

УДК 669.45+669.046.558

С.А. Полишко

Днепровский национальный университет имени Олеся Гончара

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА КОЛЕСНОЙ СТАЛИ МАРКИ R7 НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИ ПАРНОЙ И ГРУППОВОЙ КОРРЕЛЯЦИЯХ

В даній статті проведено аналіз виплавки колісної сталі марки R7, встановлені причини недолегуювання колісної сталі цієї марки, а також розглянуто вплив модифікування на стабілізацію хімічного складу і підвищення рівня механічних властивостей колісної сталі марки R7. Доведено за допомогою коефіцієнтів кореляції різних видів, що введення в розплави багатофункціональних модифікаторів сприяє долегуванню розплаву, стабілізації хімічного складу і підвищення рівня механічних властивостей колісної сталі марки R7.

Ключові слова: *колiсна сталь R7, модифікування, коефіцієнт кореляції, хімічний склад, механічні властивості.*

В данной статье проведен анализ выплавки колесной стали марки R7, установлены причины недолегирования колесной стали этой марки, а также рассмотрено влияние модифицирования на стабилизацию химического состава и повышение уровня механических свойств колесной стали марки R7. Доказано при помощи коэффициентов корреляции различных видов, что введение в расплав многофункциональных модификаторов способствует долегиованию расплава, стабилизации химического состава и повышению уровня механических свойств колесной стали марки R7.

Ключевые слова: *колесная сталь R7, модифицирование, коэффициент корреляции, химический состав, механические свойства.*

This article deal with analysis of the R7 wheel steel smelting has been carried out, the reasons for the non-alloying of the wheel steel of this brand have been determined, and the influence of the modification on the stabilization of the chemical composition and the increase in the mechanical properties of the R7 wheel steel has been considered. It has been proved with the help of correlation coefficients of various types that the introduction of multifunctional modifiers into the melt promotes alloying of the melt, stabilization of the chemical composition and an increase in the level of mechanical characteristics of the R7 wheel steel.

Keywords: *wheel steel R7, modification, coefficient of correlation, chemical composition, mechanical characteristics.*

Введение. При исследовании большого массива статистических данных современной стали R7 определено, что на всех металлургических производствах наблюдается большой размах (разница между max и min) содержания легирующих элементов как в пределах одной плавки, так и между плавками.

Действительно, колесные стали в условиях современного производства являются многокомпонентными системами. И нестабильность химического состава приведет несомненно к пониженному уровню механических свойств. Несмотря на применение технологий вакуумирования сплавов в жидком состоянии, внедрение непрерывного литья, обработку расплавов алюминиевой катанкой, различных лигатур, таких как FeSi, FeMn, SiMn, FeV, FeMo, SiCa, Al, CaO, CaF₂ и т.д, проблема стабилизации состава и свойств остается актуальной [1-3].

Постановка задачи. Определение влияния каждого из элементов химического состава и их совокупности на уровень механических свойств колесной стали R7 с помощью метода регрессионно-корреляционного анализа.

Метод решения и анализ полученных результатов. В связи с поставленной задачей, в условиях ОАО «Интерпайп НТЗ» были выплавлены 111 плавов (108 серийные и 3 модифицированные) стали R7. В табл. 1 представлены химический состав стали R7 и результаты обработки статистического массива данных по реальным плавкам.

Таблица 1 – Химический состав стали марки R7

Марка стали	Массовая доля элементов, %												
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Ti	V	Mo	Al	Cr+M o+Ni
	не более												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
EN 13262-2011	0,49	0,80	0,40	0,020	0,015	0,30	0,30	0,30	-	0,06	0,08	-	0,50
Ковшевая проба R7, среднее значение	0,483	0,691	0,324	0,010	0,008	0,197	0,049	0,060	0,006	0,028	0,001	0,021	0,246
Max	0,51	0,76	0,37	0,017	0,013	0,24	0,09	0,10	0,007	0,036	0,002	0,028	0,332
Min	0,47	0,65	0,28	0,005	0,004	0,17	0,04	0,03	0,005	0,020	0,000	0,015	0,211
Размах	0,04	0,11	0,09	0,012	0,009	0,07	0,05	0,07	0,002	0,016	0,002	0,013	0,121
Разница между max min знач. %	8,5	16,9	32,1	240	225	41	125	233	40	80	200	86,7	57,3
Среднекв. отклон.	0,008	0,026	0,018	0,003	0,002	0,012	0,007	0,015	0	0,003	-	0,003	-
Коэф. вариации	0,017	0,038	0,055	0,297	0,252	0,062	0,149	0,251	0,085	0,108	-	0,140	-
Экссесс	0,652	0,055	-0,228	-0,954	0,625	2,516	7,897	1,039	0,125	0,531	-	-0,511	-
Асимметр.	0,278	0,597	0,177	0,439	0,964	1,008	1,602	1,055	-0,430	0,276	-	0,316	-

По представленным в табл. 1 данным химического состава (ковшевых проб) стали R7 и значениям статистических параметров установлено следующее.

