

УДК 669.017.3

**ВАРИАНТ ЗАКАЛКИ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ  
В УСЛОВИЯХ ВСЕСТОРОННЕГО СЖАТИЯ**

**В. И. Большаков\*, Г. М. Воробьев\*, Т. С. Хохлова\*\***

\* Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры

\*\* Национальная металлургическая академия Украины

**Постановка проблемы.** Закалка является одним из основных видов термической обработки стали. В результате закалки сталь приобретает повышенную прочность и твердость, а также хрупкость. Повышенная хрупкость может возникать в стали в результате появления микротрещин и даже трещин [1]. Это связано со сдвиговым характером мартенситного превращения, который отчетливо проявляется в появлении игольчатого рельефа на предварительно полированной поверхности стали после закалки [2]. Такие сдвиги происходят также и во внутренних слоях стали и внутри ее аустенитных зерен. Причиной возникновения микротрещин могут быть большие напряжения на границах мартенситных кристаллов, которые растут в аустенитных зернах с увеличением удельного объема.

Поэтому весьма целесообразно было бы производить закалку стальных изделий в условиях всестороннего сжатия. Объемное сжатие стального изделия в процессе закалки должно затруднять образование трещин и микротрещин, так как их образование происходит с увеличением объема закаливаемого стального объекта.

Поэтому **целью настоящей работы** было использование эффекта увеличения удельного объема сталей при мартенситном превращении с ростом концентрации углерода в стали [3] для выполнения закалки в условиях всестороннего сжатия.

**Анализ исследований и публикаций по проблеме.** Экспериментально увеличение удельного объема закаленной стали при возрастании концентрации углерода в ней было установлено в работе [3]. В таблице 1, взятой из справочника [4], приведены значения удельных объемов закаленных и отожженных сталей с различным содержанием углерода, кремния и марганца.

**Основное содержание.** В таблице 2 приведен расчет коэффициентов регрессии и коэффициента корреляции зависимости разности удельных объемов закаленной и отожженной сталей от содержания углерода.

Таблица 2 составлена в соответствии с рекомендациями книги [5], согласно которой был выполнен расчет коэффициента корреляции

$$R = n * \sum_{i=1}^n C_i \Delta V_i - \sum_{i=1}^n C_i \sum_{i=1}^n \Delta V_i / \sqrt{\left[ n \sum_{i=1}^n C_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n C_i \right)^2 \right]} \sqrt{\left[ n \sum_{i=1}^n \Delta V_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n \Delta V_i \right)^2 \right]} =$$
$$= 11 * 418.79 - 5.5 * 627 / \sqrt{11 * 3.4946 - 5.5^2} * \sqrt{11 * 53841 - 627^2} = 0.9069$$

где  $n$  – число сталей.

Согласно [5], тесноту связи между двумя переменными считают удовлетворительной, если коэффициент корреляции  $R \geq 0,5$ , хорошей при  $R = 0.8 \dots 0.85$ .

Поэтому тесноту связи между разностью удельных объемов закаленной и отожженной стали  $\Delta V$  и концентрацией углерода  $C$  можно считать отличной.

Коэффициенты линейной регрессии  $b$  и  $a$  рассчитывали по формулам:

$$b = n \sum_{i=1}^n C_i \Delta V_i - \sum_{i=1}^n C_i \sum_{i=1}^n \Delta V_i \div n \sum_{i=1}^n C_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n C_i \right)^2 = 11 * 418.79 - 5.5 * 627 \div 11 * 3.4946 - 5.5^2 = 141.4$$

$$a = \sum_{i=1}^n \Delta V_i / n - b \sum_{i=1}^n C_i / n = 627 / 11 - 141.4 * 5.5 / 11 = -13.7.$$

Таким образом, зависимость между величинами  $\Delta V$  и  $C$  согласно расчетам должна выражаться формулой:

$$\Delta V = 141.4 * C - 13.7.$$

Аналогичные расчеты были выполнены для зависимостей разности удельных объемов закаленной и отожженной сталей от концентрации кремния и марганца.

Эти расчеты представлены в таблицах 3 и 4.

Коэффициент корреляции  $R$ , рассчитанный по таблице 3 для линейной зависимости  $\Delta V$  от концентрации кремния, оказался равным

$$\frac{11 \times 132.92 - 2.04 \times 627}{\sqrt{(11 \times 0.4412 - 2.04^2)(11 \times 53841 - 672^2)}} = 0.4932.$$

Таким образом, корреляцию между разностью удельных объемов закаленной и отожженной стали  $\Delta V$  и концентрацией кремния нельзя считать удовлетворительной.

Гораздо меньше получился коэффициент корреляции между  $\Delta V$  и концентрацией марганца, о чем свидетельствует его расчет с использованием данных таблицы 4.

$$R = \frac{11 \times 358.04 - 6.19 \times 627}{\sqrt{[11 \times 4.7669 - 6.19^2] \times \sqrt{[11 \times 53841 - 627^2]}}} = 0.034.$$

Такое значение коэффициента корреляции означает, что связь между  $\Delta V$  и концентрацией марганца практически отсутствует.

