

УДК 620.178.1

С.Г. САНДОМИРСКИЙ, д-р техн. наук, доц.  
заведующий лабораторией металлургии в машиностроении<sup>1</sup>  
E-mail: sand@iaph.bas-net.by

Е.Г. САНДОМИРСКАЯ  
научный сотрудник<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 26.04.2017.

## ОЦЕНКА ДИАПАЗОНА ВОЗМОЖНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ВРЕМЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ ПО ТВЕРДОСТИ

*Проведен анализ диапазона изменения временного сопротивления  $\sigma_B$  отливок из высокопрочного чугуна (ВЧ). Разработано аналитическое описание диапазона изменения  $\sigma_B$  в зависимости от твердости HB отливки. Показано, что графитовые включения в ВЧ всегда в большей степени снижают его временное сопротивление, чем твердость по сравнению с углеродистой сталью, имеющей то же соотношение между перлитом и ферритом в своей структуре, как и соотношение между ними в металлической матрице чугуна. Результат предназначен для определения гарантированной величины и диапазона возможного изменения  $\sigma_B$  отливки из ВЧ без ее разрушения, если нет информации о  $\sigma_B$  образцов-свидетелей.*

**Ключевые слова:** чугун, механические свойства, временное сопротивление, твердость

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ВЧ) — перспективный и ценный конструкционный материал для машиностроения [1]. Его получают модифицированием жидкого чугуна небольшими добавками ряда элементов. Установлено [2], что если в жидкий чугун ввести слабо растворяющийся в нем металл (например, магний в количестве 0,03–0,07 %) или сплав, температура кипения которого ниже температуры жидкого чугуна и пары которого вступают в реакцию окисления с газами, в состав которых входит кислород, то в остатках пузырьков пара этого металла зарождается шаровидный графит (рисунок 1).

Шаровидный графит, имеющий минимальную поверхность при заданном объеме, меньше, чем пластинчатый ослабляет металлическую основу чугуна и не является активным концентратором напряжений. ВЧ имеют пластичность, прочность, износостойкость и коррозионную стойкость, близкие к свойствам углеродистой и легированной стали. При этом они сохраняют хорошие литейные свойства и обрабатываемость резанием, способность гасить вибрации, высокую износостойкость. Стоимость отливок из ВЧ на 25–50 % меньше стоимости отливок и поковок из стали.

Условное обозначение марки высокопрочного чугуна по [4] включает буквы ВЧ — высокопрочный чугун и цифровое обозначение минимального временного сопротивления при растяжении в МПа·10<sup>-1</sup>. Для отливок предусмотрены следующие марки чугуна: ВЧ 35, ВЧ 40, ВЧ 45, ВЧ 50, ВЧ 60, ВЧ 70, ВЧ 80, ВЧ 100. Прочность чугуна, наря-

ду с формой графитовых включений, определяется структурой его металлической основы. Ее характеризуют временным сопротивлением (пределом прочности)  $\sigma_B$ . Увеличение доли перлита (см. рисунок 1) по сравнению с долей феррита в металлической основе чугуна с шаровидным графитом

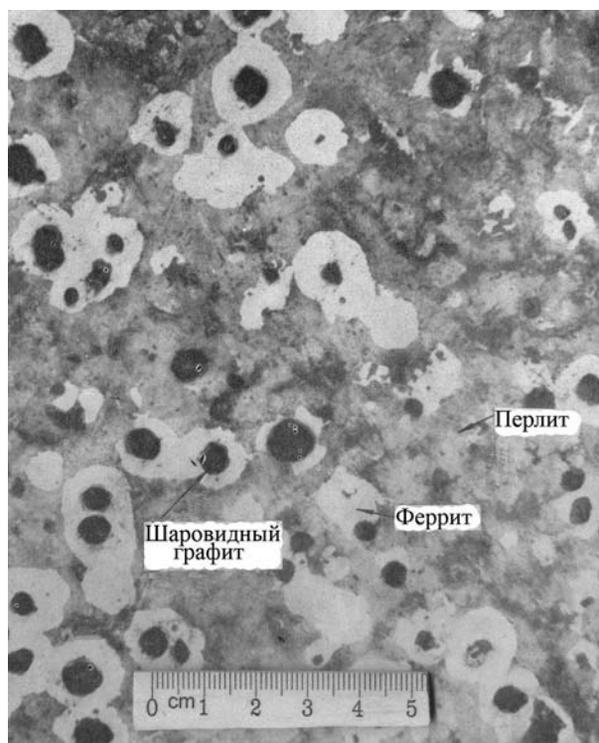


Рисунок 1 — Структура (×200) высокопрочного чугуна по [3]

