

УДК 669.046.558

DOI: 10.15587/2312-8372.2019.157676

## **ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ НА УСТАНОВКЕ ВАКУУМНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ (УВОС) НА ДЕСУЛЬФУРАЦИЮ НЕМОДИФИЦИРОВАННОЙ И МОДИФИЦИРОВАННОЙ СТАЛИ КП-2**

**Полишко С. А.**

### **1. Введение**

Применение в железнодорожном транспорте сталей для железнодорожных колес представляет собой научный и практический интерес по причине того, что это – многокомпонентные системы, которые имеют существенный разброс химического состава [1]. Это происходит потому, что при выплавке колесного металла из-за неконтролируемых по химическому составу ломов и серийных модификаторов в колесную сталь попадают неблагоприятные химические соединения. В результате это приводит к значительному разбросу механических характеристик транспортного металла, что может привести к крайне негативным последствиям – потере трещиностойкости железнодорожных колес и качества готовой продукции в целом. Этим и обосновывается актуальность данных исследований.

### **2. Объект исследования и его технологический аудит**

*Объектом исследования* в данной работе является процесс внепечной обработки колесной стали КП-2.

В современном мире очень важным является вопрос повышения качества колес для железнодорожных вагонов, где применяют легированные стали. В настоящее время используются серийные колеса. Например, в условиях открытого акционерного общества (ОАО) «Интерпайп НТЗ» (г. Днепропетровск, Украина) изготавливают колеса из стали КП-2 по ДСТУ ГОСТ 10791-2016, которые характеризуются нестабильным химическим составом, имеют повышенное количество неметаллических включений, особенно остроугольной и ограненной формы. Последние являются концентраторами напряжений, что обуславливает снижение прочности, трещиностойкости, недолгий срок службы и недостаточную стабильность свойств в процессе эксплуатации.

Среди основных направлений решения этой проблемы является модифицирование сталей многофункциональными модификатором. Для того, чтобы повысить уровень механических характеристик металла в условиях ОАО «Интерпайп НТЗ» успешно были применены модификаторы многофункционального действия [2]. Их вводили в расплав после применяемых лигатур ферросилиция, ферромарганца, ферротитана, силикомарганца, силикокальция, CaO, CaF<sub>2</sub>.

### **3. Цель и задачи исследования**

*Цель данной работы* – установление влияния модификаторов многофункционального действия на десульфурацию немодифицированной и модифицированной стали КП-2.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить такие задачи:

1. Определить стабильность химического состава в серийном и модифицированном металле.
2. Установить степень десульфурации серийного и модифицированного металла.
3. Установить влияние модифицирования на морфологию неметаллических включений и на уровень и стабильность механических характеристик.

#### **4. Исследование существующих решений проблемы**

Вопрос повышения качества колес для железнодорожных вагонов является очень важным [3]. Среди работ, посвященных данному вопросу, можно выделить [4, 5]. Однако в данных работах не рассмотрены такие проблемы, как десульфурация стали и стабилизация химического состава.

Альтернативный вариант решения проблемы, изложенный в [6], не предусматривает десульфурацию стали. Это также важно при исследовании кристаллографической текстуры стали рельсовых колес в результате модификации и термомеханической обработки.

Работа [7] посвящена исследованию влиянию модификатора, который содержит редкоземельные элементы (RE) на свойства сплава с низкой температурой плавления (Al–Bi–Sb) и сплав Ca–Si на высокоуглеродистую сталь, содержащую 1,9 мас. % С. Но в данной работе нерешенным остается вопрос снижения в стали концентрации серы и количества неметаллических включений.

Про модифицирование подробно описано в работе [8]. Однако, в этом источнике не до конца раскрыто описание процесса стабилизации химического состава и улучшение морфологии неметаллических включений.

В работах [9, 10] показано, что процесс модифицирования металла является одной из основных операций при выплавки колесных сталей. Этот процесс заключается в снижении количества из жидкого металла неметаллических включений, которые присутствуют в виде различных соединений металлов с вредными примесями. Но не доказан факт, что для улучшения морфологии неметаллических включений и снижения количества серы необходимо вводить элементы-модификаторы – вещества, обладающие способностью соединяться с серой.