На рисунке 1 приведена зависимость между величиной  $\Delta V$  и концентрацией углерода, которая выражается формулой

$$V = 141.4 \times C - 13.7 \quad (1)$$

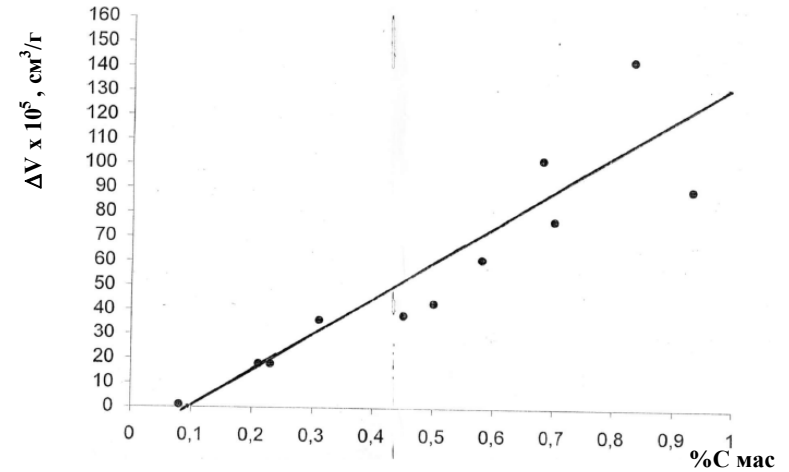


Рис. 1. Зависимость между приростом удельного объема  $\Delta V$  при закалке и концентрации углерода.

Как видно из этого рисунка, прямая (1) пересекает ось абсцисс при концентрации углерода, равной 0.0969 %. Согласно формуле (1), при концентрации углерода меньше 0.0969 % величина  $\Delta V$  должна быть меньше нуля. Однако при таких концентрациях углерода более вероятно равенство  $\Delta V = 0$ , потому что при низких содержаниях углерода закалка стали на мартенсит затруднена. Такое соображение подтверждается анализом таблицы 1, так как  $\Delta V = 1 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{g}$  для  $C = 0,08 \%$  практически соответствует равенству нулю разности удельных объемов закаленной и отожженной стали. Такая разность находится в пределах ошибок измерения плотности с использованием самых точных методов. Поэтому  $\Delta V = 1 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{g}$  можно не считать случайным значением в ряду приведенных в таблице 1, и имеется существенная целесообразность исключить сталь с содержанием углерода 0.08 % из регрессионного анализа.

В таблице 5 приведен расчет коэффициентов регрессии и корреляции после исключения значения  $\Delta V$ , соответствующего концентрации углерода 0.08 %.

Коэффициент корреляции по этой таблице определяется из выражением:

$$R = \frac{10 \times 418.71 - 5.42 \times 626}{\sqrt{(10 \times 3.4842 - 5.42^2)(10 \times 53840 - 626^2)}} = \frac{799 \times 18}{898.1662} = 0.89. \quad (2)$$

Следовательно, новый коэффициент корреляции для линейной зависимости  $\Delta V$  от концентрации на 1,69 % меньше, чем рассчитанный по таблице 2, однако на 4 % больше соответствующего «хорошей» тесноте связи между  $\Delta V$  и концентрацией углерода.

Коэффициенты уравнения регрессии, рассчитанные по таблице 5, оказались равными:

$$b = \frac{10 \times 418.71 - 5.42 \times 626}{10 \times 3.4882 - 5.42^2} = 144.269;$$

$$a = \frac{626}{10} - 144.269 \frac{5.42}{10} = 15.59.$$

Таким образом, после исключения их анализа значения  $\Delta V$  для стали с содержанием углерода 0.08% уравнение регрессии выразилось так (рис. 2):  
 $\Delta V = 144.269 \times C - 15.59$  (3)

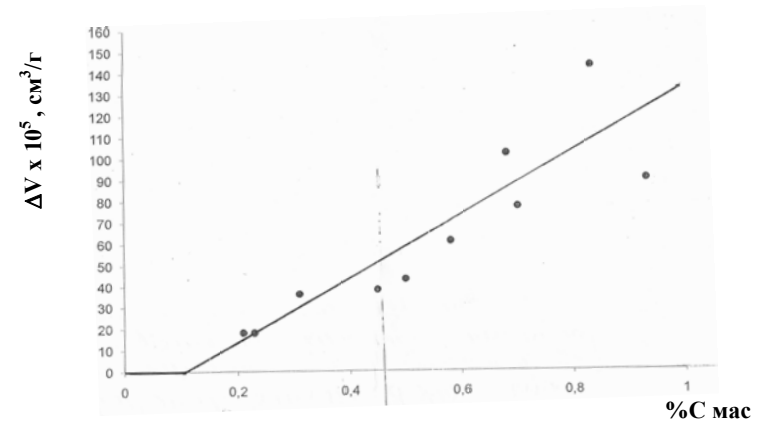


Рис. 2. Зависимость между приростом удельного объема  $\Delta V$  при закалке и концентрацией углерода после исключения из анализа стали с концентрацией углерода 0,08 %.