Выявлена недолегированность стали R7 по кремнию (на 25 %), по никелю (на 512 %), по молибдену (на 7900 %), по ванадию (на 114 %) (рис. 1).

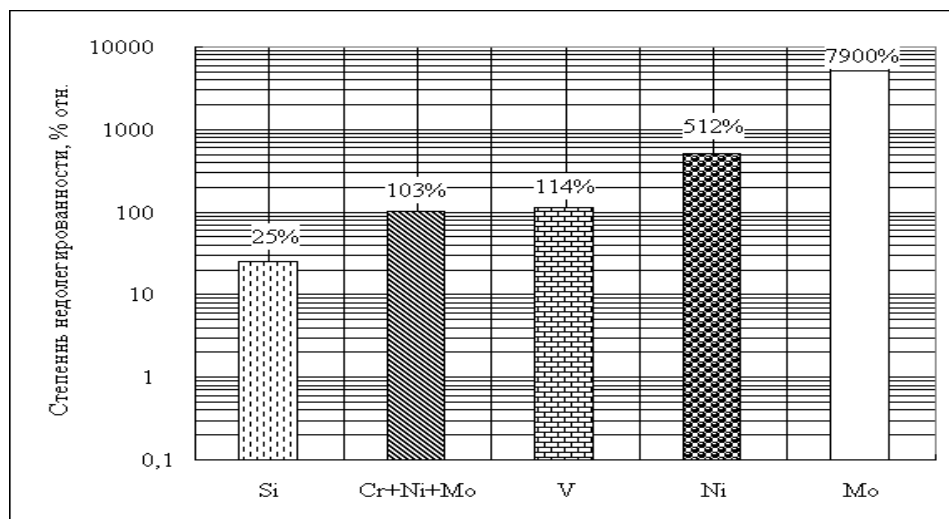


Рис.1 - Степень недолегированности стали R7 в соответствии с EN 13262-2011.

Средний химический состав стали R7 отвечал требованиям EN 13262-2011, за исключением одной плавки, где содержание углерода было выше нормы, 0,51 % C вместо 0,49 % C. Поскольку Si, Ni, Mo, Cr упрочняют феррит, недолегированность этими элементами снижает его сопротивление разрушению при циклических нагрузках стали R7.

Выявленная степень недолегированности стали R7 целым комплексом элементов (Si, Ni, Mo, V, Cr) подтверждается установленной по 108 плавкам стали R7 разницей значений микротвердости феррита и перлита, которая составляет 48 % вместо 22 % для стали с содержанием углерода от 0,48 % до 0,50 % C (рис. 2).

Установлена большая разница между максимальной (max) и минимальной (min) величинами микротвердости для феррита и перлита по 21 измерению на образцах, вырезанных из колес стали R7 (рис. 3). Для феррита она составляет 26 %, для перлита – 22 %. Это свидетельствует о неоднородности распределения легирующих элементов в феррите и перлите и недолегированности феррита.

