

УДК 669.018.14: 669.15 – 194: 621.78: 620.197

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ И АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОДОБИЯ
ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА УГЛЕРОДУ СТАЛИ 110Г13Л**

В. И. Большаков, д. т. н., проф., О. П. Юшкевич, к. т. н., доц.

*ГВУЗ «Приднепровская государственная академия
строительства и архитектуры»*

Постановка задачи. Ранее показано [1], что максимальное влияние на комплекс механических свойств стали 110Г13Л оказывает марганец. Это связано с его способностью растворяться в аустенитной матрице по принципу замещения, искажая её кристаллическую структуру, а также образовывать после кристаллизации и последующего нагрева под закалку дисперсные карбиды на границах зёрен. Минимальное воздействие на механические свойства производит углерод, который ведёт к формированию в литой структуре значительных объёмов карбидных включений, в основном, растворяющихся в процессе дальнейшей термической обработки в период выдержки стали при высоких температурах. Углерод, растворяясь по принципу внедрения в аустените, вызывает не столь значительные искажения в ГЦК кристаллах, как марганец, замещающий железо в узлах элементарных ячеек. Однако, наилучшее сочетание механических свойств стали Гадфильда достигается, когда отношение марганца к углероду составляет 10-14. Таким образом, в сочетании с марганцем углерод оказывает основное воздействие на качество аустенитной высокомарганцевистой стали. Он также сильно влияет на структуру и свойства железо-углеродистых сплавов. Поэтому с ним удобно сравнивать влияние других химических элементов на различные характеристики сталей. При этом широкое распространение получил признак сплавов, показывающий суммарное влияние на качество, который носит название углеродный эквивалент [2].

Однако, углеродный эквивалент, для подавляющего большинства сталей является показателем свариваемости и рассчитывается для некоторых конструкционных или строительных материалов по одним и тем же формулам, которые введены в государственные стандарты, и включают в себя только часть элементов марочного химического состава. При этом ряд химических компонентов, присутствующих в составе множества других сталей, отсутствует в формуле углеродного эквивалента. Поэтому, применять углеродный эквивалент для анализа влияния химического состава на качество различных сталей, можно только в первом приближении. Таким образом, использовать углеродный эквивалент, как обобщенный показатель химического состава для исследования зависимости от него механических свойств некорректно, даже для сталей, для которых разработана его формула.

В процессе производства металлоизделий возникают технологические колебания компонентов химического состава стали в пределах марочных значений, относительно их среднего уровня, вызванные особенностями шихтовки, выплавки и другими факторами, в итоге определяющими конечную структуру и физико-механические свойства. Таким образом, возникает необходимость сравнения меры воздействия компонентов химического состава на комплекс механических свойств, в том числе для углерода.

Поэтому были разработаны [3] методы расчёта инвариантов подобия химических элементов углероду по степени влияния на физико-механические свойства и оценки интегрального инварианта химического состава стали углероду по вкладу в комплекс показателей качества, которые легко реализуемы для любой стали в промышленных условиях и учитывают недостатки углеродного эквивалента. Инварианты подобия химических элементов углероду можно определить, зная весовые коэффициенты отдельных компонентов стали, которые оцениваются упрощённо, из парных корреляций [1; 3]. Подставляя вычисленные инварианты подобия углероду в линейные уравнения, обобщённо характеризующие качество стали, можно получить математические выражения интегральных инвариантов химических составов сталей углероду по вкладу в комплекс механических свойств.

Таким образом, проблема определения и анализа подобия химических элементов углероду по воздействию на качество стали 110Г13Л, актуальна. Для её решения необходимо выполнить количественную оценку инвариантов подобия химических элементов углероду по их вкладу комплекс механических свойств, основанную на корреляционных и факторных методах выявления зависимостей между признаками, получить и проанализировать уравнение интегрального инварианта химического составов углероду по вкладу в качество стали 110Г13Л.

Теоретическое обоснование. Многомерное пространство начальных признаков отдельной стали можно свернуть к новому меньшему по размерности факторному [4–6]. При этом на первую факторную ось можно спроектировать значения химических элементов, входящих в состав сталей.

В новом пространстве описания отдельно рассматриваемой стали, 1-ми абсолютными факторами её качества могут быть [1]: обобщенный показатель, 1-я главная компонента (ГК) или 1-й центроидный фактор (ЦФ) химического состава. Сравнение этих факторов в работе [1] показало их общую идентичность. Поэтому учитывая, что разработанный [3] и опробованный [1] статистический метод определения уровней вклада отдельных химических элементов в комплекс механических свойств является более простым, в дальнейшем было принято целесообразным использовать для построения и анализа закономерностей вклада компонентов стали в комплекс механических свойств обобщенный показатель химического состава.

