

Выводы. Рассмотрены алгоритмы автоматического контроля переменных, характеризующих текущее состояние электрических ракетных двигательных установок. Предложены алгоритмы, обеспечивающие обнаружение скачкообразного изменения информативных признаков подсистем ЭРДУ, а также изменения информативных признаков в виде трендов. Предложенные алгоритмы автоматического контроля могут быть использованы при разработке различных типов электрических ракетных двигательных установок.

Библиографические ссылки

1. **Архипов А. С.** Стационарные плазменные двигатели Морозова / А. С. Архипов, В. П. Ким, Е. К. Сидоренко. – М. : МАИ, 2012. – 292 с.
2. **Бокс Дж.** Анализ временных рядов, прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Дженкинс. – М. : Мир, 1974.
3. **Бугрова А. И.** Плазменные ускорители и ионные инжекторы / А. И. Бугрова, В. П. Ким ; под общ. ред. Н. П. Козлова, А. И. Морозова. – М. : Наука, 1984. – 272 с.
4. Обнаружение изменения свойств сигналов и динамических систем / под ред. М. Бассавиль, А. Банвениста. – М. : Мир, 1989.
5. Технические средства диагностирования : справочник / В. В. Ключев и др. ; под общ. ред. В. В. Ключева. – М. : Машиностроение, 1989.
6. **Petrenko O. N.** Results of Research of Steady Work Modes of Stationary Plasma Thrusters”, Processing of the 47th International Astronautical Congress, IAF-96-S.3.03, Beijing, China, 7–11 October, 1996.
7. **Petrenko O. N.** “Problem of Automatic Control and Parameters Monitor System Designing for the Electrical Propulsion Engine Modules”, Processing of the Fourth Ukraine-Russia-China Symposium on Space Science and Technology, Vol. 1, P. 349–351, September 12–17, 1996, Kiev, Ukraine.
8. **Petrenko O. N.** “The Problem of Control and Monitor Units Development for the Electrical Propulsion Modules” / Petrenko O. N., Prisniakov V. F. // Processing of the First IAA Symposium on Realistic Near-term Advanced Scientific Space Missions, June 25–27, 1996, Torino, Italy.

Надійшла до редколегії 06.10.2017

УДК 669.45 + 669.046.558

С. А. Полишко

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

СТАБИЛИЗАЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРИ ВЫПЛАВКЕ КОЛЕСНОЙ СТАЛИ КЛАССА «С»

Рассмотрены основные причины появления брака колесных сталей класса «С». Исследована структура и неметаллические включения в данной стали, определен разброс химического состава и выявлены причины возникновения ликватов. Указаны пути снижения концентрации вредных примесей и повышения качества готовой продукции.

Ключевые слова: стабилизация, колесная сталь класса «С», структура, неметаллические включения.

Розглянуто основні причини появи браку колісних сталей класу «С». Досліджено структуру і неметалеві включення в даній сталі, визначено розкид хімічного складу та виявлено причини виникнення лікватів. Вказано шляхи зниження концентрації шкідливих домішок і підвищення якості готової продукції.

Ключові слова: стабілізація, колісна сталь класу «С», структура, неметалеві включення.

This article deal with were considered main reasons for the appearance of a marriage of wheel steels class "C". The structure and nonmetallic inclusions in this steel are investigated, the distribution of the chemical composition is determined, and the causes of occurrence of liquates are revealed. The ways of reducing the concentration of harmful impurities and improving the quality of finished products are indicated.

Keywords: stabilization, wheel steel of class «C», structure, non-metallic inclusions.

Одной из сложнорешаемых и важных задач металлургической отрасли является получение стабильного химического состава и оптимального уровня механических характеристик сталей различного назначения. Однако из-за попадания из неконтролируемых ломов, лигатур, шихты в расплав различных вредных примесей, таких как сера и фосфор, значительно ухудшается качество готовой продукции.