[5, шкала 6Г] увеличивает его  $\sigma_B$  [6]. Наибольшую прочность и износостойкость обеспечивает перлитная структура металлической основы ВЧ. Отливки из ВЧ широко используют в автостроении, дизелестроении, тяжелом машиностроении, кузнечно-прессовом оборудовании для изготовления коленчатых валов, крышек цилиндров, прокатных валков и других деталей прокатных станов, корпусов насосов, вентилях и т. д. [6].

Но определение марки (временного сопротивления  $\sigma_B$ ) ВЧ по [4] проводят на заготовках-свидетелях по [7]. Измерение  $\sigma_B$  или структуры отливки по [5] требует разрушения отливки и исключает ее дальнейшую эксплуатацию. Актуально использование для оценки  $\sigma_B$  материала отливки параметра, измерение которого не приводит к разрушению отливки. Одним из таких параметров является твердость НВ отливки, измеренная по [8]. Это следствие того, что твердость и прочность чугуна взаимосвязаны [9, 10]. Повышение твердости ВЧ сопровождается ростом прочности, так как изменения  $\sigma_B$  и НВ — следствие изменения степени искаженности кристаллической решетки металлической матрицы сплава. Увеличение массовой доли и степени дисперсности, например, эвтектоидного цементита вызывает и рост твердости, и увеличивает прочность чугуна.

В [8] отмечено, что твердость НВ не переводится точно в другие величины твердости или прочности при растяжении. Но практика позволила обобщить результаты исследований механических свойств и твердости металлов и выразить связи между  $\sigma_B$  и НВ сталей разных классов в виде таблиц [11]. Соотношение между  $\sigma_B$  и НВ высокопрочных чугунов приведено в виде таблиц в [4].

Цель статьи — аналитическое описание диапазона возможного изменения временного сопротивления отливок из высокопрочных чугунов с шаровидным графитом, твердость которых измерена.

Предпосылка решения задачи — полученное в [12] на основании табличных данных [11] аналитическое описание зависимости  $\sigma_B$ (НВ) углеродистых сталей:

$$\sigma_B \approx 3,5307\tau\text{НВ}, \quad (1)$$

где  $\tau = 1$  МПа — размерный множитель.

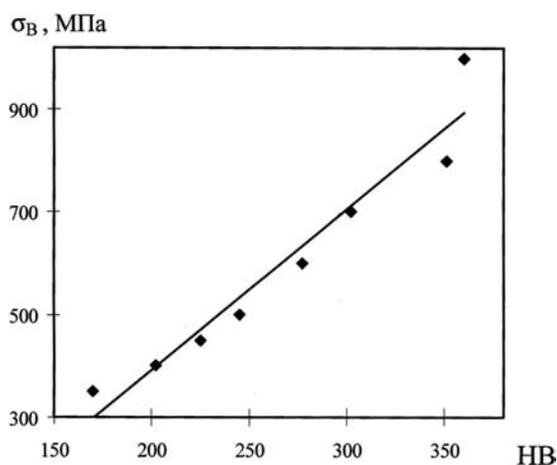
Для установления искомого диапазона возможных значений  $\sigma_B$  высокопрочных чугунов с измеренным значением НВ воспользуемся данными [4] о временном сопротивлении  $\sigma_B$  при растяжении и диапазоне возможного изменения твердости НВ отливок, приведенными в таблице.

На рисунке 2 приведены корреляционные поля между минимальным  $\text{НВ}_{\min}$  и максимальными  $\text{НВ}_{\max}$  значениями твердости НВ высокопрочных чугунов и их минимально допустимым значением временного сопротивления.