Авторами работ [7, 11] показано, что качества стали во многом зависят от обработки расплава многофункциональными модификаторами. Это неотъемлемый процесс получения качественной стали. В зависимости от ситуации в жидкую сталь вводят растворимые раскислители-модификаторы-лигатуры (FeMn, FeSi, FeTi, FeNb, SiMn, SiCa, С, Al) в виде чушек. В результате многофункционального действия железо восстанавливается до свободного состояния и происходит образование оксидов модификаторов многофункционального действия, которые благодаря менее удельному весу всплывают на поверхность в виде шлаков. Однако проблема повышения качества металла остается важной, так как часть неметаллических включений все же остается в стали, не смотря на применение вышеуказанных модификаторов многофункционального действия. Введение каждого из них снижает температуру металла в ковше, захлаживая его, что часто приводит к

недорастворенности тугоплавких ферросплавов и образованию микроликватов. Таким образом, результаты анализа позволяют сделать вывод о том, что наиболее прогрессивным способом повышения качества углеродистых сталей является обработка их в жидком состоянии многофункциональными модификаторами в виде брикетов (рис. 1).



**Рис. 1.** Уменьшение содержания серы при обработке немодифицированной серийной стали КП-2

Вышеуказанное утверждение, как доказано в работах [12, 13], обосновано тем, что модификаторы в виде брикетов полностью усваиваются стальным расплавом. В результате этого формируются неметаллические включения глобулярной формы, что приводит к образованию дополнительных центров кристаллизации. Это, в свою очередь, способствует повышению стабильности свойств и качества готового металла.

## **5. Методы исследований**

При исследовании стабильности химического состава многофункциональных модификаторов использовались методы статистической обработки. Применение статистических методов обработки удобно технически, поскольку все необходимые возможности имеются в стандартном программном обеспечении Microsoft Office.

Анализ химического состава серийной стали КП-2 методами статистической обработки показал следующее:

- низкая степень десульфурации стали КП-2;
- нестабильный химический состав стали КП-2, обработанной традиционным способом серийными раскислителями.

Для получения точных и достоверных результатов использован комплекс современных методов определения свойств изучаемых материалов. Химический состав стали без модифицирования и после модифицирования определяли на высокоточных приборах: Поливак Е-600 и LECO (Англия). Исследования микроструктуры выполнены на микроскопе НЕОРНОТ 32 (Германия) при увеличениях до 900 крат. Механические свойства определяли на стандартных разрывных образцах на разрывной машине МУП-20 и маятниковом копре МК-30

(Россия). Обработка экспериментальных данных выполнена с использованием современных компьютерных программ Microsoft Excel 2016.

Выплавку колесной стали марки КП-2 проводили на мартеновской печи с дальнейшей обработкой на печи-ковше и вакууматоре. Прокатка и термообработка колес производилась по существующей производственной технологии в условиях ОАО «Интерпайп НТЗ».

## 6. Результаты исследований

Химический состав стали КП-2 соответствовал требованиям ДСТУ ГОСТ 10791-2016 согласно данным статистических исследований 442 серийных плавов производства ОАО «Интерпайп НТЗ» немодифицированной и модифицированной плавки (6 колес) стали КП-2 (табл. 1) [14].