Отклонение экспериментальных значений  $\Delta V$  таблицы 1 от уравнения (2) использовали для выяснения зависимости этих отклонений от концентрации кремния.

При этом можно было считать, что в таблице 1 наиболее сильно проявляется зависимость  $\Delta V$  от концентрации углерода, а отклонения экспериментальных значений от уравнения (2) могли определяться концентрацией кремния.

Для проверки этого предположения был проведен анализ зависимости  $\Delta V_s - \Delta V_p$  от концентрации кремния, где  $\Delta V_p$  – значения  $\Delta V$ , рассчитанные по уравнению (3);  $\Delta V_s$  – значение приведенное в таблице 1.

Расчеты параметров зависимости разности  $\Delta V_s - \Delta V_p$ , обозначенной  $\Delta V'$  от концентрации кремния приведены в таблице 6.

Согласно этой таблице:

$$b = \frac{10 \times 5.943 - 2.02 \times (-0.03)}{10 \times 0.4408 - 2.02^2} = 181.595;$$

$$a = \frac{-0.03}{10} - 181.595 \frac{2.02}{10} = -36.683;$$

$$R = \frac{10 \times 5.943 - 2.02 \times (-0.03)}{\sqrt{(10 \times 0.4408 - 2.02^2)(10 \times 3196.6621 - 0.0009)}} = 0,58.$$

Этот расчет показывает, что исключение из анализа стали с содержанием углерода 0,08 % выявляет зависимость разности удельных объемов закаленной и отожженной стали от концентрации кремния, которая выражается рисунке 3 и формулой:

$$\Delta V' = 181.595 \text{ Si} - 36.683. \quad (4)$$

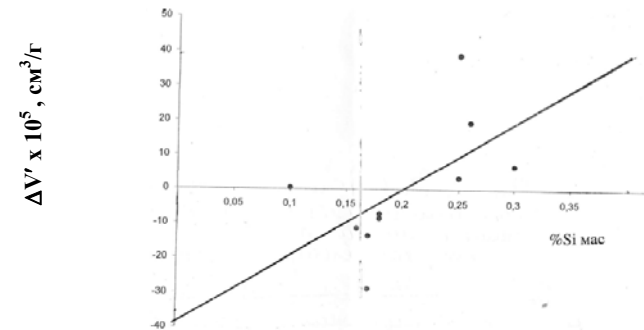


Рис. 3. Зависимость между приростом удельного объема  $\Delta V'$  при закалке и концентрацией кремния.

Коэффициент корреляции этой зависимости  $R = 58\%$  соответствует удовлетворительной тесноте связи между  $\Delta V'$  и концентрацией кремния.

Как видно из таблицы 7 и расчета по ней коэффициента корреляции, тесноту связей между  $\Delta V'$  и концентрацией марганца нельзя считать удовлетворительной. Поэтому для того чтобы проверить наличие корреляционной связи между разностью  $\Delta V_s - \Delta V_p' = \Delta V''$  таблицей 6 и концентрацией марганца, был сделан расчет, приведенный в таблице 8, где  $\Delta V_p'$  рассчитывали по формуле (4).

Для того, чтобы проверить наличие корреляционной связи между разностью  $\Delta V^i$  таблицы 6 и концентрацией марганца был сделан расчет, приведенный в таблице 7.

Для таблицы 8 коэффициент корреляции:

$$R = \frac{10.1 - 6.78767 - 6.071 \times (-10.021)}{\sqrt{(10 \times 4.7536 - 6.071^2)(10 \times 1837.5054 - 10.021^2)}} = -0.016.$$

Поскольку для таблицы 8 коэффициент корреляции оказался очень близким к нулю, то связь между разностью удельных объемов закаленной и отожженной стали, согласно с предыдущими расчетами можно было выразить формулой:

$$\Delta v = (144.269 \times C - 15.59) + (181.595 \times Si - 36.683) = 144.269C + 181.595Si - 52.273. \quad (5)$$

Для закалки в условиях всестороннего сжатия в экспериментах была использована сталь 70 с содержанием углерода 0.68 %, кремния 0.12 % и марганца 0.34 %. Рассчитанное по формуле (4) увеличение удельного объема при закалке стали составило  $67.6184 \times 10^{-5} \text{ см}^3/\text{г}$ , а относительное изменение удельного объема:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{67.6184}{129.75} = 0.0052 = 0.52\%.$$

Если мартенситное превращение стали с концентрацией 0.68 % будет происходить внутри обезуглероженной ниже уровня 0.08 % углерода, то на поверхности контакта объемов стали с разной концентрацией углерода должно возникнуть давление сжатия  $P$ , которое, согласно [7], выражается формулой:

$$-\frac{\Delta V}{V} = -\alpha\rho + \beta\rho^2, \quad (6)$$

где для железа  $\alpha = 5.844 \times 10^{-12} (\text{ПА})^{-1}$   $\beta = 1.5 \times 10^{-22} (\text{ПА})^{-2}$ .

