

УДК 669.018.14: 669.15 – 194: 621.78: 620.197  
**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЁТА ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ  
ВЛИЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА  
НА КАЧЕСТВО СТАЛИ**

**В. И. Большаков, д. т. н., проф., О. П. Юшкевич, к. т. н., доц.**  
*ГВУЗ «Приднепровская государственная академия  
строительства и архитектуры»*

**Постановка проблемы и её связь с важнейшими научными и практическими задачами.** В процессе производства металлоизделий возникают технологические колебания компонентов химического состава стали в пределах марочных значений, вызванные особенностями шихтовки, выплавки и другими факторами. Отклонения у различных плавов значений химических элементов от среднего уровня и их разброс между заданными предельными величинами, указанными в марочном составе сталей, ведёт к возникновению отличий в макро- и микроструктуре, которая формируется в металле изделий. При этом различия усиливаются за счёт разнообразия геометрических параметров и особенностей производства металлоизделий на разных предприятиях [1; 2].

Взаимодействие в расплаве металла химических элементов в различных пропорциях ведёт к формированию в литой структуре неметаллических включений, которые могут образовываться также в процессе дальнейшей термической обработки, в период выдержки стали при высоких температурах. Возникающее из-за этого рассеяние значений механических характеристик, металла разных плавов, затрудняет получение металлоизделий с гарантированными эксплуатационными свойствами.

Поэтому, помимо технологических и других параметров производства, процентные значения химических элементов в составе стали представляют собой одни из факторов, который определяет конечные физико-механические свойства. Оценка весового вклада [3; 4] химических элементов в комплекс физико-механических свойств для множеств, подмножеств, кластеров сталей или групп их плавочных составов [5] позволяет достаточно информативно определить меру воздействия при формировании качества металлоизделий.

При этом сравнение весовых коэффициентов химических элементов между собой позволяет выполнить анализ влияния компонентов химического состава на механические свойства стали.

Однако существующие методы компонентного анализа [6] или модели интегральных характеристик [7; 8] не могут использоваться для определения весового вклада химических элементов в качество сталей, так как не учитывают воздействия каждого из этих компонентов на комплекс физико-механических свойств и, поэтому требуют совершенствования.

Таким образом, проблема создания методов определения весовых коэффициентов химических компонентов, по уровню вклада каждого из этих признаков в комплекс механических свойств отдельной стали и металлоизделий, изготавливаемых из неё, является актуальной.

**Анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение поставленной задачи.** Применение методов расчёта комплексных (обобщённых) показателей [4; 5; 9] основано на определении весовых коэффициентов, являющихся оценками вклада каждого признака в уровень качества сталей. Однако, как показано в работах [7; 10], эти коэффициенты являются направляющими косинусами линии, предназначенной для сравнения спроектированных на неё информационных объектов – сталей, построенных в пространстве начальных свойств или репрезентативных признаков. Такой линией могут быть оси главных компонент [6], центроидные [10], центра тяжести [7] или сравнения качества сталей [8], которые по существу представляют собой факторные оси [11], полученные вращением исходных признаков осей, с переносом или без начала отсчёта пространства геометрического описания металлоизделий. При этом весовые коэффициенты различных признаков выступают общими характеристиками рассматриваемого множества сталей [7; 8]. Поэтому они не являются характеристиками отдельных сталей и могут определяться только как параметры их множеств, подмножеств, кластеров или групп, в том числе сформированных на основе плавочных составов. Однако при анализе особенностей отдельных сталей необходимо использовать свойственные только им характеристики.

В работе [3] положено начало решения задачи о весовом вкладе различных химических элементов в уровень механических свойств отдельно изучаемой аустенитной, высокомарганцевистой стали. Установлено, что выявить степень влияния различных элементов химического состава отдельной стали на комплекс механических свойств можно, рассчитав для них весовые коэффициенты. При этом их можно определить из парных корреляций между химическими компонентами и механическими свойствами.

**Постановка задачи.** Для анализа закономерностей, определяющих эксплуатационные характеристики готовых металлоизделий, необходима разработка методов количественной оценки весов вклада химических элементов, физико-механических свойств и других характеристик в качество отдельных сталей, основанных на выявлении связей между их признаками.