Таблица 1

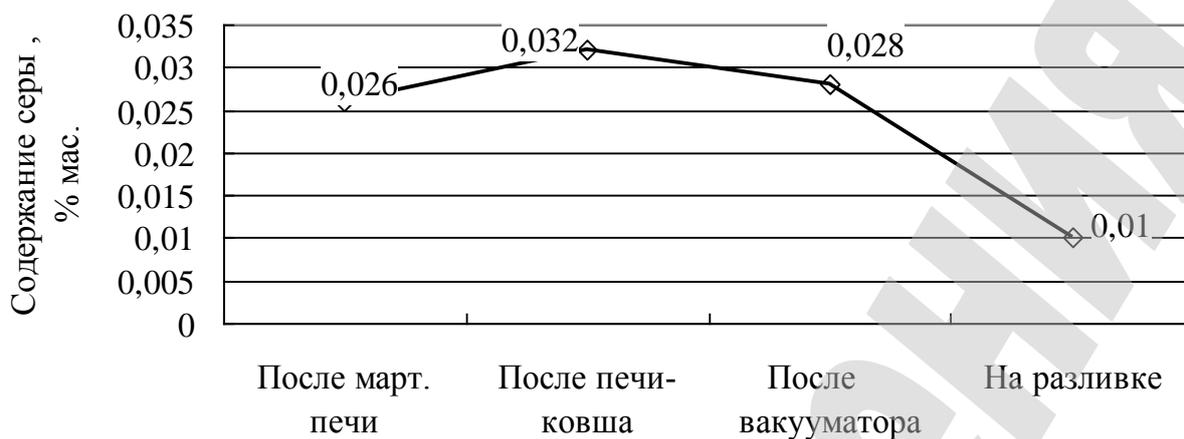
Химический состав стали КП-2

Параметры	Данные по химическому составу				
	C	Mn	Si	P	S
Немодифицированная сталь КП-2					
Максимум	0,62	0,74	0,36	0,015	0,009
Минимум	0,58	0,70	0,29	0,008	0,005
Размах	0,04	0,04	0,07	0,007	0,004
Среднее значение	0,60	0,72	0,31	0,012	0,007
Коэффициент вариации	0,02	0,02	0,09	0,21	0,24
Модифицированная сталь КП-2					
Максимум	0,63	0,73	0,33	0,013	0,006
Минимум	0,62	0,72	0,32	0,012	0,005
Размах	0,01	0,01	0,01	0,001	0,001
Среднее значение	0,63	0,73	0,33	0,012	0,006
Коэффициент вариации	0,01	0,01	0,01	0,04	0,08

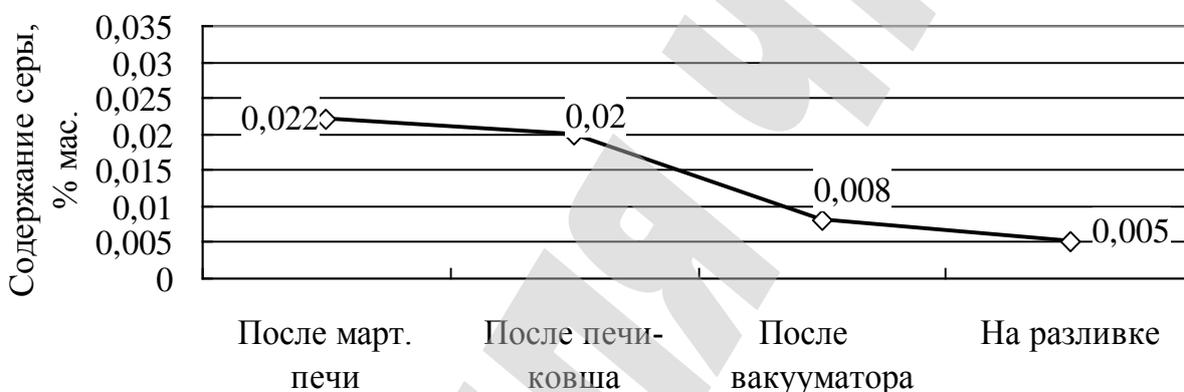
Из данных, представленных в табл. 1 следует, что максимальные значения по вредным примесям серы и фосфору в немодифицированной стали КП-2 выше, чем в модифицированном металле той же марки. При этом минимальные значения одинаковые, но в тоже время межплавочная разница (размах) между максимальным и минимальным значениями в серийном металле также больше, чем в модифицированном. Это приводит к нестабильности химического состава колесной стали КП-2, и, как следствие, к нестабильности механических характеристик. Это служит причиной снижения качества готовых колес.

С целью подтверждения вышесказанного, было проведено исследование влияния модифицирования на установке вакуумной обработки стали (УВОС, англ. SVPE – steel vacuum processing equipment) на десульфурацию немодифицированной и модифицированной стали КП-2.

Снижение содержания серы по результатам исследований в результате технологических операций на УВОС представлено на графиках (рис. 2, 3). Все данные на рис. 2, 3 соответствуют требованиям нормативной документации (ГОСТ).



**Рис. 2.** Уменьшение содержания серы при обработке немодифицированной серийной стали КП-2 на установке вакуумной обработки стали



**Рис. 3.** Уменьшение содержания серы при обработке модифицированной серийной стали КП-2 на установке вакуумной обработки стали

Из анализа данных, представленных на рис. 2, 3, можно сделать следующие выводы.

Десульфурация на УВОС промышленных плавков не зависит от концентрации серы после мартена: так, степень десульфурации при высоком содержании серы ( $S=0,026$  % мас.) после мартена на разливке составляет 2,9 ( $S=0,010$  % мас.), рис. 2.

Обработкой на УВОС модификаторами многофункционального действия стали КП-2 содержание серы снижено до 0,005% мас. Это в 7 раз ниже по сравнению с требованиями ДСТУ ГОСТ 10791 и от 40 % до 60 % меньше, чем в 442 серийных плавках немодифицированной стали КП-2 (рис. 3).

Поскольку в значительной степени содержание серы определяет риск возникновения микротрещин и разрушения колес необходимо стремиться к оптимальному их содержанию от 0,005 % до 0,006 % мас. серы.

В немодифицированных плавках даже после обработки на УВОС межплавочное содержание серы очень нестабильное. Только модифицирование позволяет снизить на постоянной основе как содержание серы, так и стабилизировать ее межплавочную и внутривплавочную концентрацию.

