

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ.
ЗАПОРОЖСКИЙ ОРДЕНА "ЗНАК ПОЧЕТА" МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ
ИНСТИТУТ ИМ. В.Я.ЧУБАРЯ

На правах рукописи

ИВАХНЕНКО Евгений Иванович

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ КОРРОЗИОННО-ИЗЪ СОСТОЙКИХ
СПЛАВОВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ

Специальность 05.02.01 "Материаловедение в
машиностроении" (промышленность).

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Запорожье - 1994

Работа выполнена в Запорожском ордена "Знак Почета" машиностроительном институте им. В.Я.Ч.Зари

Научные руководители:
академик АИИ Украины, доктор технических наук,
профессор Лунев В.В.
кандидат технических наук, доцент Федьков В.А.

Официальные оппоненты:
академик АИИ Украины, доктор технических наук,
профессор Коваль А.П.
кандидат технических наук, доцент Малышев Г.П.

Ведущая организация: Криворожский центральный рудо-ремонтный завод.

Защита состоится "___" _____ 199 г. в _____ часов
на заседании специализированного учёного совета К 068.038.01
в Запорожском ордена "Знак Почета" машиностроительном инсти-
туте им. В.Я. Чубаря по адресу: 330063, ГСП-39, Запорожье,
ул. Жуковского 64.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "___" _____ 199 г.

Учёный секретарь специализированного
учёного совета, доктор технических наук,
профессор

И.П. Волчок

Волчок И.П.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00801576 (R)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Постоянная интенсификация процессов добычи и переработки руд полезных ископаемых требует существенного увеличения надежности и долговечности горно-обогатительного оборудования, и прежде всего печей спекания, выполняющих значительный объем работ по термической обработке сырья.

Проведенным анализом было установлено, что работоспособность печей спекания глинозема, в основном определяется стойкостью литых деталей (пороговые плиты, брони, футеровки и др.), эксплуатирующихся в тяжелых условиях коррозионно-абразивного износа при высоких (900-1100°C) температурах. Простой печей спекания по вине износа и поломок перечисленных деталей составляет около 70 % от их общего количества.

Статистической обработкой данных эксплуатации оборудования показано, что около 93 % пороговых плит, брони и футеровок выходили из строя по причине коррозионно-абразивного износа, а остальные - в результате поломок. В настоящее время на предприятиях металлургии литые детали печей спекания изготавливаются из аустенитных и аустенито-ферритных сталей марок 35Х18Н24С2Л, 40Х24Н12СЛ, 35Х23Н7СЛ.

Анализ механизма разрушения серийных литых сталей в условиях высоких температур показал, что основными источниками разрушения являются пустоты и трещины, формирующиеся в результате образования легкоплавких соединений на границах и приграничных областях зерна аустенитной структуры в процессе длительной эксплуатации.

В связи с вышеизложенным, настоящая работа посвящена разработке и внедрению легионированных сплавов со стабильно-устойчивыми структурами, обладающих высоким комплексом физико-

химических, механических и специальных свойств при нормальных и высоких температурах.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ. Цель настоящего исследования заключалась в изучении влияния характера структуры на процессы разрушения и износостойкость литых деталей при высоких температурах, а также разработке и внедрению составов сталей, их технологии производства, обеспечивающих надежную работу печей спекания глинозема.

В работе решались следующие задачи:

- анализ стойкости и причин выхода из строя литых деталей печей спекания;
- изучение механизма разрушения серийных литых аустенитных и аустенито-ферритных сталей при высоких температурах эксплуатации;
- исследование влияния состава, рациональных вариантов легирования и модифицирования на структуру, механические и специальные свойства сталей системы $Fe-C-Cr-Si-Ni$;
- изучение влияния структуры на процессы износа опытных литых деталей печей спекания;
- промышленное опробование и внедрение результатов исследования в производство.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. В диссертации решены следующие основные задачи:

- предложен механизм разрушения аустенитных и аустенито-ферритных жаростойких хромоникелевых сталей при температурах 900-1100°C. Показано, что при высоких температурах эксплуатации аустенитная структура металла в сталях марок 35X18H24C2Л, 40X24H12СЛ, 35X23"7СЛ способствует образованию легкоплавких фаз, трещин и преждевременному выходу из строя отливок;

- получены функциональные зависимости, описывающие влияние химического состава на структуру, физико-механические и специальные свойства литых жаростойких сплавов системы $Fe-C-Cr-Si-Mo$;
- установлены оптимальные варианты легирования и модифицирования, обеспечивающие получение стабильно-устойчивых структур и высокое сопротивление износу при высоких температурах, на основании которых разработаны экономнолегированные ферритные сплавы марок 100Х27Н3С2Л, 100Х27С2ТЧЛ, 100Х27Н3С2ТЧЛ.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ. Использование результатов исследования позволили разработать жароизносостойкие ферритные сплавы типа 100Х27Н3С2Л, 100Х27С2ТЧЛ, 100Х27Н3С2ТЧЛ, а также внедрить их технологии в производство. Промышленное внедрение материалов исследования на глиноземных предприятиях алюминиевой промышленности показало существенное повышение надежности и долговечности ответственных литых деталей печей спекания.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Отдельные разделы работы докладывались на семинарах "Повышение технико-экономических показателей производства и качества продукции литейных цехов и предприятий цветной металлургии", Запорожье, 1987 и 1990 г.г.; Республиканских научно-технических конференциях "Повышение технического уровня и совершенствование технологических процессов производства отливок", Днепропетровск, 1987 и 1990 г.г.; "Новые конструкционные сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий", Запорожье, 1989 и 1992 г.г.; "Неметаллические включения и газы в литейных сплавах", Запорожье, 1988 и 1991 г.г.; "Пути повышения качества и экономичности литейных процессов", Одесса, 1990 и 1993 г.г.

ПУБЛИКАЦИИ. По материалам диссертации опубликовано II ра-

бот, получено 2 авторских свидетельства на изобретение.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Она содержит 176 страниц машинописного текста, в том числе: рисунков - 43, таблиц - 20, приложений - 4. Библиографический список содержит 173 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВО ВВЕДЕНИИ излагаются актуальность темы, цель и задачи исследования, научная новизна и практическое значение работы.

ПЕРВАЯ ГЛАВА носит обзорный характер и рассматривает вопросы повышения физико-механических, специальных и эксплуатационных свойств жаростойких сталей.

Рассмотренные труды отечественных и зарубежных исследователей посвящены вопросу износостойкости и коррозионного разрушения сталей. В работах освещен широкий круг современных представлений о теориях высокотемпературного разрушения и абразивного изнашивания материалов, обобщен теоретический и практический опыт борьбы с высокотемпературным износом. Показано неоднозначное влияние структурного состояния сталей, где важным фактором повышения эксплуатационной стойкости отливок является правильный подбор химического состава, рациональных вариантов легирования и модифицирования.

На основании анализа литературных данных обоснован выбор направления дальнейших исследований, сформулированы цели и задачи работы.

ВТОРАЯ ГЛАВА посвящена описанию специальных, стандартных методов и средств исследования.

В качестве объекта исследований были выбраны литые стали

и сплавы, традиционно используемые в промышленности для условий абразивного изнашивания и воздействия высоких температур ($900-1100^{\circ}\text{C}$), а также металл опытных плавов.

Плавки серийного и опытного металла проводили в электро-дуговых (емкостью 0,5-12,0 т) и индукционных (емкостью 0,01-0,4 т) печах с основной и кислой футеровками. В качестве исходных материалов применяли среднеуглеродистый лом и стандартные ферросплавы. Для получения концентрационных зависимостей, при проведении опытных плавов, применяли порционный метод отбора металла из печи, что позволило исключить влияние посторонних факторов и получить более достоверные результаты.

