

## Оценка влияния колебаний содержания химических компонентов на размах механических свойств стали 110Г13Л

Установлены и проанализированы диапазоны изменения химических компонентов и механических свойств стали Гатфильда, выплавленной в промышленных условиях. Разработаны методы расчета, определены коэффициенты и получены уравнения интегральной эффективности воздействия химических элементов на размах механических свойств стали 110Г13Л. Ил. 4. Табл. 3. Библиогр.: 7 назв.

**Ключевые слова:** сталь Гатфильда, железнодорожные крестовины и сердечники, коэффициенты и интегральные эффективности воздействия, размахи химических компонентов и механических свойств

*Ranges of change of chemical components and mechanical properties, Gatfield's steel melted in industrial conditions are established and analysed. Calculation methods are developed, factors are defined and the equations of integrated efficiency of influence of chemical elements on scope of mechanical properties of steel 110Г13Л are received.*

**Keywords:** Gatfield's steel, railway crosspieces and cores, factors and integrated efficiency of influence, scope of chemical components and mechanical properties

### Постановка задачи

В процессе производства железнодорожных крестовин и сердечников, между различными плавками стали 110Г13Л, из-за особенностей шихтовки, выплавки и других факторов, наблюдается технологический разброс химических элементов в интервалах предельных марочных значений, регламентируемых ГОСТ 7370-98: [% C] = 1,00-1,30; [% Mn] = 11,50-16,50; [% Si] = 0,3-0,9; [% P] < 0,09; [% S] < 0,020. При этом изменения химического состава стали, получаемые в различных плавках, создают отличия в макро- и микроструктуре металла, которые усиливаются за счет разнообразия геометрических параметров железнодорожных крестовин и сердечников и особенностей их производства на разных предприятиях. Возникающее из-за этого рассеяние механических свойств определяет 3 группы качества железнодорожных крестовин и сердечников, согласно ГОСТ 7370-98. При этом для 1 группы качества комплекс приемо-сдаточных показателей должен соответствовать следующим условиям:  $\sigma_b \geq 880 \text{ Н/мм}^2$ ;  $\sigma_{0,2} \geq 355 \text{ Н/мм}^2$ ;  $\delta_5 \geq 30 \%$ ;  $\psi \geq 27 \%$ ; КСУ  $\geq 250 \text{ Дж/см}^2$ ; для 2 группы –  $\sigma_b = 880-780 \text{ Н/мм}^2$ ;  $\sigma_{0,2} \geq 355 \text{ Н/мм}^2$ ;  $\delta_5 = 30-25 \%$ ;  $\psi = 27-22 \%$ ; КСУ  $\geq 250-200 \text{ Дж/см}^2$ ; для 3 группы –  $\sigma_b = 780-690 \text{ Н/мм}^2$ ;  $\sigma_{0,2} \geq 355 \text{ Н/мм}^2$ ;  $\delta_5 = 25-16 \%$ ;  $\psi = 22-16 \%$ ; КСУ = 200-165 Дж/см<sup>2</sup>. Такое рассеяние величин механических свойств затрудняет получение гарантированных стабильных эксплуатационных характеристик же-

лестнодорожных крестовин и сердечников. При этом данные о воздействии размахов компонентов химического состава стали 110Г13Л на заданные характеристики качества в литературных источниках отсутствуют. Методы [1-4] определения долевого или обобщенного вкладов при анализе влияния размахов химических элементов на разброс признаков качества металлоизделий в существующем виде использоваться не могут, так как не учитывают эффективность воздействия каждого из компонентов стали на комплекс механических свойств и требуют совершенствования. Поэтому проблема оценки уровня вклада размахов химических компонентов в разброс механических свойств стали 110Г13Л является актуальной.

### Цель работы

Разработать, опробовать методы количественной оценки и выполнить анализ эффективности воздействия отдельных химических элементов на комплекс механических свойств стали 110Г13Л.

### Теоретическое обоснование

Для отдельных сталей разработаны методы оценки интегрального [2] и долевого вкладов компонентов химического состава в механические свойства [1].

