

Влияние химического состава на механические свойства стали 110Г13Л

Рассчитаны коэффициенты вклада химического состава в отдельные механические свойства аустенитной высокомарганцевистой стали. Разработаны уравнения обобщенного показателя качества стали Гатфильда. Выполнено сравнение параметров уровней вклада химического состава в механические свойства железнодорожных крестовин и сердечников. Ил. 1. Табл. 3. Библиогр.: 7 назв.

Ключевые слова: сталь Гатфильда, железнодорожные крестовины и сердечники, коэффициенты корреляции, коэффициенты вклада в качество, обобщенные показатели качества, главные компоненты, центроидные факторы

Coefficients of contribution of chemical composition into certain mechanical characteristics of austenitic high-manganese steel are calculated. Equations of Hadfield composite index of steel quality were developed. Comparison of parameters of the levels of contribution of chemical composition into mechanical properties of railway crossing and tongue pieces is fulfilled.

Keywords: Hadfield steel, railway crossing and tongue pieces, correlation factors, factors of contribution to quality, main components, centroid factors

Постановка задачи

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 плавок стали 110Г13Л значений химических элементов между указанными в марочном составе предельными величинами ведет 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 приемо-сдаточных показателей должен соответствовать следующим условиям: $\sigma \geq 880$ Н/мм²; $\sigma_{0,2} \geq 355$ Н/мм²; $\delta_5 \geq 30$ %; $\psi \geq 27$ %; КСУ ≥ 250 Дж/см²; для 2 группы качества: $\sigma = 880-780$ Н/мм²; $\sigma_{0,2} \geq 355$ Н/мм²; $\delta_5 = 30-25$ %; $\psi = 27-22$ %; КСУ $\geq 250-200$ Дж/см²; для 3 группы качества: $\sigma = 780-690$ Н/мм²; $\sigma_{0,2} \geq 355$ Н/мм²; $\delta_5 = 25-16$ %; $\psi = 22-16$ %; КСУ = 200-165 Дж/см². Следовательно, колебания значений компонентов химического состава металла разных плавок определяют разброс показателей потребительского качества стали [1]. Это затрудняет получение железнодорожных крестовин и сердечников с гарантированными эксплуатационными характеристиками [2].

Для построения закономерностей, определяющих уровни показателей влияния химического состава стали 110Г13Л на отдельные механические свойства, следует выполнить количественную оценку и анализ их долевых и факторных коэффициентов вклада в качество металлоизделий, основанные на корреляционных методах выявления

зависимостей между признаками [3, 4]. При этом необходимо разработать, проанализировать и сравнить уравнения обобщенных показателей качества стали 110Г13Л, для которых долевые коэффициенты механических свойств получены разными методами. Таким образом, проблема определения коэффициентов вклада химических компонентов в качество металлоизделий, изготавливаемых из стали Гатфильда, актуальна.

Цель работы

Опробовать и сравнить существующие и предлагаемые в работе методы анализа параметров вклада химического состава в отдельные механические свойства, на примере стали 110Г13Л.

Теоретическое обоснование

Предлагаемые методы анализа показателей качества железнодорожных крестовин и сердечников основаны на оценке совокупного воздействия химических компонентов стали на отдельные механические свойства. Преимуществом этих методов является то, что многомерное пространство начальных признаков отдельной стали можно свернуть к новому меньшему по размерности факторному [3, 5-7]. При этом в новом пространстве на первую факторную ось можно спроектировать значения химических элементов, входящих в состав стали. Эта задача решена в работе [3]. На вторую – величины механических свойств. Значения 1-го и 2-го факторов описания стали представляют собой суммы проекций значений всех химических элементов и механических свойств на соответствующие факторные оси. При этом направляющие косинусы проекций признаков [7] без учета знака – это их коэффициенты вклада в качество металлоизделий.

Таким образом, суммы произведений значений коэффициентов вклада по модулю на соответствующие им признаки равны величинам абсолютных факторов [6].

В новом пространстве описания отдельно рассматриваемой стали, абсолютными факторами ее механических свойств могут быть [3, 5, 6]: обобщенный показатель, главная компонента (ГК) или центроидный фактор (ЦФ).

