

Определение и сравнение уровней вклада химических компонентов в комплекс механических свойств стали 110Г13Л

Рассчитаны коэффициенты вклада химических элементов в качество аустенитной высокомарганцевистой стали. Разработаны уравнения обобщённого химического состава стали Гадфильда. Установлены основные закономерности вклада химических элементов в комплекс механических свойств стали 110Г13Л. Ил. 1. Табл. 4. Библиогр.: 7 назв.

Ключевые слова: сталь Гадфильда, железнодорожные крестовины, коэффициенты корреляции, коэффициенты вклада в качество, обобщённые показатели качества, главные компоненты, центридные факторы

Weight factors and loadings of chemical elements the steel of Gadfilid are calculated. The equations of the generalised chemical compound of the steel of Gadfilid are developed. The basic laws of influence of chemical elements on a complex of mechanical properties 110Г13Л became established.

Keywords: steel of Gadfilid, railway, correlation factors, the weight factors, the generalised indicators of quality, the main components, factors

Постановка задачи

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.

Допустимые изменения компонентов химического состава аустенитной высокомарганцевистой стали для производства железнодорожных крестовин и сердечников регламентируются ГОСТ 7370-98: [%C] = 1,00-1,30; [%Mn] = 11,50-16,50; [%Si] = 0,3-0,9; [%P] < 0,09; [%S] < 0,020. Разброс у различных плавков стали 110Г13Л значений химических элементов между указанными в марочном составе предельными величинами ведёт к возникновению отличий в макро- и микроструктуре, которые формируются в металле изделий. Возникающее из-за этого рассеяние механических свойств, согласно ГОСТ 7370-98, определяет 3 группы качества железнодорожных крестовин и сердечников. При этом для 1 группы качества комплекс приёмо-сдаточных показателей должен соответствовать следующим условиям: $\sigma_b \geq 880$ Н/мм²; $\sigma_{0,2} \geq 355$ Н/мм²; $\delta_5 \geq 30$ %; $\psi \geq 27$ %; KCU ≥ 250 Дж/см²; для 2 группы качества: $\sigma_b = 880-780$ Н/мм²; $\sigma_{0,2} \geq 355$ Н/мм²; $\delta_5 = 30-25$ %; $\psi = 27-22$ %; KCU $\geq 250-200$ Дж/см²; для 3 группы качества: $\sigma_b = 780-690$ Н/мм²; $\sigma_{0,2} \geq 355$ Н/мм²; $\delta_5 = 25-16$ %; $\psi = 22-16$ %; KCU = 200-165 Дж/см². Такие колебания значений механических свойств металла разных плавков, комплекс которых определяет потребительское качество железнодорожных крестовин и сердечников, затрудняет получение металлоизделий с гарантированными эксплуатационными характеристиками.

Следовательно, возникает необходимость достаточно информативного определения меры воздействия при формировании качества, которую можно оценить по влиянию [1] отдельных компонентов стали на эксплуатационную стойкость металлоизделий или определив интегральный вклад [2] химического

состава в комплекс физико-механических свойств.

Методы расчёта интегральных показателей, выступающих общими характеристиками для всего рассматриваемого множества сталей, основаны на определении коэффициентов, являющихся оценками вклада каждого признака в уровень качества [3].

Разработаны методы оценки обобщённого и долевого вкладов химических элементов в комплекс физико-механических свойств [4, 5] отдельных сталей. При этом представление об абсолютном, то есть полном и обобщённом влиянии признаков на показатели и уровни качества стали дают их коэффициенты вклада, которые можно оценить упрощённо, из парных корреляций [4]. Подставляя вычисленные коэффициенты вклада признаков в линейные уравнения, интегрально характеризующие качество стали, можно получить математические выражения обобщённых показателей [5].

Таким образом, проблема определения коэффициентов вклада признаков, являющихся мерами влияния каждого из них на качество металлоизделий, изготавливаемых из неё, актуальна. Поэтому для построения закономерностей, определяющих и формирующих уровни воздействия химических элементов на эксплуатационные характеристики готовых металлоизделий из стали 110Г13Л, следует выполнить количественную оценку и анализ коэффициентов вклада компонентов стали в её качество, основанную на корреляционных и факторных методах выявления зависимостей между признаками. При этом необходимо получить, проанализировать и сравнить уравнения обобщённых показателей вклада химического состава в комплекс механических свойств стали 110Г13Л.

