

УДК:669.141:676.017

В. О. САВЧЕНКО^{1*}

^{1*}Каф. «Технологія металів», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063, тел. +38 (061) 769 82 71, ел. пошта savchen2007@yandex.ru, ORCID 0000-0002-4305-0097

ТЕРМОСТІЙКІСТЬ ГРАФІТИЗОВАНОЇ СТАЛІ

Мета. У роботі необхідно здійснити дослідження температурних залежностей механічних властивостей та термостійкості графітизованих сталей в умовах термоциклічних навантажень. Необхідно визначити механічні властивості й показники термостійкості графітизованих сталей та чавуну ВЧ400 у діапазоні температур 20...800 °С. **Методика.** Графітизовані сталі з хімічним складом (мас. %): 0,61...1,04 С; 1,19...1,59 % Si; 0,32...0,37 % Mn; 0,12...0,17 % Al; 0,008...0,014 % S і 0,016...0,025 % Р піддавали термічному обробленню за різними режимами. А саме: нагрівання до 810 °С – витримка 2 години; охолодження до 680 °С – витримка 2 години з наступним охолодженням із піччю для забезпечення ферито-перлітної металевої основи з включеннями графіту. Для визначення показників термостійкості (параметр теплових напружень К та критерій стійкості матеріалу при термоциклічному навантаженні С) визначалися показники механічних властивостей графітизованих сталей та чавуну в інтервалі температур 20...800 °С. **Результати.** Встановлено, що внаслідок меншого вмісту вуглецю та меншої кількості графітових включень за показниками границі міцності й пластичності при кімнатних і високих температурах, а також за критеріями термостійкості К та С графітизована сталь перевищує показники високоміцного чавуну ВЧ400. Ця особливість дає можливість використовувати її для виготовлення виробів, що працюють в умовах термоциклічних навантажень. **Наукова новизна.** Визначено границю міцності та відносне видовження графітизованих сталей в інтервалі температур 20...800 °С. Виконано, у порівнянні з високоміцним чавуном марки ВЧ400, розрахунки критеріїв термостійкості: параметру теплових напружень К і критерію стійкості матеріалу при термоциклічному навантаженні С в інтервалі температур 20...800 °С. **Практична значимість.** Показано доцільність використання графітизованої сталі для виготовлення виробів, що працюють в умовах термоциклічних навантажень.

Ключові слова: графітизована сталь; механічні властивості; термостійкість; термоциклічні навантаження

Вступ

В промисловості існують деталі, які працюють в умовах численних термоциклічних навантажень. Вимоги щодо структури та термостійкості металевих матеріалів, для виготовлення вказаних виробів, визначають термін та надійність їх використання [2, 3, 12, 13]. Вважається, що основною властивістю металевого матеріалу за цих умов є спроможність витримувати циклічну теплову дію. Наведене положення зумовлене виникаючим температурним градієнтом в об'ємі виробу, що супроводжується появою термічних напружень, які циклічно змінюються. Численні цикли таких навантажень призводять до розвитку процесів термічної втоми металу. Для виготовлення деталей, що працюють в указаних умовах, широко використовуються високоміцні чавуни та графітизовані сталі. Позитивною властивістю чавунів є їх висока теплопровідність. За цим показником вони перевищують графітизовані сталі, оскільки вміст вуглецю в чавунах в 3...4 рази більше, ніж у сталях. Але порівняно

з графітизованими сталями чавуни мають значно нижчі показники механічних властивостей. Відомо, що довговічність використання виробів за умов термічної втоми залежить від термостійкості матеріалу. Вказаний показник є комплексним і визначається низкою властивостей матеріалу, серед яких рівень виникаючого термічного напруження. Наведена характеристика дозволяє оцінити опір матеріалу зародженню і поширенню термічних і термовтомних тріщин.

