

УДК 620.179.14

Поступила 06.09.2017

ОЦЕНКА ДИАПАЗОНОВ ИЗМЕНЕНИЯ ВРЕМЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЧУГУНОВ ПО ТВЕРДОСТИ

EVALUATION OF THE RANGES OF CHANGES IN THE TENSILE STRENGTH OF CAST IRON CASTINGS BY HARDNESS

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

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

Проведен анализ диапазона изменения временного сопротивления σ_B отливок из серого, ковкого и высокопрочного чугунов. Разработано аналитическое описание диапазона изменения σ_B в зависимости от твердости HB отливки. Результат предназначен для определения гарантированной величины и диапазона возможного изменения σ_B отливки без ее разрушения, если нет информации о σ_B образцов-свидетелей.

The analysis of the range of changes in the tensile strength σ_B of castings from grey iron, malleable cast iron and ductile cast iron was made. Analytical description of the range of variation σ_B as a function for Brinell hardness HB is developed. The result is intended to determine the guaranteed size and range of possible changes σ_B in the foundry cast iron without destroying it if the information of σ_B of check test piece is missing.

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

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

Чугун наряду со сталью является основным материалом в машиностроении и металлургии. Во многом это связано с его технологичностью, низкой стоимостью, высокими литейными свойствами и небольшой усадкой, хорошей обрабатываемостью, коррозионной стойкостью, малой склонностью к образованию трещин, малой чувствительностью к надрезам. Но не высокие механические свойства ведут к материалоемкости чугунных изделий. Низкое временное сопротивление (предел прочности) σ_B при растяжении обусловлено прежде всего неблагоприятной формой графита. В наибольшей степени это относится к чугунам с пластинчатой формой графитовых включений, название которого (по цвету излома) «Серый чугун» закреплено в ГОСТ 1412-85 «Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки». Обозначение марки включает буквы СЧ и цифровое обозначение минимального σ_B в МПа·10⁻¹. Для отливок предусмотрены следующие марки чугуна: СЧ10, СЧ15, СЧ18, СЧ20, СЧ21, СЧ24, СЧ25, СЧ30, СЧ35.

Для повышения σ_B чугуна создают компактную форму графитовых включений в нем. Один из путей этого – длительный отжиг отливок из белого чугуна. После такого отжига графит в чугуне имеет хлопьевидную форму. По 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 σ_B при растяжении (кгс/мм²), а вторые – относительное удлинение δ в % (у серых чугунов $\delta \approx 0$). 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 в деталях, эксплуатируемых при высоких динамических и статических нагрузках (картеры редукторов, ступицы, крюки), а КЧ30-6 и КЧ33-8 – в менее ответственных деталях. 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.

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом получают модифицированием жидкого чугуна небольшими добавками ряда элементов. Марку высокопрочного чугуна обозначают буквами ВЧ и минимальным значением σ_B в МПа·10⁻¹. Для отливок используют следующие марки чугуна (ГОСТ 7293-85): ВЧ35, ВЧ40, ВЧ45, ВЧ50, ВЧ60, ВЧ70, ВЧ80, ВЧ100. Шаровидный графит 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.

Увеличение доли перлита за счет доли феррита в металлической основе чугунов увеличивает его σ_B . Наибольшую прочность и износостойкость обеспечивает перлитная структура металлической основы чугунов.

Определение марки (σ_B) чугунов по ГОСТ 1412-85, 1215-79 и 7293-85 проводят на заготовках-свидетелях по ГОСТ 27208-87 «Отливки из чугуна. Методы механических испытаний». Но измерение σ_B или структуры отливки по ГОСТ 3443-87 «Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры» требует разрушения отливки, исключает ее дальнейшую эксплуатацию. Актуально использование для оценки σ_B материала отливки параметра, измерение которого не разрушает отливку. Одним из таких параметров является твердость НВ отливки, измеренная по ГОСТ 9012-59 «Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю». Это – следствие связи твердости и прочности чугуна [1]. Повышение твердости серых, ковких и высокопрочных чугунов сопровождается ростом прочности (для каждого типа чугуна – по своим закономерностям в силу разной формы графитовых включений), так как изменения и σ_B , и НВ – следствие изменения искаженности кристаллической решетки металлической матрицы сплава.

