



УДК 620.178.1

Поступила 14.04.2017

ОЦЕНКА ДИАПАЗОНОВ ВОЗМОЖНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ВРЕМЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЧУГУНОВ С ПЛАСТИНЧАТЫМ И ХЛОПЬЕВИДНЫМ ГРАФИТОМ ПО ИХ ТВЕРДОСТИ

ASSESSMENT OF RANGES OF POSSIBLE CHANGE OF TEMPORARY RESISTANCE OF CAST IRON WITH LAMELLAR AND FLAKED GRAPHITE ON THEIR HARDNESS

С. Г. САНДОМИРСКИЙ, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
ул. Академическая, 12. E-mail: sand@iaph.bas-net.by

S. G. SANDOMIRSKII, Joint Institute of Mechanical Engineering of National Academy of Sciences of
Belarus, Minsk, Belarus, 12, Akademicheskaya str. E-mail: sand@iaph.bas-net.by

Проведен анализ диапазонов возможного изменения временного сопротивления σ_B отливок из ковкого и серого чугунов. Разработано аналитическое описание диапазонов изменения σ_B в зависимости от твердости HB отливки. Показано, что широкий по сравнению со сталью диапазон изменения σ_B чугуновых отливок с измеренной твердостью HB обусловлен вариацией форм и размеров графитовых включений у рассмотренных классов чугунов и влиянием толщины стенки отливки из серого чугуна на зависимость σ_B (HB). Результат предназначен для определения гарантированной величины σ_B отливки без ее разрушения в случаях, когда нет информации о σ_B образцов-свидетелей.

The analysis of ranges of possible change of temporary resistance of σ_B of castings from ductile and gray cast iron is carried out. The analytical description of ranges of change of σ_B depending on casting BH hardness is developed. It is shown that the range of change of σ_B of pig-iron castings, wider in comparison with steel, with the measured hardness of BH is caused variations of forms and the amount of graphite inclusions at the considered classes of cast iron and influence of thickness of a wall of casting from gray cast iron on dependence of σ_B (HB). The result is intended for determination of the guaranteed casting size σ_B without her destruction, when there is no information on σ_B of check test pieces.

Ключевые слова. Чугун, механические свойства, временное сопротивление, твердость.

Keywords. Cast iron, mechanical properties, ultimate resistance, strength, hardness.

Чугун наряду со сталью является основным материалом в машиностроении и металлургии. Во многом это связано с технологичностью чугуна, низкой стоимостью, высокими литейными свойствами и хорошей жидкотекучестью, небольшой усадкой, малой склонностью к образованию трещин. Можно отметить и хорошую обрабатываемость чугуна, высокую коррозионную стойкость, малую чувствительность к надразам. Вместе с тем, не высокие механические свойства ведут к увеличению материалоемкости изделий. Низкая прочность при растяжении обусловлена прежде всего неблагоприятной формой графита. В наибольшей степени это относится к широко используемому в промышленности чугуну с пластинчатой формой графитовых включений (рис. 1, а), название которого «Серый чугун» (по характерному цвету излома) закреплено в ГОСТ 1412-85 «Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки». Условное обозначение марки включает буквы СЧ (серый чугун) и цифровое обозначение величины минимального временного сопротивления при растяжении в МПа $\cdot 10^{-1}$. Для изготовления отливок предусмотрены следующие марки чугуна: СЧ10, СЧ15, СЧ18, СЧ20, СЧ21, СЧ24, СЧ25, СЧ30, СЧ35. Прочность серого чугуна наряду с формой графитовых включений определяется структурой его металлической основы и характеризуется временным сопротивлением (пределом прочности) σ_B .

Увеличение доли перлита (рис. 1, а) по сравнению с долей феррита в металлической основе серого чугуна повышает его σ_B . Наибольшую прочность и износостойкость обеспечивает перлитная структура металлической основы СЧ. Серые чугуны по свойствам и применению разделяют [2] на ферритные и ферритно-перлитные чугуны (до марки СЧ20) и перлитные чугуны (марка СЧ21 и выше). Первые при-