З метою оцінки можливості використання графітизованих сталей для виготовлення деталей, які працюють в умовах високих температур, викликає інтерес вивчення впливу вмісту вуглецю та кремнію на показники їх термостійкості. Так, в роботах [4, 7, 8, 11] був виконаний порівняльний аналіз поведінки графітизованих сталей з чавуном ВЧ40 за умови навантажень при підвищених температурах. В [1, 5] під час порівняння числових значень термостійкості графітизованих сталей і чавунів була виявлена перспективність вживання сталей як більш термостійкого матеріалу.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Мета

Метою роботи є дослідження температурних залежностей механічних властивостей та термостійкості графітізованих сталей в умовах термоциклічних навантажень.

Методика

Виплавляли графітізовану сталь у 60-кілограмовій індукційній печі з основним футеруванням. Легування марганцем здійснювали присадкою в піч феромарганцю марки ФМн-78 (ДСТУ 3547-97). Модифікування виконували присаджуванням у ківш подрібнених феросиліцію ФС-65 (ДСТУ 4127-2002) та алюмінію марки А99 (ГОСТ 11069-74) перед заливанням рідкого металу. Лиття металу здійснювали у сухі піщано-глинисті ливарні форми. Отримані виливки для зручності позначимо: сталі з вмістом 0,8 % С, 1,6 % Si (1), 0,8 % С, 1,2 % Si (2), 1,19 % С, 1,6 % Si (3); 1,19 % С, 1,2 % Si (4) і чавун ВЧ400 (5), при приблизно однаковій концентрації інших елементів (0,32–0,37 % Mn; 0,12–0,17 % Al; 0,008–0,014 % S і 0,016–0,025 % P). Термічну обробку зразків здійснювали в електричних печах опору. Технологія графітізуючого відпалу складалася з нагріву до 810 °С, витримки 2 години, охолодження до 680 °С, витримки 2 години, з наступним охолодженням з піччю. Проведена термічна обробка забезпечувала формування ферито-перлітної металевої основи сталей при одночасному зміцненні форми графітових включень.

Визначення показників міцності та пластичності виконували на розривній машині УРМ-5 з максимальним зусиллям 50 кН. Міцність при високих температурах та відносне видовження сталей здійснювали при випробуваннях в інтервалі температур від 100 до 800 °С, згідно з ГОСТ 9651-84. Зразки виготовляли з різцю згідно з ГОСТ 1497-87 ($d_0 = 5$ мм). Дослідження виконували в умовах машини ГМС-20, з муфельною піччю опору. Показниками термостійкості матеріалів є параметр теплових напружень K та критерій стійкості матеріалу при термоциклічному навантаженні C [9, 10]. Значення вказаних характеристик визначаються за співвідношеннями:

$$K = \frac{\lambda \sigma_B}{\alpha E}, [\text{Вт/м}]; C = \frac{\lambda \sigma_B \delta}{\alpha E}, [\text{Вт/м}], \quad (1)$$

де λ – теплопровідність, Вт/(м·°С), σ_B – границя міцності при розтяганні, δ – відносне видовження, α – коефіцієнт термічного розширення, E – модуль пружності.

Числові значення яких, як видно з наведених формул (1), зростає зі збільшенням теплопровідності (через зменшення градієнта температур і, відповідно, величини термічних напружень в стінках форми), міцності та пластичності, що стримують зародження та розповсюдження термовтомних тріщин, а також зі зменшенням коефіцієнта термічного розширення α та модуля пружності E .

Результати

В результаті досліджень були побудовані графіки температурних залежностей механічних властивостей та показників термостійкості графітізованих сталей різного хімічного складу та чавуну ВЧ 400, які наведені на рис. 1–4. Враховуючи, що чим менша величина термічного розширення, тим менших деформацій буде зазнавати матеріал, внаслідок чого слід очікувати зростання опору зародженню тріщин термічної втоми.