Контроль химического состава, плотности, макро- и микро-структуры производили стандартными химическим, петрографическим и спектральным методами. Микрорентгоспектральный анализ фаз и включений проводили на приборах MS-46 и "Камебак" фирмы "Камека". Газосодержание исследуемых сплавов анализировали с применением оборудования ЦНИИМ ЛВП-2 и фирмы "Лекс".

Механические свойства и жаростойкость изучали на образцах, изготовленных из литых заготовок по ГОСТ 977-88, или непосредственно из металла деталей по стандартным методикам ГОСТ 6130-71.

Высокотемпературную абразивную износостойкость определяли на установке ускоренных испытаний (ЗМИ-1 ТПП) с использованием сырья промышленной переработки, разработанной в Запорожском машиностроительном институте. Относительную износостойкость определяли по формуле:

$$E = \frac{P_{эт}}{P_{обр}} \quad (1)$$

где, $P_{эт}$ и $P_{обр}$ - соответственно потеря веса эталонного и исследуемого образцов.

Математическую обработку экспериментальных данных осуще -

связали с использованием регрессионного и корреляционного анализов с привлечением машинного комплекса РС IG40 "JBM" АНСТРАД и ЕС-1046.

Для анализа полученных экспериментальных данных и поиска оптимума свойств изучаемых металлов, использовали обобщенную функцию желательности:

$$D = \sqrt[q]{d_1 \cdot d_2 \cdot d_3 \dots d_q} \quad (2)$$

где, q - число изучаемых параметров оптимизации.

Экспериментальные данные $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6$ выражали через функции $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6$ с помощью уравнений:

$$d_i = e^{-(11Y_i')^n} \quad (3)$$

$$d_i = e^{-(e^{Y_i'})} \quad (4)$$

где, Y_i' - расчетная величина связанная с Y_i .

Промышленные испытания литых деталей печей спекания проводились по специальной программе - методике, что позволило получить объективную оценку высокотемпературной износостойкости и работоспособности исследуемых сплавов.

ТРЕТЬЯ ГЛАВА посвящена анализу стойкости и причинам выхода из строя литых деталей печей спекания глинозема (пороговые плиты, брони, футеровки и др.), изготовленных из сталей марок 35X18H24C2Л, 40X24H120Л, 35X23H7СЛ с аустенитной и аустенит-ферритной структурами. При работе в сложных условиях высокотемпературного коррозионно-абразивного изнашивания детали имели низкую стойкость (от 2 до 6 месяцев), и потерю массы $> 90\%$.

Установлено, что основными причинами преждевременного выхода из строя являлись неудовлетворительная макро- и микро-структура (крупнозернистая, неоднородная), низкий уровень износостойкости и жаростойкости, обусловленный наличием комплексов легкоплавких соединений нестехиометрического состава, подтвержденных с помощью петрографического и рентгено-спектрального анализов.

Представлен механизм разрушения серийных аустенитных и аустенито-ферритных сплавов при температурах эксплуатации 500-1100°C. Показано, что аустенитная структура способствовала образованию легкоплавких фаз, дефектов газowego происхождения по всему объему металла, приводящих в конечном итоге к появлению трещин и преждевременному разрушению деталей. При этом замечено, что стали марок 35X23H7CЛ и 40X24H12CЛ с феррито-аустенитной структурой (см. табл. I) имели меньшие потери в весе по сравнению с аустенитной маркой 35X18H24CЛ.

Таблица I

Коррозионно-абразивный износ литых сталей

Износ сталей, г/м ² ч		
35X23H7CЛ	40X24H12CЛ	35X18H24CЛ
0,91	1,09	1,53

Анализ результатов металлографических исследований, а

также значений механических и эксплуатационных свойств сталей показал, что для повышения надежности и долговечности литых деталей печей спекания необходимо применять сплавы со стабильно-устойчивой высоколегированной ферритной структурой.