Так же, как показывает практика, из-за больших объемов расплава в ковше, а также из-за применения неконтролируемых по содержанию химических элементов ломов с помощью применения только лишь традиционных технологий выплавки стали добиться получения повышения качества металлургической продукции невозможно.

Поэтому в условиях ОАО ИНТЕРПАЙП НТЗ была проведена выплавка класса «С» в мартеновских 100-тонных печах. Эта сталь обладает структурой, свойствами и составом, удовлетворяющими требованиям ГОСТ 10791-2011. Это подтверждено нашими экспериментальными исследованиями [1–3]. Были исследованы образцы готовых колес серийного производства. Анализ 137 промышленных плавов стали класса «С» показал следующее.

Химический состав исследуемого металла соответствовал требованиям технической документации и приведен в табл. 1. Его отличительные особенности были следующими.

Таблица 1

**Химический состав стали класса «С» в промышленных плавках
(средние значения)**

Источник данных	Массовая доля элементов, %												
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Mo	V	Ti	Nb
ГОСТ 10791-2011	0,70 - 0,74	0,70-0,82	0,25 - 0,37	≤ 0,018	0,005 - 0,018	0,10 - 0,20	≤ 0,25	≤ 0,25	0,013 - 0,030	≤ 0,10	≤ 0,04	≤ 0,03	≤ 0,05
Пром. плавки	0,72	0,76	0,34	0,01	0,01	0,15	0,05	0,06	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01

В промышленных плавках полностью отсутствуют два важнейших элемента, Mo и V, без которых трудно получить стабильные и высокие характеристики механических свойств, особенно повышенную трещиностойкость.

Постоянная цифра содержания Nb (< 0,01 %) не вносит ясности: есть ли ниобий в этой плавке или его нет. В то же время Nb необходим в малых, но оптимальных количествах, чтобы стабилизировать карбиды (легированный

цементит) в объеме зерен, включая границы зерен. Как показано ниже, все границы зерен в стали класса «С» заняты ферритными окаймлениями, присутствие которых должно быть вообще исключено. Присутствие Nb, даже в небольших количествах, как предусмотрено ГОСТом, исключало бы этот серьезный дефект структуры.

Содержание фосфора и серы для такой стали как сталь класса «С», с высокой прочностью, малой ударной вязкостью и пластичностью, в промышленных плавках слишком высокое. Из всех плавов ~ 20 % имеют повышенное содержание серы, близкое к верхнему пределу, и 65,7 % – повышенное содержание фосфора, что создает высокую вероятность разрушения при циклических нагрузках.

На рис. 1 приведены результаты исследования суммы легирующих элементов ($\Sigma ЛЭ$) в реальных промышленных плавках. Количественно $\Sigma ЛЭ$ отличаются не столь существенно (на ~ 20 %), но качественно различия значительные. Сталь недолегирована Mo, Nb, V, что снижает все качественные и количественные показатели стали класса «С» по механическим и эксплуатационным свойствам.



Рис. 1. Сумма легирующих элементов в промышленных плавках

Исследование промышленных образцов стали класса «С» показало, что во всех плавках обнаружено заметное количество избыточного феррита с наиболее неблагоприятным расположением его по границам колоний перлита. Причем не только в образцах разных плавов, но и в одних и тех же плавках обнаружены совершенно разные структуры при одном и том же увеличении (рис. 2 а, б).

Выявлены грубые выделения феррита (до ~ 30 %), которых в структуре стали класса «С» вообще не должно быть, а также неметаллические включения в виде сульфидов (рис. 2 в, г). Причины – недолегированность карбидообразующими элементами (V, Nb, Mo, Cr, Ti) и несоответствующие составу режимы термической обработки.

Были подсчитаны плавки из стали класса «С», которые классифицированы как бракованные по данным ультразвукового контроля и по всем другим признакам. По этим результатам построены гауссовские кривые распределения количества отбракованных колес в промышленных плавках (рис. 3, 4).