Поскольку в данном случае  $\Delta v/v = 0.0052$ , то из (5) получаем уравнение в нормальном виде:

$$1.5 \times 10^{-22} P^2 - 5.844 \times 10^{-12} P + 0.0052 = 0; \quad (7)$$

$$P_{1,2} = \frac{5.844 \times 10^{-12} \pm \sqrt{5.844^2 \times 10^{-24} - 4 \times 1.5 \times 10^{-22} \times 0.0052}}{2 \times 1.5 \times 10^{-22} \sqrt{34.152336 - 3.12}}.$$

Анализ выражения (7) показывает, что знак плюс перед корнем не соответствует физическому смыслу взаимосвязи между величиной всестороннего давления  $P$  и изменением объема  $\Delta V$ , потому что при  $\Delta V = 0$  согласно (7) при знаке плюс перед корнем  $P \neq 0$ . Если же перед корнем будет стоять знак минус, то при  $\Delta V = 0$  давление также будет равно нулю.

Поэтому для подсчета давления на поверхности соприкосновения двух объемов стали с разной концентрацией углерода использовали следующее выражение:

$$P = \frac{5.844 \times 10^{-12} - 10^{-12} \sqrt{5.844^2 - 4 \times 1.5 \times 0.52}}{2 \times 1.5 \times 10^{-22}} = 0.0911 \times 10^{10} \text{ Па.}$$

Это давление соответствует 911 МПа или 91 кгс/мм<sup>2</sup>. Поскольку мартенситное превращение в среднеуглеродистых сталях происходит при повышенной температуре, то в действительности давление должно быть несколько меньшим, так как начало мартенситного превращения среднеуглеродистых сталей соответствует температуре около 300 °С [8]. При этой температуре должна происходить значительная релаксация напряжений. Кроме того, при таком давлении мартенситное превращение в не обезуглероженной внутренней части стального изделия должно сопровождаться пластической деформацией внешней обезуглероженной сравнительно пластичной оболочки.

Приведенные выше расчеты показали, что при мартенситном превращении обезуглероженный поверхностный слой должен оказывать давление на внутренние области закаленного изделия с исходным содержанием углерода 0.68 %. Это связано с тем, что, согласно таблице 1, сталь с содержанием углерода 0.08 % и меньше при закалке не изменяет свой объем и, следовательно, не должна изменять свою форму. В то же время объем внутренней части стального изделия (необезуглероженной) при закалке должен увеличиваться, однако этому увеличению будет препятствовать внешняя обезуглероженная оболочка. В результате взаимодействия этих двух частей закаливаемого стального изделия внешний обезуглероженный поверхностный слой окажется растянутым, а внутренний и с исходным содержанием углерода – сжатым.

Всестороннее давление, которое сопровождается увеличением удельного объема стали 70 примерно на 0.52 % при закалке, должно препятствовать возникновению микротрещин и, как следствие, должно снижать хрупкость закаленных стальных изделий.

Влияние всестороннего сжатия на механические свойства закаленной стали 70 было проверено в следующих опытах.

Десять образцов для механических испытаний на растяжение с размером рабочей части 15 мм и диаметром 3 мм были выточены на токарном станке из прутка стали 70, диаметром 6,5 мм. Для исключения обезуглероживания поверхности этих образцов в процессе нагрева под закалку последние закладывали в стальную емкость вместе с титановой стружкой, которые закрывались крышкой с резьбой.

Титановая стружка использовалась для предотвращения окисления поверхности разрывных образцов при нагреве. Стальную емкость с разрывными образцами и титановой стружкой запаивали в кварцевую ампулу с предварительной откачкой воздуха и обеспечением вакуума  $2 \cdot 10^4$  мм ртутного столба.

Запаянную ампулу с разрывными образцами помещали в термическую печь с температурой 770 °С. Выдержку разрывных образцов для аустенитизации проводили при такой же температуре в течение 40 минут.

По завершении изотермической выдержки ампулу вытягивали из печи клещами и переносили в емкость с минеральным маслом, где ударом металлического груза ампулу разбивали с закалкой разрывных образцов в масле.

Кроме того, разрывные образцы длиной и диаметром рабочей части соответственно 15 и 3,2 мм подвергали обезуглероживающему отжигу, длительностью 4 часа при температуре 800 °С.

Металлографические исследования на металлмикроскопе показали, что толщина обезуглероженного поверхностного слоя этих образцов составила 0,1 мм.

Разрывные образцы с обезуглероженным поверхностным слоем повторно нагревали до температуры 770 °С с выдержкой 40 минут, после чего закаливали в масле. После закалки рабочая часть закаленных образцов сошлифовывалась до диаметра 3 мм с удалением обезуглероженного слоя (с повышенным количеством пор).

Половину образцов, нагревавшихся под закалку в кварцевой ампуле, после закалки подвергали отпуску при температуре 200 °С в течение 1 часа.