**Цель работы.** Разработать методы расчёта весовых коэффициентов признаков отдельной стали по уровню их вклада в качество металлоизделий, изготавливаемых из неё.

**Методика исследования.** В работе использованы аналитические методы исследования сталей, основанные на математическом описании, формализованном и геометрическом их представлении в многомерном пространстве компонентов химического состава и физико-механических свойств в виде точек, информационно наделённых всеми характеристиками и признаками металлоизделия [7–10; 12].

При разработке метода расчёта весовых коэффициентов отдельных показателей заданной стали использованы представления о корреляции как величине события наличия связи между рассматриваемыми признаками.

Разработка формул для расчёта весовых коэффициентов основана на представлениях об интегральном показателе качества сталей и базируется на методах векторной и линейной алгебры, изложенных в работах [7–10].

**Изложение основного материала исследований и обсуждение результатов.** Результаты приёмо-сдаточных промышленных испытаний сталей удобно представлять в виде таблиц данных (ТД) [7; 9], содержащих наименование и обозначение стали  $S_{npt}$ , с указанием составных индексов объекта информационного моделирования  $n = mzx$  ( $n = 1, \dots, N$ ), состоящих из номеров марки –  $m$  ( $m = 1, \dots, M$ ), завода-изготовителя –  $z$  ( $z = 1, \dots, Z$ ), плавочного состава –  $x$  ( $x = 1, \dots, X$ ) (соответствующего заданной плавке), индексов геометрической формы металлоизделия –  $p$  ( $p = 1, \dots, P$ ) и типоразмера –  $t$  ( $t = 1, \dots, T$ ). ТД включает наименования и значения приёмо-сдаточных физико-механических свойств  $\sigma_{npt}^{(i)}$  ( $i$  – номер свойства,  $i = 1, \dots, \rho$ ) и компонентов плавочного химического состава  $x_{npt}^{(j)}$  ( $j$  – номер химического элемента,  $j = 1, \dots, J$ ). При этом индексы свойств  $i$  могут иметь значения и соответствовать наименованиям:  $\sigma_{npt}^{(1)} = \sigma_B$ ;  $\sigma_{npt}^{(2)} = \sigma_T$ ;  $\sigma_{npt}^{(3)} = \delta_5$ ;  $\sigma_{npt}^{(4)} = \psi$ ;  $\sigma_{npt}^{(5)} = KCU$  и т. д., а номера химических компонентов  $j$ , соответственно:  $1 = [C]$ ;  $2 = [Mn]$ ;  $3 = [Si]$ ;  $4 = [S]$ ;  $5 = [P]$  и т. д.

В ТД величины химических элементов выступают признаками стали, то есть они могут обозначаться также как и физико-механические свойства:

$$x_{npt}^{(j)} = \sigma_{npt}^{(j)}(x), \quad (1)$$

где  $j = 1, \dots, J$  – индексы (номера) химических элементов в составе стали.

Таким образом, множество признаков стали  $\{\sigma_{npt}\}$  будет включать два подмножества  $\{\sigma_{npt}^{(i)}\}, \{x_{npt}^{(j)}\}$ . При этом объект информационного моделирования  $S_{npt}$  может быть задан в многомерном пространстве признаков в виде точки [10] с координатами:

$$S_{npt} = \{\sigma_{npt}^{(1)}, \dots, \sigma_{npt}^{(i)}, \dots, \sigma_{npt}^{(\rho)}, x_{npt}^{(1)}, \dots, x_{npt}^{(j)}, \dots, x_{npt}^{(J)}\}. \quad (2)$$