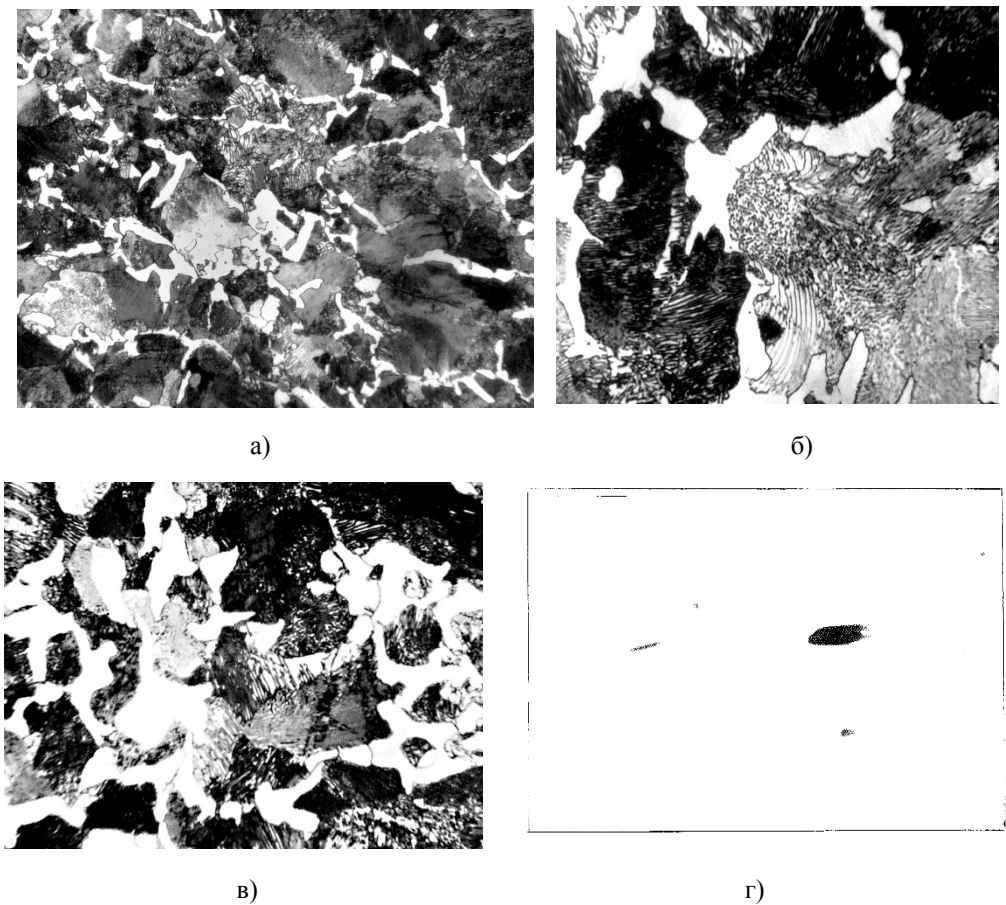


Рис. 2. Структура колесной стали класса «С»:

а) выделения избыточного феррита по границам перлитных колоний, x500; б) грубые выделения избыточного феррита в стали класса «С», где его вообще не должно быть, x1250; в) значительное количество избыточного феррита, где его не должно быть в стали класса «С», x1250, г) неметаллические включения в стали класса «С» (сульфиды, оксиды, сложные комплексные соединения), x500