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 исследования σ_B и твердости НВ сталей разных классов и выразить связи между ними в виде таблиц [1]. В виде таблиц в ГОСТ 1215-79, 1412-85 и 7293-85 выражена и связь между σ_B и НВ ковких, серых и высокопрочных чугунов.

Цель доклада – аналитическое описание диапазонов возможного изменения временного сопротивления отливок из серого, ковкого и высокопрочного чугунов, твердость которых измерена.

Предпосылка решения задачи – полученное в [2] на основании табличных данных [1] аналитическое описание зависимости σ_B (НВ) для углеродистых сталей (где $\tau = 1$ МПа – размерный множитель):

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

Зависимость (1) – заведомо не достижимая верхняя граница значений σ_B ковкого и высокопрочного чугунов с измеренным значением НВ.

Для установления искомого диапазона возможных значений σ_B ковких чугунов с измеренным значением НВ в [3, 4] использованы данные [ГОСТ 1215-79, табл. 1] о временном сопротивлении при растяжении и диапазоне возможного изменения твердости отливок, приведенные в табл. 1.

Таблица 1. Связь между твердостью НВ и временным сопротивлением σ_B ковкого чугуна по ГОСТ 1215-79

Марка чугуна	НВ _{min}	НВ _{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

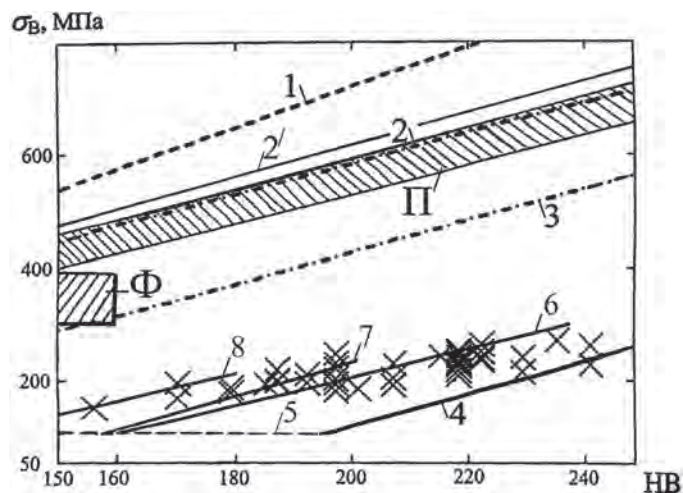


Рис. 1. Зависимости $\sigma_B(\text{НВ})$ для разных материалов: 1 – для углеродистых сталей в соответствии с (1); 2, 2' и 3 – зависимости (2), (2') и (3), ограничивающие возможный диапазон изменения σ_B ковких чугунов; 4 – зависимость (4), ограничивающая снизу возможный диапазон изменения σ_B серых чугунов; 5 – граница минимальной σ_B серых чугунов по ГОСТ 1412-85; 6–8 – зависимости (6)–(8), ограничивающие снизу возможный диапазон изменения σ_B отливок с толщиной стенки 50, 80 и 150 мм из серых чугунов; x – экспериментальные результаты по [6] для отливок из СЧ15. Заштрихованные области – диапазон возможного изменения функции $\sigma_B(\text{НВ})$ ферритного (Ф) и перлитного (П) ковкого чугуна по данным [5]