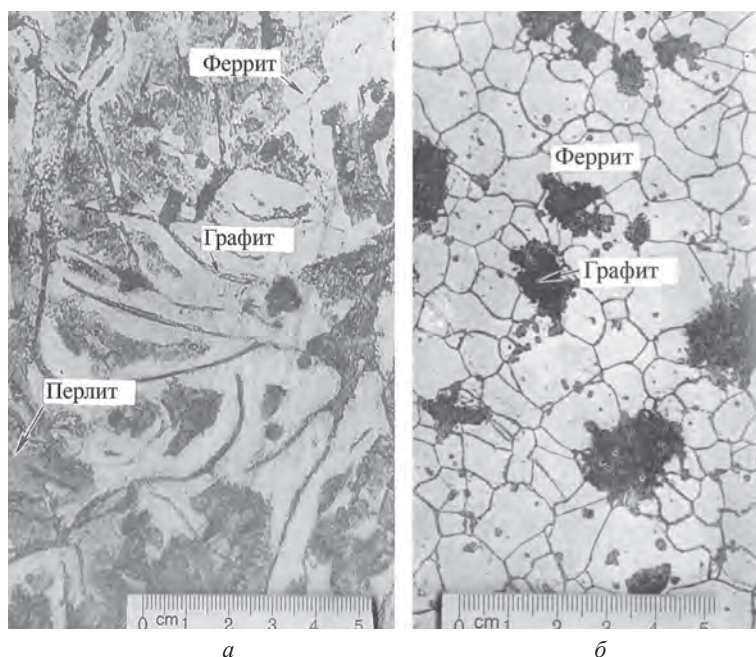


Рис. 1. Структура серого (а, $\times 200$) и ковкого (б, $\times 250$) чугунов по [1]

меняют для изготовления малоответственных деталей, испытывающих небольшие нагрузки (строительных колонн, фундаментных плит, арматуры, литых малонагруженных деталей станков, тракторов, автомобилей), вторые – для отливки станин мощных станков и механизмов, поршней, цилиндров, деталей, работающих на износ в условиях больших давлений.

Для повышения временного сопротивления чугуна создают более компактную форму графитовых включений в нем. Одним из путей этого является длительный двухстадийный отжиг отливок из белого чугуна [2]. Образующийся при таком отжиге графит в чугуне имеет компактную хлопьевидную форму (рис. 1, б). В соответствии с ГОСТ 1215-79 «Отливки из ковкого чугуна. Общие технические условия» такой чугун получил название ковкого. Его маркируют буквами КЧ и цифрами, первые из которых, как и у серого чугуна, указывают предел прочности при растяжении (в МПа), а вторые – относительное удлинение (в%) (у серых чугунов относительное удлинение практически равно нулю). По ГОСТ 1215-79 выпускают ковкие чугуны марок КЧ30-6, КЧ33-8, КЧ35-10, КЧ37-12, КЧ45-7, КЧ50-5, КЧ55-4, КЧ60-3, КЧ65-3, КЧ70-2, КЧ80-1,5. Ферритные ковкие чугуны КЧ35-10 и КЧ37-12 используют [2] в деталях, эксплуатируемых при высоких динамических и статических нагрузках (картеры редукторов, ступицы крюки, скобы), а КЧ30-6 и КЧ33-8 – в менее ответственных деталях (гайки, глушители, фланцы, муфты). Перлитные ковкие чугуны КЧ50-5, КЧ55-4, КЧ60-3, КЧ65-3 обладают высокой прочностью, умеренной пластичностью и хорошими антифрикционными свойствами. Из них изготавливают вилки карданных валов, звенья и ролики конвейеров, втулки, муфты, тормозные колодки.

Но определение марки (временного сопротивления) чугунов по ГОСТ 1412-85 и ГОСТ 1215-79 проводят на заготовках-свидетелях по ГОСТ 27208-87 «Отливки из чугуна. Методы механических испытаний». Непосредственное измерение σ_B или структуры отливки по ГОСТ 3443-87 «Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры» требует разрушения отливки и исключает ее дальнейшую эксплуатацию. Актуально использование для оценки σ_B материала отливки параметра, измерение которого не приводит к разрушению отливки. Одним из таких параметров является твердость НВ отливки, измеренная по ГОСТ 9012-59 «Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю». Это следствие того, что твердость и прочность чугуна взаимосвязаны [3, 4]. Повышение твердости и серых, и ковких чугунов сопровождается ростом прочности (для каждого из типов чугунов – по своим закономерностям в силу разной формы графитовых включений), так как изменения σ_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 ГОСТ 9012-59 отмечено, что твердость по Бринеллю не переводится точно в другие величины твердости или прочности при растяжении. Но практика позволила обобщить экспериментальные исследова-

ния механических свойств и твердости металлов и выразить связи между σ_B и HB сталей разных классов в виде таблиц [5]. Соотношение между σ_B и HB ковких и серых чугунов приведено в ГОСТ 1215-79 и ГОСТ 1412-85 в виде таблиц (в ГОСТ 1412-85 – для отливок из серых чугунов с разной толщиной стенки).

