatacja odlewów żeliwnych w warunkach cyklicznych zmian temperatury powoduje tzw. zmęczenie cieplne materiału. W efekcie tego rodzaju zmęczenia w odlewach z żeliwa powstają rysy i pęknięcia, względnie deformacje, które ograniczają ich trwałość [27].

Przyczyny przedwczesnego uszkodzenia odlewów w czasie cyklicznych zmian temperatury mogą być następujące [27]:

- w różnych miejscach materiału różny gradient temperatury, wywołujący powstawanie zmiennego stanu przestrzennego naprężeń wewnętrznych w zależności od temperatury i czasu,
- zmiany struktury osnowy metalowej powodujące zmiany objętościowe,
- naprężenia te w określonych miejscach mogą się różnić pod względem wielkości, jak i kierunków działania,
- w efekcie ich działania w odlewach żeliwnych pojawiają się najczęściej na powierzchni rysy i pęknięcia, które rozwijają się w głąb ścianki w postaci sieci szczelin aż do zajęcia całego przekroju odlewu.

Należy zwrócić uwagę, że:

- przy nieodpowiednio dobranym gatunku materiału pęknięcia mogą powstać nawet po niewielkiej liczbie cyklicznych zmian temperatury,
- w odlewach z żeliwa charakteryzującego się dobrą ciągliwością (osnowa ferrytyczna) pod działaniem cyklicznych zmian temperatury pojawia się najczęściej nadmierna deformacja (paczenie),
- powyższe rodzaje uszkodzeń materiału występują tym intensywniej, im większe są różnice temperatury w poszczególnych częściach odlewu.

- the phase transformations.

The course of the cast iron thermal fatigue is affected by many factors, among which we can mention:

- the factors characterizing the heat exchange between the material and the environment (convective heat transfer coefficient, linear expansion coefficient, thermal conductivity coefficient, specific heat capacity, density),
- the geometry (dimensions, shape, state of surface, surface-volume ratio),
- the chemical composition, structure as well as physical and mechanical properties.

The operation of iron casts under the conditions of periodic temperature changes causes the so-called thermal fatigue of the material. The effect of this type of fatigue, in iron casts, are scratches and cracks, and possibly deformations, which limit their durability [27].

The causes of a premature damage to the casts during periodic temperature changes can be as follows [27]:

- different temperature gradients in different parts of the material, causing the formation of a changeable three-dimensional state of internal stress, depending on temperature and time,
- changes in the metal matrix structure causing changes in volume,
- these stresses may differ in particular areas in regard to their value and directions of operation,
- as a result of their operation in iron casts, scratches and cracks occur, usually on the surface, which develop towards the inside of the wall in the form of gaps, until they occupy the whole cross section of the cast.

It should be noted that:

- with an improperly selected material type, cracks may occur even after a small number of periodic temperature changes,
- in casts made of cast iron of a good castability (ferritic matrix), under the operation of periodic temperature changes, excessive deformation usually occurs (warping),
- the material damage of the types mentioned above is more intense when the temperature differences in the particular areas of the cast are larger.

Naprężenia cieplne zależą od wielu czynników, co ujmuje zależność (1) [9]:

$$\sigma_T = \frac{E\alpha\Delta T}{1-\mu} \cdot S, \quad (1)$$

gdzie:

E – moduł sprężystości, MPa,

α – liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej, K^{-1} ,

ΔT – różnica temperatury, K,

μ – współczynnik Poissona,

S – współczynnik kształtu.

Ze wzoru (1) wynika, że wielkość naprężeń cieplnych zależy nie tylko od właściwości mechanicznych i fizycznych żeliwa czy kształtu odlewu, ale również od parametrów określających jego warunki nagrzewania i chłodzenia. Bezpośrednie wykorzystanie tej zależności do obliczeń wielkości naprężeń cieplnych jest niemożliwe, ponieważ jak to wcześniej wykazano, tak właściwości mechaniczne, jak i fizyczne ulegają zmianie w zależności od temperatury, a także od liczby cykli i czasu ich trwania, zakresu zmiany temperatury itp. Dlatego wielkość takich naprężeń można wyznaczyć wyłącznie metodami badań laboratoryjnych na odpowiednio dobranych próbkach.

Inną znaną zależnością określającą wskaźnik odporności na zmęczenie cieplne k odlewów jest wyrażenie (2) [9]:

$$k = \frac{R_m A \lambda}{E \alpha \sqrt{\Delta R_m}}, \quad (2)$$

gdzie:

R_m – wytrzymałość na rozciąganie, MPa,

A – wydłużenie, %,

λ – współczynnik przewodzenia ciepła, $W/(m \cdot K)$,

E – moduł sprężystości, MPa,

α – liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej, K^{-1} ,

ΔR_m – jednostkowy spadek wytrzymałości na rozciąganie z podwyższeniem temperatury, $MPa \cdot K^{-1}$.

Zwiększenie wartości k powoduje wzrost odporności żeliwa na zmęczenie cieplne.

Do wyznaczania wytrzymałości zmęczeniowej stosuje się różne rodzaje próbek (przykłady rys. 5) oraz

The thermal stresses depend on many factors, which are included in relation (1) [9]:

$$\sigma_T = \frac{E\alpha\Delta T}{1-\mu} \cdot S, \quad (1)$$

where:

E – modulus of elasticity, MPa,

α – coefficient of linear thermal expansion, K^{-1} ,

ΔT – temperature difference, K,

μ – Poisson ratio,

S – shape factor.

From equation (1) it can be inferred that the value of thermal stresses depends not only on the mechanical and physical properties of the cast iron or the shape of the cast, but also on the parameters determining its heating and cooling conditions. A direct use of this dependence for the calculation of the value of thermal stresses is impossible, because, as it was established before, both the mechanical and the physical properties change depending on temperature as well as the number of cycles and their duration, the scope of temperature change etc. That is why the value of such stresses can be determined only by means of laboratory tests performed on properly selected samples.