По результатам исследований неметаллических включений было установлено, что в модифицированной стали они имеют глобулярную форму в отличие от серийного металла, который имеет неметаллические включения вытянутой ограненной формы (рис. 4).



**Рис. 4.** Внешний вид неметаллических включений в стали марки КП-2, х900:  
*а* – серийная; *б* – модифицированная

Из приведенных фото на рис. 4 видно, что количество самих неметаллических включений также в модифицированном металле меньше, чем в серийном. Это объясняется тем, что компоненты модификаторы способствуют образованию устойчивых соединений, которые являются дополнительными центрами кристаллизации. В то же время, излишнее количество серы также формируется в соединения, которые всплывают в шлак.

Уровень механических характеристик в колесной стали КП-2 представлен в табл. 2.

**Таблица 2**

**Механические характеристики стали КП-2**

Параметры	Предел прочности, $\sigma_b$ , МПа	Относительное удлинение, $\delta$ , %	Относительное сужение, $\psi$ , %	Твердость, НВ <sub>30</sub> , МПа	Ударная вязкость, КСУ, Дж/м <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6
Немодифицированная сталь КП-2					
Максимум	1030	16,5	35	306	33
Минимум	980	13	26	278	20
Размах	50	3,5	9	28	13
Среднее значение	1005	14,81	31,5	291,4	25
Коэффициент вариации	0,03	0,07	0,10	0,03	0,15
Модифицированная сталь КП-2					
Максимум	1060	13	28	3020	31
Минимум	1020	11	21	2900	24
Размах	40	20	7	120	7

## Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6
Среднее значение	1052	11,5	22,9	2982	28
Коэффициент вариации	0,02	0,07	0,13	0,02	0,11

Из представленных данных в табл. 2 следует, что уровень механических характеристик в модифицированной стали также оказался выше, чем серийной немодифицированной стали той же марки. Уровень механических свойств стали КП-2 после модифицирования в среднем увеличился на 5 % по прочности, на 1 % по пластичности, на 11 % по ударной вязкости. Коэффициенты вариации показывают, что механические характеристики модифицированной стали КП-2 стабильнее, чем в серийных плавках той же стали. Это очень важно, так как именно благодаря стабильности можно прогнозировать уровень различных характеристик, что повысит спрос и качество на эти железнодорожные колеса.

### 7. SWOT-анализ результатов исследований

*Strengths.* Модифицирование многофункциональными модификаторами оказывает положительный эффект на формирование неметаллических включений. Это приводит к более высокому уровню механических характеристик и повышению качества готовых колес из стали марки КП-2.

К положительным сторонам исследования также можно отнести то, что:

– временные затраты снижаются в виду того, что модификаторы многофункционального действия изготавливаются безрасплавным способом в течении нескольких десятков минут за штуку. В то время как серийные раскислители изготавливаются плавным способом, требующем в среднем по времени до 1,5 часа за штуку;

– увеличивается КПД и производительность стальной продукции в целом;

– увеличивается скорость объема производства готовых колес без потери качества;

– производство модификаторов многофункционального действия экологически чистое по причине полного усвоения их расплавом стали.

*Weaknesses.* Незначительное увеличение стоимости производства за 1 брикет модификатора, что нивелируется путем необходимости их меньшего количества при выплавке стали в сравнении с серийными аналогами, которые необходимо больше, а также они стоят дороже.

*Opportunities.* Применение многофункционального модифицирования при выплавке стали КП-2 способствует снижению энергозатрат и повышению уровня механических характеристик с одновременным снижением стоимости производства готовых колес. Предполагаемый экономический эффект внедрения многофункциональных модификаторов составляет примерно 30 евро на 1 плавку.

*Threats.* Необходимость покупки материалов (стружки) для изготовления брикетов, однако это компенсируется тем, что многофункциональные

модификаторы экологически безопасны и не нуждаются в местах для захоронения отходов промышленности.

Существуют аналоги, подобные данным модификаторам, но они изготавливаются плавным способом со значительными энергозатратами [15].

## 8. Выводы

1. В результате проведенных исследований установлено, что благодаря применению многофункциональных модификаторов повышается стабильность химического состава в серийном и модифицированном металле. Методом статистической обработки установлено, что коэффициенты вариации и размах в модифицированной стали ниже, чем в серийном металле.