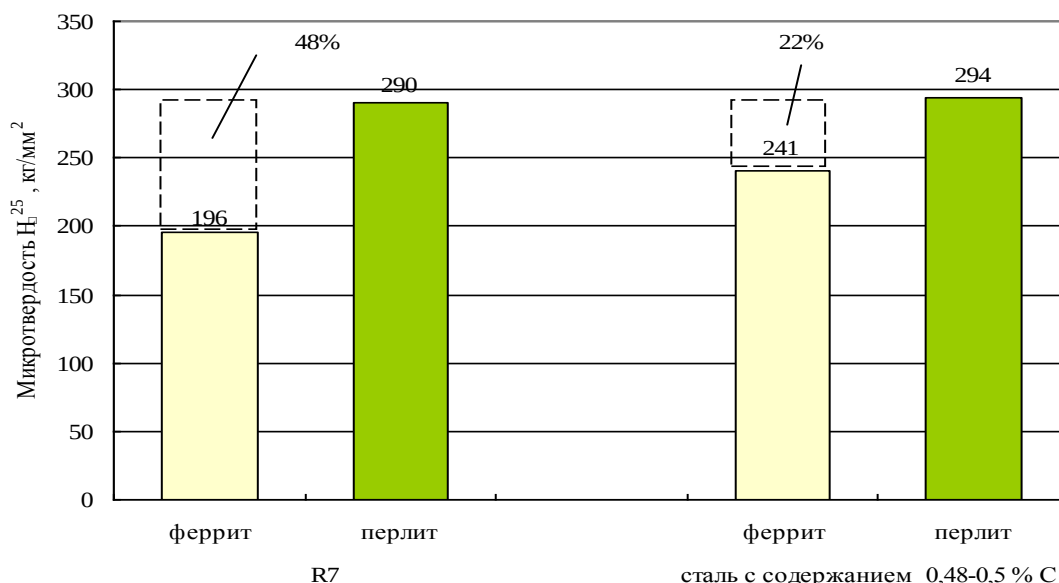


Рис. 2 - Разница средних значений микротвердости H в % (отн.) феррита и перлита для сталей R7 (по данным ОАО "ИНТЕРПАЙП НТЗ") и для углеродистой стали с содержанием 0,48-0,5 % С

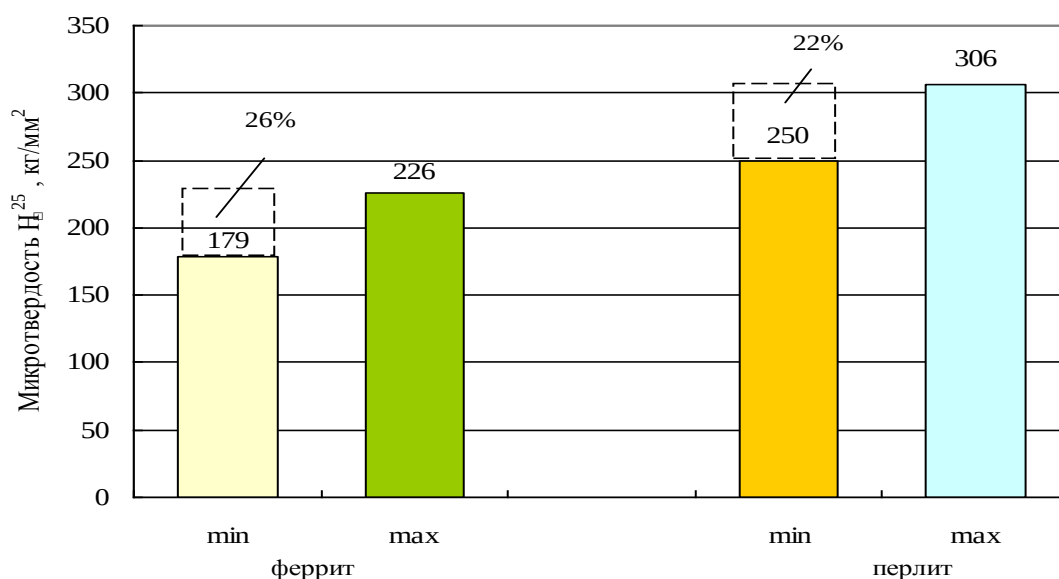


Рис. 3 - Разница (размах) между max и min значениями микротвердости феррита и перлита в стали R7 (108 плавов)

Нестабильное содержание остальных компонентов – V, Al, Ni, S, P связано с несоблюдением технологии выплавки стали R7.

Определение степени недолегированности и нестабильности стали R7 по комплексу элементов ее химического состава проверено нами по анализу 108 промышленных плавов в сравнении с требованиями EN 13262-2011;

микротвердости феррита и перлита; определением разницы между $\max$ и $\min$ содержанием каждого элемента (размаха в %); установлением коэффициентов вариации и остальных статистических параметров. Это определяет достоверность полученных данных и позволяет сделать следующие выводы по химическому составу исследованных плавок из стали R7.

1. Химический состав плавок R7 (108 плавок) не превышал верхнего уровня требований EN 13262-2011. Установлено, однако, что общая сумма легирующих элементов, рекомендованная EN 13262-2011, равная 2,65 %, на 42,5 % была меньше суммы легирующих элементов (Σ ЛЭ) в реальных 108 плавках, выплаваемых мартеновским цехом НТЗ. Близки к требованиям лишь содержания С, Мн.

