

DOI: 10.26896/1028-6861-2017-83-11-52-57

УДК (UDC) 620.178.1

ОБОБЩЕННЫЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ВРЕМЕННЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ СТАЛЕЙ И ИХ ТВЕРДОСТЬЮ

© С. Г. Сандомирский

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь; e-mail sand@iaph.bas-net.by

Статья поступила 12 апреля 2016 г.

Приведен критический анализ формы представления связей между временным сопротивлением (пределом прочности) σ_B и твердостью сталей. С использованием статистического анализа разработаны простые аналитические зависимости, которые более точно, чем известные, описывают связи между твердостью сталей, измеренными по шкалам Бринелля и Роквелла, и их σ_B . Сопоставлены результаты расчета σ_B сталей по их твердости с использованием известных и разработанных формул. Разработанные формулы использованы для анализа изменений σ_B углеродистых сталей под влиянием термических обработок. Дана количественная оценка влияния температур закалки и отпуска на изменения σ_B углеродистых сталей 35, У8 и У10 по результатам измерений их твердости HRC. С использованием разработанных формул такие результаты могут быть получены для любых сталей по данным измерения их твердости или сведениям о них, приведенным в справочной или научной литературе.

Ключевые слова: металлы; твердость; временное сопротивление (предел прочности); соотношение между твердостями.

GENERALIZED CORRELATION DEPENDENCE BETWEEN THE TENSILE STRENGTH AND HARDNESS OF STEELS

© S. G. Sandomirski

Submitted April 12, 2016.

Critical analysis of the form of representing correlation between the tensile (ultimate) strength σ_B and hardness of steels is presented. Simple analytical expressions are derived using statistical analysis, which provide more accurate description of the relationships between Brinell and Rockwell scale hardness values and tensile strength σ_B . The results of σ_B calculations by steel hardness using known and developed formulas are compared. The developed formulas are used to analyze changes in σ_B of carbon steels under the impact of heat treatment. Quantitative evaluations of the effect of quenching and tempering temperatures on the changes in σ_B values in carbon steels 35, U8, and U10 are based on the results of HRC hardness measurements. The developed formulas can be also used for other steels proceeding from the data on their measured hardness value or reference data presented in literature.

Keywords: metals; hardness; tensile (ultimate) strength; relationship between hardness values.

Структурное состояние металла, определяемое химическим составом и режимами термической обработки, обуславливает его механические свойства, прежде всего, временное сопротивление (предел прочности) σ_B — наибольшую нагрузку, предшествующую разрушению образца [1, 2]. Но измерение σ_B предполагает разрушение изделия или изготовленного из него образца [3]. Поэтому исследователи используют параметр, связанный с σ_B [4], — твердость металла (свойство материала оказывать сопротивление пластической деформации при контактном воздействии в поверхностном слое) [1, 2]. В некоторых случаях твердость металла сама является параметром, определяющим его эксплуатационные свойства. Для характеристики термически обработанной стали с нешлифованной поверхностью чаще всего используют твердость по Бринеллю [5] и Роквеллу [6].

Для определения твердости HB стали или чугуна по Бринеллю в плоскую поверхность металла под постоянной нагрузкой P вдавливают шарик диаметром D из твердого сплава. После снятия нагрузки в металле образуется лунка диаметром d . Число твердости определяют по формуле

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}. \quad (1)$$

В соответствии с [5] шарик из твердого сплава диаметром, равным 10,0, 5,0, 2,5, 2,0, 1,0 мм, должен иметь твердость по Виккерсу не менее 1500 HV10. Диаметр шарика D и усилие P выбирают таким образом, чтобы диаметр d лунки находился в пределах от 0,24 до 0,6 D . Во многих практически важных случаях используют значения $P = 3000$ кгс и $D = 10$ мм.