Теоретическое обоснование

Многомерное пространство начальных признаков отдельной стали можно свернуть к новому меньшему по размерности факторному [3, 5, 6]. При этом на

первую факторную ось можно спроектировать значения химических элементов, входящих в состав сталей. Суммы произведений значений коэффициентов вклада в качество на соответствующие им признаки стали равны величинам абсолютных факторов [3, 5, 6].

В новом пространстве описания отдельно рассматриваемой стали, 1-ми абсолютными факторами её качества могут быть [5]: обобщенный показатель, 1-я главная компонента (ГК) или 1-й центроидный фактор (ЦФ) химического состава.

Формула обобщенного показателя химического состава, представленная в [5], может быть записана в следующем виде

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

где P_j – абсолютные статистические коэффициенты вклада химических компонентов в комплекс физико-механических свойств, рассчитываемые по формуле [4]

$$P_j = \frac{\sum_{i=1}^{\rho} |r_{(i)(j)}|}{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho} |r_{(i)(j)}|} \quad (2)$$

и, представляющие собой вероятности наступления события влияния заданного химического элемента на комплекс физико-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 соответствовать наименованиям: $\sigma_{(1)} = \sigma_B$; $\sigma_{(2)} = \sigma_T$; $\sigma_{(3)} = \delta_5$; $\sigma_{(4)} = \psi$; $\sigma_{(5)} = KCU$ 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 физико-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 физико-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 физико-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

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

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

Математическое выражение 1-й ГК абсолютного вклада химического состава в комплекс свойств [5]

$$Y(x) = \Theta_c [C] + \Theta_{Mn} [Mn] + \Theta_{Si} [Si] + \Theta_p [P] + \Theta_s [S] + \dots + \Theta_j x_{(j)} \dots + \Theta_j x_{(j)} \dots, \quad (6)$$

где Θ_j – коэффициенты при величинах химических элементов, которые в первом приближении определяют абсолютный вклад компонента стали в её качество на первой оси ГК [4, 6], могут быть вычислены по формуле

$$\Theta_j = \frac{\sum_{i=1}^{\rho} |r_{(i)(j)}|}{\max_j \left(\sum_{i=1}^{\rho} |r_{(i)(j)}| \right)}, \quad (7)$$

и представляют собой долю от максимально возможного уровня влияния отдельных химических элементов на комплекс физико-механических свойств.

Формула для расчёта 1-го абсолютного центроидного фактора химического состава стали [5] может быть представлена уравнением

$$G(x) = A_c [C] + A_{Mn} [Mn] + A_{Si} [Si] + A_p [P] + A_s [S] + \dots + A_j x_{(j)} \dots + A_j x_{(j)} \dots, \quad (8)$$

где A_j – коэффициенты абсолютного вклада химических компонентов в качество стали 1-го абсолютного центроидного фактора, которые могут быть вычислены по формуле [4, 6]

$$A_j = \frac{\sum_{i=1}^{\rho} |r_{(i)(j)}|}{\sqrt{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho} |r_{(i)(j)}|}}. \quad (9)$$

Приведенная формула (9) может быть получена, согласно [4, 5], извлечением квадратного корня из знаменателя в выражении (2) для коэффициентов химических элементов обобщенного показателя химического состава стали (1).

Методика исследования

В работе при расчётах абсолютных коэффициентов вклада в качество и обобщенных показателей стали 110Г13Л использованы представления о корреляции, как величине события наличия связи между рассматриваемыми признаками [4, 5]. Разработка формул обобщенных признаков сталей базируется

на представлениях об интегральном показателе качества, определение которого основано на методах, изложенных в работах [3-6].

Изложение основного материала исследований и обсуждение полученных результатов

Для выявления обобщенного влияния элементов химического состава на комплекс механических свойств стали Гадфильда, на основе данных по 543 промышленным плавкам железнодорожных крестовин и сердечников типов P50 и P65, в среде Excel, определены коэффициенты вклада отдельных химических элементов в качество рассматриваемых металлоизделий, величины которых представлены на рисунке.