2. Показано, что содержание S и P значительно ниже предъявляемых требований, соответственно на ~ 88 % и 100 %, что является весьма положительным фактом. В то же время размах (разница между максимальным и минимальным значениями) содержания S и P составляет соответственно 225 % и 250 %. Столь большой разброс свидетельствует о значительной нестабильности состава по сере и фосфору. Это отрицательно сказывается на циклической вязкости и трещиностойкости, поскольку соединения серы – сульфиды – являются основными местами зарождения трещин при знакопеременных нагрузках.

3. Установлено, что все плавки существенно недолегированы такими компонентами (V – на 114 %, Ni – на 512 %, Mo – на 7900 %, Si- на 25 %), которые определяют трещиностойкость стали R7. В то же время содержание именно этих элементов является наиболее нестабильным. Так, размах содержания молибдена составляет 200 %; никеля – 125 %; ванадия – 80 %; титана – 40 %; кремния – 32 %. Нестабильность содержания ЛЭ подтверждается для всех плавок также повышенными значениями коэффициентов вариации и другими статистическими параметрами.

4. Необходимо с учетом всех действующих на механические свойства факторов разработать оптимальный состав стали R7, включая легирующие элементы Cr, Ni, V, Cu, элементы-раскислители Al, Ti, газовые примеси O, N, H и вредные примеси S, P, указав не верхний допустимый предел, а $\min$ и $\max$ концентрации.

В связи с вышеуказанными проблемами, было проведено модифицирование многофункциональными модификаторами расплава стали марки R7 (рис.4).



Рис. 4. Внешний вид модификатора для стали R7

Модифицирование способствовало повышению стабильности химического состава колесной стали марки R7

Химический состав, % по массе													
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	V	Mo	Al	Ti	[H]
Максимальное значение	0,51	0,71	0,36	0,016	0,006	0,24	0,15	0,12	0,037	0,047	0,025	0,007	1,8
Минимальное значение	0,48	0,7	0,31	0,007	0,004	0,19	0,04	0,05	0,034	0,033	0,021	0,006	1
Размах	0,03	0,01	0,05	0,009	0,002	0,05	0,11	0,07	0,003	0,014	0,004	0,001	0,8
Среднее значение	0,49	0,70	0,34	0,011	0,005	0,21	0,11	0,08	0,036	0,038	0,023	0,006	1,5
Коэффициент вариации	0,04	0,01	0,075	0,417	0,217	0,140	0,553	0,494	0,043	0,215	0,089	0,091	0,284

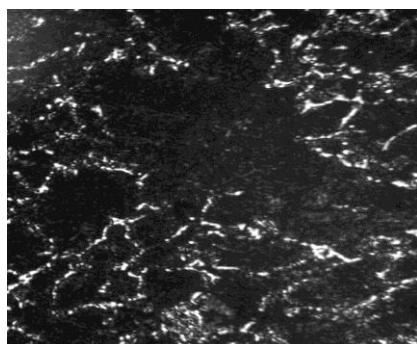
Таблица 2- Серийные плавки

Таблица 3- Модифицированные плавки

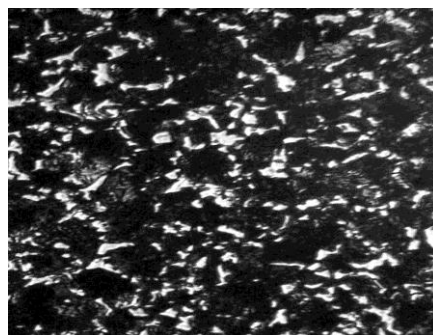
Химический состав, % по массе													
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	V	Mo	Al	Ti	[H]
Максимальное значение	0,51	0,76	0,37	0,018	0,015	0,29	0,08	0,11	0,039	0,014	0,030	0,005	2,0
Минимальное значение	0,46	0,65	0,28	0,005	0,004	0,17	0,03	0,04	0,019	0,010	0,012	0,005	0,5
Размах	0,05	0,11	0,09	0,013	0,011	0,12	0,05	0,07	0,020	0,004	0,018	0	1,5
Среднее значение	0,48	0,69	0,33	0,010	0,008	0,19	0,05	0,06	0,030	0,011	0,022	0,005	1,4
Коэффициент вариации	0,018	0,030	0,052	0,291	0,281	0,081	0,192	0,268	0,110	0,147	0,124	0	0,214

Исследование микроструктуры стали R7 немодифицированных серийных плавок, и модифицированных специальными модификаторами показало следующее.