Another known relation determining the thermal fatigue resistance factor k of the casts is expression (2) [9]:

$$k = \frac{R_m A \lambda}{E \alpha \sqrt{\Delta R_m}}, \quad (2)$$

where:

R_m – tensile strength, MPa,

A – elongation, %,

λ – thermal conductivity coefficient, $W/(m \cdot K)$,

E – modulus of elasticity, MPa,

α – linear thermal expansion coefficient, K^{-1} ,

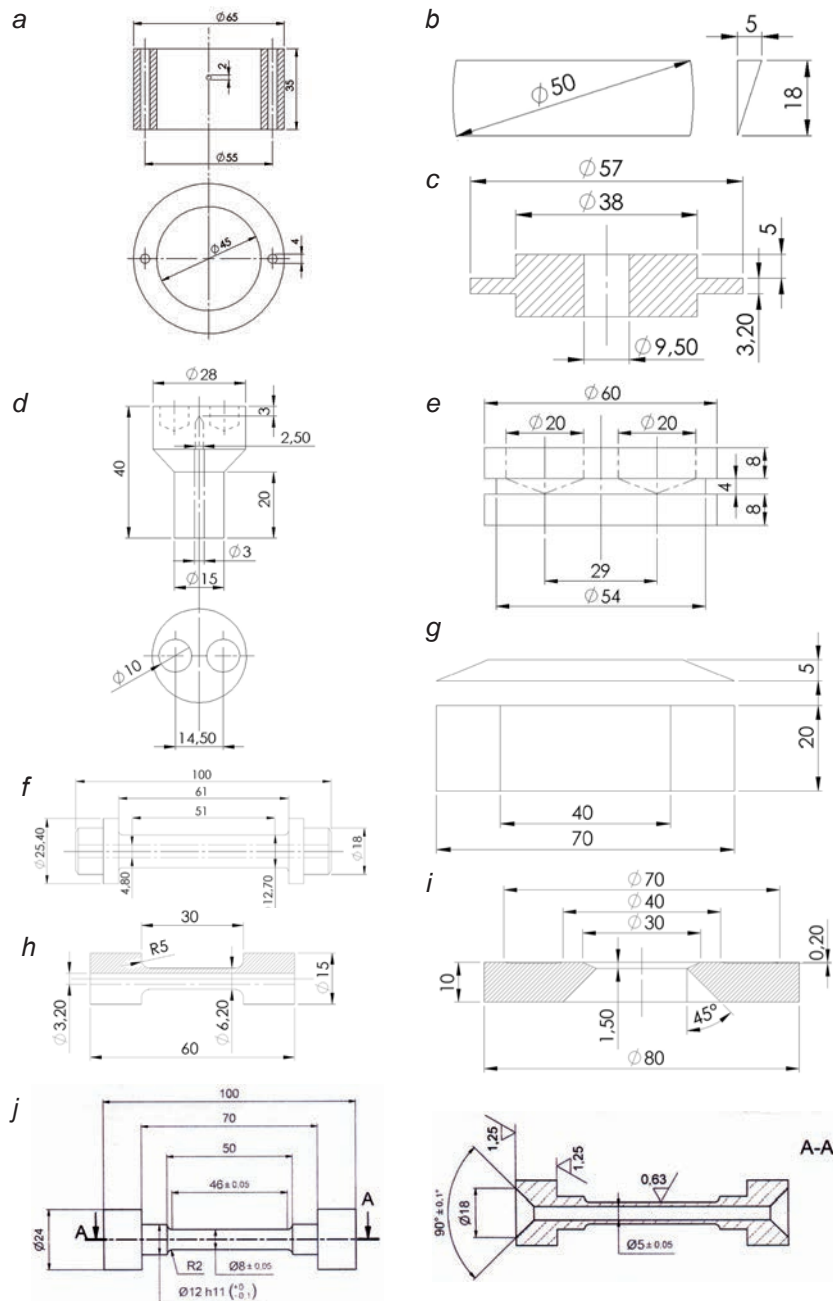
ΔR_m – unitary drop of tensile strength with temperature increase, $MPa \cdot K^{-1}$.

An increase of the value of k causes an increase of the cast iron thermal fatigue resistance.

For the determination of the fatigue strength, different types of samples are used (examples in Fig. 5) as

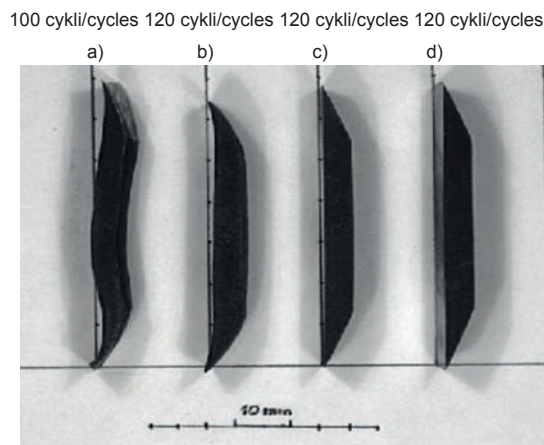
sposoby badań doświadczalnych cyklu nagrzewanie-chłodzenie. W ramach własnych badań stosowano do wyznaczenia zmęczenia cieplnego próbki o kształcie pokazanym na rysunku 5g [28]. W wyniku tych badań, przy zastosowaniu tego kształtu próbek, istnieje możliwość oceny również deformacji próbek, co pokazano na rysunku 6. Wynika z niego, że po okresie już 100–120 cykli nagrzewanie 800°C → chłodzenie ok. 65°C, próbki ze staliwa, żeliwa szarego modyfikowanego i żeliwa z grafitem kulkowym ulegają paczeniu się i częściowo zmieniają wymiary.

well as different methods of experimental tests on the heating-cooling cycle. Within the authors' own research, for the determination of thermal fatigue, samples of the shape shown in Fig. 5g were used [28]. As a result of these tests, with the use of this sample shape, it is also possible to evaluate the sample deformation, which is shown in Figure 6. From the figure it can be inferred that, already after the period of 100–120 cycles of heating 800°C → cooling about 65°C, cast steel samples (modified grey cast iron and cast iron with nodular graphite) undergo warping and partially change their dimensions.