Согласно [5, табл. 1] HB исследуемого металла может изменяться от 650 до 95,5 единиц. Для портативных твердомеров [7] используют значения D , равные 1,0 или 2,5 мм, и P , соответствующие 10 или 30 кгс.

Твердость стали и чугуна по Роквеллу (HR) определяют по глубине h отпечатка, оставленного в металле алмазным конусом с углом при вершине 120° [6]. Конус сначала вдавливают на глубину h_0 предварительной нагрузкой 10 кгс, а затем — на глубину h под общей нагрузкой 150 кгс (шкала C) или 60 кгс (шкала A). Численные значения HRC и HRA твердости по Роквеллу определяют в условных единицах, соответствующих перемещению наконечника на 0,002 мм, по формуле

$$HR = 100 - \frac{h - h_0}{0,002}. \quad (2)$$

Разные условия механического воздействия на металл не позволяют получить на основании формул (1) и (2) физически обоснованные аналитические взаимосвязи между твердостями, измеренными по шкалам HB , HRC , HRA , и σ_b металла в возможном для сталей и чугунов диапазоне изменения. В стандарте [5] отмечено, что величины твердости по Бринеллю не имеют точного метода перевода их в другие значения твердости или прочности при растяжении.

Тем не менее исследователям удалось обобщить многочисленные экспериментальные данные механических свойств и твердости металлов и выразить функциональные связи между σ_b , HB , HRC и HRA (а также твердостями, измеренными другими методами) в виде таблиц (например, [7–13]). Но установленные функциональные зависимости, представленные в табличной форме, не позволяют проследить физические особенности связей между измеренными величинами и не удобны для использования на практике. Многочисленные попытки аналитического представления связей между значениями твердости, измеренными по разным шкалам (например, [13, табл. 5]), предназначены для использования в узких диапазонах изменения параметров и недостаточно точны. Положение усугубляется тем, что приведенные в многочисленных справочниках, учебниках, монографиях и отраслевых стандартах табличные данные зачастую не совпадают. Допущенные неточности и опечатки на протяжении многих лет тиражируются без критического анализа. Например, многочисленные несоответствия соотношений между d и HB , установленные по стандарту [5], наблюдаются в [11]. Даже в многократно переизданном справочнике [8] значения HB при d , равном 2,8 и 4,5 мм ([8, табл. 15.8]), и при $d = 2,4$ мм ([8, табл. 15.11]) не соответствуют [5]. Точность табличного задания функций $HB(HRC)$ и $HB(HRA)$ снижена и дискретностью чисел HRC и HRA . Это приводит к разным значениям HB при одинаковых HRC и HRA [11, 12], что физически не верно.

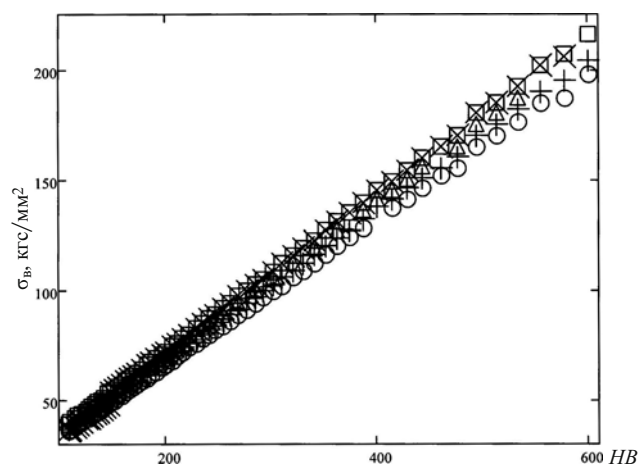


Рис. 1. Зависимости временного сопротивления σ_b разных сталей (углеродистой (\square), «хромансиль» (\times), хромоникелевой ($+$), хромомолибденовой (\circ), хромистой (Δ)) от их твердости HB по данным [8]

Цель данной работы — построение простых аналитических зависимостей, физически верно описывающих установленные и представленные в табличном виде взаимосвязи между твердостью, измеренной по шкалам Бринелля и Роквелла, и временным сопротивлением сталей разных классов. С использованием разработанных зависимостей получена новая информация об изменениях временного сопротивления (предела прочности) сталей под влиянием термических обработок.