Установлены предельные уровни показателей свойств сплавов, обеспечивающие их удовлетворительную высокотемпературную износостойкость, а именно: жаростойкость (глубинный показатель коррозии) $h_{gr} \leq 7,0 \cdot 10^{-6}$ м; относительную износостойкость $\varepsilon \geq 1,0$; предел прочности на растяжение $\sigma_b \geq 300$ МПа; предел прочности на растяжение при $t = 1000^\circ\text{C}$ $\sigma'_{b_{1000}} \geq 100$ МПа; твердость $2000 \leq \text{HV} \leq 3000$ МПа и твердость после выдержки ($t = 1000^\circ\text{C}$; в течении 100ч) $1800 \leq \text{HV}_{100} \leq 4300$ МПа. Для сравнения в качестве эталона принята серийная сталь марки 40X24H12C1 по ГОСТ 977-88, которая совместно с маргами 35X18H24C2L и 35X23H7C1 не удовлетворяют установленным уровням свойств.

ЧЕТВЕРТАЯ ГЛАВА посвящена разработке и изучению новой износостойкой стали.

С помощью метода математического планирования эксперимента проведена оптимизация состава для системы элементов $Fe - C - Cr - Si$, обеспечивающая высокий уровень рассматриваемых свойств (износостойкость, жаростойкость и др.).

Сделан полный факторный эксперимент по плану 2^3 , где изучали влияние углерода (массовая доля 0,2- 1,8%), хрома (20- 32%) и кремния (0,8- 2,5%).

Как показал металлографический анализ, структуры исследуемых сплавов изменялись от аустенитных, аустенито-ферритных до ферритных и феррито-карбидных в соответствии с химсоставом.

Проведенным регрессионным анализом получены линейные модели, описывающие функцию отклика в ограниченной области изу-

чаемых факторов для жаростойкости ($h_{ж} - Y_1$), отчислите: ной износостойкости ($\epsilon - Y_2$), предела прочности на разрыв ($G'_6 - Y_3$, $G'_{6_{водC}} - Y_4$) и твердости ($HB - Y_5$, $HB_{\infty} - Y_6$) после испытаний при нормальных ($t = 20^{\circ}C$) и высоких ($t = 1000^{\circ}C$) температурах:

$$h_{ж} = 6,37 + 27,76 C - 0,44 Si - 0,04 Cr - 1,49 C \cdot Si - 0,93 C \cdot Cr \pm 0,096 \cdot 10^{-6} \quad (5)$$

$$\epsilon = -0,76 + 0,33 C + 0,06 Si + 0,06 Cr \pm 0,037 \quad (6)$$

$$G'_6 = -700,62 + 2974,84 C + 938,13 Si + 37,64 Cr - 877,38 C \cdot Si - 114,97 C \cdot Cr - 33,51 Si \cdot Cr + 37,63 C \cdot Si \cdot Cr \pm 11,36 \cdot \text{МПа} \quad (7)$$

$$G'_{6_{водC}} = -59,57 + 712,80 C + 181,72 Si + 5,72 Cr - 166,26 C \cdot Si - 28,65 C \cdot Cr - 8,29 Si \cdot Cr + 8,10 C \cdot Si \cdot Cr \pm 4,36 \cdot \text{МПа} \quad (8)$$

$$HB = 2272,13 - 3436,26 C + 2187,6 Si + 120,14 Cr - 2128,20 C \cdot Si - 106,74 C \cdot Cr + 88,10 C \cdot Si \cdot Cr \pm 20,80 \cdot \text{МПа} \quad (9)$$

$$HB_{\infty} = -2404 + 5542,6 C + 3144 Si + 240,07 Cr - 3144 C \cdot Si - 166,3 C \cdot Cr - 118,8 Si \cdot Cr + 110 C \cdot Si \cdot Cr \pm 25,13 \cdot \text{МПа} \quad (10)$$