Подготовленные таким образом образцы испытывали на разрыв на разрывной машине при максимальной нагрузке 10 килоньютон, с записью диаграммы растяжения. На рисунке 4 приведено по одной кривой растяжения для трех серий образцов стали 70: после закалки с нагревом в вакууме, а также с дополнительным отпуском при 200 °С, и закаленных после обезуглероживания поверхностного слоя.

Как видно на рисунке 4, вершина кривой растяжения образца после предварительного обезуглероживания в 34 раза выше, чем после закалки без обезуглероживания. Сравнение кривых растяжения этих образцов подтверждает предварительное предположение о возможном затруднении образования микротрещин и трещин при закалке образцов стали 70 с поверхностным обезуглероженным слоем. Рисунок 4 показывает, что предварительное обезуглероживание позволяет в значительной степени снизить хрупкость закаленной стали. Острые вершины кривых растяжения закаленных и отпущенных образцов стали 70 позволяют сделать вывод, что в обоих случаях имеет место хрупкое разрушение. Кривая растяжения отпущенного при 200 °С образца имеет хорошо выраженное округление на вершине. Это свидетельствует о том, что при растяжении отпущенного образца имеет место некоторое пластическое течение металла, которое начинает проявляться после достижения предела текучести, который на 25 % ниже, чем у обезуглероженного образца.



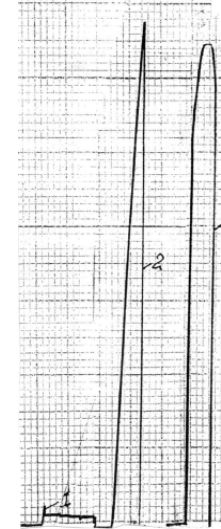


Рис. 4. Диаграммы растягивания стали 70:

1 – обезуглероженной после закалки;

2 – необезуглероженной после закалки;

3 – необезуглероженной после закалки и отпуска при 200 °С 1 час.

Хрупкость стали 70, закаленной без предварительного обезуглероживания, проявляется в чрезвычайно низкой прочности этой стали на разрыв.

В то же время, после предварительного окисления с последующей закалкой, прочность стали 70 на разрыв оказалась на 6 % выше, чем после закалки с предварительным вакуумным нагревом и последующим отпуском при 200 °С.

Поскольку сталь 70 используется для изготовления пружинной проволоки, закалка в условиях всестороннего сжатия может открыть возможность снижения температуры отпуска или его устранения для пружинно-рессорных сталей.

#### ВЫВОДЫ

1. Проведен корреляционный анализ зависимости разности удельных объемов закаленной и отпущенной стали от содержания углерода, кремния, марганца.

2. На основании корреляционного анализа литературных данных об изменении плотности закаленных сталей с различным содержанием углерода рассчитана величина всестороннего давления стали 70 при закалке после предварительного поверхностного окисления.

3. Предложен способ закалки стали в условиях всестороннего сжатия.

**Таблица 1**  
**Зависимость удельного объема закаленной и отожженной стали от химического состава**

Химический состав %			Удельный объем см <sup>3</sup> /г		$(V_3 - V_0) \cdot 10^5$ , см <sup>3</sup> /2
C	Mn	Si	Отжига, $V_0$ , см <sup>3</sup> /2	Закалки, $V_3$ , см <sup>3</sup> /2	
0.08	0.12	0.02	0.12707	0.12708	1
0.21	1.05	0.25	0.12761	0.12779	18
0.23	0.54	0.10	0.12724	0.12742	18
0.31	0.73	0.30	0.12752	0.12788	36
0.45	0.14	0.16	0.12747	0.12785	38
0.50	0.53	0.17	0.12786	0.12829	43
0.58	0.90	0.18	0.12750	0.12811	61
0.68	1.17	0.26	0.12873	0.12975	102
0.70	0.39	0.18	0.12785	0.12862	77
0.83	0.28	0.25	0.12757	0.12900	143
0.93	0.34	0.17	0.12802	0.12892	90

Таблица 2

Расчет коэффициентов регрессии и корреляции для  $\Delta V = f(c)$ 

$C, \%$ масс	$\Delta V \cdot 10^5, c$ $\text{м}^3/\text{г}$	$C - \bar{C}$	$\Delta V - \Delta \bar{V},$ $\text{см}^3/\text{г}$	$(C - \bar{C})^2$	$(\Delta V - \Delta \bar{V})^2$	$C^2$	$\Delta V^2$	$C \cdot \Delta V$	$(C - \bar{C}) \cdot$ $*(\Delta V - \Delta \bar{V}),$
0.08	1	-0.42	-56	0.1764	3136	0.0064	1	0.08	23.52
0.21	18	-0.29	-39	0.0841	1521	0.0441	324	3.78	11.314
0.23	18	-0.27	-39	0.0729	1521	0.0529	324	4.14	10.53
0.31	36	-0.19	-21	0.0361	441	0.0961	1296	11.16	3.99
0.45	38	-0.05	-19	0.0025	361	0.2025	1444	17.1	0.95
0.50	43	0	-14	0	196	0.25	1849	21.5	0
0.58	61	0.08	4	0.0064	16	0.3364	3721	35.38	0.32
0.68	102	0.18	45	0.0324	2025	0.4624	10404	69.36	8.1
0.70	77	0.20	20	0.04	400	0.49	5929	53.9	4
0.83	143	0.33	86	0.1089	7396	0.6889	20449	118.69	28.38
0.93	90	0.43	33	0.1849	1089	0.18649	8100	83.7	14.19
<b>5.5</b>	<b>627</b>			<b>0.7446</b>	<b>18102</b>	<b>34946</b>	<b>53841</b>	<b>418.79</b>	<b>105.29</b>