Определив уровни вклада химического состава в отдельные механические свойства $\sigma_{(i)}$ умножением на них P_i – долевых коэффициентов (параметров) вклада в качество, и складывая полученные произведения, получаем формулу 2-го фактора стали. Таким образом, находим математическое выражение обобщенного показателя [6] механических свойств определяющего величину интегрального уровня вклада химического состава в качество стали:

$$K(\sigma) = P_1[\sigma_B] + P_2[\sigma_T] + P_3[\delta_5] + P_4[\psi] + P_5[KCU] + \dots + P_i \sigma_{(i)} + \dots + P_\rho \sigma_{(\rho)}, \quad (1)$$

где i – индексы механических свойств ($i = 1, \dots, \rho$), которые могут иметь значения и соответствовать наименованиям: $\sigma_{(1)} = \sigma_r$; $\sigma_{(2)} = \sigma_b$; $\sigma_{(3)} = \delta_5$; $\sigma_{(4)} = \psi$; $\sigma_{(5)} = KCU$ и т. д.; $P_i \times \sigma_{(i)}$ – уровни вклада химического состава в отдельные механические свойства; P_i – абсолютный (без учета знака) статистический долевым коэффициент (параметр) вклада всего химического состава в одно любое механическое свойство, представляющий собой вероятность влияния заданного показателя на качество стали [5, 6]:

$$P_i = \sum_{j=1}^J P_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^J |r_{(i)(j)}|}{\sum_{i=1}^{\rho} \sum_{j=1}^J |r_{(i)(j)}|}. \quad (2)$$

При этом P_i является долей от общей абсолютной взаимосвязи между всеми признаками, приходящейся на одно механическое свойство; 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.; $r_{(i)(j)} = m_{ij}$ – абсолютные коэффициенты парной корреляции химических элементов $x_{(j)}$ и механических свойств $\sigma_{(i)}$, которые представляют собой уровни благоприятных исходов m_{ij} связи признаков сталей; $\sum_{j=1}^J |r_{(i)(j)}| = n_i$ – суммы коэффициентов парной корреляции, равные количеству благоприятных исходов n_i связи заданного механического свойства с химическим составом; $\sum_{i=1}^{\rho} \sum_{j=1}^J |r_{(i)(j)}| = \sum_{i=1}^{\rho} n_i = \sum_{j=1}^J n_j = n(x)$ – сумма, определяющая число всех возможных благоприятных исходов или общий уровень взаимосвязей n между всеми элементами химического состава и механическими свойствами; P_{ij} – уровни вероятности связи заданного химического компонента $x_{(j)}$ или отдельного механического свойства $\sigma_{(i)}$ со всеми признаками стали, которые определяют по формуле [5]

как отношения значений благоприятных исходов m_{ij} к n – количеству всех возможных событий взаимосвязей признаков стали в выборке.

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

При этом

$$0 \leq P_i \leq 1 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{\rho} P_i = 1. \quad (5)$$

Параметры уровней связи химического состава стали с отдельными механическими свойствами определяют факторные коэффициенты Θ_i в уравнении ГК [5, 6]. В первом приближении они могут быть вычислены, как отношения сумм коэффициентов корреляции в строках корреляционной матрицы к максимальному значению этих сумм [5]. То есть коэффициенты Θ_i выражают долю от максимально возможной связи между заданным механическим свойством и химическим составом. При этом в выражении для расчета абсолютных факторных коэффициентов отдельных механических свойств 2-й главной компоненты необходимо использовать значения корреляций $r_{(i)(j)}$ по модулю [5, 6].

$$\Theta_i = \frac{\sum_{j=1}^J |r_{(i)(j)}|}{\max_j \left(\sum_{j=1}^J |r_{(i)(j)}| \right)}. \quad (6)$$

Подставляя в уравнение (1) вместо P_i коэффициенты Θ_i , получаем формулу для расчета 2-го абсолютного главного фактора механических свойств [6] выражающего величину интегрального относительного уровня связи химического состава с качеством стали:

$$Y(\sigma) = \Theta_1[\sigma_B] + \Theta_2[\sigma_T] + \Theta_3[\delta_5] + \Theta_4[\psi] + \Theta_5[KCU] \dots + \Theta_i \sigma_{(i)} + \dots + \Theta_\rho \sigma_{(\rho)}, \quad (7)$$

где $\Theta_i \times \sigma_{(i)}$ – относительные уровни связи химического состава с отдельными механическими свойствами.

Если в выражениях (2) и (3) для долевых коэффициентов обобщенного показателя качества (1), извлечь квадратный корень из знаменателей, то согласно [5] получаем математическое выражение для расчета абсолютных коэффициентов (параметров) 2-го центроидного фактора, аналогичное формуле представленной в работе [4]

$$A_i = \sum_{j=1}^J A_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^J |r_{(i)(j)}|}{\sqrt{\sum_{i=1}^{\rho} \sum_{j=1}^J |r_{(i)(j)}|}}, \quad (8)$$

выражающих зависимость рассматриваемого механического свойства $\sigma_{(i)}$ от химического состава.