Серийная немодифицированная сталь R7 отличается неоднородностью структуры, значительной разнотернистостью и формированием сплошных окаймлений избыточного феррита вокруг колоний перлита (рис. 5а). При больших увеличениях в микроструктуре обнаружены мелкие выделения второй фазы. Не исключено, что это выделения третичного цементита, выделяющегося в феррите в процессе охлаждения колес после термической обработки из-за уменьшения растворимости углерода в феррите при понижении температуры до комнатной. В избыточном феррите нами было обнаружено значительное количество неметаллических включений (сульфидов, оксисульфидов, оксидов), рис. 6-8.

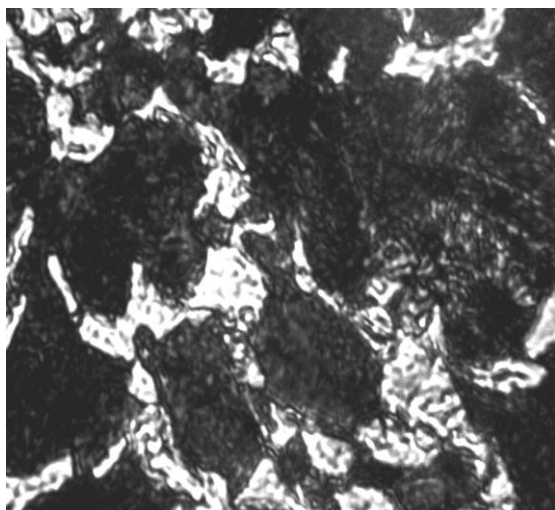


а)

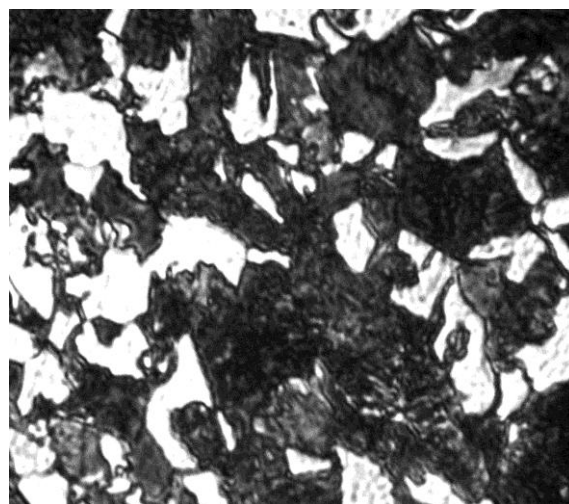


б)

Рис. 5 – Микроструктура немодифицированной стали R7 плавки № 21477 и плавки № 22811, обработанной специальным модификатором, x280



**Рис. 6 – Немодифицированная сталь R7.
Разнотернистость и непрерывные
окаймления вокруг колоний перлита,
неоднородность структуры феррита**



**Рис. 7 – Модифицированная
специальным модификатором сталь R7
с прерывистыми выделениями
избыточного феррита в перлите**