Цель статьи – аналитическое описание диапазона возможного изменения временного сопротивления отливок из серого и ковкого чугунов, твердость которых измерена.

Предпосылка решения задачи – полученное в [6] на основании табличных данных [5] аналитическое описание зависимости σ_B (HB) для углеродистых сталей:

$$\sigma_B \approx 3,5307\tau HB, \quad (1)$$

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

Зависимость (1) является верхней (заведомо не достижимой) границей диапазона значений σ_B чугунов с измеренным значением HB.

Для установления искомого диапазона возможных значений σ_B ковких чугунов с измеренным значением HB воспользуемся данными (ГОСТ 1215-79, табл. 1) о временном сопротивлении при растяжении и диапазоне возможного изменения твердости отливок, приведенными в таблице.

Связь между твердостью HB и временным сопротивлением σ_B ковкого чугуна по ГОСТ 1215-79

Марка чугуна	HB _{min}	HB _{max}	σ_B МПа, не менее
КЧ30-6	100	163	294
КЧ33-8	100	163	323
КЧ35-10	100	163	333
КЧ37-12	110	163	362
КЧ45-7	150	207	441
КЧ50-5	170	230	490
КЧ55-4	192	241	539
КЧ60-3	200	269	588
КЧ65-3	212	269	637
КЧ70-2	241	285	686
КЧ80-1,5	270	320	784

На рис. 2 приведены корреляционные поля между минимальным и максимальными значениями твердости HB ковких чугунов и их минимально допустимым значением временного сопротивления.

Линии тренда приведенных на рис. 2 зависимостей имеют вид

$$\sigma_B \approx \tau(2,682HB + 48), \quad (2)$$

$$\sigma_B \approx \tau(2,843HB - 141). \quad (3)$$

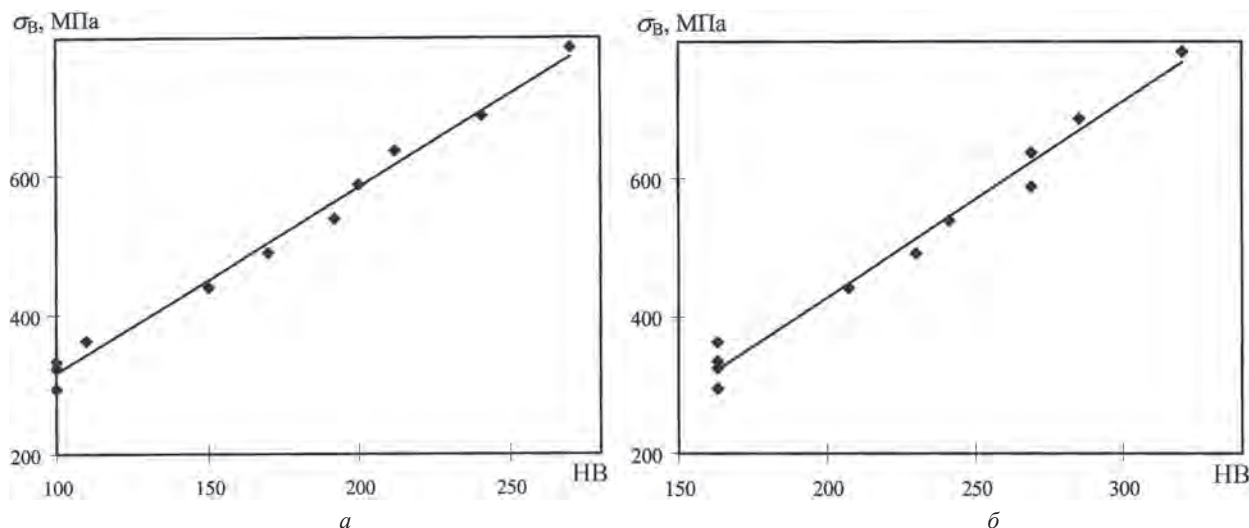


Рис. 2. Корреляционные поля и линии тренда зависимостей между минимальной (а) и максимальной (б) твердостью HB ковких чугунов и их временным сопротивлением σ_B по данным таблицы