Интегральный вклад отдельных компонентов стали в комплекс механических свойств выражается формулой обобщенного показателя химического состава, представленной в работе [3] в следующем виде

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

где  $j$  – 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.;  $x_{(j)}$  – обозначения компонентов химического состава стали;  $P_j$  – абсолютные статистические коэффициенты вклада химических компонентов в комплекс механических свойств. Они являются величинами вероятности наступления события влияния заданного химического элемента на комплекс механических свойств, и выражают долю от общей абсолютной взаимосвязи –  $P$  между всеми признаками, приходящуюся на один компонент химического состава [1]

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

где  $P_{ij}$  – уровни вероятности связи заданного химического компонента  $x_{(j)}$  или отдельного механического свойства  $\sigma_{(i)}$  со всеми признаками стали, которые определяют по формуле [1, 3], как отношения значений благоприятных исходов  $m_{ij}$  к количеству всех возможных событий взаимосвязей признаков стали в выборке

$$n = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^J |r_{(i)(j)}| = \sum_{j=1}^J n_j, \quad (3)$$

где  $i$  – индексы механических свойств ( $i = 1, \dots, p$ ), значения которых соответствуют наименованиям:  $\sigma_{(1)} = \sigma_m$ ;  $\sigma_{(2)} = \sigma_\delta$ ;  $\sigma_{(3)} = \delta_5$ ;  $\sigma_{(4)} = \psi$ ;  $\sigma_{(5)} = KCU$  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;  $\sum_{i=1}^p |r_{(i)(j)}| = \sum_{i=1}^p m_{ij} = n_j$  – число благоприятных исходов связи отдельного химического элемента с комплексом механических свойств;  $P_j \times x_{(j)}$  – уровни вклада отдельных компонентов химического состава в комплекс механических свойств. При этом

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

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

С использованием формулы (2) в работе [3] были определены абсолютные значения долевых коэффициентов вклада химических эле-

ментов в комплекс механических свойств стали Гадфильда, величины которых представлены на рис. 1. Получено уравнение обобщенного показателя химического состава стали 110Г13Л

$$K(x) = 0,1180[C] + 0,3517[Mn] + 0,2567[Si] + 0,1715[P] + 0,1021[S], \quad (6)$$

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

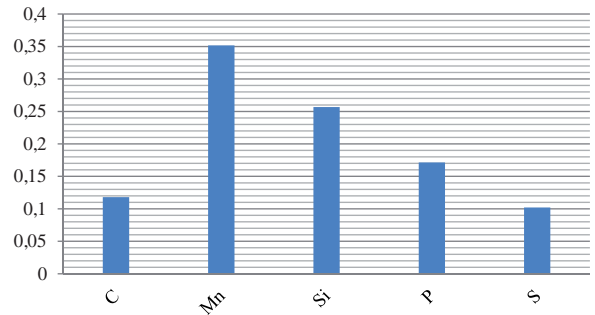


Рис. 1. Диаграмма сравнения коэффициентов вклада химических элементов в комплекс механических свойств стали 110Г13Л

Анализ диаграммы (рис. 1) и уравнения (6), выполненный в работе [3], 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**

В среде Excel определены статистические характеристики выборки данных соответствующих химических составов и механических свойств 543 промышленных плавок стали Гадфильда.

В расчетах использованы методы определения безразмерных механических свойств [5], абсолютных долевых коэффициентов вклада в качество [1], обобщенных показателей стали [2] и использованы представления о корреляции, как величине вероятности события наличия связи между рассматриваемыми признаками [1-4]. При этом разработка формул обобщенных показателей сталей основана на методах, изложенных в работах [2-4].

**Изложение основного материала исследований и обсуждение полученных результатов**

Выполнен статистический анализ влияния рассеяния содержания химических компонентов стали 110Г13Л на разброс механических свойств и получена действительная картина изменения их значений (табл. 1 и 2) при производстве готовых железнодорожных крестовин и сердечников типов Р50 и Р65.