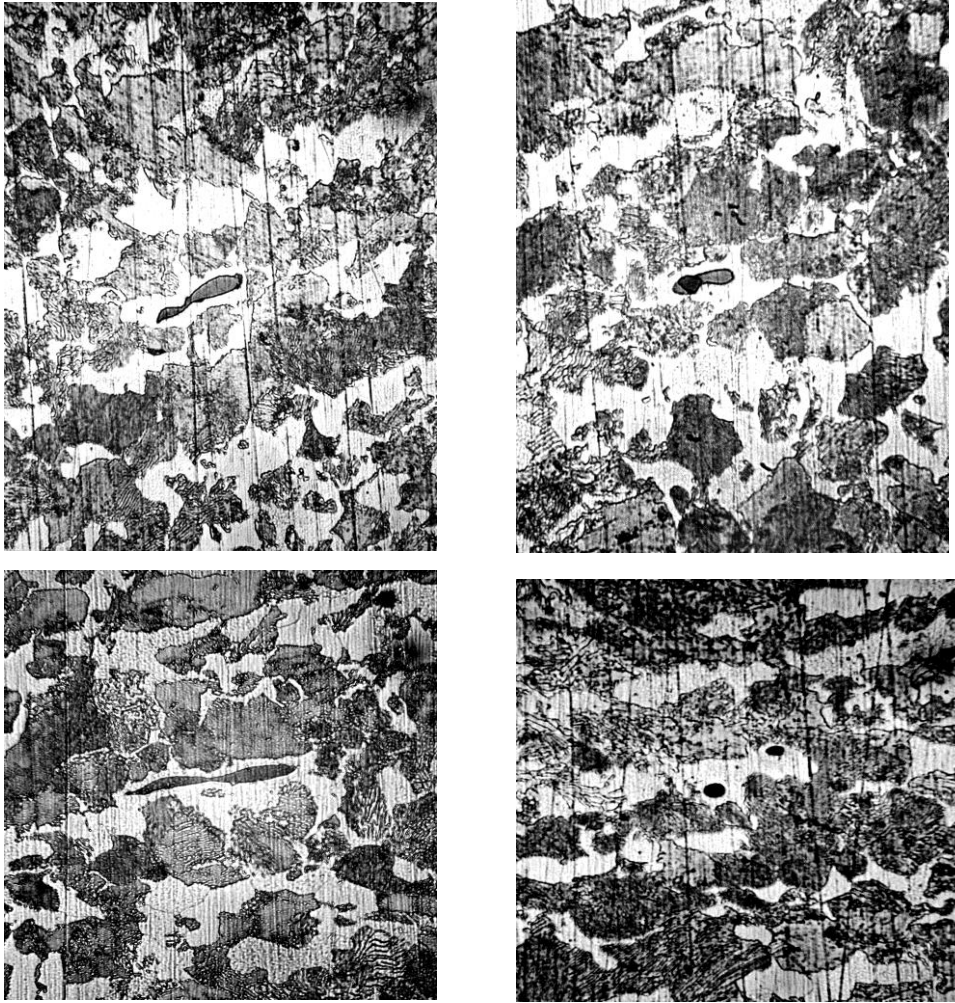


Рис. 8 – Неметаллические включения в выделениях избыточного феррита (сульфиды, оксиды, оксисульфиды) в стали R7

Неметаллические включения также имели сложную форму в серийной стали в отличие от модифицированной.

Регрессионно-корреляционным методом установлены коэффициенты парной и групповой корреляции для предела прочности и ударной вязкости с элементами химического состава стали R7 (рис. 9-12).

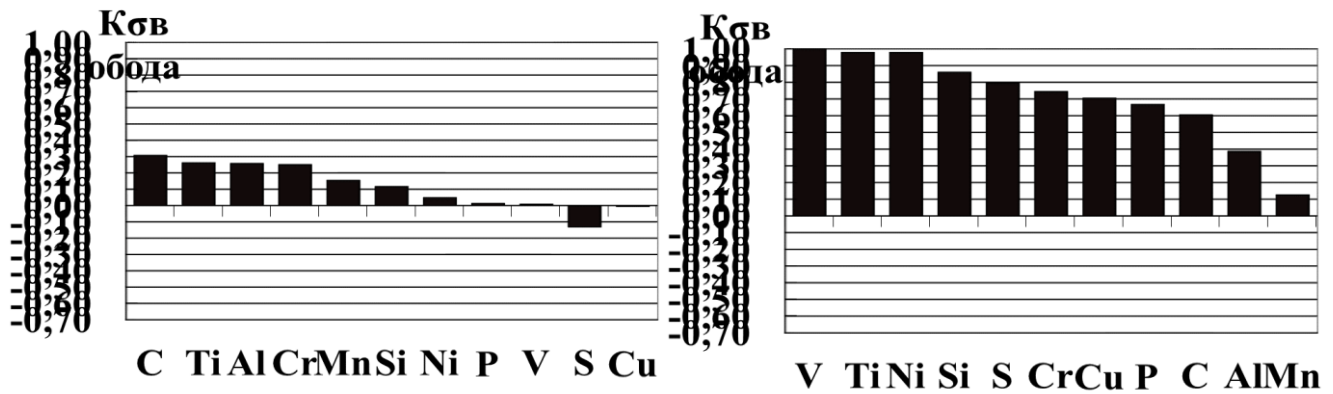


Рис. 9 - Гистограмма коэффициентов парной корреляции между пределом прочности и химическим составом стали КП-Т