Для установления аналитических зависимостей $\sigma_b(HB)$ для сталей разных классов используем данные, представленные в [8, табл. 15.8]. Указанные выше несоответствия между значениями HB и d (при $D = 10$ мм) в этой таблице исправлены в соответствии с [5, прил. 3, табл. 1]. Полученные результаты (рис. 1) показали, что для исследованных сталей функциональные связи $\sigma_b(HB)$ могут быть аппроксимированы линейными зависимостями вида

$$\sigma_b \approx \tau k HB, \quad (3)$$

где $\tau = 1$ кгс/мм² — размерный множитель; k — коэффициент пропорциональности.

Статистическая обработка данных проведена в стандартной оболочке программы XL, которая рассчитывала коэффициент k в проходящем через «0» уравнении регрессии (3), коэффициент R корреляции между σ_b , найденными по (3) и σ_b , приведенными в [8, табл. 15.8]. Среднее по n данным из [8, табл. 15.8] значение модуля $|\Delta|$ отклонения результатов (σ_{bci}) расчета σ_b по (3) от $\sigma_{bi}(tabl)$, приведенных в [8, табл. 15.8], составило

$$|\bar{\Delta}| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\sigma_{bci} - \sigma_{bi}(tabl)|. \quad (4)$$

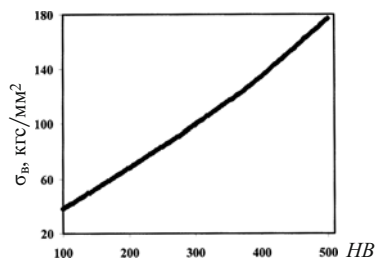


Рис. 2. Зависимость временного сопротивления σ_b конструкционных углеродистых сталей перлитного класса от их твердости HB по данным [7]

Среднее значение $\bar{\delta}$ модуля относительного отклонения результатов σ_{bci} расчета σ_b по (3) от σ_{bi} (tabl) из работы [8, табл. 15.8] рассчитывали как

$$\bar{\delta} = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\sigma_{bci} - \sigma_{bi}(tabl)|}{\sigma_{bi}(tabl)}. \quad (5)$$

Приведенные в табл. 1 значения коэффициентов k , R^2 («коэффициент достоверности аппроксимации»), $|\bar{\Delta}|$ и $\bar{\delta}$ для сталей разных классов показывают, что относительное отклонение $\bar{\delta}$ между рассчитанной по формуле (3) и измеренной величинами σ_b для углеродистой, хромомолибденовой и хромоникелевой сталей в 5–10 раз меньше дискретности (2–4 %) величины σ_b , обусловленной дискретностью изменения численного значения параметра HB при изменении d с шагом 0,05 мм в соответствии с [5]. Для хромистой стали и стали «Хромансиль» величина $\bar{\delta}$ выше. Однако для таких сталей она в 2–4 раза меньше погрешности ($\pm 4\%$ [10]) измерения HB на стандартных мерах твердости. Это позволяет использовать результаты измерения твердости HB сталей разных классов, представленные в литературе, для оценки их σ_b по формуле (3) с коэффициентами k , приведенными в табл. 1.

Сопоставим (см. рис. 1 и табл. 1) результаты анализа соотношения между σ_b и HB углеродистых сталей, полученные в [8] при $D = 10$ мм, с данными [7, приложение 2], рекомендованными для описания связи между σ_b и HB этих конструкционных углеродистых сталей перлитного класса при измерении HB портативными твердомерами при D , равном 2,5 и 1,0 мм (рис. 2).