Таблица 3

Расчет коэффициента корреляции для зависимости разности удельных объемов  $\Delta V$  закаленной и отожженной стали от концентрации кремния Si

Si, % масс	$\Delta V$ $\text{см}^3/\text{г}$	Si-Si, % масс	$\Delta V - \Delta V,$ $\text{см}^3/\text{г}$	$\text{Si}^2$	$\Delta V - \Delta V,$ $\text{см}^3/\text{г}$	$\text{Si}^* \Delta V$	$(\Delta V - \Delta V)^**(\text{Si-Si})$	$(\text{Si-Si})^2$	$\Delta V^2$
0.02	1	-0.1655	-56	0.0004	3136	0.02	9.268	0.02739	1
0.1	18	-0.0855	-39	0.01	1521	1.8	3.3345	0.09731	324
0.16	38	-0.0255	-19	0.0256	361	6.68	0.4845	0.00065	1444
0.17	43	-0.0155	-14	0.0289	196	7.31	0.217	0.00024	1849
0.17	90	-0.0155	33	0.0289	1089	15.3	0.5115	0.00024	8100
0.18	77	-0.0055	20	0.0324	400	13.86	-0.11	0.00003	5929
0.18	61	-0.0055	4	0.0324	16	10.98	-0.022	0.00003	3721
0.25	143	0.0645	86	0.0625	7396	35.75	5.547	0.00416	20449
0.25	18	0.0645	-39	0.0625	1521	45	-2.816	0.00416	324
0.26	102	0.0745	45	0.0676	2025	26.52	3.3525	0.00555	10404
0.30	36	0.1145	-21	0.09	441	10.8	-2.405	0.01311	1296
<b>2.04</b>	<b>627</b>			<b>0.4412</b>	<b>18102</b>	<b>132.92</b>	<b>16.34</b>	<b>0.06287</b>	<b>53841</b>

**Таблица 4**  
**Расчет коэффициента корреляции для линейной зависимости разности удельных объемов закаленной и отожженной стали  $\Delta V$  от концентрации Mn**

Mn,% масс	$\Delta V \cdot 10^5$ , см <sup>3</sup> /г	Mn-Mn % масс	$\Delta V - \Delta V$ , см <sup>3</sup> /г	$(Mn-Mn)^2$ см <sup>6</sup> /г	$(\Delta V - \Delta V)^2$ , см <sup>3</sup> /г	Mn <sup>2</sup>	$\Delta V^2 \cdot$ $10^{10}$	Mn * $\Delta V$	(Mn-Mn)* *( $\Delta V - \Delta V$ )
0.12	1	-0.443	-56	0.196	3136	0.0144	1	0.12	24.808
0.14	38	-0.423	-19	0.1789	361	0.0196	1444	5.32	8.037
0.28	143	-0.283	86	0.08	7396	0.0784	20449	40.04	24.338
0.34	90	-0.223	33	0.0497	1089	0.1156	8100	30.6	7.359
0.39	77	-0.173	20	0.03	400	0.1521	5929	30.53	3.46
0.53	43	-0.033	-14	0.00109	196	0.2809	1849	22.79	0.462
0.54	18	-0.023	-39	0.000529	1521	0.2916	324	9.72	0.897
0.73	36	0.167	-21	0.0279	441	0.5329	1296	26.28	3.507
0.90	61	0.337	4	0.1136	16	0.81	3721	54.9	1.348
1.05	18	0.487	-39	0.237	1521	1.1025	324	18.9	18.993
1.17	102	0.607	45	0.2956	2025	1.3689	10404	119.34	27.315
<b>6.19</b>	<b>627</b>			<b>1.210319</b>	<b>18102</b>	<b>4.7679</b>	<b>53.841</b>	<b>358.04</b>	<b>120.524</b>

**Таблица 5**  
**Расчет коэффициентов уравнения регрессии и коррекции после исключения значения  $\Delta V$ , соответствующего**  
**концентрации углерода 0.08%.**