Хром и кремний, являясь феррито-стабилизирующими элементами, в рекомендуемых пределах оказывали положительное влияние на весь комплекс изучаемых параметров. При этом действие углерода неоднозначно. Углерод, имея высокое сродство к хрому и образуя карбидные соединения, повышал значения прочности, твердости и износостойкости. Однако его высокие концентрации (более 1,3 %) снижали жаростойкость. Как показали металлографические и петрографические исследования это связано с

обедением твердого раствора хромом и формированием легкоплавких соединений нестехиометрического состава. Дальнейшее увеличение или снижение массовой доли этих элементов сверх оптимальной, отрицательно сказывалось на комплексе изучаемых свойств сплавов.

Используя модифицированный симплекс-метод для анализа математических моделей определены максимальные и минимальные присадки изучаемых элементов, обеспечивающие высокотемпературную износостойкость сплавов. Оптимальные показатели изучаемых элементов с учетом исследованных факторов, получены для сплавов с феррито-карбидной структурой типа 100X27C2Л и находятся в пределах: 0,7 - 1,3 % C, 1,1 - 2,5 % Si, 25,0 - 29,0 % Cr. Приведенный сплав, близкий по составу марке чугуна типа ЧХ28 по ГОСТ 7769-82, совершенствовался за счет применения рациональных методов легирования (никель) и модифицирования (алюминий, титан, РЗМ, ШЗМ).

Из литературных данных известно, что никель оказывает положительное влияние на комплекс изучаемых свойств ряда марок литых сталей. В работе исследовали влияние возрастающих присадок никеля (от 0 до 12 %) на свойства предложенного сплава 100X27C2Л. Дополнительное легирование никелем в пределах 2 - 6 % привело к существенному повышению твердости и прочности (рис. 1 и 2). Значения показателей пластичности (δ и ψ) при высоких температурах снижались во всем исследуемом интервале концентрации, что связано с упрочнением высоколегированного твердого раствора феррита и равномерным распределением в нем карбидной фазы.

Высокотемпературные испытания ($t=1000^{\circ}\text{C}$) исследуемых сплавов показали повышение значений твердости в изучаемых пределах (рис. 2), что объясняется формированием и распреде-

Влияние никеля на механические свойства сплава IOOX27C2II

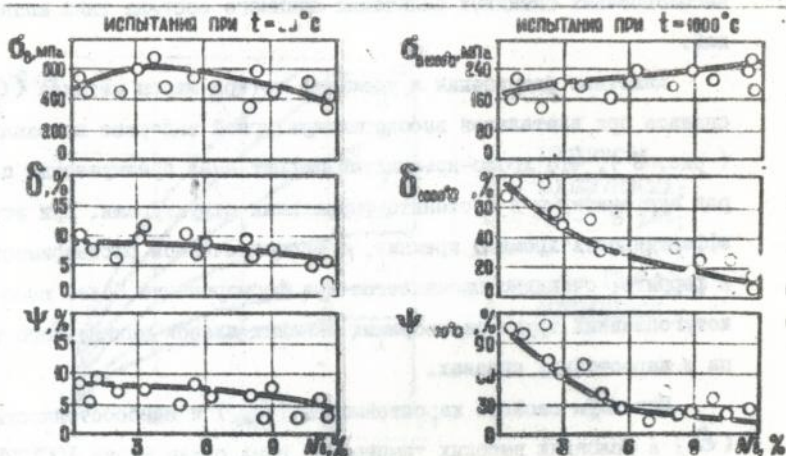


Рис. 1.

Зависимость твердости от содержания никеля и длительности выдержки сплава IOOX27C2II

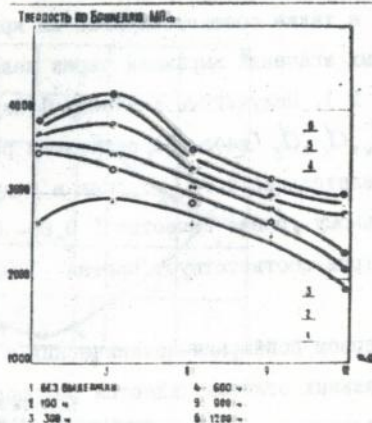


Рис. 2.