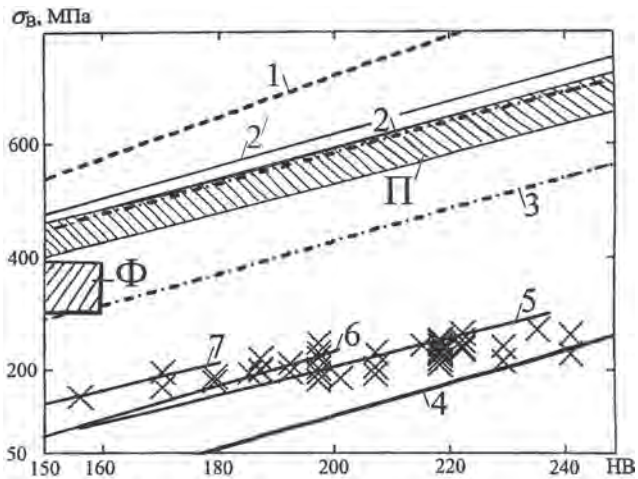


Рис. 3. Зависимость $\sigma_B(НВ)$ для разных материалов: 1 – для углеродистых сталей в соответствии с (1); 2, 2', 3 – зависимости (2), (2'), (3), ограничивающие возможный диапазон изменения временного сопротивления σ_B ковких чугунов, твердость НВ которых измерена; 4 – зависимость (4), ограничивающая снизу возможный диапазон изменения σ_B серых чугунов, твердость НВ которых измерена; 5–7 – зависимости (5)–(7), ограничивающие снизу возможный диапазон изменения σ_B отливок с толщиной стенки соответственно 50, 80 и 150 мм из серых чугунов, твердость НВ которых измерена; × – экспериментальные результаты для отливок из СЧ15 по [7]. Заштрихованные области – диапазон возможного изменения значений функции $\sigma_B(НВ)$ ферритного (Φ) и перлитного (Π) ковкого чугуна по данным [3]

Достоверность R^2 аппроксимации (квадрат коэффициента R корреляции) зависимостями (2) и (3) зависимостей $\sigma_B(НВ)$, представленных на рис. 2, составила соответственно 0,99 и 0,98. На рис. 3 зависимости (1)–(3) показаны соответственно прямыми 1, 2 и 3.

Зависимость (2) должна ограничивать сверху возможный диапазон изменения временного сопротивления σ_B ковкого чугуна в отливках, твердость НВ которых измерена. Но вспомним, что использованные при ее построении значения σ_B (см. таблицу) по ГОСТ 1215-79 имеют статус «не менее». Этим объясняется то, что верхний предел зависимости $\sigma_B(НВ)$ перлитного ковкого чугуна по [3, рис.184] лежит несколько выше (рис. 3) зависимости $\sigma_B(НВ)$, рассчитанной по (2) (значения функции $\sigma_B(НВ)$ ферритного ковкого чугуна по [3] находятся между зависимостями (2) и (3) на рис. 3). Следовательно, зависимость (2) должна быть скорректирована. На основании соотношения (см. таблицу) между σ_B и НВ ковких чугунов «соседних» марок и с учетом экспериментальных данных [3] предлагается следующая корректировка зависимости (2):

$$\sigma_B \approx \tau(2,8 \text{ НВ} + 60). \quad (2')$$

На рис. 3 зависимость (2') показана прямой 2'.

Зависимость (3) ограничивает снизу возможный диапазон изменения временного сопротивления σ_B ковкого чугуна в отливках, твердость НВ которых измерена. Одновременно можно считать, что зависимость (3) ограничивает сверху возможный диапазон изменения временного сопротивления материала отливок из серого чугуна, твердость которых измерена: она близка к верхней границе возможного диапазона изменения зависимости $\sigma_B(НВ)$ серых чугунов по данным [3, рис. 184] измерений «разных исследователей».

Для установления нижней границы искомого диапазона возможных значений σ_B серых чугунов с измеренным значением НВ воспользуемся данными (ГОСТ 1412-85, Приложение 1) о временном сопротивлении при растяжении и твердости в стенках отливок разного сечения, приведенными на рис. 4.