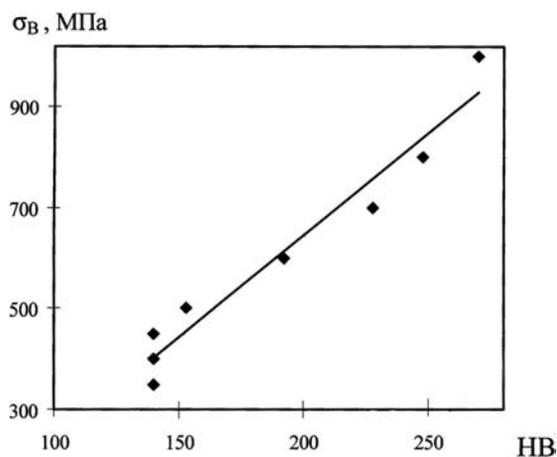
Линии тренда приведенных на рисунке 2 зависимостей имеют вид:

Таблица — Связь между твердостью НВ и временным сопротивлением  $\sigma_B$  ковкого чугуна по [4]

Марка чугуна	НВ <sub>min</sub>	НВ <sub>max</sub>	$\sigma_B$ (МПа), не менее
ВЧ 35	140	170	350
ВЧ 40	140	202	400
ВЧ 45	140	225	450
ВЧ 50	153	245	500
ВЧ 60	192	277	600
ВЧ 70	228	302	700
ВЧ 80	248	351	800
ВЧ 100	270	360	1000



а



б

Рисунок 2 — Корреляционные поля и линии тренда зависимостей между минимальной (а) и максимальной (б) твердостью НВ высокопрочных чугунов и их временным сопротивлением  $\sigma_B$  по данным таблицы

$$\sigma_B \approx \tau(4,04\text{НВ} - 163); \quad (2)$$

$$\sigma_B \approx \tau(3,137\text{НВ} - 236). \quad (3)$$

Достоверность  $R^2$  аппроксимации (квадрат коэффициента  $R$  корреляции) зависимостями (2)

и (3) зависимостей  $\sigma_B(\text{HB})$ , представленных на рисунке 2, составила соответственно 0,95 и 0,94.

Зависимости (2) и (3) должны ограничивать сверху и снизу возможный диапазон изменения временного сопротивления  $\sigma_B$  ВЧ в отливках, твердость HB которых измерена. Для экспериментального обоснования (рисунки 3, 4) и корректировки по его результатам разработанных зависимостей (2) и (3) используем результаты, приведенные в [9, рис.184], а также результаты измерений  $\sigma_B$  и HB на одних и тех же образцах ферритного ВЧ в [13, 14]. В [13, 14] половина образцов прошла термообработку: закалка — нагрев при 920 °С, выдержка 2 часа, охлаждение на воздухе; отпуск — нагрев при 730 °С, выдержка 1 час, охлаждение на воздухе. У другой половины образцов вариации механических свойств получены за счет изменения химического состава, режимов литья и модифицирования при номинальных режимах термической обработки.

Результаты (см. рисунок 3) измерений  $\sigma_B$  и HB высокопрочных чугунов по [9] находятся в диапазоне, ограниченном зависимостями (2) и (3). Но верхний предел зависимости  $\sigma_B(\text{HB})$  ферритного ВЧ по результатам измерений в [13, 14] лежит выше (см. рисунок 4) зависимости  $\sigma_B(\text{HB})$ , рассчитанной по (2). Следовательно, зависимость (2) должна быть скорректирована.

Вспомним, что использованные при ее построении значения  $\sigma_B$  (см. таблицу) по [4] имеют статус «не менее». Этим объясняется то, что часть экспериментальных точек (HB,  $\sigma_B$ ) лежит «выше» зависимости (2). Обратим внимание, что эти экспериментальные точки в координатах (HB,  $\sigma_B$ ) всегда находятся «ниже» зависимости (1), устанавливающей связь между  $\sigma_B$  и HB для углеродистых сталей. Из этого следует, что графитовые включения в высокопрочном чугуне всегда в большей степени снижают его временное сопротивление,

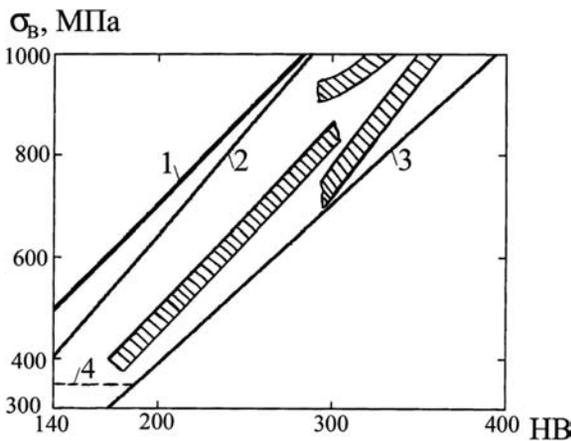


Рисунок 3 — Зависимости  $\sigma_B(\text{HB})$  для разных материалов: 1 — для углеродистых сталей по (1); 2, 3 — зависимости (2) и (3); 4 — минимально возможное значение  $\sigma_B = 350$  МПа высокопрочного чугуна по [4]; заштрихованные области — диапазон возможного изменения значений (HB,  $\sigma_B$ ) высокопрочного чугуна по данным [9]