Формула обобщенного показателя химического состава представлена в работе [7] может быть записана в следующем виде:

$$K(x) = P_c [C] + P_{Mn} [Mn] + P_{Si} [Si] + P_P [P] + P_S [S] + \dots + P_j x_{(j)} + P_J x_{(J)}, \quad (1)$$

где P_j – абсолютные статистические коэффициенты вклада химических компонентов в комплекс механических свойств, рассчитываемые по формуле [3]:

$$P_j = \sum_{i=1}^p P_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^p |r_{(i)(j)}|}{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^p |r_{(i)(j)}|}, \quad (2)$$

представляющие собой вероятности наступления события влияния заданного химического элемента на комплекс механических свойств, и являющиеся долей от общей абсолютной взаимосвязи между всеми признаками, приходящейся на один компонент химического состава; i – индексы механических свойств ($i = 1, \dots, \rho$), которые могут иметь значения и наименования:

$\sigma_{(1)} = \sigma_B$; $\sigma_{(2)} = \sigma_T$; $\sigma_{(3)} = \delta_5$; $\sigma_{(4)} = \psi$; $\sigma_{(5)} = KCU$ и т. д.; j – номера компонентов в химическом составе стали ($j = 1, \dots, J$), которые могут иметь значения и соответствовать: 1 – [C]; 2 – [Mn]; 3 – [Si]; 4 – [S]; 5 – [P] и т. д.; $|r_{(i)(j)}|$ –

абсолютные коэффициенты парной корреляции химических элементов $x_{(j)}$ и механических свойств $\sigma_{(i)}$, которые представляют собой уровни благоприятных исходов m_{ij} связи признаков сталей;

$\sum_{i=1}^{\rho} |r_{(i)(j)}| = n_j$ – суммы коэффициентов парной корреляции, равные количеству благоприятных исходов n_j связи заданного химического компонента с комплексом механических свойств;

$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho} |r_{(i)(j)}| = \sum_{j=1}^J n_j = \sum_{i=1}^{\rho} n_i = n(x)$ – сумма, определяющая число

всех возможных благоприятных исходов или общий уровень взаимосвязей n между всеми элементами химического состава и механическими свойствами;

P_{ij} – уровни вероятности влияния заданного химического компонента

$x_{(j)}$ или отдельного физико-механического свойства $\sigma_{(i)}$ на все признаки стали, которые определяют по формуле [4]:

$$P_{ij} = \frac{m_{ij}}{n} = \frac{|r_{(i)(j)}|}{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho} |r_{(i)(j)}|}, \quad (3)$$

как отношения значений (без учёта знака) благоприятных исходов m_{ij} , к n – количеству всех возможных благоприятных событий взаимосвязей признаков стали в выборке. При этом

$$0 \leq P_j \leq 1, \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^J P_j = 1. \quad (5)$$

С использованием математического выражения (2) в работе [1] были определены абсолютные значения коэффициентов вклада химических элементов в комплекс механических свойств, величины которых представлены на ри-

сунке 1, и получено уравнение обобщенного показателя химического состава стали 110Г13Л:

$$K(x) = 0,118[C] + 0,352 [Mn] + 0,257 [Si] + 0,172[P] + 0,102[S], \quad (6)$$

которое показывает интегральный абсолютный вклад химических компонентов в комплекс механических свойств.

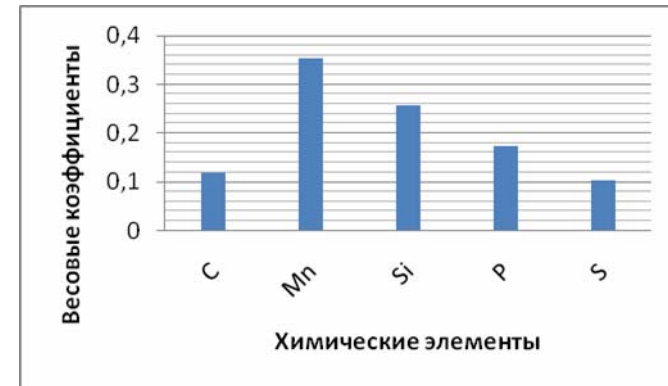


Рис. 1. Диаграмма сравнения коэффициентов вклада химических элементов в качество стали 110Г13Л

Анализ диаграммы (рис. 1) и уравнения (10) выполненный в работе [1] позволил установить, что максимальное воздействие на качество стали оказывает марганец, значительное – кремний и фосфор, незначительное – углерод и минимальное – сера. Это позволило рекомендовать марганец, кремний и фосфор, как основные параметры воздействия на качество стали 110Г13Л.