$C, \%$ масс	$\Delta V$ $\text{см}^3/\text{г}$	$C - \bar{C}$	$\Delta V - \Delta \bar{V}$ , $\text{см}^3/\text{г}$	$(C - \bar{C})^2$	$(\Delta V - \Delta \bar{V})^2$ , $\text{см}^6/\text{г}^2$	$C^2$	$\Delta V^2$	$C * \Delta V$	$(C - \bar{C}) *$ $*(\Delta V - \Delta \bar{V})$
0.21	18	-0.332	-44.6	0.1102	1989.16	0.0441	324	3.78	14.8072
0.23	18	-0.312	-44.6	0.997	1989.16	0.0529	324	4.14	13.9152
0.31	36	-0.232	-26.6	0.0538	707.56	0.0961	1296	11.16	6.1712
0.45	38	-0.092	-24.6	0.00846	605.15	0.2025	1444	17.1	2.2632
0.5	43	-0.042	-19.6	0.001764	384.16	0.25	1849	21.5	0.8232
0.58	61	0.038	-1.6	0.00144	2.56	0.3364	3721	35.38	-0.0608
0.68	102	0.138	39.4	0.019	1552.36	0.4624	10409	69.36	5.4372
0.7	77	0.158	14.4	0.025	207.36	0.49	5929	53.9	2.2752
0.83	143	0.288	80.4	0.083	6464.16	0.6889	20449	118.69	23.1552
0.93	90	0.388	27.4	0.1505	150.76	0.8649	8160	83.7	10.6312
<b>5.42</b>	<b>626</b>			<b>0.550164</b>	<b>14652.39</b>	<b>3.4882</b>	<b>53840</b>	<b>418.71</b>	<b>79.134</b>

**Таблица 6**  
**Расчет коэффициентов корреляции и коэффициентов уравнения регрессии между отклонениями экспериментальных от расчетных значений  $\Delta V$  от концентрации кремния**

Si, % масс	C, % масс	$\Delta V_3$ см <sup>3</sup> /г	$\Delta V_3$ см <sup>3</sup> /г	$\Delta V =$ $(\Delta V_3 -$ $\Delta V_p)$	Si-Si, % масс	Si <sup>2</sup>	$(\Delta V)^2$	(Si-Si) % <sup>2</sup> масс	$(\Delta V \cdot$ $\Delta V)^2$	Si*( $\Delta V_3 -$ $\Delta V_p)$	(Si-Si)* $r(\Delta V_3 -$ $\Delta V)$
0.1	0.23	18	17.59	0.41	-	0.01	0.1681	0.0104	0.1656	0.041	-0.0415
0.16	0.45	38	49.33	-11.33	-	0.256	128.3	0.00176	128.44	-1.8128	0.476
0.17	0.5	43	56.54	-13.54	-	0.0289	183.3	0.001024	183.46	-2.3018	0.433
0.17	0.93	90	118.58	-28.58	-	0.0289	816.8	0.001024	816.99	-4.8586	0.9143
0.18	0.58	61	68.09	-7.09	-	0.0324	50.268	0.000484	50.31	-1.2762	0.156
0.18	0.7	77	85.4	-8.4	-	0.0324	70.56	0.000484	70.61	-1.512	0.1849
0.25	0.21	18	14.71	3.29	0.048	0.0625	10.82	0.002304	10.804	0.8225	0.1578
0.25	0.83	143	104.15	38.85	0.048	0.0625	1509.3	0.002304	1509.09	9.7125	1.8647
0.26	0.68	102	82.51	19.49	0.058	0.0676	379.86	0.003364	379.74	5.0674	1.1302
0.3	0.31	36	29.13	6.87	0.098	0.09	47.196	0.00969	47.155	2.061	0.673
<b>2.02</b>				<b>-0.03</b>		<b>0.4408</b>	<b>3196.6621</b>	<b>0.119188</b>	<b>3197.1166</b>	<b>5.943</b>	<b>5.9484</b>

**Таблица 7**

**Расчет коэффициента корреляции между разностью  $\Delta V'_3 - \Delta V'_p$  и концентрацией марганца, где  $\Delta V'_3 = \Delta V'$  в табл.6, а  $\Delta V'_p$  рассчитывается по формуле (3)**

Mn,% масс	Si,% масс	$\Delta V'_3$ см <sup>3</sup> /г	$\Delta V'_p$ см <sup>3</sup> /г	$\Delta V'_3 - \Delta V'_p$	Mn- Mn	$\frac{\Delta V'_3 - \Delta V'_p}{\Delta V'_3 - \Delta V'_p}$ (Mn- Mn)	$[(\Delta V'_3 - \Delta V'_p)^2 - \Delta V'_p]$	Mn <sup>2</sup>	$(\Delta V'_3 - \Delta V'_p)^2$	Mn* *( $\Delta V'_3 - \Delta V'_p$ )	(Mn- Mn)* *(Z)
0.14	0.1638	-11.33	-7.63	-3.7	-0.4671	-4.702	22.1097	0.0196	13.69	-0.518	2.19635
0.28	0.25143	38.85	8.716	30.134	-0.3271	29.131	848.668	0.0784	408.06	8.43752	-9.529
0.34	0.1790	-28.58	-5.812	-22.768	-0.2671	23.770	565.018	0.1156	518.38	-7.74112	6.349
0.39	0.1877	-8.4	-3.996	-4.404	-0.2171	-5.4061	29.2259	0.1521	19.395	-1.71756	1.1737
0.53	0.1743	-13.54	-5.81	-7.73	-0.0771	-8.7321	6.2496	0.2809	59.753	-4.0969	0.6732
0.54	0.118	0.41	-18.52	18.93	-0.0671	7.9279	142.14	0.2916	79.74	4.8222	-0.532
0.73	0.336	6.87	17.79	-10.92	0.1229	11.922		0.5329	119.2464	-7.9716	-1.4652
0.90	0.1861	-7.09	-3.996	-3.094	0.2929	-4.0961	16.778	0.81	9.573	-2.7846	-1.1997
1.05	0.2518	3.29	8.716	-5.426	0.4429	-6.4281	41.32	1.1025	29.44	-5.6973	-2.847
1.17	0.26102	19.487	0.53	8.957	0.5629	7.9549	63.28	1.3689	80.228	10.47969	4.4778
6.07				-0.021	-0.001	20.041	1797.6392	4.7525	1337.5054	-6.78767	-0.70285