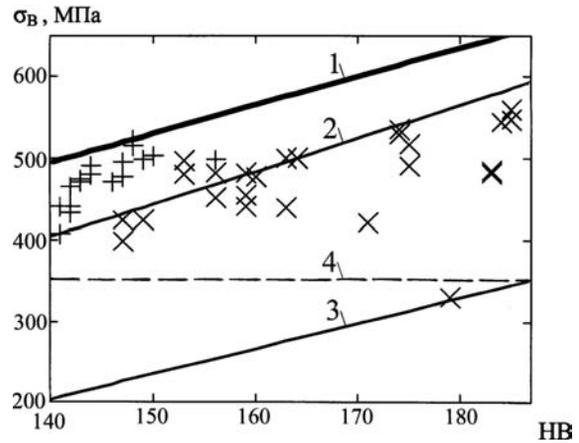


Рисунок 4 — Зависимости  $\sigma_B(\text{HB})$  для разных материалов: 1, 2, 3 — зависимости (1), (2) и (3); 4 — минимально возможное значение  $\sigma_B = 350$  МПа высокопрочного чугуна по [4]; × + — экспериментальные результаты для отливок из ВЧ 45 по [13] и ВЧ 42 по [14] соответственно

чем твердость, по сравнению с углеродистой сталью, имеющей то же соотношение между перлитом и ферритом в своем составе, что и соотношение между ними в металлической матрице чугуна.

На основании соотношения (см. таблицу) между  $\sigma_B$  и HB высокопрочных чугунов «соседних» марок, с учетом экспериментальных данных рисунка 4 и сближения зависимостей  $\sigma_B(\text{HB})$ , рассчитанных по (2) и (1) при увеличении HB (см. рисунок 3), предлагается верхним пределом диапазона изменения  $\sigma_B$  высокопрочных чугунов считать зависимость (1), полученную для углеродистых сталей.

Приведенные на рисунках 3 и 4 экспериментальные результаты подтверждают, что зависимость (3) ограничивает снизу возможный диапазон изменения  $\sigma_B$  высокопрочного чугуна в отливках, твердость HB которых измерена. Но для более точного ограничения этого диапазона используем то, что по [4]  $\sigma_B$  высокопрочных чугунов не может быть меньше (прямые 4 на рисунках 3 и 4) значения

$$\sigma_B = 350 \text{ МПа.} \quad (4)$$

Равенство значений  $\sigma_B$ , рассчитанных по (3) и (4), имеет место при  $\text{HB} \approx 187$ .

Следовательно, нижняя граница возможного диапазона изменения  $\sigma_B$  высокопрочных чугунов с измеренным значением твердости  $\text{HB} < 187$  ограничивается прямой (4), а при  $\text{HB} \geq 187$  — прямой (3).

Отметим, что  $\sigma_B = 329$  МПа (при твердости 179 HB) одного из образцов плавки № 18 в [13, таблица 1] не соответствует не только заявленной марке ВЧ 45, но и возможному по [4] нижнему пределу  $\sigma_B = 350$  МПа высокопрочного чугуна (см. рисунок 4). По-видимому, указанный образец имел в значительной степени структуру не высокопрочного, а серого (с пластинчатой формой графитовых включений) чугуна. Подтверждением этого служит и anomalно низкое значение (2 %)

относительного удлинения  $\delta$  этого образца по сравнению с  $\delta = 5 \div 16\%$  у других образцов в [13, таблица 1].

Результат позволяет оценить марку ВЧ по результату измерения его твердости НВ. Например, при твердости отливки 150 НВ ее материал может соответствовать маркам ВЧ 35–ВЧ 45, а при 300 НВ — маркам ВЧ 80–ВЧ 100.