Линии тренда зависимостей σ_B ковких чугунов с их минимальными НВ_{\min} и максимальными НВ_{\max} значениями твердости НВ имеют вид [3]:

$$\sigma_B \approx \tau(2,682 \text{ НВ} + 48), \tag{2}$$

$$\sigma_B \approx \tau(2,843 \text{ НВ} - 141). \tag{3}$$

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

Зависимость (2) должна ограничивать сверху диапазон изменения σ_B ковкого чугуна в отливках, твердость НВ которых измерена. Но вспомним, что использованные при ее построении значения σ_B (табл. 1) по ГОСТ 1215-79 имеют статус «не менее». Этим объясняется то, что верхний предел зависимости $\sigma_B(\text{НВ})$ перлитного ковкого чугуна по [5, рис. 184] лежит несколько выше (рис. 1) зависимости $\sigma_B(\text{НВ})$, рассчитанной по (2) (значения $\sigma_B(\text{НВ})$ ферритного ковкого чугуна по [5] находятся между зависимостями (2) и (3) на рис. 1). Значит, зависимость (2) должна быть скорректирована. На основании соотношения (табл. 1) между σ_B и НВ ковких чугунов «соседних» марок и с учетом данных [5] предложена [3] корректировка зависимости (2):

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

На рис. 1 зависимость (2') изображена прямой 2'.

Зависимость (3) ограничивает снизу диапазон изменения σ_B ковкого чугуна в отливках, твердость НВ которых измерена. Можно считать, что зависимость (3) ограничивает сверху возможный диапазон изменения σ_B материала отливок из серого чугуна, твердость которых измерена: она близка к верхней границе диапазона изменения зависимости $\sigma_B(\text{НВ})$ серых чугунов по данным [5, рис. 184] измерений «разных исследователей».

Для установления нижней границы σ_B серых чугунов с измеренным значением НВ воспользуемся данными [ГОСТ 1412-85, Приложение 1] о σ_B и НВ стенок отливок разного сечения, приведенными на рис. 2.

Анализ этих зависимостей показал [3], что для отливок с $4 \leq h, \text{ мм} \leq 30$ зависимости $\sigma_B(\text{НВ})$ практически не различаются. Линия тренда корреляционной зависимости между σ_B и НВ для таких отливок имеет вид:

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

Достоверность R^2 аппроксимации функцией (4) зависимости $\sigma_B(\text{НВ})$, приведенной на рис. 2, составила 0,986. На рис. 1 зависимость (4) изображена прямой 4, которая после значения $\text{НВ} \approx 194$ переходит в прямую 5:

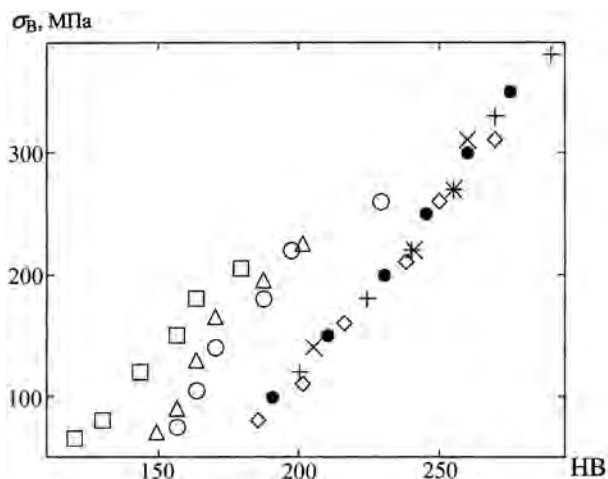


Рис. 2. Зависимость минимальной величины σ_B отливок из серых чугунов с разной толщиной h стенки от их HB по данным ГОСТ 1412-85: x – для $h = 4$ мм; $+$ – для $h = 8$ мм; \bullet – для $h = 15$ мм; \diamond – для $h = 30$ мм; \circ – для $h = 50$ мм; Δ – для $h = 80$ мм; \square – для $h = 150$ мм

отливок из серого чугуна, твердость HB которых измерена. Это подтверждают и приведенные на рис. 1 экспериментальные результаты измерения HB и σ_B отливок из СЧ15, проведенные в [6]. Твердость HB и σ_B образцов в [6] определяли по стандартным методикам на разрывных пробах диаметром 30 мм. Экспериментальные точки, приведенные на рис. 1, получены позиционированием экспериментальных точек в [6, рис. 3]. При этом все точки (HB, σ_B) лежат выше прямых 4, 5 и ниже прямой 3.