Rys. 5. Schematy próbek stosowanych w różnych badaniach do wyznaczenia zmęczenia cieplnego (a–j) oraz kształt i wymiary próbki stosowanej w badaniach własnych (g) [9,28]

Fig. 5. Diagrams of the samples used in different tests for the determination of thermal fatigue (a–j) and the shape and dimensions of the sample used in authors' own research (g) [9,28]

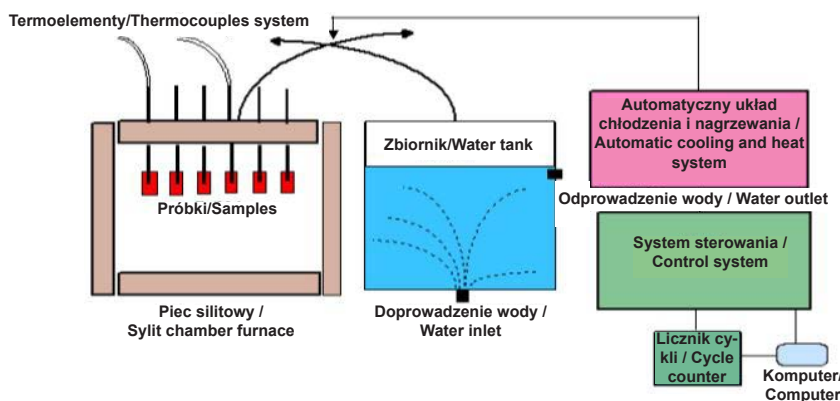


Rys. 6. Próbkki: a) ze staliwa, b) żeliwa szarego modyfikowanego, c) żeliwa z grafitem wermikularnym, d) żeliwa z grafitem kulkowym; po 100 i 120 liczby cykli, nagrzewanie-chłodzenie

Fig. 6. Samples: a) cast steel, b) modified grey cast iron, c) cast iron with vermicular graphite, d) cast iron with nodular graphite, after 100 and 120 heating-cooling cycles

Schemat stanowiska do badania odporności na zmęczenie cieplne w warunkach cyklicznych zmian temperatury zilustrowano na rysunku 7.

A diagram of the test station used for the thermal fatigue resistance tests under the conditions of periodical temperature changes is shown in Figure 7.



Rys. 7. Schemat stanowiska do wykonywania prób zmęczenia cieplnego żeliwa z grafitem wermikularnym (próbki płaskie)

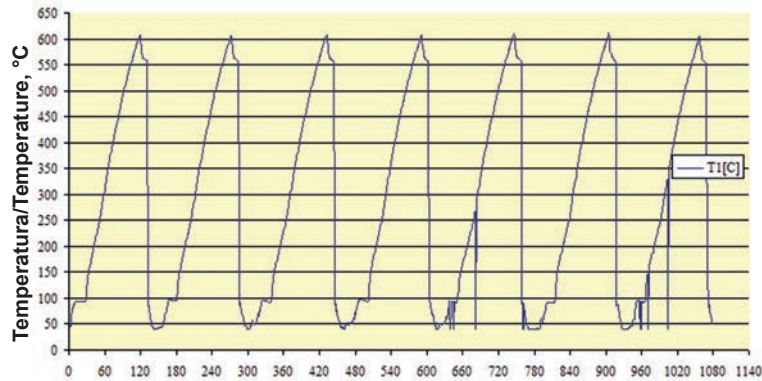
Fig. 7. Diagram of the test station for thermal fatigue tests on cast iron with vermicular graphite (flat samples)

Stanowisko składało się z pieca silitowego ze specjalnie skonstruowanym mechanizmem mocowania próbek pracującym w cyklu automatycznym, zbiornika z wodą do chłodzenia próbek, systemu sterowania i komputera magazynującego dane. Temperatura nagrzewania i chłodzenia próbek była mierzona za pomocą termoelementów. Jako miarę odporności żeliwa wermikularnego z dodatkami stopowymi przyjęto wartość sumy długości pęknięć na krawędziach próbki [mm]. Najmniejsza wartość sumy długości pęknięć próbki świadczyła o lepszej odporności żeliwa na zmęczenie cieplne (wskaźnik *p*).

Przebieg wykresu zmiany pola temperatury próbek z żeliwa wermikularnego w zakresie 65–600°C (rys. 8) świadczy o stabilizacji przeprowadzonej próby zmęczenia cieplnego.

The test station consisted of a silit type furnace with a specially constructed sample fastening mechanism working in automatic cycles, a container with water for sample cooling, a control system and a computer storing the data. The sample heating and cooling temperatures were measured by means of thermocouples. As a measure of strength of vermicular cast iron with alloy additions, the value of the sum of crack lengths on the sample edges was assumed [mm]. The lowest value of the sample crack length proved a better thermal fatigue resistance of the cast iron (index *p*).

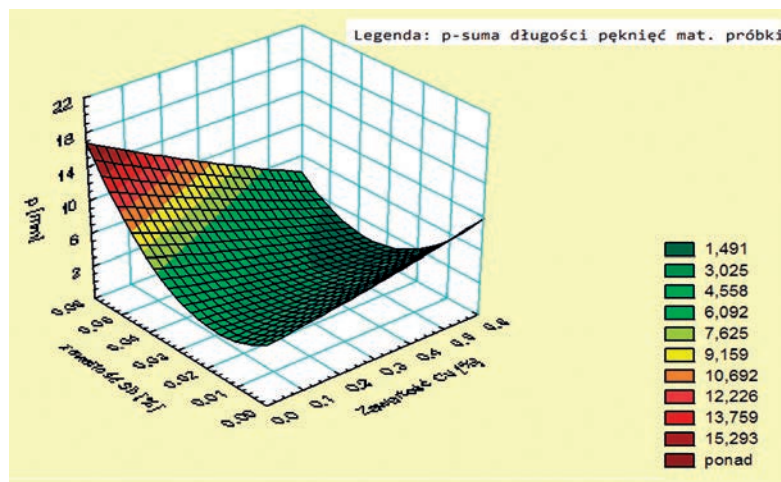
The course of the diagram of sample temperature field change for samples of vermicular cast iron in the range of 65–600°C (Fig. 8) proves that the performed thermal fatigue test was stable.