2. Доказано, что под влиянием модифицирования увеличилась десульфурация стали КП-2. При введении в расплав многофункциональных модификаторов средняя концентрация серы снизилась с 0,007 до 0,006 %. Максимальное значение при этом снизилось еще больше – с 0,009 до 0,006 %, а минимальное осталось одинаковое – 0,005 % для серийной и модифицированной стали. Это подтверждает выводы по пункту 1 – снижение размаха в модифицированном металле. Рекомендуется ужесточить технологические режимы по всей цепочке производства, вплоть от выплавки до деформации и термической обработке.

3. Установлено, что влияние модифицирования улучшает морфологию неметаллических включений. Применение многофункционального модифицирования на предприятии ОАО «Интерпайп НТЗ» при выплавке стали КП-2 позволило повысить уровень механических свойств стали КП-2 в среднем на 5 % по прочности, на 1 % по пластичности и на 11 % по ударной вязкости. На основании полученных коэффициентов вариации можно утверждать, что механические характеристики модифицированной стали КП-2 стабильнее, чем в серийных плавках той же стали. Это очень важно, так как именно благодаря стабильности можно прогнозировать уровень различных характеристик, что повысит спрос и качество на эти железнодорожные колеса.

## Литература

1. Полишко С. А., Маркова И. А., Ивченко Т. И., Носова Т. В. Влияние элементов на параметры механических свойств серийной и модифицированной стали Ст1кп // *Металлургия и горнорудная промышленность*. 2012. № 4. С. 73–75.

2. Розкислювач-модифікатор для обробки розплавів сталей і сплавів: пат України № 93684 / Шаповалов В. П., Шаповалов О. В., Шаповалова О. М., Полішко С. О. № а200801124, заявл. 30.01.2008. опубл. 10.03.2011. Бюл. № 5. 4 с.

3. Formation and Thermodynamics of Mg-Al-Ti-O Complex Inclusions in Mg-Al-Ti-Deoxidized Steel / Ren Y. et. al. // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2014. Vol. 45, Issue 6. P. 2057–2071. doi: <http://doi.org/10.1007/s11663-014-0121-0>

4. Осташ О. П., Андрейко І. М., Кулик В. В., Прокопєць В. І. Циклічна тріщиностійкість сталей залізничних коліс типу КП-2 і КП-Т за впливу експлуатаційних температурно-силових факторів // *Проблеми механіки залізничного транспорту: Безопасність руху, динаміка, міцність*

подвижного состава, энергосбережение. XIII Международная конференция. Тезисы докладов. Д.: ДНУЖТ, 2012. С. 105–106.

5. Татарченко Д. М. *Металлургия чугуна, железа и стали*. М.: Книга по Требованию, 2014. 491 с.

6. Investigation of rail wheel steel crystallographic texture changes due to modification and thermomechanical treatment / Lychagina T. et. al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 82. P. 1–6. doi: <http://doi.org/10.1088/1757-899x/82/1/012107>

7. Effects of modification on microstructure and properties of ultrahigh carbon (1.9wt.% C) steel / Liu K. P. et. al. // *Materials Science and Engineering: A*. 2011. Vol. 528, Issue 28. P. 8263–8268. doi: <http://doi.org/10.1016/j.msea.2011.07.038>

8. Пригунова А. Г., Петров С. С. Будова металевих розплавів і її взаємозв'язок з твердим станом // *Металознавство та обробка металів*. 2016. № 2. С. 17–27.

9. Brebbia C., Connor J. J. *Progress in Materials Science and Engineering* / ed. by Newkirk J. W., Popov A. A., Zhilin A. S. Springer, 2018. 203 p. doi: <http://doi.org/10.1007/978-3-319-75340-9>

10. Alloys with modified characteristics / Mirsado O. et. al. // *Mater in Technol*. 2011. Vol. 45, Issue 5. P. 485–489.

11. Maślak M., Skiba R. Fire Resistance Increase of Structural Steel through the Modification of its Chemical Composition // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 108. P. 277–284. doi: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.148>

12. Polishko S. Effect of modification on the formation of nonmetallic inclusions in KP-T wheel steel // *Техническая механика*. 2017. Вып. 4. С. 112–118.

13. Полишко С. А. Стабилизация химического состава при выплавке колесной стали класса «С» // *Вісник Дніпропетровського національного університету імені Олеся Гончара. Серія Ракетно-космічна техніка*. 2017. Вып. 1. С. 78–85.

14. ДСТУ ГОСТ 10791-2016. Колеса цельнокатаные. Стандартифо, 2016. 29 с.

15. Войнов А. Р., Ри Э. Х. *Технология комплексной обработки сталей на агрегате «ковш-печь» (ladle-furnace): учебное пособие*. Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет (ТОГУ), 2018. 64 с.