Для установления диапазона возможных значений σ_B высокопрочных чугунов с измеренным значением HB воспользовались [4] данными ГОСТ 7293-85 о временном сопротивлении σ_B при растяжении и диапазоне возможного изменения твердости HB отливок, приведенными в табл. 2.

Таблица 2. Связь между твердостью HB и временным сопротивлением σ_B высокопрочного чугуна по ГОСТ 7293-85

Марка чугуна	HB _{min}	HB _{max}	σ_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

Линии тренда корреляционных полей между минимальным HB_{min} и максимальными HB_{max} значениями твердости HB высокопрочных чугунов и их минимально допустимым значением временного сопротивления σ_B по данным табл. 2 имеют вид:

$$\sigma_B \approx \tau(4,04 \text{ HB} - 163), \quad (9)$$

$$\sigma_B \approx \tau(3,137 \text{ HB} - 236). \quad (10)$$

Достоверность R^2 аппроксимации (квадрат коэффициента R корреляции) зависимостями (9) и (10) зависимостей σ_B (HB), представленных табл. 2, составила [4] соответственно 0,95 и 0,94.

Зависимости (9) и (10) должны ограничивать сверху и снизу диапазон изменения σ_B ВЧ в отливках, твердость HB которых измерена. Для экспериментального обоснования (рис. 3) и корректировки по его результатам разработанных зависимостей (9) и (10) используем результаты «разных исследователей», приведенные в [5, рис. 184], а также результаты измерений σ_B и HB на одних и тех же образцах ферритного ВЧ в [7, 8].

$$\sigma_B = 100 \tau, \quad (5)$$

которая ограничивает снизу возможные значения σ_B серого чугуна в соответствии с ГОСТ 1412-85.

Зависимости σ_B (HB) для отливок из серого чугуна с толщиной стенки 50, 80 и 150 мм (рис. 2) при статистической обработке могут быть охарактеризованы соответственно линиями тренда:

$$\sigma_B \approx \tau(2,53 \text{ HB} - 301), \quad (6)$$

$$\sigma_B \approx \tau(3 \text{ HB} - 366), \quad (7)$$

$$\sigma_B \approx \tau(2,52 \text{ HB} - 241). \quad (8)$$

Достоверности R^2 аппроксимации функциями (6)–(8) зависимостей σ_B (HB) (рис. 2) составили соответственно 0,942; 0,95 и 0,987. На рис. 1 зависимости (6)–(8) в диапазонах их изменения в соответствии с ГОСТ 1412-85 изображены линиями 6–8.

Анализ рис. 1 показывает, что линии 6–8 лежат выше прямой 4. Следовательно, зависимости (4), (5) определяют нижний предел возможного значения σ_B