Материал и методика исследования. Для определения интегрального инварианта химического состава стали углероду по вкладу в комплекс механических свойств стали Гатфильда, на основе данных по 543 промышленным плавкам железнодорожных крестовин и сердечников типов Р50 и Р65, в среде Excel, рассчитаны инварианты подобия химических элементов углероду по влиянию на качество рассматриваемых металлоизделий.

При этом была рассчитана матрица $R(\sigma_{(i)}, x_{(j)})$ абсолютных значений коэффициентов множественной корреляции $r_{(i)(j)}$ химических компонентов $x_{(j)}$ и механических свойств $\sigma_{(i)}$ стали 110Г13Л, представленная в работе [1].

Применение полученной матрицы позволило рассчитать по формуле (3) вероятности влияния P_{ij} заданного химического элемента $x_{(j)}$ на всю совокупность механических свойств стали [1]. Суммы $\sum_{i=1}^p P_{ij}$ этих вероятностей являются величинами абсолютных статистических коэффициентов вклада

химических компонентов P_j в качестве стали в уравнении обобщённого показателя (1). Последовательно разделив коэффициент вклада углерода P_C из уравнения обобщённого показателя химического состава (1) на веса каждого компонента стали P_j^{opt} , получим соответственно:

$$E_C = \frac{P_C}{P_C} = 1; E_{Mn} = \frac{P_C}{P_{Mn}}; E_{Si} = \frac{P_C}{P_{Si}}; E_P = \frac{P_C}{P_P}; E_S = \frac{P_C}{P_S}; \dots; E_j = \frac{P_C}{P_j}; \dots; E_J = \frac{P_C}{P_J} \quad (7)$$

инварианты подобия химических элементов углероду по степени воздействия на механические свойства [8; 9]. При этом:

$$E_i \geq 0. \quad (8)$$

Умножив найденные таким образом, коэффициенты на соответствующие им величины химических компонентов и последовательно сложив произведения, приходим к математическому выражению интегрального инварианта подобия химического состава стали углероду:

$$C_{инв.} = E_C [C] + E_{Mn} [Mn] + E_{Si} [Si] + E_P [P] + E_S [S] + \dots + E_J x^{(J)}. \quad (9)$$

Изложение основного материала исследований и обсуждение полученных результатов. Разделив коэффициенты вклада углерода последовательно на веса всех компонентов стали из уравнения (6) получим в соответствии с формулой (7) абсолютные величины инвариантов подобия химических элементов углероду по степени влияния на комплекс механических свойств, представленные графической зависимостью в виде столбиковой диаграммы на рисунке 2.

Анализ диаграммы инвариантов подобия химических элементов, изображённой на рисунке 2 показал, что наиболее близкими химическими элементами к углероду по уровню воздействия на механические свойства являются сера и фосфор. Однако эти компоненты принято считать вредными примесями, поэтому вынужденное снижение их содержания, при наличии в структуре сульфидных, фосфидных и карбофосфидных эвтектик, можно компенсировать повышением количества углерода в составе стали. При этом необходимо учитывать, что сера и кремний негативно влияют на механические свойства стали 110Г13Л [8]. Марганец обладает наименьшим сходством с углеродом по влиянию на комплекс механических свойств. Поэтому, компенсировать снижение количества марганца, обусловленное экономической необходимостью, путём увеличением содержания углерода не эффективно.

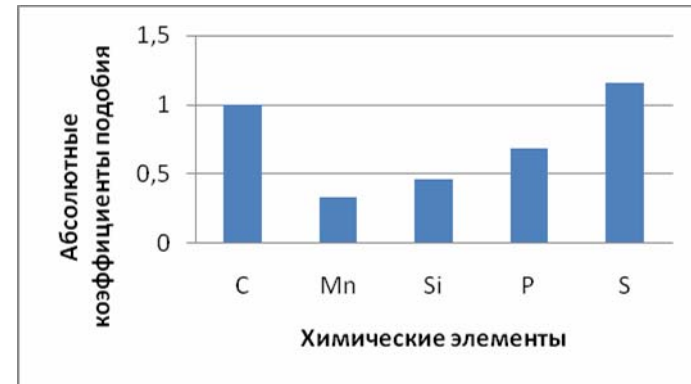


Рис. 2. Диаграмма сравнения инвариантов подобия химических элементов углероду

Подставив значения инвариантов подобия в уравнение (9), приходим к формуле абсолютной величины интегрального инварианта подобия химического состава стали 110Г13Л углероду по вкладу в комплекс механических свойств:

$$C_{инв.} = [C] + 0,3357[Mn] + 0,4598[Si] + 0,6885[P] + 1,1567[S]. \quad (10)$$

Полученное математическое выражения имеет внешнее сходство с формулой углеродного эквивалента $C_{экв.}$ [2]. Однако не является её аналогом, так как определяют вклад [C] в комплекс механических свойств, даже не смотря на то, что расчётные значения интегрального инварианта подобия химического состава углероду имеют один порядок с величинами углеродного эквивалента и близки к ним.