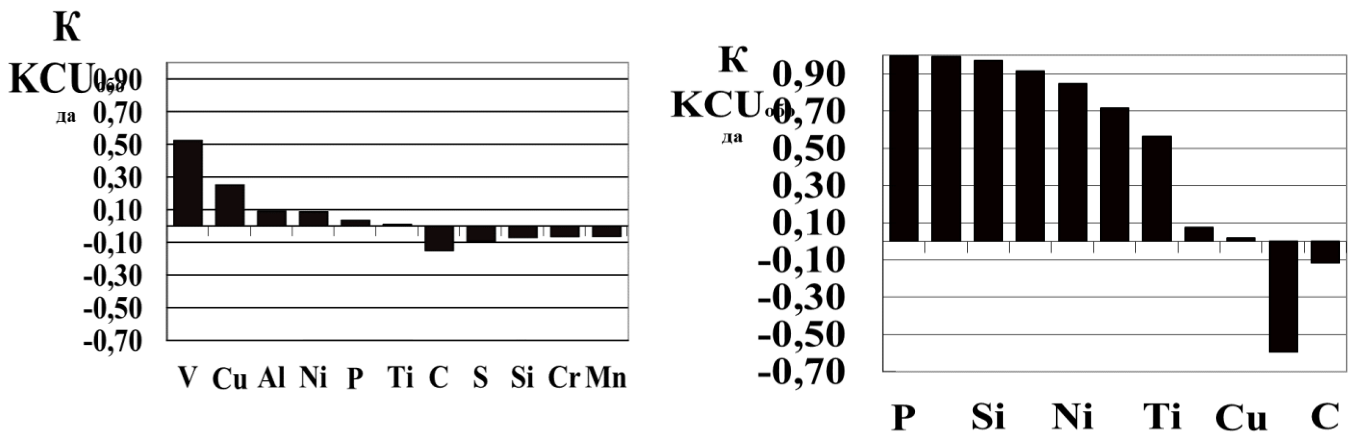


Рисунок 10 - Гистограмма коэффициентов парной корреляции между ударной вязкостью (обода) и химическим составом стали КП-Т

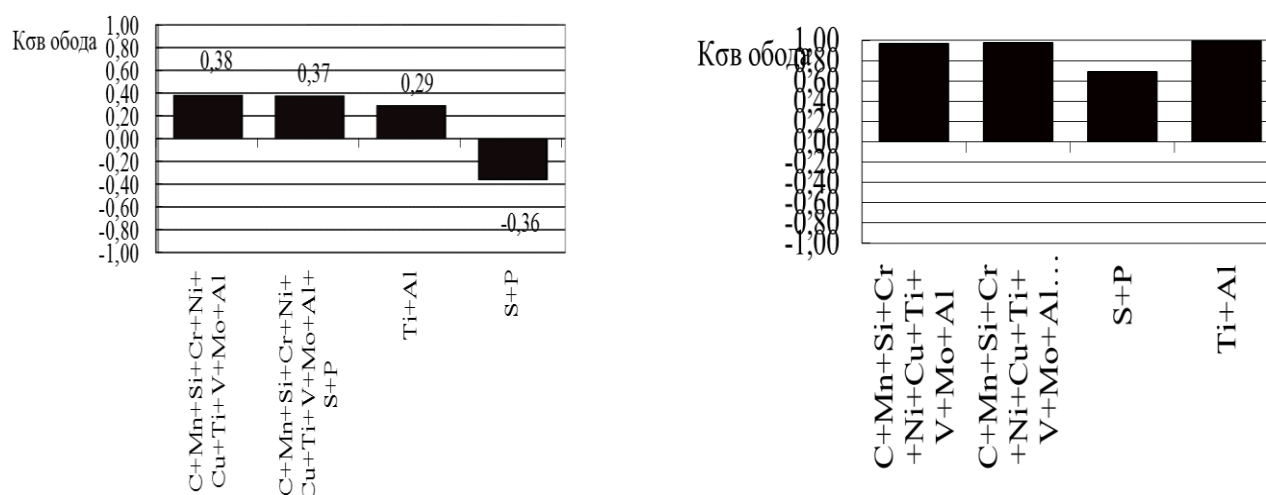


Рис. 11 - Гистограмма коэффициентов корреляции между пределом прочности и химическим составом стали КП-Т