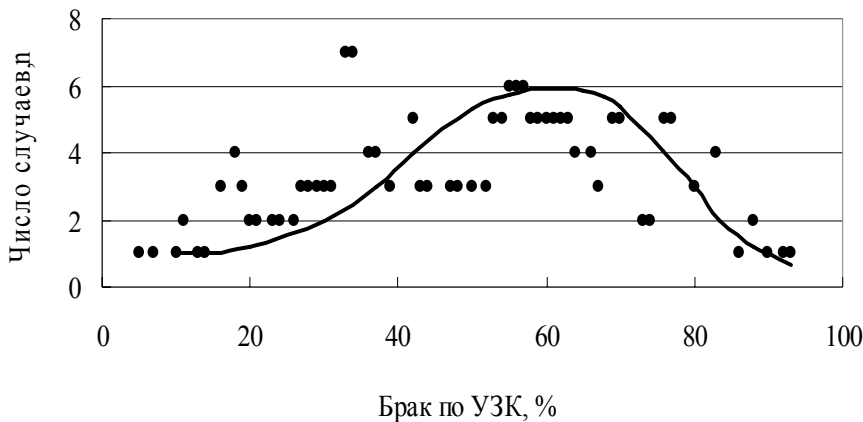


Рис. 3. Гауссовская кривая распределения числа случаев брака по УЗК в промышленных плавках стали класса «С»

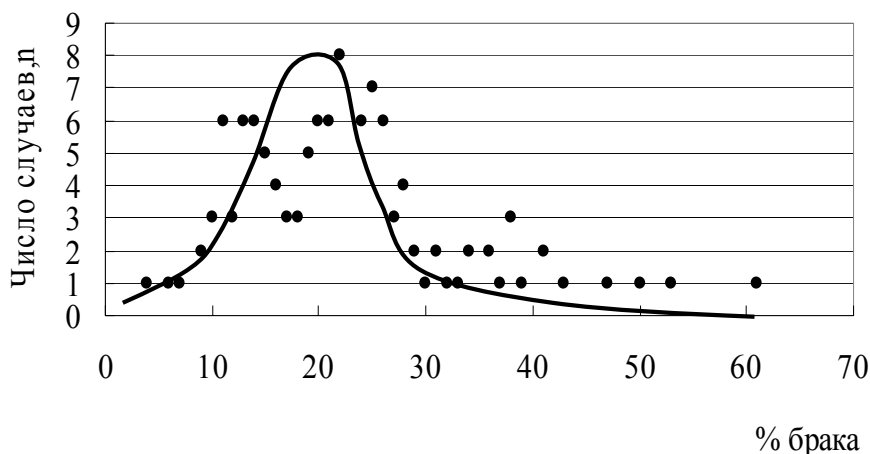


Рис. 4. Гауссовская кривая распределения % брака в плавках стали класса «С»

Из анализа представленных данных следует, что общее количество брака по колесам из стали класса «С» (137 плавков) составляет 22 %, по УЗК – 49 %, по твердости – 42 %, по магнито - порошковой дефектоскопии – 16 %.

Ранее установлена общая сумма легирующих элементов, которая отличается в промышленных плавках лишь на 20 % от $\sum \text{ЛЭ}$. Такая разница вряд ли могла быть причиной брака колес до 22–49 %. Поскольку не исключали, что причиной мог быть разброс значений содержания каждого из элементов, исследовали разницу между \max и \min концентрациями всех компонентов стали «С» в 137 плавках по отношению к минимальному значению (рис. 5).