Анализ представленных на рис. 2 данных показал, что зависимость $\sigma_b(HB)$ удовлетворительно ($|\bar{\Delta}| \approx 2,29$ кгс/мм²; $\bar{\delta} \approx 2,6\%$; $R^2 \approx 0,9956$) описывается

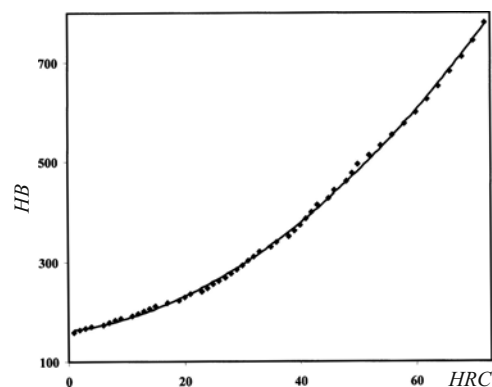


Рис. 3. Зависимость между твердостями HB и HRC сталей [8] и линия тренда этой зависимости, описываемая степенной функцией (7)

линейной зависимостью (3) при $k \approx 0,3414$. Меньшее значение коэффициента k в (3), чем в зависимости, полученной при измерении твердости HB при вдавливании шарика диаметром $D = 10$ мм, соответствует общепринятым представлениям о влиянии масштабного фактора на соотношение между HB и σ_b . Значения коэффициента k в (3) могут быть использованы для количественной оценки этого эффекта. Отметим, что лучшую точность расчета σ_b по HB ($|\bar{\Delta}| \approx 0,975$ кгс/мм²; $\bar{\delta} \approx 1,06\%$; $R^2 \approx 0,9996$) обеспечивает полиномиальная линия тренда представленной на рис. 2 зависимости:

$$\sigma_b \approx \tau[0,0002HB^2 + 0,2161HB + 16,167]. \quad (6)$$

Повышение степени полинома линии тренда для данных, представленных на рис. 2, не приводит к снижению погрешности оценки σ_b по HB .

Многие исследования влияния термических обработок сталей на их твердость проведены с использованием шкал HRC и HRA [14]. Установим связь твердости сталей, определенной по этим шкалам, с твердостью, измеренной по шкале HB . Для получения аналитической зависимости между HB и HRC стали используем данные, приведенные в [8, табл. 15.11]. По сравнению с многими другими источниками в этой таблице, выдержавшей многократные переиздания, численные значения HRC в зависимости от HB изменяются монотонно и охватывают весь возможный диапазон изменения HRC — от 1 до 72. Данные, выходящие за пределы регламентированного [5] диапазона

Таблица 1. Результаты статистической обработки данных расчета по формуле (3) и измерения по [8] временного сопротивления сталей разных классов

Класс стали по [8]	Символ на рис. 1	k	R^2	$ \bar{\Delta} $, кгс/мм ²	$\bar{\delta}$, %
Углеродистая	□	0,3599	0,9999	0,355	0,377
«Хромансиль»	×	0,3586	0,9984	1,187	2,22
Хромоникелевая	+	0,3399	0,9999	0,345	0,377
Хромомолибденовая	○	0,3296	0,9998	0,398	0,436
Хромистая	△	0,3500	0,9998	1,286	0,956

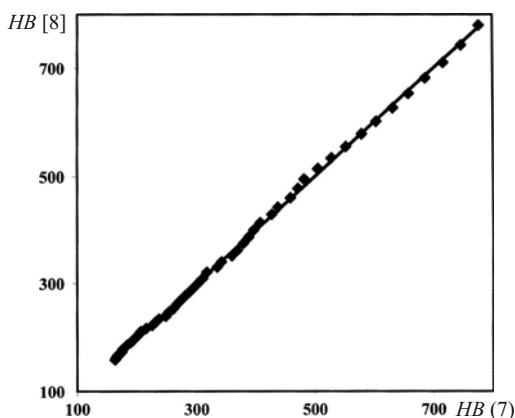


Рис. 4. Корреляционное поле между результатами расчета твердости HB сталей по (7) и представленными в [8] данными о HB стали с известной HRC и линия тренда (8) этой зависимости

изменения HB , не будем исключать из рассмотрения. Отмеченное выше несоответствие стандарту между значениями HB и d [8, табл. 15.11] исправлено согласно [5, прил. 3, табл. 1].