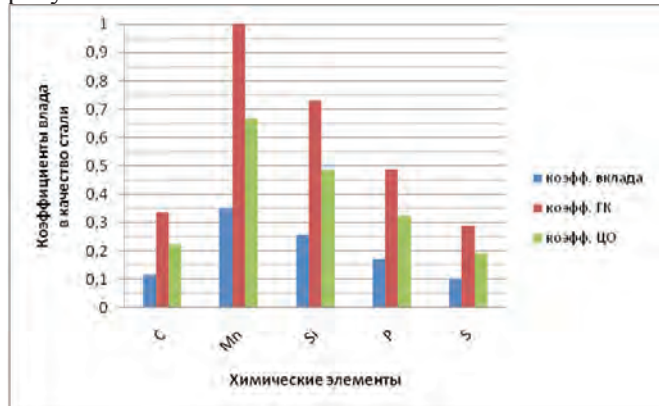


Рисунок. Диаграмма сравнения коэффициентов вклада химических элементов в качество стали 110Г13Л

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 табл. 1.

Таблица 1. Матрица $R(\sigma_{(i)}, X_{(j)})$ абсолютных значений коэффициентов корреляции $r_{(i)(j)}$ химических компонентов $X_{(j)}$ и механических свойств $\sigma_{(i)}$ стали 110Г13Л

Характеристика стали	Химический элемент					Сумма элементов строк
	C	Mn	Si	P	S	
σ_B	0,1602	0,3715	0,1608	0,1143	0,0223	0,8291
$\sigma_{0,2}$	0,1249	0,2262	0,0969	0,344	0,0621	0,8541
δ_5	0,0291	0,3151	0,2075	0,0867	0,0561	0,6945
ψ	0,0705	0,1858	0,1515	0,0385	0,0961	0,5424
KCU	0,0398	0,1659	0,3065	0,0331	0,1304	0,6757
Сумма элементов столбцов	0,4245	1,2645	0,9232	0,6166	0,367	7,1916

Применение полученной матрицы позволило рассчитать по формуле (3) вероятности влияния P_{ij} заданного химического элемента $X_{(j)}$ на всю совокупность признаков стали (табл. 2). Суммы $\sum_{i=1}^p P_{ij}$ этих вероятностей, представлены в столбцах табл. 2, и являются величинами абсолютных статистических коэффици-

ентов вклада химических компонентов P_j в качество стали в уравнении обобщенного показателя (1).

Таблица 2. Статистические коэффициенты и вероятности вклада признаков в качество стали 110Г13Л

Характеристика стали	C	Mn	Si	P	S	Коэффициенты свойств
σ_B	0,0445	0,1033	0,0447	0,0318	0,0062	0,2306
$\sigma_{0,2}$	0,0347	0,0629	0,0269	0,0957	0,0173	0,2375
δ_5	0,0081	0,0876	0,0577	0,0241	0,0156	0,1931
ψ	0,0196	0,0517	0,0421	0,0107	0,0267	0,1508
KCU	0,0111	0,0461	0,0852	0,0092	0,0363	0,1879
Коэффициенты компонентов	0,1180	0,3517	0,2567	0,1715	0,1021	1

Подставляя коэффициенты P_j отдельных химических элементов, значения которых равны суммам столбцов табл. 2, в формулу (1), получаем обобщенный показатель химического состава стали 110Г13Л для железнодорожных крестовин и сердечников типа P50 и P65

$$K(x) = 0,1180[C] + 0,3517[Mn] +$$

$$+ 0,2567[Si] + 0,1715[P] + 0,1021[S], \quad (10)$$

который показывает интегральный абсолютный вклад химических компонентов в комплекс механических свойств. Однако его значения отличаются от величины 1-го абсолютного главного фактора химического состава стали. Это подтверждается рассчитанными по формуле (7) на основе данных табл. 2 абсолютными коэффициентами химических элементов 1-й главной компоненты, представленными в табл. 3 и на рис. 1 (диаграмма коэфф. ГК).

Таблица 3. Сравнение абсолютных значений коэффициентов химических элементов 1-й ГК и статистического вклада компонентов стали 110Г13Л

Характеристика стали	Химический элемент				
	C	Mn	Si	P	S
Абсолютные коэффициенты 1-й ГК	0,3357	1	0,7301	0,4876	0,2902
Коэффициенты вклада	0,1180	0,3517	0,2567	0,1715	0,1021
$\Theta_j - P_j$	0,2176	0,6483	0,4733	0,3161	0,1882

Подставляя значения абсолютных коэффициентов 1-й ГК из табл. 3 в формулу (6), получаем математическое выражение для вычисления 1-й абсолютной ГК химического состава стали

$$Y(x) = 0,3357[C] + [Mn] +$$

$$+ 0,7301[Si] + 0,4876[P] + 0,2902[S]. \quad (11)$$

Полученная формула, по сути, представляет собой эквивалент химического состава марганца, по отношению воздействию на механические свойства.