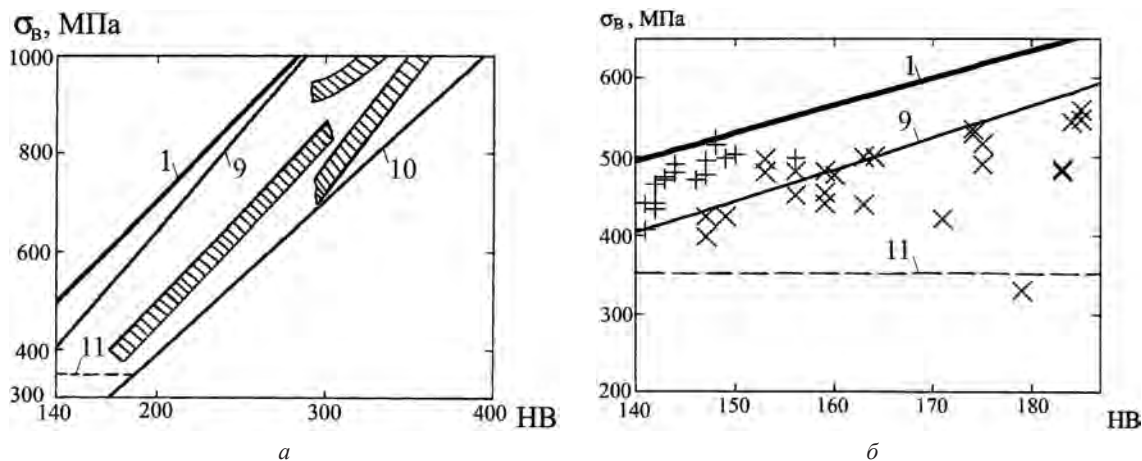


Рис. 3. Зависимости $\sigma_B(\text{НВ})$ для разных материалов: 1 – для углеродистых сталей по (1); 9, 10 – зависимости (9) и (10); 11 – минимальное значение $\sigma_B = 350$ МПа высокопрочного чугуна по ГОСТ 7293-85. Заштрихованные области (а) – диапазон изменения значений (НВ, σ_B) высокопрочного чугуна по данным [5]. × и + (б) – экспериментальные результаты для отливок из ВЧ45 по [7] и ВЧ42 по [8]

В [7, 8] половина образцов прошла термообработку: закалка – нагрев при 920 °С, выдержка 2 ч, охлаждение на воздухе; отпуск – нагрев при 730 °С, выдержка 1 ч, 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 (рис. 3, а) измерений σ_B и НВ высокопрочных чугунов «разными исследователями» по [5] находятся в диапазоне, ограниченном зависимостями (9) и (10). Но верхний предел зависимости $\sigma_B(\text{НВ})$ ферритного ВЧ по результатам измерений в [7, 8] лежит выше (рис. 3, б) зависимости $\sigma_B(\text{НВ})$, рассчитанной по (9). Следовательно, зависимость (9) должна быть скорректирована.

Вспомним, что использованные при ее построении значения σ_B (табл. 1) по ГОСТ 7293-85 имеют статус «не менее». Этим объясняется то, что часть экспериментальных точек (НВ, σ_B) лежит «выше» зависимости (9). Обратим внимание, что эти экспериментальные точки в координатах (НВ, σ_B) всегда находятся «ниже» зависимости (1), устанавливающей связь между σ_B и НВ для углеродистых сталей. Из этого следует, что графитовые включения в высокопрочном чугуне всегда в большей степени снижают его временное сопротивление, 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 (табл. 2) между σ_B и НВ высокопрочных чугунов «соседних» марок с учетом экспериментальных данных рис. 4 и сближения зависимостей $\sigma_B(\text{НВ})$ по (9) и (1) при увеличении НВ (рис. 3) предложено [4] верхним пределом диапазона изменения σ_B высокопрочных чугунов считать зависимость (1), полученную для углеродистых сталей.

Приведенные на рис. 3 экспериментальные результаты подтверждают, что зависимость (10) ограничивает снизу возможный диапазон изменения σ_B высокопрочного чугуна в отливках, твердость НВ которых измерена. Для более точного ограничения этого диапазона используем то, что по ГОСТ 7293-85 σ_B высокопрочных чугунов не меньше (прямая 11 на рис. 3) значения

$$\sigma_B = 350 \text{ МПа.} \tag{11}$$

Равенство значений σ_B , рассчитанных по (10) и (11), имеет место при $\text{НВ} \approx 187$. Следовательно, нижняя граница возможного диапазона высокопрочных чугунов с измеренным значением твердости $\text{НВ} < 187$ ограничивается прямой 11, а при $\text{НВ} \geq 187$ – прямой 10.