лением в структуре тугоплавких высокодисперсных карбидов и высокопрочных оксидных включений сложного состава типа шпинелей.

Кинетика разрушения и удельные потери массы металла (q) сплавов при длительной высокотемпературной выдержке показали (рис. 3), что хромо-кремнистый феррит имел преимущества перед аустенитными и аустенито-ферритными структурами. При этом эффективность хрома и кремния, с неограниченной растворимостью в феррите, очевидно проявляется при формировании более высокоплавких труднорастворимых оксидных пленок шпинельного типа в жаростойких сплавах.

Максимум свойств жаростойкости ($k_{жм}$) и износостойкости (ϵ) в условиях высоких температур имел сплав марки IOOX27H3C2Л при содержании никеля 2 - 4 % (рис. 4).

Анализ экспериментальных данных и поиск оптимума свойств сплавов проводили с использованием обобщенной функции желательности (D).

Изучаемые параметры $y_1(k_{жм})$, $y_2(\epsilon)$, $y_3(\sigma_0)$, $y_4(\sigma_{0_{исп}})$, $y_5(HB)$, $y_6(HB_{исп})$, а также соответствующие им критерии минимальных и максимальных значений выражали через желаемый уровень качества (табл. 2). Полученные значения функций желательности $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6$ (табл. 3) позволили рассчитать обобщенную функцию желательности (D), где в ряду рассмотренных сплавов, оптимальному уровню качества (0,80 - 0,60) по всему комплексу параметров соответствует состав IOOX27H3C2Л.

Большим резервом повышения механических и специальных характеристик стальных отливок является разработка рациональных вариантов модифицирования исследуемых сплавов.

Удельные потери массы металла исследуемых сплавов при длительной высокотемпературной выдержке ($t = 1000^{\circ}\text{C}$)

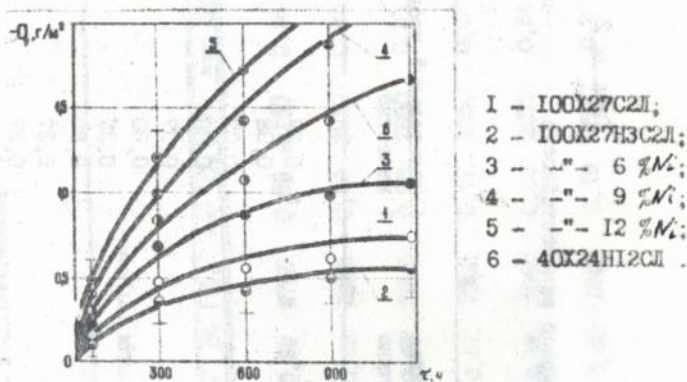


Рис. 3.

Влияние никеля на жаростойкость и относительную износостойкость (при $t = 1000^{\circ}\text{C}$) сплава IOOX27C2Л

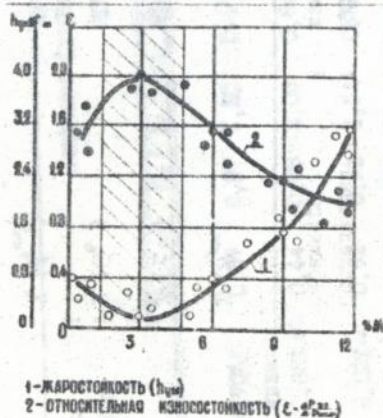


Рис. 4.