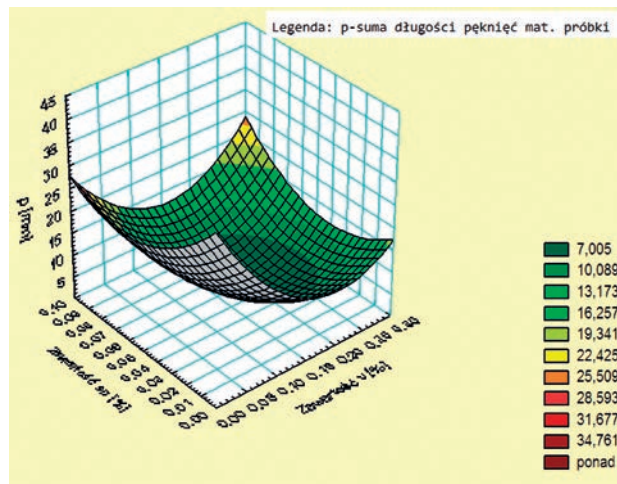
Rys. 8. Wykres zmiany pola temperatury próbek z żeliwa z grafitem wermikularnym w zakresie 65–800°C
 Fig. 8. Diagram of sample temperature field change for samples of cast iron with vermicular graphite in the range 65–800°C

W wyniku przeprowadzonych badań opracowano wykresy sumy długości pęknięć p [mm] stosowanej próbki płaskiej (pokazanej na rysunku 5g) z niskostopowego żeliwa z grafitem wermikularnym. Przyjęto następujące warunki badań: temperatura maksymalna cyklu 600°C, minimalna 65°C, liczba cykli, po których liczone sumę pęknięć, wynosiła 500. Za pomocą programu komputerowego „Statistica” na podstawie wcześniej wyliczonej funkcji obiektu badań wykreślono wykresy przestrzenne dla funkcji $p = f(Cu, Sb)$ dla stałej wartości $V = 0,184\%$ wag. i $Sn = 0,06\%$ wag. oraz dla funkcji $p = f(V, Sn)$ dla stałej wartości $Cu = 0,6\%$ wag. i $Sb = 0,06\%$ wag. Wykresy te przedstawiono na rysunkach 9 i 10. Za pomocą tego samego programu wykreślono wykresy płaskie funkcji $p = f(Sn)$ dla stałej wartości $Cu = 0,6\%$ wag., $V = 0,184\%$ wag. i $Sb = 0,06\%$ wag. oraz $p = f(Sb)$, dla stałej wartości $Cu = 0,6\%$ wag., $V = 0,184\%$ wag. i $Sn = 0,06\%$ wag. Wykresy te zamieszczono na rysunkach 11 i 12.

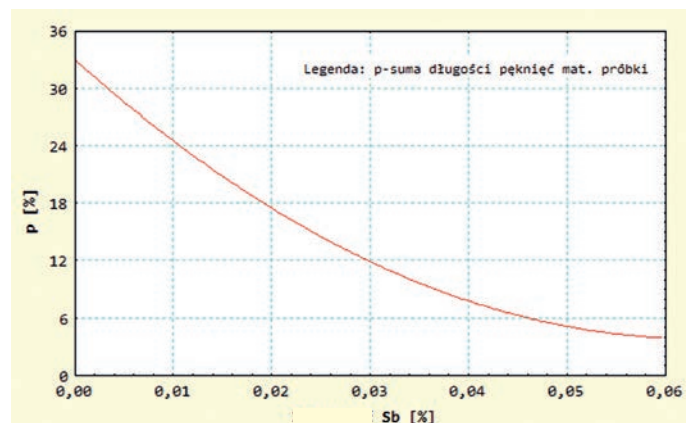
As a result of the performed tests, diagrams of the sum of crack lengths p [mm] in the applied flat sample (shown in Figure 5g) of low-alloy cast iron with vermicular graphite were drawn. The following test conditions were assumed: maximal cycle temperature – 600°C, minimal cycle temperature – 65°C, number of cycles after which the crack sum was calculated – 500. By means of the computer program “Statistica”, based on the test object function calculated earlier, the dimensional diagrams were determined for the function $p = f(Cu, Sb)$ for the constant value $V = 0.184$ wt. % and $Sn = 0.06$ wt. %, as well as for the function $p = f(V, Sn)$ for the constant value $Cu = 0.6$ wt. % and $Sb = 0.06$ wt. %. The diagrams are presented in Figures 9 and 10. By means of the same program, flat diagrams of the function $p = f(Sn)$ were drawn, for the constant value $Cu = 0.6$ wt. %, $V = 0.184$ wt. % and $Sb = 0.06$ wt. %, as well as for the function $p = f(Sb)$, for the constant value $Cu = 0.6$ wt. %, $V = 0.184$ wt. % and $Sn = 0.06$ wt. %. The diagrams are shown in Figures 11 and 12.