В отличие от $C_{экв.}$ уравнения интегрального инварианта углерода могут быть легко определены по разработанной методике для любых сталей в условиях промышленного производства. При этом они характеризуют связь между составом и свойствами стали.

Повышая или понижая величины интегрального инварианта подобия химического состава стали углероду можно проследить, как будет изменяться уровень обобщённых показателей механических свойств, то есть общая зависимость качества металлоизделий от количества и состава химических компонентов стали 110Г13Л.

ВЫВОДЫ

1. Рассчитана формула интегрального инварианта и коэффициенты подобия химического состава стали углероду по вкладу в комплекс показателей качества. Анализ этого уравнения показал, что максимальным подобием углероду по вкладу в комплекс механических свойств обладает фосфор, а минимальным – марганец.

2. Анализ полученных уравнений и зависимостей показал неоднозначное воздействие различных химических элементов на качество высокомарганцевистой стали.

3. Вклад марганца и фосфора в качество стали, превосходит позитивное влияние углерода на механические свойства. Однако содержание этих химических элементов может быть увеличено в пределах, допустимых нормативными документами и в соответствии с экономической целесообразностью их применения.

Перспективы дальнейших исследований. Дальнейшие исследования будут направлены на применение метода расчёта инвариантов подобия химических элементов углероду по степени воздействия на механические свойства для оптимизации химического состава стали 110Г13Л.

Литература

1. Большаков В. И. Определение и сравнение уровней вклада химических компонентов в комплекс механических свойств стали 110Г13Л / В. И. Большаков, О. П. Юшкевич // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – Д., 2013. – № 6. – С. 34–38.

2. Ем Ю. А. Замена листовых малоуглеродистых сталей при изготовлении баллонов на экономнолегированные с повышенной прочностью и пластичностью / Ю. А. Ем, В. Я. Савенков, О. П. Юшкевич, Е. И. Литвиненко // *Металознавство та термічна обробка металів*. – Д. : ПГАСА, 2003. – № 4.

3. Большаков В. И. Разработка методов расчёта весовых коэффициентов и обобщенных показателей стали / В. И. Большаков, О. П. Юшкевич // *Металознавство та термічна обробка металів*. – Д. : ДВНЗ ПДАБтаА, 2013. – № 1.

4. О. П. Юшкевич. Модель представления комплексного показателя качества сталей до и после термической обработки / Юшкевич О. П. // *Теория и практика металлургии*. – Днепропетровск, 2011. – № 3–4.

5. О. П. Юшкевич. Модель редуцированного пространства описания сталей / Юшкевич О. П., Погорелый В. И., Юшкевич П. О. // *Строительство, материаловедение, машиностроение*. – Вып. 59. – Дн-ск : ГВУЗ «ПГАСА», 2011. – 184 с. (в обл.).

6. В. И. Большаков. Модель интегрального показателя качества в системе аналитического описания сталей / Большаков В. И., Юшкевич О. П. // *Металознавство та термічна обробка металів* – Дн-вск : ГВУЗ ПГГАСА, 2012. – № 3.

7. В. И. Большаков. Разработка методов расчёта обобщенных показателей вклада признаков сталей в их качество / Большаков В. И., Юшкевич О. П. // *Металознавство та термічна обробка металів*. – Дн-вськ : ДВНЗ ПДАБА, 2013. – № 2.

УДК 669.018.14: 669.15 – 194: 621.78: 620.197

Определение и анализ показателей подобия химического состава углероду стали 110Г13Л / В. И. Большаков, О. П. Юшкевич // Металлознание та термічна обробка металів: науков. та інформ. журнал / Д. : ДВНЗ ПДАБА, 2014. – № 3. – С. –. – Рис. 2. – Бібліограф.: (7 назв).

Розраховані інваріанти подоби елементів хімічного складу сталі 110Г13Л вуглецю. Розроблено рівняння інтегрального інваріанта подоби хімічного складу сталі Гатфільду вуглецю по внеску у комплекс механічних властивостей. Встановлені основні закономірності впливу хімічних елементів на комплекс механічних властивостей сталі 110Г13Л.

Вычислены инварианты подобия элементов химического состава стали 110Г13Л углероду. Разработано уравнение интегрального инварианта химического состава стали Гатфильда углероду по вкладу в комплекс механических свойств. Установлены основные закономерности влияния химических элементов на комплекс механических свойств стали 110Г13Л.

Became calculated invariants similarity of elements of a chemical compound 110Г13Л to carbon. The equation integrated invariant a chemical compound of a steel of Gadfield to carbon under the contribution to a complex of mechanical properties is developed. The basic laws of influence of chemical elements on a complex of mechanical properties 110Г13Л became established.