Из рисунка видно, что для отливок с $4 \leq h, \text{ мм} \leq 30$ зависимости $\sigma_B(НВ)$ практически не различаются. Корреляционное поле зависимости между σ_B и НВ для таких отливок приведено на рис.5.

Линия тренда приведенной на рис.5 зависимости имеет вид

$$\sigma_B \approx \tau(2,91 \text{ НВ} - 465). \quad (4)$$

Достоверность R^2 аппроксимации зависимостью (4) зависимости $\sigma_B(НВ)$, представленной на рис. 5, составила 0,986. На рис. 3 зависимость (4) изображена прямой 4.

Зависимости $\sigma_B(НВ)$ для отливок из серого чугуна с толщиной стенки 50, 80 и 150 мм, приведенные на рис. 4, при статистической обработке могут быть охарактеризованы соответственно линиями тренда:

$$\sigma_B \approx \tau(2,53 \text{ НВ} - 301), \quad (5)$$

$$\sigma_B \approx \tau(3 \text{ НВ} - 366), \quad (6)$$

$$\sigma_B \approx \tau(2,52 \text{ НВ} - 241). \quad (7)$$

Достоверности R^2 аппроксимации зависимостями (5)–(7) соответствующих зависимостей $\sigma_B(НВ)$, представленных на рис.4, составили соответственно 0,942, 0,95 и 0,987. На рис. 3 зависимости (5)–(7) в диапазонах их изменения в соответствии с ГОСТ 1412-85 изображены отрезками 5–7.

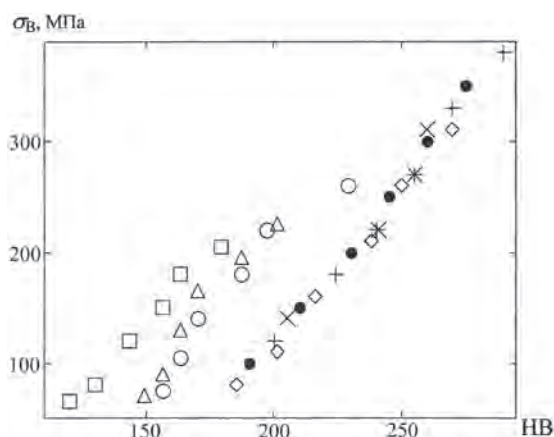


Рис. 4. Зависимость минимальной величины σ_B отливок из серых чугунов с разной толщиной h стенки от их НВ по данным ГОСТ 1412-85: \times – для $h = 4$ мм; $+$ – для $h = 8$ мм; \bullet – для $h = 15$ мм; \diamond – для $h = 30$ мм; o – для $h = 50$ мм; Δ – для $h = 80$ мм; \square – для $h = 150$ мм

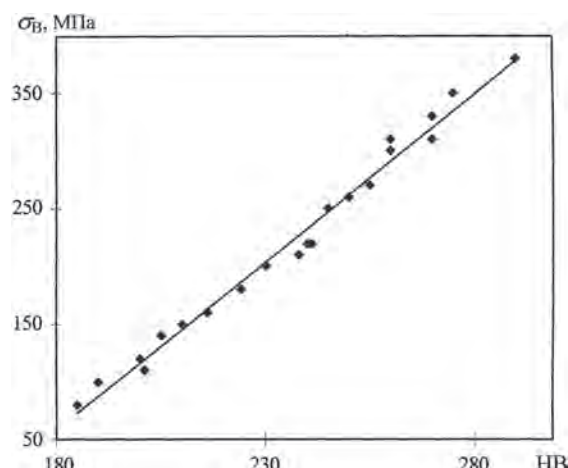


Рис. 5. Корреляционное поле и линия тренда зависимости между твердостью НВ серых чугунов и минимальной величиной их временного сопротивления σ_B при $4 \leq h, \text{ мм} \leq 30$ по данным ГОСТ 1412-85

Анализ рис. 3 показывает, что отрезки 5–7 лежат выше прямой 4. Следовательно, зависимость (4) определяет нижний предел возможного значения σ_B отливок из серого чугуна, твердость НВ которых измерена. Это подтверждают и приведенные на рис.3 экспериментальные результаты измерения НВ и σ_B отливок из серого чугуна СЧ15, проведенные в [7]. Временное сопротивление σ_B и твердость НВ образцов в [7] определяли по стандартным методикам. Разрывные пробы имели диаметр 30 мм. Экспериментальные точки, приведенные на рис.3, получены позиционированием экспериментальных точек в [7, рис. 3]. При этом все экспериментальные точки (НВ, σ_B) лежат выше прямой 4 и ниже прямой 3.