Отметим, что $\sigma_B = 329$ МПа (при твердости 179 НВ) одного из образцов плавки № 18 в [7, табл. 1] не соответствует не только заявленной марке ВЧ45, но и возможному по ГОСТ 7293-85 нижнему пределу $\sigma_B = 350$ МПа высокопрочного чугуна (рис. 3, б). По-видимому, указанный образец имел в значительной степени структуру не высокопрочного, а серого (с пластинчатой формой графитовых включений) чугуна. Подтверждением этому служит и аномально низкое значение (2%) относительного удлинения δ этого образца по сравнению с $\delta = 5\text{--}16\%$ у других образцов в [7, табл. 1].

Результат позволяет оценить марку ВЧ по его твердости НВ. Например, при твердости отливки 150 НВ ее материал может соответствовать маркам ВЧ35 – ВЧ45, а при 300 НВ – маркам ВЧ80 – ВЧ100.

Выводы

Таким образом, значения σ_B серых, ковких и высокопрочных чугунов с измеренным значением HB заключены в пределах следующих диапазонов:

серый чугун:

$$\text{для HB} < 194: 100 < \sigma_B, \text{ МПа} < 2,843 \text{ HB} - 141; \quad (12)$$

$$\text{для HB} \geq 194: 2,91 \text{ HB} - 465 < \sigma_B, \text{ МПа} < 2,843 \text{ HB} - 141; \quad (13)$$

ковкий чугун:

$$2,843 \text{ HB} - 141 < \sigma_B, \text{ МПа} < 2,682 \text{ HB} + 48; \quad (14)$$

высокопрочный чугун:

$$\text{для HB} < 187: 350 \leq \sigma_B, \text{ МПа} < 3,5307 \text{ HB}; \quad (15)$$

$$\text{для HB} \geq 187: 3,137 \text{ HB} - 236 \leq \sigma_B, \text{ МПа} < 3,5307 \text{ HB}. \quad (16)$$

Результаты экспериментального измерения значений σ_B и HB чугунов разных классов подтверждают, что они находятся внутри установленных диапазонов (12)–(16) возможного изменения σ_B чугунов при измеренном значении HB. Полученный результат может быть использован для определения без разрушения отливки гарантированной величины ее σ_B в тех случаях, когда информации о свойствах образцов-свидетелей нет.

Литература

1. **Металловедение** и термическая обработка стали: справ. В 3-х т. / под ред. М. Л. Берштейна, А. Г. Рахштадта. 4-е изд., перераб. и доп. Т. 1. Методы испытаний и исследования. М.: Металлургия, 1991.
2. **Сандомирский С. Г.** Анализ связи коэрцитивной силы с временным сопротивлением углеродистых сталей // *Сталь*. 2016. № 9. С. 62–65.
3. **Сандомирский С. Г.** Оценка диапазонов возможного изменения временного сопротивления чугунов с пластинчатым и хлопьевидным графитом по их твердости // *Литье и металлургия*. 2017. № 2. С. 40–45.
4. **Сандомирский С. Г., Сандомирская Е. Г.** Оценка диапазона возможного изменения временного сопротивления чугуна с шаровидным графитом по твердости // *Механика машин, механизмов и материалов*. 2017. № 2. С. 79–83.
5. **Гиршович Н. Г.** Кристаллизация и свойства чугуна в отливках / Н. Г. Гиршович. М.-Л.: Машиностроение, 1966. 562 с.
6. **Воронкова Л. В.** Определение прочности чугуна ультразвуковым методом / Л. В. Воронкова // *Контроль. Диагностика*. 2011. № 12. С. 62–64.
7. **Исследование** возможности контроля механических свойств чугуна ВЧ45-5 магнитоупругоакустическим методом / Л. С. Правдин [и др.] // *Дефектоскопия*. 1989. № 1. С. 34–42.
8. **О возможности** контроля механических свойств высокопрочного чугуна магнитоупругоакустическим способом / В. А. Бурцева [и др.] // *Дефектоскопия*. 1987. № 2. С. 10–17.