**Таблица 8**

**Расчет коэффициента корреляции между разностью  $\Delta V'_3 - \Delta V'_p$  и концентрацией марганца,**

**где  $\Delta V'_3 = \Delta V'_3$  в табл.б, а  $\Delta V'_p$  рассчитывается по формуле (3)**

$Mn, \%_{\text{мас}}$	$\Delta V_3, \text{см}^3/\text{т}$	$\Delta V_p, \text{см}^3/\text{т}$	$\Delta V = (\Delta V_3 - \Delta V_p)$	$Mn - Mn$ $\%_{\text{мас}}$	$\Delta V_3 - \Delta V_p$ $\%_{\text{мас}}$	$\Delta V_3 - \Delta V_p$ $(Mn - Mn)^2$ $\%_{\text{мас}}$	$(\Delta V_3 - \Delta V_p)^2$	$Mn^2$ $\%_{\text{мас}}$	$(\Delta V_3 - \Delta V_p) \cdot Mn^2$ $\%_{\text{мас}}$	$(\Delta V_3 - \Delta V_p)^2$	$Mn(\Delta V_3 - \Delta V_p)$ $\square$	$(Z)$ $(Mn - Mn)^*$
0.14	0.1638	-11.33	-7.63	-0.4671	-4.702	0.2118	22.1097	0.0196	13.69	13.69	-0.518	2.19635
0.28	0.25143	38.85	8.716	-0.3271	29.1319	0.107	848.668	0.0784	408.06	408.06	8.43752	-9.529
0.34	0.1790	-28.58	-5.812	-0.2671	-23.7701	0.0713	565.018	0.1156	518.38	518.38	-7.74112	6.349
0.39	0.1877	-8.4	-3.996	-0.2171	-5.4061	0.0471	29.2259	0.1521	19.395	19.395	-1.71756	1.1737
0.53	0.1743	-13.54	-5.81	-0.0771	-8.7321	0.00594	6.2496	0.2809	59.753	59.753	-4.0969	0.6732
0.54	0.118	0.41	-18.52	-0.0671	7.9279	0.0045	62.85	0.2916	79.74	79.74	4.8222	-0.532
0.73	0.336	6.87	17.79	0.1229	-11.9221	0.0151	142.14	0.5329	119.2464	119.2464	-7.9716	-1.4652
0.90	0.1861	-7.09	-3.996	0.2929	-4.0961	0.0858	16.778	0.81	9.573	9.573	-2.7846	-1.1997
1.05	0.2518	3.29	8.716	0.4429	-6.4281	0.19616	41.32	1.1025	29.44	29.44	-5.6973	-2.847
1.17	0.26102	19.487	0.53	0.5629	7.9549	0.3168	63.28	1.3689	80.228	80.228	10.47969	4.4778
<b>6.07</b>				<b>-0.001</b>	<b>-20.0419</b>	<b>1.0615</b>	<b>1797.6392</b>	<b>4.7525</b>	<b>1337.5054</b>	<b>1337.5054</b>	<b>-6.78767</b>	<b>-0.70285</b>

### Литература

1. Бернштайн Л. М., Капуткина Л. М., Прокошкина С. Д. Отпуск стали. М. : МИСИС. – 336 с.
2. Курдюмов Г. В., Утевский Л. М., Энтин Р. И. Превращения в железе и стали. М., Наука, 1972. – 238 с.
3. Металловедение и термическая обработка стали и чугуна, Справочник, ГНТИЛЧЦМ, М., 1956. – 390 с.
4. Окнов М. Г. Журнал Русского металлургического общества. Ч.1, № 5, 1912.
5. Крутов В. И., Грушко В. В., Попов А. Я. и др. Основы научных исследований. – М. : Высшая школа. – 308 с.
6. Кивилис С. С. Техника измерений плотности жидкостей и твердых тел. М., 1959.
7. Физические величины. Справочник. 1991. Энергоиздат, 1232 с.
8. Арзамасов Б. Н. и др. Материаловедение, М. : Изд-во МГТУ. – 2001. – 646 с.