Аналогично подставляя полученные коэффициенты (8) в уравнение обобщенного показателя качества (1), получаем формулу для расчета 2-го абсолютного центроидного фактора механических свойств стали [6] определяющего величину интегрального уровня зависимости качества стали от химического состава:

$$\sigma(\sigma) = A_1[\sigma_B] + A_2[\sigma_T] + A_3[\delta_5] + A_4[\psi] + A_5[КСУ] \dots + A_i \sigma_{(i)} + \dots + A_p \sigma_{(p)}, \quad (9)$$

где $A_i \times \sigma_{(i)}$ – уровни зависимости отдельных механических свойств от химического состава.

Таким образом, разработано три метода оценки интегрального показателя качества отдельно рассматриваемой стали, определение которого основано на математических подходах, изложенных в работах [3, 5-7] и базируется на расчете абсолютных коэффициентов (параметров) вклада химического состава в механические свойства.

Материал и методика исследования

Для выявления вклада комплекса механических свойств в качество стали Гатфильда, на основе данных по 543 промышленным плавкам железнодорожных крестовин и сердечников типов Р50 и Р65, в среде Excel, определены коэффициенты (параметры) вклада (3), (6) и (8) в уравнениях обобщенных показателей качества (1), (7) и (9). При расчетах абсолютных коэффициентов вклада P_i , Θ_i и A_i в качестве и разработке уравнений обобщенных показателей $K(\sigma)$, $Y(\sigma)$ и $G(\sigma)$ стали 110Г13Л использованы представления о корреляции, как величине события наличия связи между рассматриваемыми признаками [5, 6].

Изложение основного материала исследований и обсуждение полученных результатов

Определены абсолютные коэффициенты (параметры) в уравнениях обобщенных показателей качества железнодорожных крестовин и сердечников типов Р50 и Р65, величины которых представлены на рисунке.

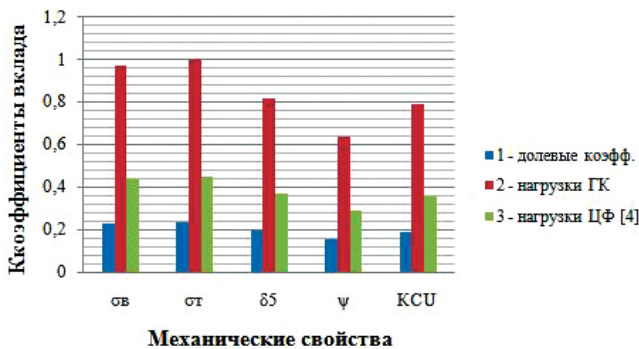


Рисунок. Диаграммы абсолютных коэффициентов (параметров) влияния химического состава на отдельные механические свойства стали Гатфильда

Рассчитана матрица $R(x_{(j)}, \sigma_{(i)})$ абсолютных значений коэффициентов множественной корреляции $r_{(i)(j)}$ химических компонентов $x_{(j)}$ и механических свойств $\sigma_{(i)}$ стали 110Г13Л, представлена в табл. 1.

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

Характеристики стали	C	Mn	Si	P	S	Сумма элементов строки
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
КСУ	0,0398	0,1659	0,3065	0,0331	0,1304	0,6757
Сумма элементов столбца	0,4245	1,2645	0,9232	0,6166	0,367	7,1916

Применение полученной матрицы позволило рассчитать по формуле (3) вероятности связи P_{ij} заданного приемо-сдаточного механического свойства $\sigma_{(i)}$ со всей совокупностью признаков стали (табл. 2). Суммы $\sum_{j=1}^J P_{ij}$ этих вероятностей, представлены в строках табл. 2, и являются величинами абсолютных статистических долевых коэффициентов (параметров) вклада P_i каждого механического свойства в качество стали в уравнении обобщенного показателя (1).

Таблица 2. Вероятности связи и абсолютные статистические долевые коэффициенты (параметры) вклада признаков в качество стали 110Г13Л

Характеристики стали	C	Mn	Si	P	S	Долевые 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
КСУ	0,0111	0,0461	0,0852	0,0092	0,0363	0,1879
Долевые коэффициенты компонентов	0,1180	0,3517	0,2567	0,1715	0,1021	1

Подставляя значения долевых коэффициентов вклада, рассчитанных как суммы строк табл. 1, в формулу (1), получаем обобщенный показатель влияния химического состава на комплекс механических свойств стали 110Г13Л для железнодорожных крестовин и сердечников типа Р50 и Р65:

$$K(\sigma) = 0,230 \sigma_B + 0,237 \delta_5 + 0,193 \sigma_T + 0,150 \psi + 0,187 КСУ \quad (10)$$

Рассчитываемая, с помощью полученного уравнения величина $K(\sigma)$, выражает вклад комплекса механических свойств в качество стали Гатфильда. Долевые коэффициенты этого уравнения определяют вклад химического состава в отдельные механические свойства.