За даними [6] з підвищенням температури до 400 °С межа міцності вуглецевих сталей незначно підвищується, що пояснюється процесами старіння, які супроводжуються виділенням різноманітних дисперсних структурних складових (карбіди, нітриди). На противагу цьому, для досліджуваних сталей було визначено (рис. 1), що з підвищенням температури до 400 °С межа міцності однозначно знижувалася. Так, для сталей з вмістом вуглецю 0,8 % при вмісті кремнію 1,6 %, міцність знизилася з 820 до 750 МПа. Подальше зменшення його концентрації (до 1,2 %) не призвело до зміни характеру залежності міцності металу – практично еквідистантний хід кривих. Хоча загальний рівень значень міцності зменшився. Одне з пояснень наведеного характеру залежностей – наявність в структурі сталей графітових включень.

В той же час з підвищенням температури пластичність сталей (рис. 2) збільшувалася (з 2 при 20 °С до 35 % при 800 °С). Теплопровідність досліджуваних сталей визначається головним чином вмістом вуглецю та структурним станом.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

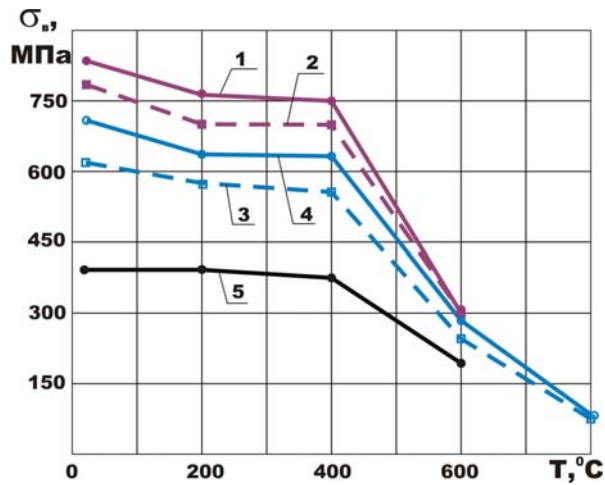


Рис. 1. Температурні залежності межі міцності графітізованої сталі та чавуну ВЧ400:

1 – сталь з вмістом 0,8% С, 1,6% Si; 2 – сталь з вмістом 0,8% С, 1,2% Si; 3 – сталь з вмістом 1,19% С, 1,6% Si; 4 – сталь з вмістом 1,19% С, 1,2% Si; 5 – чавун ВЧ400

Fig. 1. Temperature dependencies of tensile strength of graphitized steel and cast iron VCh400:

1 – steel containing 0.8% C, 1.6% Si; 2 – steel containing 0.8% C, 1.2% Si; 3 – steel containing 1.19% C, 1.6% Si; 4 – steel containing 1.19% C, 1.2% Si; 5 – cast iron VCh400

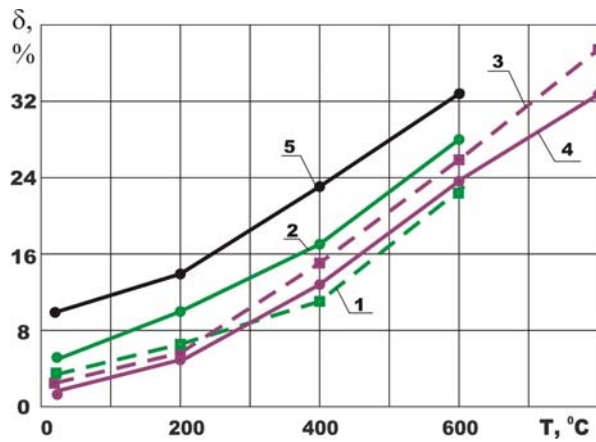


Рис. 2. Температурні залежності відносного видовження графітізованої сталі та чавуну ВЧ400. Позначення аналогічні рис. 1

Fig. 2. Temperature dependencies of percent elongation of graphitized steel and cast iron VCh400.

Designations are similar to Fig. 1

Результати розрахунків параметра К та критерію С чавуна (рис. 3, 4) показали, що з підвищенням температури параметр К знижувався від 50 Вт/м при 20 °С до 35 Вт/м при 600 °С. Одночасно з цим критерій С підвищувався від 4,0 Вт/м при 20 °С до 8,0 Вт/м при 600 °С. Зменшення параметра К з підвищенням температури

ри зумовлене зниженням міцності чавуну та модуля пружності, а підвищення значень критерію С – значним зростанням характеристик пластичності з температурою.