**Разработка метода определения весовых коэффициентов химических элементов и физико-механических свойств заданной стали.** Для признаков сталей, измеренных в количественных шкалах, оценка коэффициента парной корреляции определяется следующим образом [12]:

$$r_{npt}^{(l)(b)} = \frac{\sum_{x=1}^x (\sigma_{npt}^{(l)} - \bar{\sigma}_{npt}^{(l)}) (\sigma_{npt}^{(b)} - \bar{\sigma}_{npt}^{(b)})}{\sqrt{D(\sigma_{npt}^{(l)}) D(\sigma_{npt}^{(b)})}}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{npt}^{(l)}$  и  $\sigma_{npt}^{(b)}$  – произвольно выбранные признаки стали из выборки объёмом  $N \times (\rho + J)$ . Например,  $\sigma^{(l)} = \sigma_T$ ,  $\sigma^{(b)} = [Mn]$ ;  $N$  – число информационных объектов-сталей;  $\rho$  – количество рассматриваемых физико-механических свойств;  $J$  – количество химических компонентов в составе



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\sigma_{npt}^{(\rho)}$	$r_{npt}^{\rho 1}$	...	$r_{npt}^{\rho i}$	...	$r_{npt}^{\rho \rho}$	$r_{npt}^{\rho 1x}$	...	$r_{npt}^{\rho j}$	...	$r_{npt}^{\rho J}$
$x_{npt}^{(1)}$	$r_{npt}^{1x1}$	...	$r_{npt}^{1xi}$	...	$r_{npt}^{1x\rho}$	$r_{npt}^{1x1x}$	...	$r_{npt}^{1xj}$	...	$r_{npt}^{1x\rho}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$x_{npt}^{(j)}$	$r_{npt}^{j1}$	...	$r_{npt}^{ji}$	...	$r_{npt}^{j\rho}$	$r_{npt}^{j1x}$	...	$r_{npt}^{jxi}$	...	$r_{npt}^{j\rho}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$x_{npt}^{(J)}$	$r_{npt}^{J1}$	...	$r_{npt}^{Ji}$	...	$r_{npt}^{J\rho}$	$r_{npt}^{J1x}$	...	$r_{npt}^{Jj}$	...	$r_{npt}^{JJ}$

Обобщённая корреляционная таблица 1 состоит из четырех матриц:  $R(\sigma_{npt}^{(i)}, \sigma_{npt}^{(i)})$ ,  $R(\sigma_{npt}^{(i)}, x_{npt}^{(j)})$ ,  $R(x_{npt}^{(j)}, \sigma_{npt}^{(i)})$ ,  $R(x_{npt}^{(j)}, x_{npt}^{(j)})$ . Первая из них  $R(\sigma_{npt}^{(i)}, \sigma_{npt}^{(i)})$  представляет собой корреляционную матрицу физико-механических свойств. Её анализ выполнен в работе [12]. Вторая определяет связи между физико-механическими свойствами  $\sigma_{npt}^{(i)}$  и химическими компонентами стали  $x_{npt}^{(j)}$ . Эта матрица  $R(\sigma_{npt}^{(i)}, x_{npt}^{(j)})$  идентична третьей  $R(x_{npt}^{(j)}, \sigma_{npt}^{(i)})$ , так как получается из неё путём транспонирования (заменой местами строк и столбцов):

$$R(\sigma_{npt}^{(i)}, x_{npt}^{(j)}) = R(x_{npt}^{(j)}, \sigma_{npt}^{(i)})^T. \quad (6)$$

Четвёртая  $R(x_{npt}^{(j)}, x_{npt}^{(j)})$  не имеет явного физического смысла и определяет наличие взаимного влияния химических компонентов  $x_{npt}^{(j)}$ , возникающего, видимо, ещё в процессе выплавки стали.

В обобщённой корреляционной таблице наиболее информативными являются две эквивалентные матрицы  $R(\sigma_{npt}^{(i)}, x_{npt}^{(j)})$ , отражающие связи между физико-механическими свойствами  $\sigma_{npt}^{(i)}$  и химическими компонентами  $x_{npt}^{(j)}$ . Их структура представлена в виде таблицы 2.