Применяя для расчета формулу (6), получаем значения абсолютных факторных коэффициентов Θ_i 2-й главной компоненты механических свойств. Результаты расчета представлены в табл. 3.

Таблица 3. Сравнение абсолютных факторных и долевых коэффициентов вклада химического состава в отдельные механические свойства стали 110Г13Л

Характеристика	Механические свойства				
	σ_B	σ_T	δ_5	ψ	KCU
Факторные коэффициенты	0,9707	1	0,8131	0,6351	0,7911
Долевые коэффициенты	0,2306	0,2375	0,1931	0,1508	0,1879
$P_i - \Theta_i$	0,7401	0,7625	0,6200	0,4843	0,6032

Математическое выражение 2-го абсолютного главного фактора влияния химического состава на комплекс механических свойств определяем, подставляя в формулу (7) значения соответствующих коэффициентов из табл. 3:

$$Y(\sigma) = 0,971\sigma_B + \delta_5 + 0,813\sigma_T + 0,635\psi + 0,791KCU \quad (11)$$

Полученное уравнение выражает интегральный уровень связи химического состава с качеством стали Гатфильда. Коэффициенты в этом математическом выражении определяют параметры уровней относительной связи между химическим составом и отдельными механическими свойствами.

Из табл. 3 следует, что разности $P_i - \Theta_i$ долевых и факторных коэффициентов механических свойств, то есть вычитания между параметрами величин вклада и относительных связей, являются значительными. Поэтому коэффициенты долевого вклада P_i могут быть интерпретированы как независимые параметры уровней механических свойств.

Аналогично уравнениям (10) и (11), используя формулы (8) и (9), получаем математическое выражение для расчета 2-го абсолютного центроидного фактора влияния химического состава на комплекс механических свойств стали 110Г13Л:

$$G(\sigma) = 0,437\sigma_B + 0,450\delta_5 + 0,366\sigma_T + 0,286\psi + 0,356KCU \quad (12)$$

Это уравнение определяет интегральный уровень зависимости качества стали от совокупности химических компонентов стали Гатфильда. Коэффициенты в математическом выражении (12) – это параметры уровней зависимости отдельных механических свойств от химического состава.

На рисунке (диаграммы: 1 – долевые коэфф., 2 – нагрузки ГК, 3 – нагрузки ЦФ) представлено графическое сравнение коэффициентов вклада химического состава в отдельные механические свойства стали 110Г13Л, которые получены различными методами оценки. Из рисунка, уравнений (10-12) и табл. 3 следует, что наибольшую

зависимость от химического состава имеют прочностные характеристики, минимальную – относительное удлинение.

Графические зависимости, представленные на рисунке, показывают, что в полученных уравнениях (10), (11) и (12) значения долевых и факторных коэффициентов равноименных механических свойств отличаются; это отражает индивидуальный вклад каждого из признаков в качество стали. Таким образом, эти уравнения достаточно информативны

Преимущества разработанного метода, следующие из представленных на рисунке диаграмм, показывают, что значения долевых коэффициентов вклада химического состава, в отличие от коэффициентов главных компонент и центроидных факторов [4], изменяются от 0 до 1 (от 0 до 100 %), и как видно из табл. 2 их сумма равна 1 (100 %). Это означает, что долевые коэффициенты являются статистическими весовыми коэффициентами отдельных свойств [5], а линейное уравнение (1) определяет известный комплексный показатель [7] качества металлоизделия. При этом появляется возможность оценить долю влияние технологических факторов на отдельные механические свойства. Отнимая от 1 величину коэффициента долевого вклада химического состава получаем значение параметра воздействия совокупности технологических факторов и чистоты шихтовых материалов на отдельное механическое свойство. Применение описанной процедуры к определению значений долевых коэффициентов свойств свидетельствует (табл. 2 и рисунок), что пластические характеристики стали Гатфильда в большей степени зависят от технологических факторов выплавки, кристаллизации и термической обработки, чем прочностные. При этом воздействие химического состава высокомарганцевистой аустенитной стали для производства железнодорожных крестовин и сердечников на прочностные характеристики превышает его влияние на пластические, что вероятно обусловлено высокой энергией дефектов упаковки, жесткостью межатомных сил связи, и наличием дисперсных карбидных включений по границам и в объеме аустенитных зерен.