Выводы

В результате проведенного анализа установлено, что временное сопротивление σ_B отливок из ковкого и серого чугунов, твердость НВ которых измерена, может изменяться в пределах следующих диапазонов:

для ковкого чугуна:

$$2,843\text{НВ} - 141 < \sigma_B, \text{ МПа} < 2,8\text{НВ} + 60, \quad (8)$$

для серого чугуна:

$$2,91\text{НВ} - 465 < \sigma_B, \text{ МПа} < 2,843\text{НВ} - 141. \quad (9)$$

Относительно широкий по сравнению со сталью диапазон возможного изменения σ_B чугунных отливок с измеренной твердостью НВ обусловлен, в частности, возможной вариацией форм и размеров графитовых включений (см., например, [1, фиг. 37, а, б]) в пределах рассмотренных классов чугунов. Для серых чугунов широкий диапазон изменения σ_B отливок с измеренной твердостью НВ обусловлен также и влиянием толщины стенки отливки на зависимость $\sigma_B(\text{НВ})$ в соответствии с ГОСТ 1412-85, Приложение 1.

Полученный результат может быть использован для определения без разрушения отливки гарантированной величины ее временного сопротивления в тех случаях, когда информации о свойствах образцов-свидетелей нет.

Литература

1. **Болохвитинов Н. Ф.** Атлас макро- и микроструктур металлов и сплавов / Н. Ф. Болохвитинов, Е. Н. Болохвитинова. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: МАШГИЗ, 1959. 88 с.
2. **Лахтин Ю. М.** Металловедение: учеб. для машиностроительных вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1980. 493 с.
3. **Гиршович Н. Г.** Кристаллизация и свойства чугуна в отливках / Н. Г. Гиршович. М.; Л.: Машиностроение, 1966. 562 с.
4. **Худокормов Д. Н.** Производство отливок из чугуна: учеб. пособ. для вузов / Д. Н. Худокормов. Мн.: Выш. шк., 1987. 298 с.
5. **Металловедение и термическая обработка стали:** справ. В 3-х т. / Под ред. М. Л. Берштейна, А. Г. Рахштадта. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1991. Т. 1. Методы испытаний и исследования.
6. **Сандомирский С. Г.** Анализ связи коэрцитивной силы с временным сопротивлением углеродистых сталей / С. Г. Сандомирский // Сталь. 2016. № 9. С. 62–65.

7. **Воронкова Л. В.** Определение прочности чугуна ультразвуковым методом / Л. В. Воронкова // Контроль. Диагностика. 2011. № 12. С. 62–64.

References

1. **Bolohvitinov N. F., Bolohvitinova E. N.** *Atlas makro- i mikrostruktur metallov i splavov* [The atlas macro- and microstructures of metals and alloys]. Moscow, MASHGIZ Publ., 1959. 88 p.
2. **Lahtin Ju. M., Leont'eva V. P.** *Materialovedenie: Uchebnik dlja mashinostroitel'nyh vuzov* [Materials science: The textbook for machine-building higher education institutions]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980, 493 p.
3. **Girshovich N. G.** *Kristallizacija i svojstva chuguna v otlivkah* [Crystallization and properties of cast iron in castings]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1966. 562 p.
4. **Hudokormov D. N.** *Proizvodstvo otlivok iz chuguna* [Production of castings from cast iron]. Minsk, Vyshhejschaja shkola Publ., 1987. 298 p.
5. **Bershtejn M. L., Rahshtadt A. G.** *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka stali* [The metallurgical science and heat treatment became]. Moscow, Metallurgija Publ., 1991.
6. **Sandomirskij S. G.** Analiz svjazi kojercitivnoj sily s vremennym soprotivleniem uglerodistyh stalej [The analysis of communication of coercive force with a temporary resistance carbonaceous staly]. *Stal' = Steel*, 2016, no. 9, pp. 62–65.
7. **Voronkova L. V.** Opredelenie prochnosti chuguna ul'trazvukovym metodom [Determination of durability of cast iron by an ultrasonic method]. *Kontrol'. Diagnostika = Control. Diagnostics*, 2011, no. 12, pp. 62–64.