Результаты статистического анализа химических составов отливок из стали 110Г13Л

Статистические характеристики	Содержание химических элементов, %				
	C	Mn	Si	P	S
Минимальное значение	1,0	11,50	0,31	0,02	0,01
Максимальное значение	1,4	20,05	0,89	0,06	0,042
Оценка математического ожидания	1,161	13,625	0,5417	0,03636	0,01648
Доверительный интервал	±0,0056	±0,0713	±0,01	±0,00056	±0,0009
Размах	0,4	9,05	0,58	0,04	0,032

Таблица 2

Результаты статистического анализа механических свойств отливок из стали 110Г13Л

Статистические характеристики	$\sigma_{Br}$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %	KCU, кгс/м <sup>2</sup>
Минимальные значения	688,94	279,3	27	21,9	20,1
Максимальные значения	1014,3	608,58	70	46,3	49,4
Оценка математического ожидания	862,7	486,8	46	33,8	27,3
Доверительный интервал	±4,6	±8,5	±0,8	±0,5	±0,48
Размах	325,36	329,28	43	24,4	29,3
Безразмерный размах	0,377	0,676	0,935	0,722	1,073

На основании данных приведенных в последней строке табл. 1 построена диаграмма сравнения размахов –  $R(\sigma_{(i)})$  значений химических элементов, входящих в состав стали 110Г13Л промышленной выплавки (рис. 2).

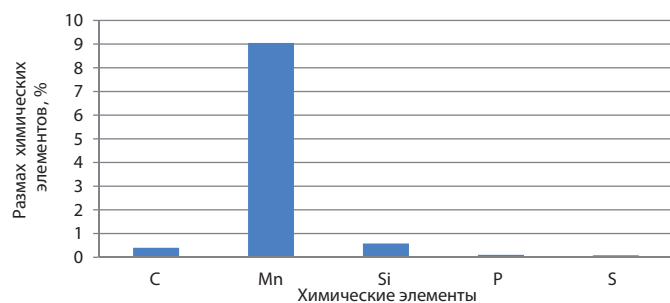


Рис. 2. Диаграмма сравнения размахов химических компонентов стали 110Г13Л промышленной выплавки

Из табл. 1 и рис. 2 следует, что в химическом составе стали наибольший размах значений, обусловленный влиянием различных технологических факторов, имеет количество Mn. При этом содержания углерода и кремния изменяются незначительно. Минимальные размахи наблюдаются у фосфора и серы. Сравнение с нормативными приемо-сдаточными показателями, заданными ГОСТ 7370-98, статистических характеристик механических свойств сердечников и крестовин (табл. 2) показало, что все они соответствуют уровням интервалов допустимых величин. Сопоставление колебаний количеств химических элементов в плавочных составах с разбросом значений приемо-сдаточных механических свойств, представленных в табл. 1 и 2, по-

казало существование определенной связи между ними.

Таким образом, влияние существующей технологической нестабильности химического состава на разброс значений механических свойств при производстве стали Гатфильда требует изучения и анализа.

Анализ размахов отдельных механических свойств показал, что их сравнение затруднено из-за различной физической размерности, поэтому сопоставление их величин корректно производить для относительных безразмерных значений (нормированных), полученных делением размахов механических свойств –  $R(\sigma_{(i)})$  на соответствующие им значения оценок математических ожиданий –  $M_x(\sigma_{(i)})$

$$\tilde{R}(\sigma_{(i)}) = \frac{R(\sigma_{(i)})}{M_x(\sigma_{(i)})}. \quad (7)$$

Величины размахов относительных безразмерных признаков качества стали 110Г13Л приведены в последней строке табл. 2. При этом их сравнительный анализ выполнен с помощью диаграммы, представленной на рис. 3.

Из рис. 3 следует, что в готовых изделиях наибольший безразмерный размах имеют ударная вязкость ( $\tilde{R}(KCU) = 1,07$ ) и относительное удлинение ( $\tilde{R}(\delta_5) = 0,935$ ), промежуточный – предел текучести ( $\tilde{R}(\sigma_T) = 0,676$ ) и относительное сужение ( $\tilde{R}(\psi) = 0,722$ ) и минимальный – предел прочности ( $\tilde{R}(\sigma_B) = 0,377$ ). Таким образом, разброс значений элементов химического состава наиболее сильно влияет на вязкопластические характеристики стали 110Г13Л.