Выводы

1. Опробованы методы расчета долевых и факторных коэффициентов вклада химического состава в отдельные механические свойства стали Гатфильда. На примере стали 110Г13Л подтверждено, что суммы долевых коэффициентов равны 1, их значения изменяются от 0 до 1. При этом долевые и факторные коэффициенты вклада химического состава в механические свойства вычислены из корреляционной матрицы признаков стали.

2. Получены уравнения для расчета обобщенных показателей, 2-й главной компоненты и 2-го

центроидного фактора влияния химического состава на механические свойства стали 110Г13Л, представляющие собой суммы произведений признаков на их долевые или факторные коэффициенты соответственно. Сравнительный анализ этих уравнений показал, что химический состав стали вносит наибольший вклад в значения предела прочности и текучести. При этом у них близки значения долевых и факторных коэффициентов. То есть эти механические свойства в одинаковой степени зависят от влияния химического состава.

3. Различные механические свойства вносят неоднозначный вклад в качество высокомарганцевистой стали. Основной вклад в качество стали, обусловленный влиянием химического состава, вносят показатели прочности и текучести, промежуточный – относительное удлинение и ударная вязкость, наименьший – относительное сужение. При этом пластические характеристики стали Гатфильда в большей степени зависят от технологических факторов выплавки, кристаллизации и термической обработки, чем прочностные.

4. Анализ уравнений обобщенных показателей качества стали 110Г13Л показал, что значения долевых или факторных коэффициентов различных механических свойств имеют значимые различия. Это отражает индивидуальный вклад каждого из механических свойств в качество металлоизделий. Таким образом, применение этих уравнений для анализа качества сталей дает необходимые представления о влиянии химического состава на комплекс механических свойств.

Перспективы дальнейших исследований

Дальнейшие исследования будут направлены на применение разработанного метода расчета долевых коэффициентов и полученных уравнений обобщенных показателей для анализа различных марок сталей и сплавов. Расчет для сталей обобщенных показателей химических составов [6] и комплекса механических свойств позволит разработать математические зависимости между ними, которые могут быть использованы для многофакторной оптимизации компонентов сплавов, с целью повышения эксплуатационной стойкости металлоизделий.

Библиографический список

1. Металлургия высокомарганцевой стали / М. И. Гасик, Ю. В. Петров, И. А. Семенов, А. Р. Садовник, О. И. Поляков, И. Я. Якубцов, Ю. С. Пройдак – К.: Техника, 1990. – 136 с.
2. Моделирование характеристик эксплуатационной стойкости крестовин стрелочных переводов из высокомарганцевистой стали / М. И. Гасик, И. А. Семенов, О. П. Юшкевич, А. Н. Овчарук, Ю. С. Пройдак // Проблемы специальной металлургии. – 2002. – № 1. – С. 40-43.
3. Большаков В. И., Юшкевич О. П. Определение и сравнение уровней вклада химических компонентов в комплекс механических свойств стали 110Г13Л // Металлург. и горноруд. пром-сть: Научно-технич. и производств. журнал. – Дн-вск. – 2013. – № 6. – С. 34-38.
4. Иберла К. Факторный анализ / Пер. с нем. В. М. Ивановой; Предисл. А. М. Дуброва. – М.: Статистика, 1980. – 398 с.: ил. – (Математико-статистические методы за рубежом).
5. Большаков В. И., Юшкевич О. П. Разработка методов расчета весовых коэффициентов влияния элементов химического состава на качество стали // Металознавство та термічна обробка металів: Науков. та інформ. журн., ПДАБтаА. – Дн-вськ. – 2013. – № 1. – С. 14-27.
6. Большаков В. И., Юшкевич О. П. Разработка методов расчета обобщенных показателей отдельных сталей // Металознавство та термічна обробка металів: Науков. та інформ. журн., ПДАБтаА. – Дн-вськ. – 2013. – № 2-3. – С. 21-35.
7. Большаков В. И., Юшкевич О. П. Модель интегрального показателя качества в системе аналитического описания сталей // Новини науки Придніпров'я: Наук.-практ. журнал, ДВНЗ «ПГАСА». – Дн-вск. – 2012. – № 2. – С. 61-68.

Поступила 08.08.2014

**Metallurgical and Mining
Industry**

www.metaljournal.com.ua