Таблица 2

Корреляционная матрица  $R(\sigma_{npt}^{(i)}, x_{npt}^{(j)})$  связи химических компонентов  $x_{npt}^{(j)}$

с физико-механическими свойствами  $\sigma_{npt}^{(i)}$

$\sigma$ \ $x$	$x_{npt}^{(1)}$	...	$x_{npt}^{(j)}$	...	$x_{npt}^{(J)}$
$\sigma_{npt}^{(1)}$	$r_{npt}^{(1)(1)}$	...	$r_{npt}^{(1)(j)}$	...	$r_{npt}^{(1)(J)}$
...	...	...	...	...	...
$\sigma_{npt}^{(i)}$	$r_{npt}^{(i)(1)}$	...	$r_{npt}^{(i)(j)}$	...	$r_{npt}^{(i)(J)}$
...	...	...	...	...	...
$\sigma_{npt}^{(\rho)}$	$r_{npt}^{(\rho)(1)}$	...	$r_{npt}^{(\rho)(j)}$	...	$r_{npt}^{(\rho)(J)}$

На основе этих матриц можно определить вероятность влияния  $p_{ij}$  заданного химического элемента на отдельное физико-механическое свойство, которая является долей от общего числа связей компонента со всеми свойствами и рассчитывается как отношение коэффициентов корреляции к их сумме (определяется как сумма элементов столбца):

$$p_{ij} = \frac{m_{ij}}{n_j} = \frac{|r_{npt}^{(i)(j)}|}{\sum_{i=1}^{\rho} |r_{npt}^{(i)(j)}|}, \quad (7)$$

где  $\sum_{i=1}^{\rho} |r_{npt}^{(i)(j)}|$  – сумма коэффициентов парной корреляции между  $j$ -м

химическим элементом и всеми физико-механическими свойствами;  $|r_{npt}^{(i)(j)}|$  – коэффициенты парной корреляции химических элементов и физико-механических свойств;  $m_{ij} = |r_{npt}^{(i)(j)}|$  – величина благоприятного исхода, то

есть численное выражение связи между величинами  $x_{npt}^{(j)}$  и  $\sigma_{npt}^{(i)}$ ;

$n_j = \sum_{i=1}^{\rho} |r_{npt}^{(i)(j)}|$  – количество благоприятных исходов связей заданного

химического элемента со всеми физико-механическими свойствами.

Эта величина представляет собой сумму элементов  $j$ -го столбца, отвечающих механическим свойствам  $\sigma_{npt}^{(i)}$ , и соответствует заданному химическому компоненту  $x_{npt}^{(j)}$ .

При этом сумма:

$$n(x) = \sum_{j=1}^J n_j = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho} \left| r_{npt}^{(i)(j)} \right| \quad (8)$$

представляет собой величину возможных благоприятных исходов или общее число связей между всеми элементами химического состава и физико-механическими свойствами. Вычисляется как сумма суммарных накоплений столбцов. Учитывая равенство:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho} \left| r_{npt}^{(i)(j)} \right| = \sum_{i=1}^{\rho} \sum_{j=1}^J \left| r_{npt}^{(j)(i)} \right|, \quad (9)$$

получаем:

$$n(x) = \sum_{j=1}^J n_j = \sum_{i=1}^{\rho} n_i = n(\sigma), \quad (10)$$

что суммы накоплений элементов столбцов и строк корреляционной матрицы равны.

Вычисления сумм удобно выполнять в дополненной корреляционной таблице 3.

Совокупность вероятностей влияния  $p_{ij}$  заданных химических элементов на отдельные физико-механические свойства (7) образует матрицу, представленную в таблице 4.

Суммируя вероятности влияния заданного компонента на отдельные физико-механические свойства, то есть складывая элементы столбцов таблицы 4, получаем вероятность влияния химического элемента на комплекс всех свойств стали, которая равна 1:

$$p_j = \sum_{i=1}^{\rho} p_{ij} = \sum_{i=1}^{\rho} \frac{m_{ij}}{n_j} = \sum_{i=1}^{\rho} \frac{\left| r_{npt}^{(i)(j)} \right|}{\sum_{i=1}^{\rho} \left| r_{npt}^{(i)(j)} \right|} = \frac{\sum_{i=1}^{\rho} \left| r_{npt}^{(i)(j)} \right|}{\sum_{i=1}^{\rho} \left| r_{npt}^{(i)(j)} \right|} = 1. \quad (11)$$