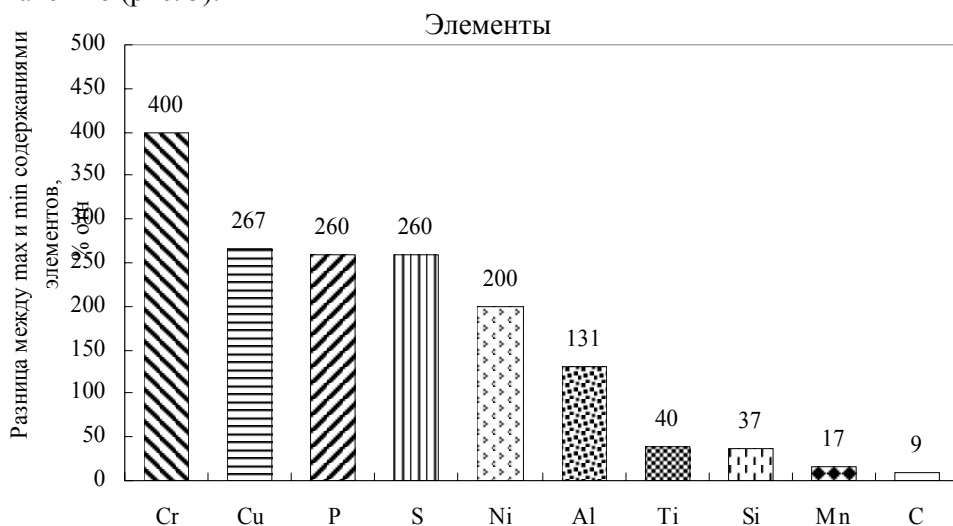
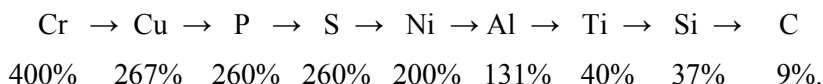


Рис. 5. Гистограмма разницы между \max и \min содержаниями элементов (% отн) в 137 плавках стали класса «С»

Большая разница межплавочного состава свидетельствует о нестабильной концентрации элементов в стали класса «С». Убывающий ряд последовательности нестабильности концентраций в 137 плавках имеет вид:



Для Ti, Si, C разница содержаний находилась в допустимых пределах, поэтому для дальнейшего анализа по причинам нестабильности рассмотрены остальные элементы Cr, Cu, P, S, Ni, Al. Исследовали коэффициенты вариации (V), учитывающие степень стабильности каждого элемента по 137 плавкам. Чем выше коэффициент вариации V, тем больше нестабильность (рис. 6).

Как следует из анализа рис. 5, наиболее нестабильной оказалась сумма легирующих элементов. Это означает, что содержания каждого из элементов во всех плавках наиболее существенно отличались друг от друга.

Высокие коэффициенты вариации V по P и S связаны с тем, что по ГОСТ 10791-2011 допускаются очень широкие пределы их содержаний, а именно: $P \leq 0,018 \%$, а $S = 0,005 - 0,018 \%$. Поскольку фосфор растворяется только в феррите, а избыточного феррита не должно быть в структуре стали класса «С», как доказано нами выше, то он мог растворяться только в феррите перлита и это не представляло бы опасности. Однако реально во всех плавках стали класса «С», как показано металлографическими исследованиями (рис. 2), имеется значительное количество избыточного феррита. Поскольку феррит при охлаждении стали формируется раньше перлита, фосфор будет находиться преимущественно в феррите, упрочняя и охрупчивая его. Поэтому в дальнейшем предприятиям, которые производят стальную продукцию, желательно уменьшить верхний предел содержания фосфора.