Элементы матрицы абсолютных параметров влияния отдельных показателей на всю совокупность признаков в центроидном пространстве - A_{ij} , знач-

ния которых записаны в ячейках табл. 4, рассчитаны с использованием формулы (9). Результаты вычислений коэффициентов элементов химического состава A_j 1-го центроидного фактора приведены в последней строке табл. 4 и на рисунке (диаграмма коэфф. ЦО).

Таблица 4. Абсолютные значения параметров влияния отдельных показателей на всю совокупность признаков и коэффициентов элементов химического состава 1-го центроидного фактора

Характеристика стали	C	Mn	Si	P	S	Коэффициенты свойств
σ_B	0,0845	0,1959	0,0848	0,0603	0,0118	0,4372
$\sigma_{0,2}$	0,0659	0,1193	0,0511	0,1814	0,0327	0,4504
δ_5	0,0153	0,1662	0,1094	0,0457	0,0296	0,3662
ψ	0,0372	0,0980	0,0799	0,0203	0,0507	0,2860
KCU	0,0210	0,0875	0,1616	0,0174	0,0688	0,3563
Коэффициенты компонентов	0,2239	0,6668	0,4868	0,3252	0,1935	1,8963

Умножая абсолютные коэффициенты компонентов стали на 1-й центроидной оси на обозначения соответствующих химических элементов и складывая полученные произведения согласно уравнения (8), получаем формулу для расчёта 1-го абсолютного центроидного фактора химического состава

$$G(x) = 0,2239[C] + 0,6668 [Mn] + 0,4868 [Si] + 0,3252[P] + 0,1935[S] \quad (12)$$

Представленные на диаграммах (рисунок) качественные зависимости от элементов химического состава абсолютных коэффициентов статистического вклада (диаграмма коэфф. вклада), 1-й главной компоненты (диаграмма коэфф. ГК) и 1-го центроидного фактора (диаграмма коэфф. ЦО), идентичны. Различия составляют только абсолютные значения коэффициентов при химических элементах. При этом коэффициенты различного рода одного и того же химического компонента стали пропорциональны друг другу.

Графическое сравнение диаграмм, представленных на рисунке, показало, что максимальное влияние на механические свойства 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. Однако, значительным является воздействие на механические свойства кремния. Этот химический компонент способен изменять прочность кристаллических структур внутри и на границах зёрен аустенита. Менее выражено влияние фосфора, которое основано на его способности к повышению величины торможения расщеплённых дислокаций, а также углерода, который, растворяясь по принципу внедрения в аустените, вызывает не столь значительные искажения в кристаллах, как марганец, замещающий железо в узлах элементарных ячеек и частично связанный в карбидах. Минимальное воздействие на

механические свойства оказывает сера, которая связана в сульфидных включениях.

Из диаграмм, представленных на рисунке следует, что влияние изменений содержания кремния на механические свойства близко к величине воздействия на качество металлоизделий марганца при повышении или уменьшении его количества в химическом составе стали. Однако, как следует из работы [7], кремний может оказывать отрицательное влияние на механические свойства. Таким образом, при пониженном содержании марганца компенсировать снижение уровня механических свойств можно за счёт уменьшения количества Si.

Выводы

1. Определены абсолютные значения коэффициентов вклада химических элементов в комплекс механических свойств и получено уравнение обобщенного показателя химического состава стали 110Г13Л, которые показывают, что максимальное воздействие на качество стали оказывает марганец, значительное - кремний и фосфор, незначительное – углерод и минимальное - сера.

2. Получено в первом приближении уравнение 1-й абсолютной главной компоненты химического состава стали 110Г13Л (марганцевый эквивалент). Из уравнения следует, что значения абсолютных коэффициентов вклада в качество стали 1-й ГК у марганца и кремния близки. Однако, влияние кремния на комплекс свойств, противоположно вкладу марганца. Отсюда следует, что понижая содержание Si, можно достичь, такое же воздействие на рост механических свойств, как и при повышении содержания марганца в составе аустенитной высокомарганцевистой стали.

3. Получена формула для расчёта 1-го абсолютного центроидного фактора химического состава стали 110Г13Л, анализ которой подтвердил, что максимальное воздействие на механические свойства оказывают марганец, кремний, а минимальное – фосфор, углерод и сера.