Таблица 3

Дополненная корреляционная таблица  $R(\sigma_{npt}^{(i)}, x_{npt}^{(j)})$  связи физико-механических свойств  $\sigma_{npt}^{(i)}$  с химическими компонентами  $x_{npt}^{(j)}$

Номера столб.							
Номера строк	$j$	1	...	$j$	...	$J$	$\Sigma$
$i$	Компоненты Свойства	$x_{npt}^{(1)}$	...	$x_{npt}^{(j)}$	...	$x_{npt}^{(J)}$	Сумма элементов строк
1	$\sigma_{npt}^{(1)}$	$r_{npt}^{(1)(1)}$	...	$r_{npt}^{(1)(j)}$	...	$r_{npt}^{(1)(J)}$	$\sum_{i=1}^{\rho} r_{npt}^{(1)(j)}$
...	...	...	...	...	...	...	...
$i$	$\sigma_{npt}^{(i)}$	$r_{npt}^{(i)(1)}$	...	$r_{npt}^{(i)(j)}$	...	$r_{npt}^{(i)(J)}$	$\sum_{i=1}^{\rho} r_{npt}^{(i)(j)}$
...	...	...	...	...	...	...	...
$\rho$	$\sigma_{npt}^{(\rho)}$	$r_{npt}^{(\rho)(1)}$	...	$r_{npt}^{(\rho)(j)}$	...	$r_{npt}^{(\rho)(J)}$	$\sum_{i=1}^{\rho} r_{npt}^{(\rho)(j)}$
$\Sigma$	Сумма элементов столбцов	$\sum_{i=1}^{\rho} r_{npt}^{(i)(1)}$	...	$\sum_{i=1}^{\rho} r_{npt}^{(i)(j)}$	...	$\sum_{i=1}^{\rho} r_{npt}^{(i)(J)}$	$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho} r_{npt}^{(i)(j)}$

Решая абстрактную обратную задачу о связи заданного отдельного физико-механического свойства с химическим составом стали, определяем долю общей связи для каждого свойства как сумму строк таблицы 4:

$$D_i = \sum_{j=1}^J D_{ij} = \sum_{j=1}^J \frac{|r_{npt}^{(i)(j)}|}{\sum_{i=1}^{\rho} |r_{npt}^{(i)(j)}|} = \frac{\sum_{j=1}^J |r_{npt}^{(i)(j)}|}{\sum_{i=1}^{\rho} |r_{npt}^{(i)(j)}|}. \quad (12)$$

При этом сумма всех долей  $D_{ij}$ , содержащихся в ячейках последнего столбца, не равна 1. Следовательно, величина  $D_i$  не отвечает одному из свойств вероятности события и не является ею.

Суммируя  $p_j$  и  $D_i$  по столбцам и строкам соответственно, получаем:



$$\sum_{i=1}^{\rho} D_i = \sum_{i=1}^{\rho} \frac{\sum_{j=1}^J |r_{npt}^{(i)(j)}|}{\sum_{i=1}^{\rho} |r_{npt}^{(i)(j)}|} = \sum_{j=1}^J \frac{\sum_{i=1}^{\rho} |r_{npt}^{(i)(j)}|}{\sum_{i=1}^{\rho} |r_{npt}^{(i)(j)}|} = \sum_{j=1}^J p_j = \sum_{j=1}^J 1 = J, \quad (13)$$

что они равны одному и тому же числу  $J$  – количеству компонент в составе стали. Таким образом, представленные величины  $p_j$  и  $D_i$  не вполне адекватно характеризуют вклад признаков в качество отдельно рассматриваемой стали.