На рис. 3 приведена зависимость HB от HRC в соответствии с [8]. Описываемая степенной функцией линия тренда этой зависимости имеет вид

$$HB \approx 0,0977HRC^2 + 1,053HRC + 161,41 \quad (7)$$

при коэффициенте корреляции $R \approx 0,99956$ между результатами расчета по (7) и табличными данными о HB . Изменение вида функции линии тренда и повышение степени полинома (7) не приводят к увеличению R .

На рис. 4 представлено корреляционное поле между результатами расчета $HB(calc)$ по (7) и приведенными в [8, табл. 15.11] данными $HB(tabl)$ о HB стали с известной HRC .

Статистические параметры связи (t — постоянный коэффициент)

$$HB(tabl) = tHB(calc) \quad (8)$$

при $1 \leq HRC \leq 72$ представлены в табл. 2.

Погрешности оценки по формуле (7) HB сталей по их HRC в возможном диапазоне изменения HRC существенно меньше (см. табл. 2), чем по формуле

$$HB \approx 0,1HRC^2 + 1,3HRC + 160, \quad (9)$$

рекомендованной в [13] для оценки HB перлитных сталей в диапазоне $1 < HRC < 45$.

Для разработки более простого, чем (7) или (9), аналитического выражения, пригодного для использования на практике, воспользуемся тем, что значения HRC конструкционных сталей (если исключить опечатку в [14, табл. 5.1]) не меньше 11 [14]. В диапазоне $9 \leq HRC \leq 72$ из бесконечного числа возможных интерполяций зависимости $HB(HRC)$ требованию про-

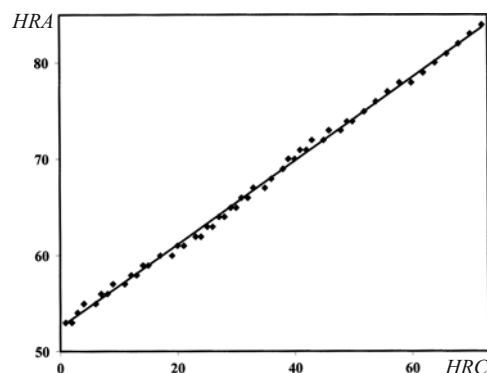


Рис. 5. Корреляционное поле связи между твердостями HRA и HRC по данным [8] и линия тренда (12) этой зависимости

стоты и точности аппроксимации данных из [5, табл. 15.11] лучше всего удовлетворяет функция

$$HB \approx 0,28HRC^{1,8} + 163. \quad (10)$$

Результаты статистической обработки данных корреляционного поля между результатами расчета HB по (10) и представленными в [8, табл. 15.11] данными о HB стали с известной HRC представлены в табл. 2. Среднее отклонение результатов расчета HB стали с известной HRC по формуле (10) от классических табличных данных — менее 5 ед. HB , что составляет около 1,5 % HB . Это почти в три раза меньше погрешности измерения твердости HB твердомерами на стандартных мерах твердости [10]. При этом значительная часть относительной погрешности расчета величины HB по формуле (10) обусловлена не неточностью интерполяции функцией (10) зависимости $HB(HRC)$ для сталей, а дискретностью представления данных о твердости HRC стали в [8, табл. 15.11]. Это позволяет рекомендовать формулу (10) наряду с формулой (7) для оценки величины HB сталей по их HRC и для анализа связи между этими числами твердости взамен неудобных для использования и физически не точных таблиц.