4. Анализ полученных уравнений и зависимостей показал неоднозначность воздействия различных химических элементов на качество высокомарганцевистой стали. Позитивное раздельное влияние марганца и фосфора, превосходит воздействие углерода на механические свойства. Таким образом, содержание этих химических элементов может быть увеличено в пределах, допустимых нормативными документами и в соответствии с экономической целесообразностью их применения.

5. Разработан и опробован статистический метод определения уровней вклада отдельных химических элементов в комплекс механических свойств. Сравнение его с способами определения 1-х главных и центроидных факторов химического состава показало идентичность общих закономерностей вклада компонентов стали в качество металлоизделий.

Перспективы дальнейших исследований

Дальнейшие исследования будут направлены на применение разработанных методов расчёта абсо-

плотных коэффициентов вклада признаков в качество и полученных уравнений обобщенных показателей, главных компонент и центроидных факторов для анализа, оптимизации, моделирования, разработки новых химических составов сталей и различных процессов обработки металлоизделий.

Библиографический список

1. Моделирование характеристик эксплуатационной стойкости крестовин стрелочных переводов из высокомарганцевистой стали / Гасик М.И., Семенов И.А., Юшкевич О.П. и др. // Проблемы специальной металлургии. - 2002. - № 1. - С. 40-43.
2. Гасик М.И. Сталь Гадфильда: современное состояние технологии и материаловедения крестовин железнодорожных стрелочных переводов // Современная электрометаллургия. - 2004. - № 1. - С. 29-39.
3. Юшкевич О.П. Модель представления комплексного показателя качества сталей до и после термической обработки / Теория и практика металлургии // Общегосударственный научно-технический журнал. АИНУ. – Днепропетровск. - 2011. - № 3-4. - С. 150-154.
4. Большаков В.И., Юшкевич О.П. Разработка ме-

тодов расчёта весовых коэффициентов и обобщенных показателей стали / Металознавство та термічна обробка металів: Науков. та інформ. журн. / ПДАБтаА. – Дніпропетровськ. - 2013. - № 1. - С. 14-27.

5. Большаков В.И., Юшкевич О.П. Разработка методов расчёта обобщенных показателей вклада признаков сталей в их качество / Металознавство та термічна обробка металів: Науков. та інформ. журн. / ПДАБтаА. – Дніпропетровськ. - 2013. - № 2-3. - С. 21-35.

6. Иберла К. Факторный анализ / Пер. с нем. В.М. Ивановой; Предисл. А.М. Дуброва. - М.: Статистика, 1980. – 398 с. - (Математико-статистические методы за рубежом).

7. Металлургия высокомарганцевой стали / М.И. Гасик, Ю.В. Петров, И.А. Семёнов и др. – К.: Техника, 1990. - 136 с.

Поступила 01.08.2013



УДК 669.2\8-154.621.315.5.92

**Приходько Э.В. /д.т.н./, Пиптюк В.П. /к.т.н./,
Петров А.Ф., Мороз В.Ф. /к.т.н./, Греков С.В.**
ИЧМ НАНУ им. З.И. Некрасова

Логозинский И.Н.
ПАО «Днепрспецсталь»

Наука

Прогнозирование плотности стандартных марок феррохрома методом физико-химического моделирования

Разработаны модели для описания плотности стандартных марок феррохрома. Установлены закономерности изменения этой физической характеристики в зависимости от модельных параметров межатомного взаимодействия. Ил. 3. Табл. 3. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: феррохром, плотность, модель, критерии, интегральные параметры

Models are worked out for description of density of standard marks of ferrochromium. determine to conformity of change of this physical description are set depending on the model parameters of interatomic interaction.

Keywords: ferrochromium, density, model, criteria, integral parameter

Среди наиболее важных физико-химических и структурно-чувствительных характеристик сплавов особое место занимает плотность, которая влияет на плавление и усвоение кусков ферросплава в ковше, а также на скорость его растворения и равномерность распределения в объеме металла. В литературе дискутируется вопрос о величине оптимальной плотности ферросплава. А.И. Строганов [1] считает, что оптимальная плотность ферросплава должна быть равна плотности жидкого обрабатываемого металла.

В противном случае сплав запутается в шлаке или опустится на дно ковша. Исследование влияния плотности на скорость растворения частиц ферросплавов в стальной ванне показало, что более полно вовлекаются в движение частицы ферросплава, имеющие плотность, равную плотности жидкого расплава [2]. Есть мнение, что плотность ферросплава должна быть больше плотности обрабатываемого металла [3].

Анализ плотности ряда твердых промышленных ферросплавов [4] показал, что величина их зависит от