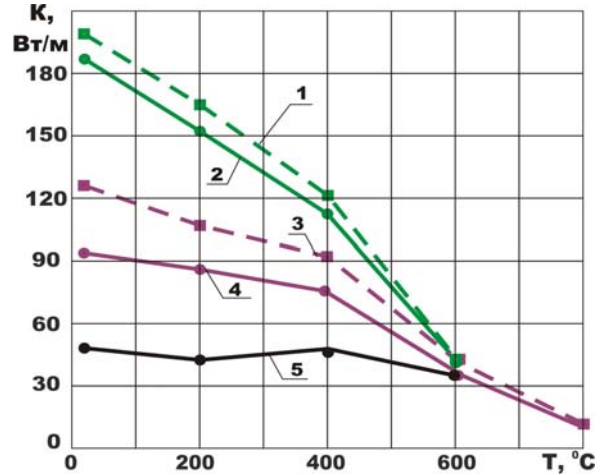


Рис. 3. Температурні залежності параметру теплових напружень графітізованої сталі та чавуну ВЧ400.

Позначення аналогічні рис. 1

Fig. 3. Temperature dependencies of heat stresses parameter of graphitized steel and cast iron VCh400.

Designations are similar to Fig. 1

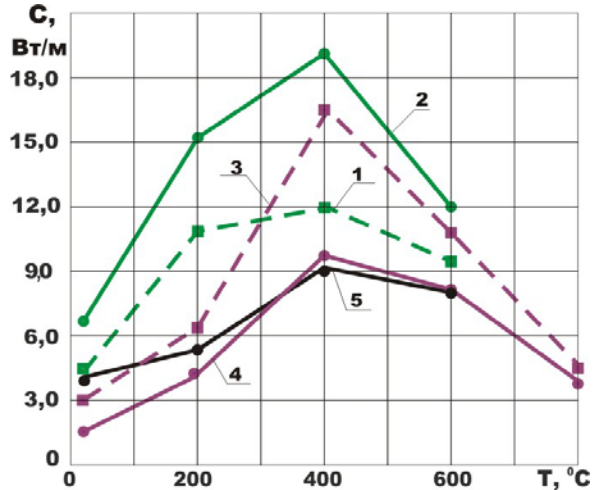


Рис. 4. Температурні залежності критерію стійкості графітізованої сталі та чавуну ВЧ400.

Позначення аналогічні рис. 1

Fig. 4. Temperature dependencies of the resistance criterion of graphitized steel and cast iron VCh400.

Designations are similar to Fig. 1

Параметр теплових напружень К для графітізованих сталей знижується з підвищенням температури, як і для чавунів. Разом з цим слід відзначити, що вказана характеристика при те-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

мпературі 20 °С перевищує в 2,5...4 рази значення для чавуна і досягає практично однакових значень при температурі 600 °С.

Під час розрахунків критерію термостійкості С за співвідношенням (1) для досліджуваних металевих матеріалів був визначений однаковий характер залежності. Так, для графітізованих сталей, виявлений екстремум при 400 °С, визначається здебільшого стабілізацією характеристики міцності при зростанні пластичності в інтервалі температур випробувань 200...400 °С. Подальше збільшення температури супроводжувалося зниженням критерію С, що пояснюється розвитком процесів пом'якшення сталей при температурах 600...800 °С. Порівняно з чавунами критерій С для сталей перевищував аналогічний показник в 1,5...2 рази. Отримані результати із застосуванням характеристик К і С (за визначенням термостійкості графітізованих сталей порівняно з сірим високоміцним чавуном) знаходять якісне підтвердження відомими експериментальними даними.