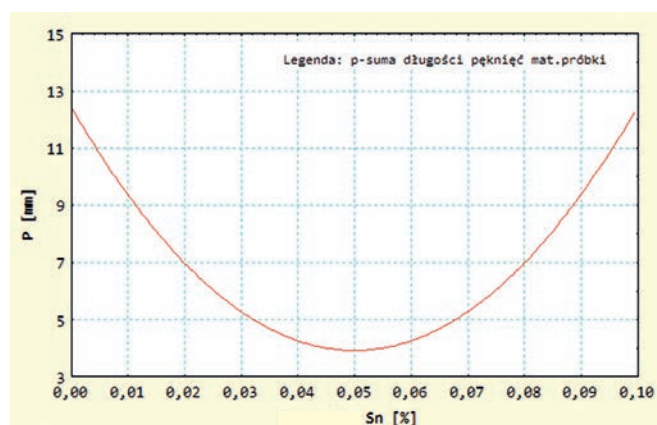
Rys. 9. Wykres funkcji $p = f(Cu, Sb)$; $V = 0,184\%$ wag., $Sn = 0,06\%$ wag.
 Fig. 9. Diagram of function $p = f(Cu, Sb)$; $V = 0.184$ wt. %, $Sn = 0.06$ wt. %



Rys. 10. Wykres funkcji $p = f(V, S_n)$; $C_u = 0,6\%$ wag., $S_b = 0,06\%$ wag.
 Fig. 10. Diagram of function $p = f(V, S_n)$; $C_u = 0.6$ wt. %, $S_b = 0.06$ wt. %



Rys. 11. Wykres funkcji $p = f(S_n)$; $C_u = 0,6\%$ wag., $V = 0,184\%$ wag., $S_b = 0,06\%$ wag.
 Fig. 11. Diagram of function $p = f(S_n)$; $C_u = 0.6$ wt. %, $V = 0.184$ wt. %, $S_b = 0.06$ wt. %



Rys. 12. Wykres funkcji $p = f(S_b)$; $C_u = 0,6\%$ wag., $V = 0,184\%$ wag., $S_n = 0,06\%$ wag.
 Fig. 12. Diagram of function $p = f(S_b)$; $C_u = 0.6$ wt. %, $V = 0.184$ wt. %, $S_n = 0.06$ wt. %

Wyniki badań zmęczenia cieplnego, które wyrażają sumę długości pęknięć p w próbce [mm] z żeliwa z grafitem wermikularnym z dodatkiem miedzi i antymonu (rys. 9), przy stałych zawartościach wanadu =

The results of the thermal fatigue tests, which express the sum of crack lengths p in the sample [mm] of cast iron with vermicular graphite, with the addition of copper and antimony (Fig. 9), with constant contents of

0,184% wag. i 0,05% wag. cyny wskazują najmniejsze wartości tego parametru p . Z kolei wpływ wanadu i cyny na sumę długości pęknięć p próbki [mm], przy stałej zawartości Cu i Sb pokazuje rysunek 10 oraz wykazuje obszar najmniejszej wartości parametru p . Na tych wykresach (rys. 9 i 10) wyraźnie widać, że obniża się suma długości pęknięć p w próbce doświadczalnej, co wskazuje na większą odporność tego żeliwa na zmęczenie cieplne.

Wyniki badań zmęczenia cieplnego, które wyrażają sumę długości pęknięć p w próbce [mm] z żeliwa z grafitem wermikularnym z dodatkiem cyny (rys. 11), przy stałych zawartościach Cu = 0,6% wag., V = 0,184% wag. i Sb = 0,06% wskazują najmniejsze wartości tego parametru p dla zawartości cyny 0,04–0,06% wag. Z kolei wpływ antymonu na sumę długości pęknięć p próbki [mm], przy stałej zawartości Cu = 0,6% wag., V = 0,184% wag. i Sn = 0,06% wag. pokazuje rysunek 12 oraz wykazuje najmniejszą wartość parametru p przy zawartości Sb około 0,06% wag. Na tych wykresach (rys. 11 i 12) również widać wyraźne obniżanie się sumy długości pęknięć p w próbce doświadczalnej, co wskazuje na większą odporność tego żeliwa na zmęczenie cieplne.

5. Zastosowanie żeliwa z grafitem wermikularnym w przemyśle samochodowym

Żeliwo z grafitem wermikularnym ma zastosowanie na odlewy pracujące w warunkach zmęczenia cieplnego, jak np. bloki i cylindry, kolektory wydechowe, wlewnice czy też odlewy, od których wymaga się zwiększonej zdolności do tłumienia drgań (np. obudowy tunelu metra pod ziemią) [26].

Wymagania dotyczące oszczędności paliwa w pojazdach, zwiększenia osiągnięć silnika oraz zmniejszenia poziomu szkodliwych emisji stanowią cały czas wyzwanie dla konstruktorów w zakresie doboru odpowiednich materiałów na odlewy. W miarę jak poprawia się infrastruktura sieci dróg i zwiększa się konieczność zapewnienia transportu towarów, od konstruktorów wymaga się zaprojektowania najnowocześniejszych, wysokosprawnych silników Diesla, które mogłyby transportować większe masy ładunków przy optymalnym zużyciu paliwa. W oparciu o doświadczenia osiągnięcie wyższych osiągnięć pracy silnika wymaga zwiększenia najwyższego ciśnienia spalania (P_{max}) w komorze spalania. W sektorze europejskich pojazdów do eksploatacji handlowej P_{max} zwiększyło się z około 18 MPa do 22–24 MPa w 2007 roku. Wynikające stąd zwiększenie obciążenia termicznego i mechanicznego wymagało przejścia ze standardowego żeliwa szarego na żeliwo z grafitem wermikularnym, głównie dla uzyskania przedłużenia żywotności silnika bez zwiększenia jego gabarytów lub masy. Przy wytrzymałości na rozciąganie rzędu minimum 75%, sztywności wyższej o 45% i około dwukrotnie wyższej

vanadium = 0.184 wt. % and tin = 0.05 wt. %, point to the lowest values of this parameter p . In turn, the effect of vanadium and tin on the sum of crack lengths p in the sample [mm], with constant contents of Cu and Sb is shown in Figure 10 and demonstrates the area of the lowest value of parameter p . In these diagrams (Figs. 9 and 10), it can be clearly seen that the sum of crack lengths p in the test sample is lowered, which suggests a higher thermal fatigue strength of this cast iron.

The results of the thermal fatigue tests, which express the sum of crack lengths p in the sample [mm] of cast iron with vermicular graphite with a tin addition (Fig. 11), with constant contents of Cu = 0.6 wt. %, V = 0.184 wt. % and Sb = 0.06 wt. %, point to the smallest values of parameter p , for the tin content 0.04–0.06 wt. %. In turn, the effect of antimony on the sum of crack lengths p in the sample [mm], with constant contents of Cu = 0.6 wt. %, V = 0.184 wt. % and Sn = 0.06 wt. %, is shown in Figure 12 and exhibits the lowest value of parameter p with the content of Sb of about 0.06 wt. %. In these diagrams (Figs. 11 and 12), one can see a clear reduction of the sum of crack lengths p in the test sample, which suggests a higher thermal fatigue resistance of this cast iron.