Близкие по точности расчета к формуле (10) результаты обеспечивает (см. табл. 2) и экспоненциальная функция:

$$HB \approx 147e^{0,234HRC}. \quad (11)$$

Некоторое снижение коэффициента R корреляции между табличными данными и результатами расчета HB

Таблица 2. Результаты статистической обработки соотношения HB и HRA по [8] с данными расчета по разным формулам HB и HRA сталей по их HRC

Рассчитываемое число твердости (номер формулы)	t	R^2	$ \bar{\Delta} $, ед. HB , HRA	$\bar{\delta}$, %
HB (7)	1,000	0,9993	3,68	1,16
HB (9)	1,013	0,9992	5,49	1,72
HB (10)	1,001	0,9987	4,78	1,63
HB (11)	1,002	0,9976	6,65	1,80
HRA (12)	—	0,9975	0,328	0,51

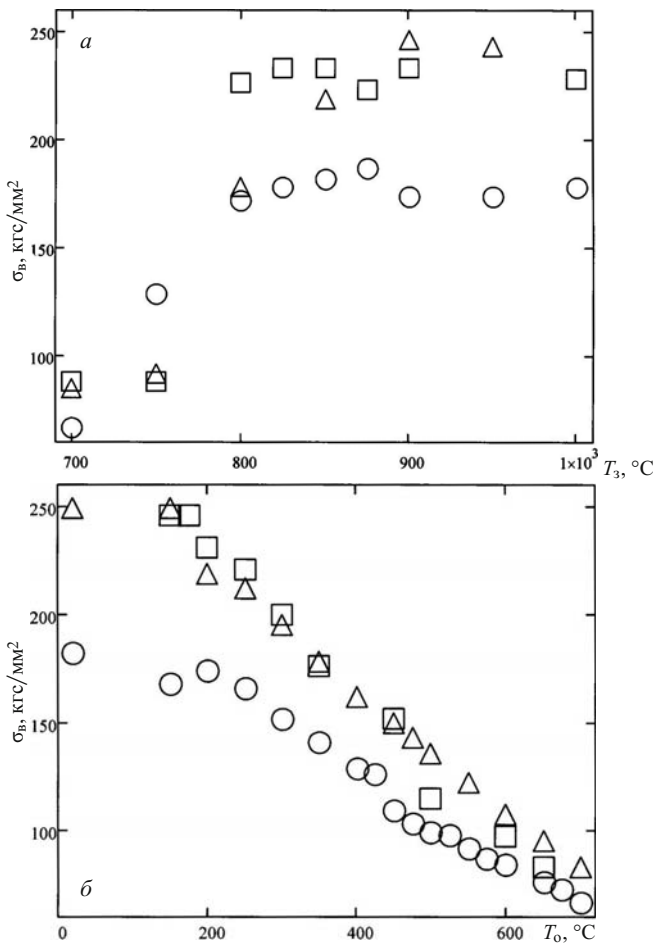


Рис. 6. Зависимости временного сопротивления σ_b сталей 35 (○), У8 (△) и У10 (□) от температур T_3 закалки (а) и T_0 отпуска (б)

по формулам (10), (11) по сравнению с расчетом по формуле (7) в соответствии с [15] обусловлено главным образом сужением диапазона изменения HRC .

Для получения аналитической зависимости между HRA и HRC используем табличные значения этих чисел твердости, представленные в [8, табл. 15.11]. На рис. 5 представлено корреляционное поле связи между HRA и HRC . Линейная функция линии тренда этой зависимости

$$HRA \approx 0,434HRC + 52,447 \quad (12)$$

может быть использована для расчета HRA по HRC (и HRC по HRA) с погрешностью (см. табл. 2), практически обусловленной лишь дискретностью табличного представления чисел твердости HRA и HRC .