Таблица 4  
Матрица вероятности влияния заданного химического элемента на отдельные физико-механические свойства

Элементы \ Свойства	$x_{npt}^{(1)}$	...	$x_{npt}^{(j)}$	...	$x_{npt}^{(J)}$	
$\sigma_{npt}^{(1)}$	$\frac{ r_{npt}^{(1)(1)} }{\sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(1)} }$	...	$\frac{ r_{npt}^{(1)(j)} }{\sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(j)} }$	...	$\frac{ r_{npt}^{(1)(J)} }{\sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(J)} }$	$\frac{\sum_{j=1}^J  r_{npt}^{(1)(j)} }{\sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(j)} }$
...	...	...	...	...	...	...
$\sigma_{npt}^{(i)}$	$\frac{ r_{npt}^{(i)(1)} }{\sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(1)} }$	...	$\frac{ r_{npt}^{(i)(j)} }{\sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(j)} }$	...	$\frac{ r_{npt}^{(i)(J)} }{\sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(J)} }$	$\frac{\sum_{j=1}^J  r_{npt}^{(i)(j)} }{\sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(j)} }$
...	...	...	...	...	...	...
$\sigma_{npt}^{(\rho)}$	$\frac{ r_{npt}^{(\rho)(1)} }{\sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(1)} }$	...	$\frac{ r_{npt}^{(\rho)(j)} }{\sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(j)} }$	...	$\frac{ r_{npt}^{(\rho)(J)} }{\sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(J)} }$	$\frac{\sum_{j=1}^J  r_{npt}^{(\rho)(j)} }{\sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(j)} }$
$\Sigma$	$\frac{\sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(1)} }{\sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(1)} } = 1$	...	$\frac{\sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(j)} }{\sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(j)} } = 1$	...	$\frac{\sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(J)} }{\sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(J)} } = 1$	$J$

Однако полностью отвечает свойствам вероятности события отношение значения благоприятного исхода, равного абсолютной величине

коэффициента корреляции между химическим элементом и свойством, к количеству всех благоприятных событий в выборке, определяемому, как сумма количественных характеристик уровней связей (без учёта знака), между всеми признаками стали

$$P_{ij} = \frac{|r_{npt}^{(i)(j)}|}{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho} |r_{npt}^{(i)(j)}|} \quad (14)$$

Значения вероятности связи  $P_{ij}$  заданного химического компонента или отдельного приемо-сдаточного физико-механического свойства со всеми признаками стали образуют элементы матрицы, представленной в таблице 5. При этом каждый такой элемент является вероятностью связи компонента стали и заданного свойства.

Вероятность наступления события связи химического элемента с комплексом всех физико-механических свойств определяется теоремой сложения вероятностей. Она представляет собой сумму вероятностей связи заданного компонента стали с отдельными физико-механическими свойствами:

$$P_j = \sum_{i=1}^{\rho} P_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^{\rho} |r_{npt}^{(i)(j)}|}{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho} |r_{npt}^{(i)(j)}|} \quad (15)$$

При этом суммарная вероятность связи всех элементов химического состава стали с комплексом физико-механических свойств:

$$P = \sum_{j=1}^J P_j = \sum_{j=1}^J \frac{\sum_{i=1}^{\rho} |r_{npt}^{(i)(j)}|}{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho} |r_{npt}^{(i)(j)}|} = 1 \quad (16)$$

Аналогично можно получить величину вероятности наступления события связи между отдельным физико-механическим свойством и комплексом всех химических элементов, которая также определяется теоремой сложения:

$$P_i = \sum_{j=1}^J P_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^J |r_{npt}^{(i)(j)}|}{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho} |r_{npt}^{(i)(j)}|} \quad (17)$$

При этом суммарная вероятность связи комплекса физико-механических свойств с химическим составом стали:

$$P = \sum_{i=1}^{\rho} P_i = \sum_{i=1}^{\rho} \frac{\sum_{j=1}^J |r_{npt}^{(i)(j)}|}{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho} |r_{npt}^{(i)(j)}|} = 1 \quad (18)$$

Таким образом, значения величин вероятности связи признаков  $P_i$  и  $P_j$ , могут изменяться от 0 до 1. При этом  $P_j$  определяет для зависимости комплекса физико-механических свойств от заданного химического компонента а  $P_i$  – химического состава от указанного механического свойства долю от всех связей между представленными признаками. То есть эти величины выражают вес показателя стали в общей системе связей между всеми признаками. Поэтому величины  $P_i$  и  $P_j$  могут служить показательными весовыми характеристиками отдельных признаков сталей.