5. Applications of cast iron with vermicular graphite in the automotive industry

Cast iron with vermicular graphite is applied for casts working under the conditions of thermal fatigue, such as clocks and cylinders, exhaust manifolds, ingot moulds, as well as for casts which are required to exhibit an elevated vibration damping ability (e.g. housing of an underground tunnel) [26].

The requirements concerning fuel economy in vehicles, as well as engine performance increase and hazardous substance level reduction, still constitute a challenge for constructors in regard to the selection of appropriate cast materials. As the infrastructure of road networks improves and the product transport demand increases, the constructors are expected to design the most modern, high-performance, Diesel engines, which can transport higher load masses with the optimal fuel consumption. On the basis of experience, obtaining higher engine performance requires increasing the peak firing pressure (P_{max}) in the combustion chamber. In the European sector of commercial vehicles, P_{max} increased from about 18 MPa to 22–24 MPa in 2007. The resulting increase of the thermal and mechanical load required a transition from the standard grey cast iron to cast iron with vermicular graphite, mainly to prolong the engine durability without increasing its overall dimensions or mass. With the elongation strength at the level of minimum 75%, the rigidity 45% higher and twice as high fatigue strength in comparison to the conventional modified cast iron,

wytrzymałości zmęczeniowej w porównaniu z konwencjonalnym żeliwem modyfikowanym żeliwo z grafitem wermikularnym może sprostać wymaganiom większej trwałości i zapewnić stabilność wymiarową konieczną dla spełnienia warunku obniżenia emisji spalin w czasie pracy silnika. W początkowym okresie wytwarzania żeliwa z grafitem wermikularnym przy użyciu zapraw zawierających magnez proces wykonywania żeliwa był nieustabilizowany, szczególnie jeżeli chodzi o powtarzalność mikrostruktury (grafit wermikularny) takich odlewów, jak bloki i głowice cylindrów. Zastosowanie nowoczesnych metod zabiegu wermikularyzowania żeliwa np. techniką TP (technika przewodu elastycznego zawierającego rdzeń magnezowy) oraz kontroli procesu przy użyciu elektronicznych systemów pomiarowych i techniki komputerowej zapewniło wymagany wysoki zakres krytycznej zawartości magnezu 0,015–0,02% wag. Jeszcze w latach 90. XX w. rozpoczęto pierwszą seryjną produkcję bloków cylindra z żeliwa z grafitem wermikularnym przeznaczonych do samochodu Opel Calibry [29]. Obecnie wiele odlewów bloku cylindra z tego rodzaju żeliwa jest wytwarzanych dla producentów takich samochodów, jak: Audi, DAF, Ford, Hyundai, MAN, Mercedes, PSA, Volkswagen i Volvo [30].

O ile wyższa wartość P_{max} zapewnia lepsze spalanie, osiągi i udoskonalenie pracy silnika, to wynikające stąd wyższe obciążenia termiczne i mechaniczne wymagają nowych rozwiązań konstrukcyjnych. Inżynierowie konstruktorzy zmuszeni są wybierać pomiędzy zwiększeniem przekroju ścianek odlewów i masy odlewów wykonanych z tradycyjnych materiałów, takich jak żeliwo modyfikowane i stopy aluminium, lub zastosować materiał o większej wytrzymałości, jakim jest żeliwo z grafitem wermikularnym [11].

Zastosowane w przemyśle motoryzacyjnym odlewy kolektora wydechowego były początkowo wykonywane z żeliwa szarego, ale po przebiegu samochodu około 15–30 tys. km w terenie górzystym, odlewy te ulegały pękaniu. Również niektóre obudowy przekładni ulegały pękaniu [31]. W latach 80. XX w. rozpoczęto, na niewielką skalę, próby otrzymywania kolektorów z żeliwa wermikularnego. Próby wykazały, iż samochody po przebiegu 200 tys. km były pozbawione pęknięć; nawet po usunięciu żeber wzmacniających, które stanowiły 10% masy tego rodzaju odlewu. Również, po zastosowaniu żeliwa wermikularnego, całkowicie zlikwidowano pęknięcia obudowy przekładni. Od 1984 roku rozpoczęto produkcję z żeliwa wermikularnego większości kolektorów wydechowych i niektórych przekładni.

Na przykład od 1992 roku odlewnia DFM produkuje kolektory wydechowe z żeliwa wermikularnego do szanghajskiego samochodu Volkswagen Santana [31]. Do dziś wyprodukowano wiele sztuk kolektorów wydechowych z żeliwa wermikularnego, jak i obudów przekładni.

Produkuje się także kolektory wydechowe z żeliwa wermikularnego do samochodów ciężarowych. W tabeli 3 zestawiono charakterystyczne parametry geome-

the one with vermicular graphite can meet the requirements of higher durability and ensure dimensional stability, necessary to fulfill the conditions of a lowered combustion gas emission during the engine operation. In the initial period of vermicular cast iron production with the use of master alloys containing magnesium, the process of cast iron preparation was unstable, especially in regard to microstructure repeatability (vermicular graphite) of such casts as cylinder blocks and heads. The use of modern cast iron vermicularization methods, e.g. the TP technique (elastic conductor with a magnesium core) as well as electronic measurement systems and computer technology for process control, ensured the required high range of critical magnesium content 0.015–0.02 wt. %. Already in 1990s, the first series production of cylinder blocks made of cast iron with vermicular graphite began for the Opel Calibry car [29]. At present, many cylinder block casts made of this type of cast iron are manufactured for such car producers as: Audi, DAF, Ford, Hyundai, MAN, Mercedes, PSA, Volkswagen and Volvo [30].