На основі результатів досліджень [5] визначено, що завдяки врахуванню критерієм С характеристики пластичності матеріалу, його порівняно з К слід вважати більш об'єктивним показником. Наведене положення при формальному розгляді може бути прийняте завдяки існуванню пропорційної залежності рівня термостійкості металевих матеріалів від величини пластичних властивостей.

Наукова новизна та практична значимість

Визначено границю міцності та відносне видовження графітізованих сталей в інтервалі температур 20...800 °С. Виконано (порівняно з високоміцним чавуном марки ВЧ400) розрахунки критеріїв термостійкості: параметра теплових напружень К і критерію стійкості матеріалу при термоциклічному навантаженні С в інтервалі температур 20...800 °С. Доведено доцільність використання графітізованої сталі для виготовлення виробів, що працюють в умовах термоциклічних навантажень.

Висновки

Встановлено, що внаслідок більш низького вмісту вуглецю та меншої кількості графітових включень за характеристиками міцності та пла-

стичності, критеріями К та С, графітізована сталь перевищує показники високоміцного чавуну ВЧ400. На підставі цього, такі сталі обґрунтовано можуть замінити високоміцні чавуни для виготовлення визначених виробів, що працюють в умовах численних термоциклічних навантажень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абрамов, В. В. Термоуравновешенная изложница / В. В. Абрамов, В. А. Курганов. – М. : Металлургия, 1988. – 144 с.
2. Акимов, И. В. Повышение износостойкости графитизированных сталей / И. В. Акимов // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. – 2013. – № 6 (48) – С. 81–87.
3. Вакуленко, І. О. Металеві матеріали з підвищеною міцністю для виготовлення вагонів / І. О. Вакуленко, В. Г. Анофрієв // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 37. – С. 216–219.
4. Волчок, І. П. Оптимизация состава термостойкой графитизированной стали / И. П. Волчок, А. Ю. Яковлев // Стр-во, материаловедение, машиностроение : сб. научн. тр. под ред. В. И. Большакова. – Вып. 41. Часть 1. – Д. : ПГАСА, 2007. – С. 119–125.
5. Воронова, Н. А. Отливка изложниц из магниевого чугуна / Н. А. Воронова, В. П. Гельд, Н. Т. Ткач // Повышение стойкости изложниц. Темат. отраслевой сб. № 1. – М. : Металлургия, 1972. – С. 75–87.
6. Губкин, С. И. Деформируемость металлов / С. И. Губкин. – М. : Металлургиздат, 1953. – 350 с.
7. Изложницы для слитков легированных сталей / Я. Л. Додин, Л. Г. Саксонов, Л. О. Соколовский, Л. И. Торбочкин. – М. : Металлургиздат, 1963. – 192 с.
8. Твердопаливни ракетні двигуни. Матеріали і технології / Ф. П. Санін, Л. Д. Кучма, Є. О. Джур, А. Ф. Санін. – Д. : Вид-во ДДУ, 1999. – 318 с.
9. Теплопроводность твердых тел : справочник / под ред. А. С. Охотина. – М. : Энергоиздат, 1984. – 321 с.
10. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике : справ. / под ред. Б. Е. Неймарка. – М.–Л. : Энергия, 1967. – 240 с.
11. Volchok, I. Heat resistance of graphitized steel / Ivan Volchok, Ivan Akimov, Vera Savchenko // Problems of modern Techniques in Engineering and Education-2009. – Krakow : Zaklad Usług Poligraficznych, 2009. – P. 103–107.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

12. Pat. 5,139,583, C22C38/00. Graphite Precipitated hot-rolled Steel plate having workability and hardenability and method therefore / Yoshikazu Kawabata, Masahiko Morita, Fusao Togashi (USA). – № US19920822649 ; filed. 21.01.92 ; publ. 18.08.92.
13. Pat. US5830285, C21D1/26; C21D1/84, C21D8/06, C22C38/12, C22C38/60. Fine

Graphite uniform dispersion steel excellent in gold Machinability, Cuttability and Hardenability, and production method for the same / Sakae Katayama, Toshimi Tarui, Masahiro Toda, Ken-Ichiro Naito (Japan). – № US19960700355 ; filed. 23.08.96 ; publ. 03.11.98.