Таким образом, методическая новизна работы заключается в аналитическом представлении взаимосвязей между твердостями сталей, измеренными по шкалам HB и HRC , HRA и HRC , установлении достоверных коэффициентов пропорциональности в линейной связи между твердостью HB и временным сопротивлением (пределом прочности) сталей разных классов. При этом разработанные функции описыва-

ют эти зависимости во всем диапазоне возможно для сталей изменения параметров математически просто, физически верно и более точно, чем известные (с минимальной погрешностью относительно табличных данных).

В качестве примера, иллюстрирующего практическую значимость разработанных формул, используем их для анализа влияния режимов термической обработки на временное сопротивление углеродистых сталей 35, У8 и У10. В справочнике [14] приведены лишь данные о твердости HRC этих сталей. Из (10) и (3) с учетом значения коэффициента $k \approx 0,3599$ (см. табл. 1) для углеродистых сталей получим

$$\sigma_b \approx \tau(0,1008HRC^{1,8} + 58,66). \quad (13)$$

На рис. 6 приведены зависимости временного сопротивления σ_b сталей 35, У8 и У10 от температуры закалки и отпуска, полученные по формуле (13) с использованием данных о твердости HRC этих сталей из [14, табл. 2.1, 2.2, 4.1, 4.3, 5.1, 5.2]. Анализ этих данных показывает, что закалка углеродистых сталей от $T_3 \geq 850$ °С повышает σ_b в 2,5 – 2,8 раза. При этом σ_b высокоуглеродистой стали У10 на 28 % выше, чем среднеуглеродистой стали 35. При увеличении температур отпуска (T_0) углеродистых сталей от 200 до 700 °С происходит линейное снижение их σ_b до уровня незакаленного состояния. С использованием разработанных формул подобные результаты могут быть легко получены любым исследователем для любых сталей по результатам измерения их твердости или сведениям о ней, приведенным в справочной или научной литературе.

В заключение можно сделать следующие выводы.

1. Разработаны аналитические зависимости (7), (10) и (12) для описания взаимосвязей между твердостями сталей, измеренными по шкалам HB и HRC , HRA и HRC . Показано, что разработанные функции описывают эти взаимосвязи в возможном для конструкционных сталей диапазоне изменения параметров физически верно и более точно, чем известные.

2. Установлены (см. табл. 1) статистически достоверные коэффициенты пропорциональности в линейных взаимосвязях (3) между твердостью HB , измеренной при вдавливании шара диаметром D , равным 10 и 2,5 мм, и временным сопротивлением σ_b сталей разных классов.

3. Полученные формулы позволили количественно оценить влияние температур закалки и отпуска на изменение σ_b углеродистых сталей 35, У8 и У10 по результатам измерений их твердости HRC .

ЛИТЕРАТУРА

1. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение: учебник для машиностроительных вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1980. — 493 с.

2. Агамиров Л. В. Машиностроение. Энциклопедия. В 40 т. Разд. 2. Материалы в машиностроении. Т. 2-1. Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов. — М.: Машиностроение, 2010. — 851 с.
3. ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. — М.: Изд-во стандартов, 1990. — 52 с.
4. Марковец М. П. Определение механических свойств металлов по твердости. — М.: Машиностроение, 1979. — 171 с.
5. ГОСТ 9012–59. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю. Изм. № 5. — М.: Изд-во стандартов, 1984. — 110 с.
6. ГОСТ 9013–59. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу. Изм. № 3. — М.: Изд-во стандартов, 2001. — 13 с.
7. ГОСТ 22761–77. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю переносными твердомерами статического действия. — М.: Изд-во стандартов, 1989. — 10 с.
8. Металловедение и термическая обработка стали: справочник. В 3 т. / Под ред. М. Л. Берштейна, А. Г. Рахштадта. Изд. 4-е, перераб. и доп. Т. 1. Методы испытаний и исследования. В 2-х кн. — М.: Металлургия, 1991.
9. РТМ 3-1947–91. Руководящий технический материал. Конструкторские нормы. Металлы и сплавы. Переводные таблицы твердости. — 31 с.
10. Мальков О. В., Литвиненко А. В. Измерение твердости металлов. Электронное учебное издание. — М.: МГТУ им. Баумана, 2011. — 19 с.
11. Тылкин М. А. Справочник термиста ремонтной службы. — М.: Металлургия, 1981. — 648 с.
12. Dempsey J. Hardness Conversion Table: Brinell to Rockwell A B C / <http://www.anvilfire.com/FAOs.hardness.htm>.
13. РД ЭО 0027–2005. Инструкция по определению механических свойств металла оборудования атомных станций безобразцовыми методами по характеристикам твердости. — М.: ФГУП концерн «Росэнергоатом», 2006. — 47 с.
14. Бида Г. В., Ничипурук А. П. Магнитные свойства термообработанных сталей. — Екатеринбург: УрО РАН, 2005. — 218 с.
15. Сандомирский С. Г. Влияние точности измерения и диапазона изменения физической величины на коэффициент корреляции между ее истинными значениями и результатами измерения / Измерительная техника. 2014. № 10. С. 13 – 17.