While a higher value of P_{max} ensures better combustion, performance and engine perfection, the resulting higher thermal and mechanical loads require new construction solutions. Engineers are forced to choose between an increased cross section of cast walls and the cast mass made of traditional materials such as modified cast iron or aluminium alloys, or to apply a material of a higher strength, such as cast iron with vermicular graphite [11].

The exhaust manifold casts applied in the automotive industry were initially made of grey cast iron, but, after the car reached the mileage of about 15–30 thousand km in a mountainous terrain, the casts began to crack. Also, some of the gear casing underwent cracking [31]. In the 1980s, attempts at obtaining manifolds made of vermicular cast iron began on a small scale. They showed that, after reaching the mileage of 200 thousand km, the cars exhibited no cracks, even after the removal of the reinforcing ribs, which constituted 10% of the mass of this type of cast. Also, after the application of vermicular cast iron, the problem of gear casing cracking was entirely eliminated. In 1984, most exhaust manifolds and some gears began to be produced from vermicular cast iron.

For example, since 1992, the DFM foundry has been producing exhaust manifolds made of vermicular cast iron for the Shanghai car Volkswagen Santana [31]. Until now, many items of exhaust manifolds and gear casings have been produced from vermicular cast iron.

Vermicular cast iron exhaust manifolds are also produced for trucks. Table 3 lists the characteristic geometrical parameters of car and truck exhaust manifolds as well as gear casings [31].

The exhaust manifold works at the temperature of about 700°C. The thermal expansion during overheating provides an increase of the compressive stresses,

tryczne kolektorów wydechowych samochodów osobowych i ciężarowych oraz obudowy przekładni [31].

Kolektor wydechowy pracuje w temperaturze około 700°C. Rozszerzalność cieplna podczas przegrzania daje zwiększenie naprężeń ściskających, podczas gdy skurcz podczas chłodzenia powoduje naprężenia rozciągające w kolektorze przymocowanym śrubami do chłodzonego wodą bloku cylindrowego. Odporność na zmęczenie termiczne żeliwa wermikularnego jest 3–4 razy większa od odporności żeliwa szarego, podczas zmian temperatury w zakresie 250–700°C, dzięki czemu kolektory z żeliwa wermikularnego nie pękają tak łatwo, jak kolektory z żeliwa modyfikowanego.

whereas the shrinkage during cooling causes tensile stresses in the manifold, fastened to the water-cooled cylinder block by means of screws. The thermal fatigue resistance of vermicular cast iron is 3–4 times higher than the resistance of grey cast iron during the temperature changes in the range of 250–700°C, owing to which vermicular cast iron manifolds do not crack as easily as manifolds made of modified cast iron.

Tabela 3. Charakterystyczne parametry geometryczne kolektorów wydechowych samochodów osobowych i ciężarowych oraz obudowy przekładni

Table 3. Characteristic geometrical parameters of car and truck exhaust manifolds and gear casings

| Typ odlewów / Cast type | Maksymalny wymiar, mm / Maximal size, mm | Przeważająca grubość, mm / Dominant thickness, mm | Maksymalna grubość, mm / Maximal thickness, mm | Masa, kg / Mass, kg |
|--|--|--|---|------------------------|
| Kolektor wydechowy (samochód ciężarowy) / Exhaust manifold (truck) | 668,0 | 5,0 | 26,0 | 14,0 |
| Obudowa przekładni (samochód ciężarowy) / Gear casing (truck) | 379,0 | 5,5 | 31,0 | 30,0 |
| Kolektor wydechowy (samochód osobowy) / Exhaust manifold (car) | 326,0 | 4,0 | 35,0 | 6,0 |

Warto zaznaczyć, iż w ostatnim okresie proponuje się na kolektory żeliwo średniostopowe krzemowo-molibdenowe (tzw. SiMo) z grafitem wermikularnym.

Odporność korozyjna żeliwa wermikularnego w otaczającej i wysokiej temperaturze jest również lepsza niż żeliwa szarego, przez co zmniejsza się ryzyko pęknięcia odlewów.

Próbowano też wykonywać kolektory z ferrytycznego żeliwa sferoidalnego, lecz po rozmontowaniu stwierdzono znaczne odkształcenia odlewów.

It is worth mentioning that, in the recent years, there have been proposals of exhaust manifolds made of medium-alloy silicon-molybdenum cast iron (SiMo) with vermicular graphite.

The corrosion resistance of vermicular cast iron at ambient and elevated temperatures is also better than that of grey cast iron, which reduces the risk of cast cracking.

Attempts have also been made at producing manifolds from ferritic spheroidal cast iron. However, after dismantling, a significant deformation of the casts was observed.

6. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury oraz badań własnych można sformułować następujące wnioski:

1. Żeliwo z grafitem wermikularnym jest materiałem konstrukcyjnym, predestynowanym na odlewy, zwiększającym odporność na zmęczenie cieplne, w porównaniu do żeliwa szarego modyfikowanego i sferoidalnego, szczególnie w przemyśle motoryzacyjnym.
2. Wprowadzone do żeliwa z grafitem wermikularnym dodatki stopowe, takie jak miedź, antymon, wanad

6. Conclusions

Based on the performed literature analysis and the authors' own studies, it is possible to draw the following conclusions:

1. Cast iron with vermicular graphite is a construction material predestined for casts, which increases the thermal fatigue resistance, as compared to modified grey cast iron and spheroidal cast iron, especially in the automotive industry.
2. The alloy additions introduced into cast iron with vermicular graphite, such as copper, antimony, va-

i cyna, zwiększając odporność na pękanie tego żeliwa wyrażoną sumą długości pęknięć p stosowanej próbki płaskiej (rys. 9, 10, 11, 12), co związane jest z trwałością perlitycznej osnowy metalowej żeliwa.

nadium and tin, increase the crack resistance of this cast iron, expressed by the sum of crack lengths p in the used flat sample (Figs. 9, 10, 11, 12), which is connected with the durability of the cast iron perlitic metal matrix.

Podziękowania

W artykule wykorzystano materiały z realizacji projektu pt. „Badania i rozwój nowoczesnych technologii tworzyw odlewniczych odpornych na zmęczenie cieplne” realizowanego w latach 2009–2013 współfinansowanego przez Unię Europejską.