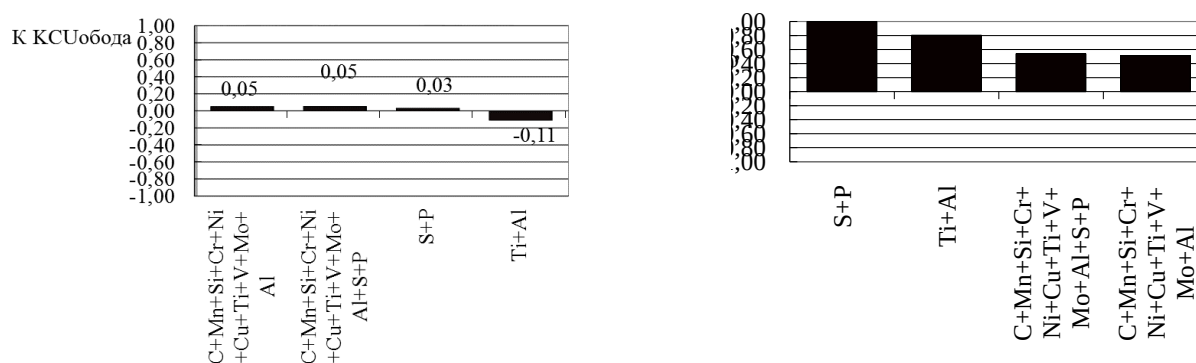


Рис. 12 - Гистограмма коэффициентов корреляции между ударной вязкостью (обод) и химическим составом стали КП-Т

Как видно, на предел прочности наиболее существенно влияют углерод, кремний, алюминий, ванадий. На ударную вязкость оказывают значительное влияние ванадий, хром, никель, титан, повышая ее.

Если говорить о групповом влиянии элементов, то наиболее существенно, как видно из гистограмм, оказывают влияние все компоненты вместе именно в модифицированном металле. Это связано с компонентами многофункциональных модификаторов.

Выводы. В данной статье установлена недолегированность такими элементами, как V, Ni, Mo, Si, которые в значительной степени определяют

трещиностойкость стали R7. Отмечена нестабильность содержания легирующих элементов в серийном металле, подтвержденная статистическими параметрами. В модифицированном металле с использованием специальных модификаторов, количество феррита получено ~12 %. При циклических испытаниях на базе $1 \cdot 10^7$ циклов, проведенных в Германии, трещиностойкость колеса отвечала требованиям. Кроме того, в модифицированных сталях сформировалось значительно меньшее по размерам первичное зерно; избыточный феррит не образует сплошных окаймлений по границам перлитных колоний, снижена разнотернистость. Это указывает на перспективность использования специальных модификаторов для обработки расплавов.

Библиографические ссылки

1. Полішко С.О. Влияние модифицирования многофункциональными модификаторами на структуру и свойства колесных сталей /С.О. Полішко// Первый независимый научный вестник, Киев, № 6 – 2016, с. 87-96 (Ulrich's Periodicals Directory, EBSCO, Open Academic Journals Index)
2. Полишко С.А. Влияние межплавочной разницы содержания компонентов в колесной стали марки КП-Т на трещиностойкость/С.А. Полишко /Технологический аудит и резервы производства.).//Сб научн.трудов.№3/4(17), – X.– 2014, с 23-26.
3. Теоретичні основи керованого структуроутворення сплавів для підвищення їх властивостей шляхом бробки розплавів спеціальними модифікаторами з енергозбереженням. [Текст] : отчет по НИР (заключ.) // кер. Санін А.Ф., вик. Івченко Т.І., Бабенко О.П., Кушнір М.А., Маркова І.А., Полішко С.О., Татарко Ю.В.- Дніпропетровськ, 2013.115 с.№ ДР 0111U001143, №6-243-11.
4. Пат 93684 Україна МПК (2011.01) C22C 35/00 C21C 7/04. Розкислювач-модифікатор для обробки розплавів сталей і сплавів. [Електронний ресурс] /Шаповалова О. М, Шаповалов В. П., Шаповалов О. В., Полішко С. О.(Україна); Заявник та патентотримувач Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара. – №а200801124, заявл. 30.01.2008 р., опубл. 10.03.2011 р. – Бюл №5. – Режим доступу: \www/URL: <http://uapatents.com/4-93684-rozkislyuvach-modifikator-dlya-obrobki-rozplaviv-stalej-i-splaviv.html>