**Закключение.** В результате проведенного анализа установлено, что временное сопротивление  $\sigma_B$  отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ВЧ), твердость НВ которых измерена, может изменяться в пределах следующего диапазона:

- для НВ < 187:

$$350 \leq \sigma_B, \text{ МПа} < 3,5307\text{НВ}; \quad (5)$$

- для НВ  $\geq$  187:

$$3,137\text{НВ} - 236 \leq \sigma_B, \text{ МПа} < 3,5307\text{НВ}. \quad (6)$$

При этом графитовые включения в ВЧ всегда в большей степени снижают его временное сопротивление, чем твердость, по сравнению углеродистой сталью, имеющей то же соотношение между перлитом и ферритом в своей структуре, что и соотношение между ними в металлической матрице чугуна.

Относительно широкий по сравнению со сталью диапазон возможного изменения  $\sigma_B$  отливок из ВЧ с измеренной твердостью НВ обусловлен возможной вариацией форм, размеров, количества и распределения шаровидных графитовых включений (см. [5, шкала 3]) в высокопрочном чугуне.

Полученный результат может быть использован для определения без разрушения отливки гарантированной величины и возможного диапазона изменения ее временного сопротивления

в случаях, когда информации о свойствах образцов-свидетелей нет.

#### Список литературы

1. Бубликов, В.Б. Высокопрочному чугуна — 60: обзор / В.Б. Бубликов // Литейное производство. — 2008. — № 11. — С. 2–8.
2. Горшков, А.А. О механизме образования шаровидного графита / А.А. Горшков // Литейное производство. — 1955. — № 3. — С. 17–21.
3. Болохвитинов, Н.Ф. Атлас макро- и микроструктур металлов и сплавов / Н.Ф. Болохвитинов, Е.Н. Болохвитинова. — 2-е изд., доп. и перераб. — М.: МАШГИЗ, 1959. — 88 с.
4. Чугун с шаровидным графитом для отливок. Марки: ГОСТ 7293-85. — Введ. 01.01.87. — М.: Изд-во стандартов, 1989. — 7 с.
5. Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры: ГОСТ 3443-87. — Введ. 01.07.88. — М.: Стандартиформ, 2005. — 42 с.
6. Лахтин, Ю.М. Материаловедение: учебник для машиностроительных вузов / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. — 2-е изд., доп. и перераб. — М.: Машиностроение, 1980. — 493 с.
7. Отливки из чугуна. Методы механических испытаний: ГОСТ 27208-87. — Введ. 01.01.88. — М.: Изд-во стандартов, 1987. — 12 с.
8. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю: ГОСТ 9012-59. — Взамен ОСТ 10241-40. — Введ. 01.01.60. — М.: Изд-во стандартов, 1984. — 110 с.
9. Гиршович, Н.Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках // Н.Г. Гиршович. — М.—Л.: Машиностроение, 1966. — 562 с.
10. Худокормов, Д.Н. Производство отливок из чугуна: учеб. пособие для вузов по спец. «Литейное пр-во черных и цветных металлов и сплавов» // Д.Н. Худокормов — Минск: Выш. школа, 1987. — 298 с.
11. Металловедение и термическая обработка стали: справ. в 3 т. / под ред. М.Л. Берштейна, А.Г. Рахштадта. — 4-е изд., доп. и перераб. — М.: Металлургия, 1991. — Т. 1. Методы испытаний и исследования: в 2 кн.
12. Сандомирский, С.Г. Анализ связи коэрцитивной силы с временным сопротивлением углеродистых сталей / С.Г. Сандомирский // Сталь. — 2016. — № 9. — С. 62–65.
13. Исследование возможности контроля механических свойств чугуна ВЧ45-5 магнитоупругоакустическим методом / Л.С. Правдин [и др.] // Дефектоскопия. — 1989. — № 1. — С. 34–42.
14. О возможности контроля механических свойств высокопрочного чугуна магнитоупругоакустическим способом / В.А. Бурцева [и др.] // Дефектоскопия. — 1987. — № 2. — С. 10–17.

SANDOMIRSKII Sergei G., D. Sc. in Eng., Assoc. Prof.

Head of the Laboratory of Metallurgy in Mechanical Engineering<sup>1</sup>

E-mail: sand@iaph.bas-net.by

SANDOMIRSKAYA Elena G.

Researcher<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 26 April 2017.