Acknowledgements

The article contains data collected in the realization of the project: “Research and development of modern technologies for casting materials resistant to thermal fatigue”, implemented in 2009–2013, co-financed by the European Union.

Literatura/References

1. Kovacs B.V. 1991. „Heat treating of austempered ductile iron”. *Transactions of American Foundrymen's Society* 99 : 281–286.
2. Kovacs B.V. 1994. „On the terminology and structure of ADI”. *Transactions of American Foundrymen's Society* 102 : 417–420.
3. Brandenberg K., K.L. Hayrynen, J.R. Keought. 2001. „Austempered gears and shafts: Tough solutions”. *Gear Technology* 18 (2) : 42–50.
4. Kowalski A., A. Pytel, J. Turzyński. 2007. Properties and application of new types of ausferritic cast iron. W *Conference Proceedings. Slovenian Foundrymen Society. Faculty of Natural Sciences and Engineering. University of Ljubljana. Portorož 12–13 September 2007*.
5. Pirowski Z., M. Gościański. 2009. „Konstrukcja i technologia wytwarzania odlewanych lemieszki do pługów obracalnych i zagonowych”. *MOTROL Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa* 11 : 159–167.
6. Podrucki C. 1996. „Problemy produkcji odlewów z żeliwa sferoidalnego ADI”. *Przegląd Odlewnictwa* 10 : 260–265.
7. Guzik E. 2001. Żeliwo ausferytyczne na walce hutnicze. W *Konferencja Naukowo-Techniczna nt. „Kierunki rozwoju produkcji walców”, Wisła-Malinka 21–23.02.2001*, 87.
8. Guzik E. 2001. *Procesy uszlachetniania żeliwa. Wybrane Zagadnienia*. Katowice: Archiwum Odlewnictwa.
9. Podrucki C. 1991. *Żeliwo: struktura, właściwości, zastosowanie. Tom 1 i 2*. Kraków: Wydawnictwo ZG STOP.
10. Zych J. 1995. Wpływ molibdenu na odporność na zmęczenie cieplne żeliwa z grafitem płatkowym, wermikularnym i sferoidalnym. W *XX Konferencja Wydziału Odlewnictwa AGH, Kraków 1995*, 93–98.
11. Dawson S. 2009. „Compacted graphite iron – a material solution for modern diesel engine cylinder blocks and heads”. *China Foundry* 6 (3) : 241–246.
12. Pietrowski S. 2000. „Kompedium wiedzy o żeliwie wermikularnym”. *Krzepnięcie Metali i Stopów* 2 (44) : 279–292.
13. Pytel A., K. Sękowski. 1999. Perlitic Vermicular Graphite Cast Iron. W *International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies, AMPT 99, Dublin, Ireland, 1381–1388*.
14. Dawson S., F. Zhang. 2010. Compacted graphite iron – A material solution for modern diesel engine cylinder blocks and heads. W *Proceedings of 69th World Foundry Congress, 16–20 October 2010, Hangzhou, China*, 0359–0364.
15. Dawson S., T. Schroeder. 2004. „Practical applications for compacted graphite iron”. *Transactions of American Foundrymen's Society* 112 : 1–9.
16. ISO 16112:2006 Compacted (vermicular) graphite cast irons – Classification.
17. PN-EN 16079:2012 Odlewnictwo – Żeliwo z grafitem zwartym (wermikularnym).
18. Nechtelberger E., H. Pühr, J.B. von Nesselrode, A. Nakayasu. 1982. Cast iron with vermicular/compacted graphite – State of the art development, production, properties applications. W *49th International Foundry Congress, Chicago 1982*, paper no. 1.
19. PN-H-04661:1975 Żeliwo szare sferoidalne i ciągliwe – Badania metalograficzne – Określanie mikrostruktury.
20. Schelleng R.D. 1967. „Effect of certain elements on the form of graphite in cast iron”. *AFS Cast Metals Research Journal* 3 (1) : 30–38.
21. PN-EN ISO 945-1:2009 Mikrostruktura żeliwa – Część 1: Klasyfikacja wydzieleni grafitu na podstawie analizy wizualnej.
22. VDG – Merkblatt W50 März 2002 – Gußeisen mit Vermiculargraphit.

23. ASTM A842 – 85 2009 Standard Specification for Compacted Graphite Iron Castings.
24. Sternkopf J. 1985. „Statische und dynamische Festigkeitseigenschaften von Gusseisen mit Vermiculargraphit”. *Giessereitechnik* 31 (9) : 278–281.
25. Nechtelberger E., H. Pühr, J.B. von Nesselrode, A. Nakayasu. 1982. „Stand der Entwicklung von Gusseisen mit Vermiculargraphit – Herstellung, Eigenschaften und Anwendung. Teil 1”. *Giesserei-Praxis* 22 : 359–372.
26. Pytel A. 2012. Żeliwo z grafitem wermikularnym – materiał konstrukcyjny na elementy pracujące w warunkach zmęczenia cieplnego. W *Badania i rozwój nowoczesnej technologii tworzyw odlewniczych odpornych na zmęczenie cieplne. Materiały konferencyjne, Zakopane, 12–14 czerwca 2012*, 1–11 (referat 3). Kraków: Instytut Odlewnictwa.
27. Orłoś Z. (red.). 1991. *Naprężenia cieplne*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
28. Kosowski A. 1966. *Metaloznawstwo stopów odlewniczych*. Kraków: Wydawnictwo AGH.
29. Dawson S. 1995. „Das Sinter-Cast-Verfahren zur Herstellung von Gusseisen mit Vermiculargraphit”. *Giesserei-Praxis* (12) : 29–34.
30. David E. 2001. „Developing In-the Mold-Treatment for CGI”. *Modern Casting* 91 (3) : 50.
31. Wan R., Peng Y., Chen M. 1994. „Research on and experience in the mass production of CGI exhaust manifolds”. *Foundry Trade Journal* 168 (3498) : 441–448.