REFERENCES

1. Lakhtin Yu. M., Leont'eva V. P. Materials: A Textbook for high schools of engineering. 2nd edition. — Moscow: Mashinostroenie, 1980. — 493 p. [in Russian].
2. Agamirov L. V. Mechanical Engineering. Encyclopedia. In 40 vols. Section 2. Materials in Mechanical Engineering. Vol. 2-1. Physical-mechanical properties. Tests of Metallic Materials. — Moscow: Mashinostroenie, 2010. — 851 p. [in Russian].
3. State Standard GOST 1497–84. Metals. Methods of tension test. — Moscow: Izd. standartov, 1990. — 52 p. [in Russian].
4. Markovets M. P. Determination of mechanical properties of metals hardness. — Moscow: Mashinostroenie, 1979. — 171 p. [in Russian].
5. ISO 6506–81. Metals. Hardness test — Brinell test.
6. ISO 6508–86. Metals. Hardness test — Rockwell test — scales A, B, C, D, E, F, G, H, K.
7. State Standard GOST 22761–77. Metals and alloys. Brinell hardness test by static action portable hardness meters. — Moscow: Izd. standartov, 1989. — 10 p. [in Russian].
8. Bershtein M. L., Rakhshadt A. G. (eds.). Metallurgy and heat treatment of steel: a guide. In 3 vols. 4th Edition. Vol. 1. Methods of testing and research. In 2 books. — Moscow: Metallurgiya, 1991.
9. RTM 3-1947–91. Steering the technical material. Design standards. Metals and alloys. Transferable hardness table. — 31 p. [in Russian].
10. Mal'kov O. V., Litvinenko A. V. Measurement of hardness metals. Electronic textbook. — Moscow: MGTU im. N. É. Bauman, 2011. — 19 p. [in Russian].
11. Tylkin M. A. Directory treater repair service. — Moscow: Metallurgiya, 1981. — 648 p. [in Russian].
12. Dempsey J. Hardness Conversion Table: Brinell to Rockwell A B C / <http://www.anvilfire.com/FAOs.hardness.htm>.
13. RD ÉO 0027–2005. Instructions for determining the mechanical properties of nuclear power plants equipment metal bezobraztsovymi methods for hardness characteristics. — Moscow: FGUP kontsern «Rosénergoatom», 2006. — 47 p. [in Russian].
14. Bida G. V., Nichipuruk A. P. Magnetic properties of the heat treatment steels. — Yekaterinburg: UrO RAN, 2005. — 218 p. [in Russian].
15. Sandomirski S. G. Effect of Measurement Accuracy and Range of Variation of a Physical Quantity on the Correlation Coefficient / Measurement Techniques. Vol. 57. Issue 10(2014). P. 1113 – 1120.