## EVALUATION OF THE RANGE OF POSSIBLE CHANGES IN THE STRENGTH OF SPHEROIDAL GRAPHITE CAST IRON CASTINGS FOR BRINELL HARDNESS

*The analysis of the range of changes in the strength  $\sigma_B$  of spheroidal graphite cast iron (SGCI) is made. An analytical description of the range of variation  $\sigma_B$  as a function for Brinell hardness HB is developed. It is shown that graphite*

inclusions in SGCI always reduce its  $\sigma_B$  to a greater extent than HB in comparison with carbon steel. The result is intended to determine the guaranteed size and range of possible changes  $\sigma_B$  in the casting of SGCI without destroying it.

**Keywords:** cast iron, mechanical properties, strength, hardness

## References

1. Bublikov V.B. Vysokoprochnomu chugunu — 60\* (obzor) [Spheroidal graphite iron — 60\* (review)]. *Litejnoe proizvodstvo* [Foundry], 2008, no. 11, pp. 2–8.
2. Gorshkov A.A. O mehanizme obrazovanija sharovidnogo grafita [On the mechanism of formation of spherical graphite]. *Litejnoe proizvodstvo* [Foundry], 1955, no. 3, pp. 17–21.
3. Bolohvitinov N.F., Bolohvitinova E.N. *Atlas makro- i mikrostruktur metallov i splavov* [Atlas of macro- and microstructures of metals and alloys]. Moscow, MASHGIZ, 1959. 88 p.
4. GOST 7293-85. *Chugun s sharovidnym grafitom dlja otlivok. Marki* [State Standart 7293-85. Spheroidal graphite iron for casting. Grades]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1989. 7 p.
5. GOST 3443-87. *Otlivki iz chuguna s razlichnoj formoj grafita. Metody opredelenija struktury* [State Standart 3443-87. Cast iron casting with graphite of different form. Methods of structure determination]. Moscow, Standartinform, 2005. 42 p.
6. Lahtin Ju.M., Leonteva V.P. *Materialovedenie: Uchebnik dlja mashinostroitelnyh vuzov* [Material Science: A Textbook for Engineering Universities]. Moscow, Mashinostroenie, 1980. 493 p.
7. GOST 27208-87. *Otlivki iz chuguna. Metody mehanicheskikh ispytanij* [State Standart 27208-87. Cast iron casting. Methods of mechanical testing]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1987. 12 p.
8. GOST 9012-59. *Metally. Metod izmerenija tverdosti po Brinellju* [State Standart 9012-59. Metals. Method of Brinell hardness measurement]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1984. 110 p.
9. Girshovich N.G. *Kristallizacija i svojstva chuguna v otlivkah* [Crystallization and properties of cast iron in castings]. Moscow–Leningrad, Mashinostroenie, 1966. 562 p.
10. Hudokormov D.N. *Proizvodstvo otlivok iz chuguna: ucheb. posobie dlja vuzov po specialnosti "Litejnoe proizvodstvo chernyh i cvetnyh metallov i splavov"* [Production of castings from cast iron: training. Manual for universities on the specialty "Foundry of ferrous and non-ferrous metals and alloys"]. Minsk, Vyshhejschaja shkola, 1987. 298 p.
11. Bershtejn M. L., Rahshtadt A.G. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka stali: spravochnik* [Metal Science and Heat Treatment of Steel: a Handbook]. Moscow, Metallurgija, 1991.
12. Sandomirskij S.G. Analiz svjazi koercitivnoj sily s vremennym soprotivleniem uglerodistyh stalej [Coercive Force and Strength of Carbon Steel]. *Stal* [Steel], 2016, no. 9, pp. 62–65.
13. Pravdin L.S., Sherbinin V.E., Burceva V.A., Yakovlev S.G. Issledovanie vozmozhnosti kontrolja mehanicheskikh svojstv chuguna VCh45-5 magnitoprugoakusticheskim metodom [Investigation of the possibility of controlling the mechanical properties of Spheroidal graphite iron 45-5 magnetoelastic-acoustic method]. *Defektoskopija* [Defectoscopy], 1989, no. 1, pp. 34–42.
14. Burceva V.A., Pravdin L.S., Sherbinin V.E., Yakovlev S.G. O vozmozhnosti kontrolja mehanicheskikh svojstv vysokoprochnogo chuguna magnitoprugoakusticheskim sposobom [On the possibility of controlling the mechanical properties of Spheroidal graphite iron casting by magnetoelastic-acoustic method]. *Defektoskopija* [Defectoscopy], 1987, no. 2, pp. 10–17.