В. А. САВЧЕНКО^{1*}

^{1*}Каф. «Технология металлов», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, Запорожье, Украина, 69063, тел. +38 (061) 769 82 71, эл. почта savchen2007@yandex.ru, ORCID 0000-0002-4305-0097

ТЕРМОСТОЙКОСТЬ ГРАФИТИЗИРОВАННОЙ СТАЛИ

Цель. В работе необходимо осуществить исследование температурных зависимостей механических свойств и термостойкости сталей в условиях термоциклических нагрузок. Необходимо определить механические свойства и показатели термостойкости графитизированных сталей и чугуна ВЧ400 в диапазоне температур 20...800 °С. **Методика.** Графитизированные стали с химическим составом (мас. %): 0,61...1,04 С; 1,19...1,59 % Si; 0,32...0,37 % Mn; 0,12...0,17 % Al; 0,008...0,014 % S и 0,016...0,025 % P подвергали термической обработке в разных режимах. А именно: нагрев до 810 °С – выдержка 2 часа; охлаждение до 680 °С – выдержка 2 часа с последующим охлаждением с печью для обеспечения феррито-перлитной металлической основы с включениями графита. Для определения показателей термостойкости (параметр тепловых напряжений К и критерий стойкости материала при термоциклической нагрузке С) исследовались показатели механических свойств графитизированных сталей и чугунов в диапазоне температур 20...800 °С. **Результаты.** Установлено, что вследствие меньшего содержания углерода и меньшего количества включений графита по показателям предела прочности и пластичности при комнатных и высоких температурах, а также по критериям термостойкости К и С графитизированная сталь превышает показатели высокопрочного чугуна ВЧ400. Эта особенность дает возможность использовать ее для изготовления изделий, которые работают в условиях термоциклических нагрузок. **Научная новизна.** Определены предел прочности и относительное удлинение графитизированных сталей в диапазоне температур 20...800 °С. Выполнены, в сравнении с высокопрочным чугуном марки ВЧ400, расчеты критериев термостойкости: параметра тепловых напряжений К и критерия стойкости материала при термоциклических нагрузках С в диапазоне температур 20...800°С. **Практическая значимость.** Показана целесообразность использования графитизированной стали для изготовления изделий, которые работают в условиях термоциклических нагрузок.

Ключевые слова: графитизированная сталь; механические свойства; термостойкость; термоциклические нагрузки

В. О. SAVCHENKO^{1*}

^{1*}Dep. «Metal Technology», Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskiy St., 64, Zaporizhzhia, Ukraine, 69063, tel. +38 (061) 769 82 71, e-mail savchen2007@yandex.ru, ORCID 0000-0002-4305-0097

HEAT RESISTANCE OF GRAPHITIZED STEEL

Purpose. The investigation of temperature dependences of steels' mechanical properties and heat resistance under conditions of thermal cyclic loads. It's necessary to determine the mechanical properties and heat resistance indices of graphitized steels and cast iron VCh400 within the temperature range of 20...800°C. **Methodology.** Graphitized steels of the following chemical composition (mass %): 0.61...1.04C; 1.19...1.59%Si; 0.32...0.37%Mn; 0.12...0.17%Al; 0.008...0.014%S and 0.016...0.025%P have been heat-treated according to the mode: heating up to 810°C – holding for 2 hours; cooling down to 680°C – holding for 2 hours with further cooling using the furnace in order to provide the ferrite-pearlite metallic base with graphite inclusions. In order to determine heat resistance indices (heat stresses index

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

K and the material's resistance criterion at thermal cyclic load C) the indices of graphitized steels' and cast irons' mechanical properties in the temperature range of 20...800°C have been investigated. **Findings.** It has been established that as a result of lower carbon content and smaller quantity of graphite inclusions, graphitized steel exceeds such indices of nodular cast iron VCh400 as: tensile strength and plasticity at room and high temperatures, and also heat resistance criteria K and C. This steel can be used to manufacture articles operating under conditions of thermal cyclic loads. **Originality.** Tensile strength and percent elongation of graphitized steels within the temperature range of 20...800°C have been determined. Calculations of heat resistance criteria to the heat stresses index K and the material's resistance criterion at thermal cyclic loads C within the temperature range 20...800°C in comparison with nodular cast iron of VCh400 grade have been carried out. **Practical value.** The expediency of using graphitized steel for manufacturing of articles operating under conditions of thermal cyclic loads has been shown.