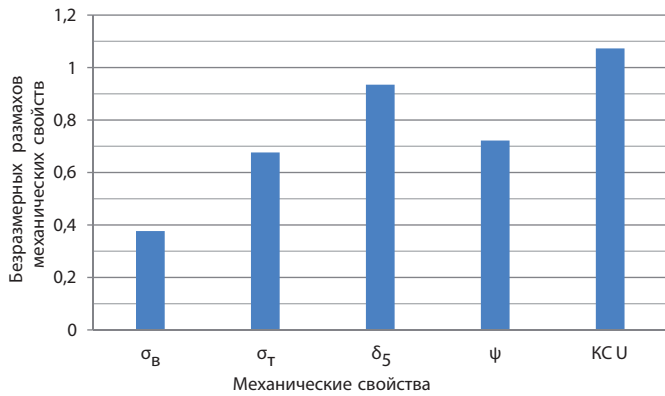


Рис. 3. Диаграмма сравнения безразмерных размахов механических свойств стали 110Г13Л промышленной выплавки

Эффективность воздействия размаха каждого химического компонента на комплекс механических свойств можно оценить по отношению долевых коэффициентов вклада отдельных химических элементов  $P_j$  в комплекс механических свойств к величинам размахов  $R(x_{(j)})$  компонентов в плавочных составах

$$Ef_{x_{(j)}} = \frac{P_j}{R(x_{(j)})} \quad (8)$$

Результаты расчета коэффициентов  $Ef_{x_{(j)}}$  эффективности воздействия размаха химических компонентов на комплекс механических свойств, приведен в табл. 3.

Таблица 3

**Эффективность воздействия химических компонентов на комплексный показатель [4] механических свойств**

Характеристика	Химические элементы				
	C	Mn	Si	P	S
Эффективность воздействия	0,2952	0,0389	0,4427	4,287	3,1895

Произведения коэффициентов эффективности воздействия на соответствующие значения химических элементов определяют величины уровней эффективности, сумма которых определяет интегральный показатель эффективности воздействия химического состава на комплекс механических свойств

$$IEf(x) = Ef_C[C] + Ef_{Mn}[Mn] + Ef_{Si}[Si] + Ef_P[P] + Ef_S[S] + \dots + Ef_{x_{(j)}}[x_{(j)}] \quad (9)$$

Подставляя в полученное уравнение значения коэффициентов эффективности воздействия из табл. 3, приходим к формуле

$$IEf(x) = 0,2952[C] + 0,0389[Mn] + 0,4427[Si] + 4,287[P] + 3,1895[S] \quad (10)$$

На рис. 4 представлена диаграмма сравнения коэффициентов эффективности воздействия

колебаний химических элементов на комплекс механических свойств.

Из табл. 3, рис. 4 и уравнения (9) следует, что наибольшее по эффективности воздействие на комплекс механических свойств оказывает фосфор. Сера воздействует меньше. Незначительно на размах механических свойств действуют кремний и углерод. Пренебрежимо малая эффективность воздействия свойственна марганцу.

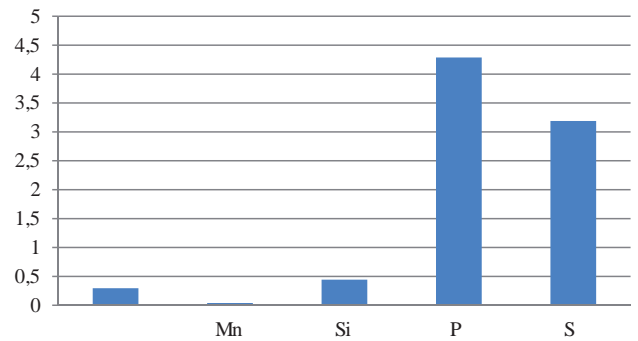


Рис. 4. Диаграмма сравнения коэффициентов эффективности воздействия химических компонентов на механические свойства стали 110Г13Л