Таблица 5  
Матрица вероятности связи заданного химического элемента или отдельного прямо-сдаточного физико-механического свойства со всеми признаками

	$x_{npt}^{(1)}$	...	$x_{npt}^{(j)}$	...	$x_{npt}^{(J)}$	$\Sigma$
$\sigma_{npt}^{(1)}$	$\frac{ r_{npt}^{(1)(1)} }{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(j)} }$	...	$\frac{ r_{npt}^{(1)(j)} }{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(j)} }$	...	$\frac{ r_{npt}^{(1)(J)} }{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(j)} }$	$\sum_{j=1}^J \frac{ r_{npt}^{(1)(j)} }{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(j)} }$
...	...	...	...	...	...	...
$\sigma_{npt}^{(i)}$	$\frac{ r_{npt}^{(i)(1)} }{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(j)} }$	...	$\frac{ r_{npt}^{(i)(j)} }{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(j)} }$	...	$\frac{ r_{npt}^{(i)(J)} }{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(j)} }$	$\sum_{j=1}^J \frac{ r_{npt}^{(i)(j)} }{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(j)} }$
...	...	...	...	...	...	...
$\sigma_{npt}^{(\rho)}$	$\frac{ r_{npt}^{(\rho)(1)} }{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(j)} }$	...	$\frac{ r_{npt}^{(\rho)(j)} }{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(j)} }$	...	$\frac{ r_{npt}^{(\rho)(J)} }{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(j)} }$	$\sum_{j=1}^J \frac{ r_{npt}^{(\rho)(j)} }{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(j)} }$
$\Sigma$	$\frac{\sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(1)} }{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(j)} }$	...	$\frac{\sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(j)} }{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(j)} }$	...	$\frac{\sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(J)} }{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(j)} }$	$\frac{\sum_{i=1}^{\rho} \sum_{j=1}^J  r_{npt}^{(i)(j)} }{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho}  r_{npt}^{(i)(j)} } = 1$

Подставляя в формулу (14) величины коэффициентов корреляции с учётом их знака, получаем выражение для определения доли общей связи между всеми показателями, приходящейся на один признак стали. При этом доля общей связи между химическим элементом и всеми признаками определяется следующим математическим выражением:

$$\Delta_{ji}^{npt} = \frac{r_{npt}^{(i)(j)}}{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho} r_{npt}^{(i)(j)}} \quad (19)$$

Суммируя эти величины, то есть элементы столбцов матрицы (табл. 5), получаем коэффициенты общей связи между химическим элементом и всеми механическими свойствами:

$$\Delta_j^{npt} = \sum_{i=1}^{\rho} \Delta_{ij}^{npt} = \frac{\sum_{i=1}^{\rho} r_{npt}^{(i)(j)}}{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho} r_{npt}^{(i)(j)}} \quad (20)$$

Идентичные формулы получаются для определения доли общей связи между рассматриваемым физико-механическим свойством и всеми признаками:

$$\varphi_{ij}^{npt} = \frac{r_{npt}^{(i)(j)}}{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho} r_{npt}^{(i)(j)}} \quad (21)$$

и для расчёта весового коэффициента физико-механических свойств стали:

$$\varphi_i^{npt} = \sum_{j=1}^J \frac{r_{npt}^{(i)(j)}}{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{\rho} r_{npt}^{(i)(j)}} \quad (22)$$

которые выполняются суммированием элементов строк таблицы 5. Применяя к этим математическим выражениям (19), (20), (21) и (22) преобразования аналогичные (16) и (18), получаем, что значения величин  $\Delta_{ji}^{npt}$ ,  $\Delta_j^{npt}$ ,  $\varphi_{ij}^{npt}$  и  $\varphi_i^{npt}$  могут изменяться от 0 до 1.

## ВЫВОДЫ

1. Разработан метод расчёта весовых коэффициентов компонентов химического состава по уровню их влияния на механические свойства стали.
2. Суммы весовых коэффициентов компонентов химического состава или заданных механических свойств стали равны 1. Поэтому значения этих коэффициентов изменяются от 0 до 1.
3. Показано, что весовые коэффициенты признаков сталей могут быть вычислены из их корреляционной матрицы.