Keywords: graphitized steel; mechanical properties; heat resistance; thermal cyclic loads

REFERENCES

1. Abramov V.V., Kurganov V.A. *Termouravnoveshennaya izlozhnitsa* [Thermally balanced ingot mould]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1972. 144 p.
2. Akimov I.V. Povysheniye iznosostoykosti grafityzovannykh staley [Increasing of wear resistance of the graphitized steels]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2013, issue 48, pp. 81-87.
3. Vakulenko I.O., Anofriev V.H. Metalevi materialy z pidvishchenoiu mitsnistiu dlia vyhotovlennia vahoniv [Metallic materials with increased strength for cars manufacture]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 37, pp. 216-219.
4. Volchok I.P., Yakovlev A.Yu. Optimizatsiya sostava termostoykoy grafityzirovannoy stali [Optimization of heat resistant graphitized steel composition]. *Stroitelstvo, materialovedeniye, mashinostroeniye* [Construction, material science, mechanic engineering], Dnipropetrovsk, 2007, issue 41, part 1, pp. 119-125.
5. Voronova N.A., Geld V.P., Tkach N.T. Otlivka izlozhnits iz magniyevogo chuguna [Casting of ingot moulds from magnesium cast iron]. *Povysheniye stoykosti izlozhnits. Tematicheskyy otraslevoy sbornik № 1* [Increasing of ingot moulds' strength. Thematic and specialized proc. no. 1], Moscow, 1972, pp. 75-87.
6. Gubkin S.I. *Deformiruyemost metallov* [Deformability of metals]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1953. 350 p.
7. Dodin Ya.L., Saksonov L.G., Sokolovskiy L.O., Torbochkin L.I. *Izlozhnitsy dlya slitkov legirovannykh staley* [Ingot moulds for ingots of alloyed steels]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1963. 192 p.
8. Sanin F.P., Kuchma L.D., Dzhur Ye.O., Sanin A.F. *Tverdopalyvni raketni dvyhuny. Materialy i tekhnologii* [Solid-fuel rocket engines. Materials and technologies]. Donetsk, Vydavnytstvo DDU Publ., 1999. 318 p.
9. Okhotin A.S. *Teploprovodnost tverdykh tel* [Heat conductivity of solid bodies]. Moscow, Energoizdat Publ., 1984. 321 p.
10. Neimark B.E. *Fizicheskiye svoystva staley i splavov, primenyayemykh v energetike*. [Physical properties of steels and alloys used in energetics]. Moscow-Leningrad, Energiya Publ., 1967. 240 p.
11. Volchok I., Akimov I., Savchenko V. Heat resistance of graphitized steel. Problems of modern Techniques in Engineering and Education-2009. Krakow, 2009, pp. 103-107.
12. Kawabata Yoshikazu, Morita Masahiko, Togashi Fusao. Graphite Precipitated hot-rolled Steel plate having workability and hardenability and method therefore. Patent USA, no. US19920822649, 1992.
13. Katayama Sakae, Tarui Toshimi, Toda Masahiro, Naito Ken-Ichiro. Fine Graphite uniform dispersion steel excellent in gold Machinability, Cuttability and Hardenability, and production method for the same. Patent Japan, no. US19960700355, 1996.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. А. А. Мітяєвим (Україна); д.т.н., проф. І. О. Вакулєнком (Україна)

Поступила до редакції: 30.04.2014

Прийнята до друку: 17.06.2014