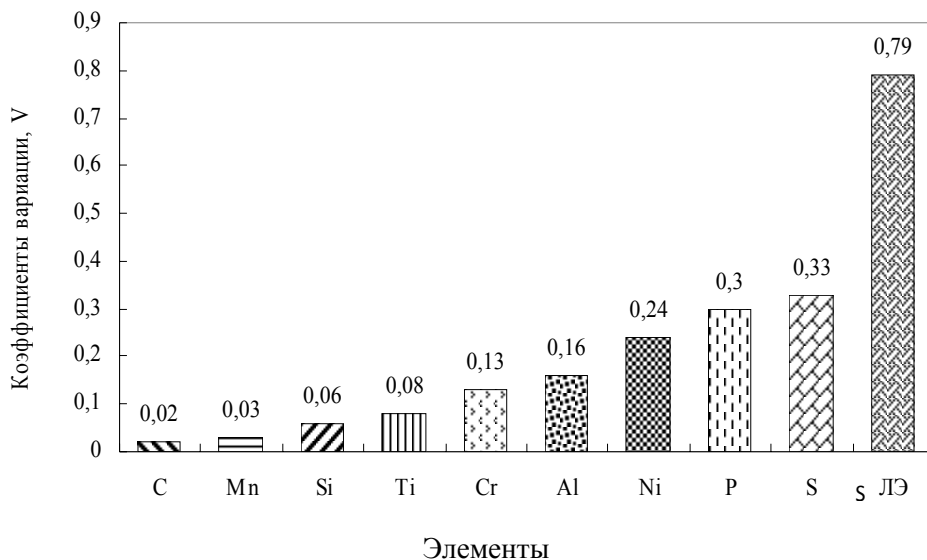


Рис. 6. Изменение коэффициента вариации для 137 плавков стали класса «С»

Сера очень опасна для высокопрочных сталей и, хотя общее среднее содержание серы невелико, но, как показали наши расчеты, $\sim 5 \%$ плавков стали класса «С» содержат высокую концентрацию серы ($0,014 - 0,018 \%$). Именно сульфиды являются наиболее опасными местами с позиции трещинообразования.

До 26 % плавков имеют пониженное содержание Cr, 100 % плавков не содержат Mo и V, $\sim 50 \%$ плавков не имеют в своем составе Nb. Это те элементы

(карбидообразующие), которые могут задержать выделение избыточного феррита и обеспечить требуемую трещиностойкость.

42 % брака стали класса «С» по твердости связано с указанными недостатками – большим разбросом химического состава по сере, фосфору, хрому; отсутствием упрочняющих микролегирующих элементов вообще (Mo, V) или в большем числе плавок (Nb); наличием сульфидов, оксидов, силикатов и ликватов; несовершенством структуры.

Сталь класса «С» имеет очень высокий брак колес по твердости (42 %), по УЗК (49 %), по магнито – порошковой дефектоскопии (16 %).

Таким образом, в процессе анализа результатов выплавки колесной стали класса «С» установлено, что причинами высокого брака колес из указанной марки стали являются следующие.

1. Большой межплавочный разброс химического состава: коэффициент вариации, показывающий нестабильность системы (стали класса «С») по $\Sigma \text{ЛЭ}$ для 137 плавок составляет 0,79, т.е. 79 %.

2. Очень большая разница между max и min содержаниями элементов по Cr, Cu, P, S, Al, соответственно (% отн): 400, 267, 260, 260, 131.

3. Отсутствие важнейших карбидообразующих элементов (V, Nb, Mo, Cr, Ti) или содержание их в стали класса «С» в неоптимальных количествах.

4. Присутствие сульфидов, оксидов, сложных комплексных соединений и, главное, ликватов в структуре металла. Они являются источниками разрушения колес в условиях ударных и знакопеременных нагрузок.

Устранение указанных недостатков возможно путем соблюдения технологической дисциплины по всем переделам производства колес; обязательным легированием оптимальными количествами Nb, V, Mo, Cr; снижением верхнего уровня по S и P; необходимостью определения состава ликватов, связанных с неполным растворением лигатур; модифицированием стали; более полным исследованием механических свойств на экспериментальных плавках для выявления причин брака по конкретным плавкам.

Библиографические ссылки

1. **Шаповалова О. М.** Стабилизация химического состава и механических свойств в сталях 1кп и R7 под влиянием модифицирования / О. М. Шаповалова, А. Е. Камышный, А. В. Шаповалов и др. // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. научн. трудов. – ПГАСА. – Вып. 48, ч. 3. – 2009. – С. 232.
2. Теоретичні основи керованого структуроутворення сплавів для підвищення їх властивостей шляхом обробки розплавів спеціальними модифікаторами з енергозбереженням : звіт з НДР (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.
3. **Полішко С. А.** Комплексное влияние вредных примесей (S, P, As) и основных легирующих элементов на механические свойства стали Ст1кп / С. А. Полишко. // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки : зб. наук. праць. – Днепропетровск. – 2015. – № 18. – С. 78–83.

Надійшла до редколегії 12.04.2016