Таким образом, фосфор и сера, имеющие, в соответствии с рис. 1, меньшее воздействие на механические свойства ( $P_p = 0,1012$  и  $P_s = 0,1715$ ), чем марганец ( $P_{Mn} = 0,3517$ ), кремний ( $P_{Si} = 0,2567$ ) и углерод ( $P_c = 0,3517$ ), и обладающие незначительным размахом значений в плавочных составах ( $R(S) = 0,032\%$  и  $R(P) = 0,04\%$ ) по сравнению с Mn ( $R(Mn) = 9,05\%$ ), Si ( $R(Si) = 0,58\%$ ) и C ( $R(C) = 0,4\%$ ) (рис. 2), оказывают более эффективное влияние ( $Ef(S) = 3,19$  и  $Ef(P) = 4,29$ ), чем марганец ( $Ef(Mn) = 0,039$ ), кремний ( $Ef(Si) = 0,44$ ) и углерод ( $Ef(C) = 0,29$ ) на разброс показателей качества стали 110Г13Л (рис. 4). Однако сера, при ее значительном воздействии, отрицательно влияет на все механические свойства [6], поэтому ее количество следует минимизировать до тысячных долей %. При этом фосфор в стали 110Г13Л позитивно действует на эксплуатационную стойкость железнодорожных крестовин и сердечников, являясь упрочнителем аустенитной матрицы. Однако при его содержании на уровне верхнего предела ГОСТ 7370-98 ( $[P] \leq 0,09\%$ ) на границах аустенитных зерен выделяются фосфидные и карбофосфидные эвтектики, способствующие охрупчиванию металлоизделий в процессе эксплуатации. При этом, учитывая так же высокое воздействие фосфора на разброс механических свойств, пределы изменения его количества следует сузить с 0-0,09% до рациональных значений 0,035-0,067%, полу-

ченных в работе [7]. Это позволит нивелировать фактор химического состава и перейти к выявлению иных технологических параметров, влияющих на разброс механических свойств стали Гатфильда.

### Выводы

1. Разработан и опробован новый метод расчета коэффициентов эффективности воздействия химических компонентов на механические свойства стали 110Г13Л. Преимуществом разработанного метода является возможность оценки уровня влияния колебаний химических элементов в составе стали на разброс механических свойств.

2. Впервые получено уравнение интегральной эффективности воздействия элементов химического состава на механические свойства стали Гадфильда. Это уравнение позволяет определить уровни совокупного воздействия химических компонентов на нестабильность механических свойств.

3. Установлено неоднозначное воздействие размахов концентраций различных химических элементов на разброс механических свойств аустенитной высокомарганцевой стали при стабильных технологических параметрах существующего производства. Наименьший фактический разброс имеет безразмерный предел прочности ( $\bar{R}(\sigma_B) = 0,377$ ). Наибольший – безразмерные пластичность и ударная вязкость ( $\bar{R}(\delta_5) = 0,935$  и  $\bar{R}(KCU) = 1,07$ ).

4. Установлено, что наибольшую эффективность воздействия на комплекс механических свойств имеют размахи серы и фосфора. Менее эффективно влияют кремний и углерод. Механические свойства под воздействием разброса значений марганца изменяются минимально.

### Перспективы дальнейших исследований

Дальнейшие исследования будут направлены на применение разработанных методов расчета интегральных показателей и коэффициентов эффективности воздействия химических элементов на разброс механических свойств для анализа особенностей производства различных марок сталей в разнообразных условиях,

оптимизации их составов и ограничения размаха компонентов, обладающих высоким воздействием на показатели качества.

### Библиографический список

1. Большаков В. И., Юшкевич О. П. Разработка методов расчета весовых коэффициентов влияния элементов химического состава на качество стали // *Металлознавство та термічна обробка металів: Науков. та інформ. журн., ПДАБтаА.* – Дн-ськ. – 2013. – № 1. – С. 14-27.

2. Большаков В. И., Юшкевич О. П. Разработка методов расчета обобщенных показателей отдельных сталей // *Металлознавство та термічна обробка металів: Науков. та інформ. журн., ПДАБтаА.* – Дн-ськ. – 2013. – № 2-3. – С. 21-35.

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.* – 2013. – № 6. – С. 34-38.

4. Большаков В. И., Юшкевич О. П. Оценка параметров вклада химического состава в механические свойства стали 110Г13Л // *Металлург. и горноруд. пром-сть: Научно-технич. и производств. журнал.* – 2014. – № 5. – С. 34-38.

5. Юшкевич О. П. Поуровневое аналитическое представление марочного сортамента сталей // *Строительство, материаловедение, машиностроение / Сб. научн. трудов. Вып. 15, ч. 1.* – Дн-ск, ПГАСА. – 2002. – 280 с. (в обл.). – С. 193-198.

6. *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.

7. Моделирование характеристик эксплуатации 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.

Поступила 29.01.2015