4. В корреляционной таблице признаков сталей наиболее информативной является матрица коэффициентов корреляции химических компонентов и механических свойств.

**Перспективы дальнейших исследований.** Дальнейшие исследования будут направлены на применение полученного метода расчёта весовых коэффициентов при разработке уравнений обобщённых показателей, анализе различных марок сталей и оптимизации их химических составов.

Расчёт для сталей весовых коэффициентов элементов химических составов и механических свойств [5] позволяет выполнить их графическое сопоставление и использовать результаты сравнительного анализа для оценивания и оптимизации химических составов сталей и различных процессов обработки металлоизделий.

### Литература

1. Юшкевич О. П. Концептуальные основы классификации и унификации марочного сортамента металлопроката из конструкционных сталей / О. П. Юшкевич, В. К. Флоров, С. К. Калиновский, Е. Н. Власова // *Металлургическая и горнорудная промышленность / Науч.-технич. и производств. журнал. Спецвыпуск. – Дн-вск, 2000. – № 8–9. – С. 412–414.*

2. Юшкевич О. П., Калиновский С. К. Учет эффекта геометрического упрочнения при упорядочении марочного сортамента металлопроката из конструкционных сталей / О. П. Юшкевич, С. К. Калиновский // *Теория и практика металлургии : Общегосудар. науч.-техн. журнал. – Дн-вск : АИНУ, 2002. – № 4.*

3. Юшкевич О. П. Взаимосвязь механических свойств стали Гадфильда для железнодорожных крестовин с химическим составом / О. П. Юшкевич, Е. И. Литвиненко // *Строительство, материаловедение, машиностроение : Сб. научн. тр. – Вып. 36, ч.3. – Дн-вск : ПГАСА, 2006. – 232 с.*

4. 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 : Наук. та інформ. журнал. – Дн-вск : ПГАСА, 2003. – № 4.*

5. Юшкевич О. П. Алгоритм структуризации термообрабатываемых марок сталей по конечному назначению / О. П. Юшкевич, С. К. Калиновский // *Металознавство та термічна обробка металів : Наук. та інформ. журнал. – Дн-вск : ПГАСА, 2001. – № 4.*

6. Юшкевич О. П. Модель редукции пространства описания сталей / О. П. Юшкевич, В. И. Погорельский, П. О. Юшкевич // *Строительство, материаловедение, машиностроение : Сб. научн. тр. – Вып. 59. – Дн-вск : ГВУЗ «ПГАСА», 2011. – 184 с.*

7. Юшкевич О. П. Модель представления комплексного показателя качества сталей до и после термической обработки / О. П. Юшкевич // *Теория и практика металлургии : Общегосудар. науч.-техн. журнал. – Дн-вск : АИНУ, 2011. – № 3–4.*

8. Большаков В. И. Модель интегрального показателя качества в системе аналитического описания сталей / В. И. Большаков, О. П. Юшкевич // Металознавство та термічна обробка металів : Наук. та інформ. журнал. – Дн-вск : ПГАСА, 2012. – № 1.
9. Юшкевич О. П. Разработка структуры данных марочного сортамента металлопроката / О. П. Юшкевич // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. тр. – Вып. 22, ч. 2. – Дн-вск : ПГАСА, 2003. – 320 с.
10. Юшкевич О. П. Модель представления репрезентативных показателей качества металлоизделий до и после термической обработки / О. П. Юшкевич // Металознавство та термічна обробка металів : Наук. та інформ. журнал. – Дн-вск : ПГАСА, 2011. – № 3.
11. Иберла К. Факторный анализ / К. Иберла. Пер. с нем. В. М. Ивановой. – М. : Статистика, 1980. – 398с., ил.
12. Юшкевич О. П. Анализ независимости признаков вектора описания марочного сортамента металлопроката / О. П. Юшкевич // Металознавство та термічна обробка металів : Наук. та інформ. журнал. – Дн-вск : ПГАСА, 2006. – № 3.