Табл. да 2

Предельные уровни свойств в высокотемпературной износостойкости
исслед, емых сплавов

Исследуемые параметры	! Единица ! измерения	! Заданная ! величина	! Желательный уровень ! качества
$y_1 (h_{2M})$	Ю м ⁻⁶	4,0	0,37
		0,1	0,98
$y_2 (\varepsilon)$	-	1,0	0,37
		3,0	0,80
$y_3 (\sigma_0)$	МПа	300	0,37
		900	0,80
$y_4 (\sigma_{0, макс})$	МПа	120	0,37
		240	0,80
$y_5 (HB)$	МПа	3700	0,37
		2000	0,37
$y_6 (HB_{100})$	МПа	4300	0,37
		1800	0,37

Таблица 3

Результаты исследований опытных сплавов с использованием
функции желательности

Марка сплава	Значения функций желательности для параметров												Обобщенная функция желательности D
	$y_1 = a_1$	$y_2 = a_2$	$y_3 = a_3$	$y_4 = a_4$	$y_5 = a_5$	$y_6 = a_6$	$y_7 = a_7$	$y_8 = a_8$	$y_9 = a_9$	$y_{10} = a_{10}$	$y_{11} = a_{11}$	$y_{12} = a_{12}$	
100Х27С2Л без никеля	0,87	0,97	1,20	0,47	438	0,38	108	0,29	2750	0,99	3160	0,96	0,60
"- 2,88%Ni	0,44	0,98	2,08	0,84	569	0,51	130	0,46	2840	0,99	3210	0,97	0,75
"- 6,02%Ni	0,92	0,95	1,54	0,61	659	0,53	204	0,60	2690	0,98	2850	0,95	0,74
"- 8,93%Ni	1,28	0,94	1,12	0,40	589	0,54	245	0,81	2360	0,71	2550	0,87	0,68
"- 12,13%Ni	4,1	0,36	0,92	0,35	451	0,41	262	0,85	1950	0,34	2070	0,54	0,45
40Х24Н12СЛ	1,27	0,94	1,00	0,37	520	0,48	133	0,40	1640	0,19	1560	0,20	0,36

С этой целью изучали раздельное и комплексное влияние модифицирующих добавок (Al , Ti , РЗМ и ЦЗМ) на свойства сплавов IOOX27C2Л и IOOX27H3C2Л (табл. 4). Показано, что все исследуемые варианты модифицирования оказали положительное влияние на прочность, жаростойкость и износостойкость при высоких температурах, твердость при этом практически не изменялась.

Алюминий, изучался как раскисляющая присадка, так как его содержание свыше 0,026 % оказывает негативное влияние на металл в связи с формированием в нем восстановительной среды, которая способствовала образованию легкоплавких оксидных соединений нестехиометрического состава (AlO , Al_2O) и приводила к необратимым разрушительным процессам. Массовая доля присадки алюминия для составов марок IOOX27C2Л и IOOX27H3C2Л должна находиться в пределах 0,015- 0,024 %.

Как видно из табл.4, наиболее эффективным является комплексное модифицирование оптимальной присадки алюминия, титана (0,10- 0,35 %) и ЦЗМ (0,06- 0,15 %). Положительное влияние элементов (см. вар.7, 14, табл. 4) связано с образованием и равномерным распределением образующихся карбонитридных комплексов в ферритной основе. Титан образует высокотвердые тугоплавкие карбидные, карбонитридные соединения, которые в металле выполняют роль центров кристаллизации и способствуют формированию мелкозернистой структуры повышенной износостойкости. Действие силицидов ЦЗМ (лигатура кремний-барий-стронций) как поверхностно-активных элементов, проявлялось в торможении процесса коагуляции карбидов в металле и равномерному их распределению. Присадки силицидов РЗМ (лигатура кремний-

РЗМ) от 0,06 до 0,15 % действовали менее эффективно (см.вар. 6, 12, табл.4), ввиду коагуляции карбидов, которые по грани-

Влияние модифицирования на свойства исследуемых сплавов

Марка сплава	№ п/п	Присадка модификатора, %	Специальные и механические свойства металла					
			$\rho_{\text{пл}}, 10^{-6} \text{ МПа}$	ϵ	$\sigma_s, \text{ МПа}$	$\sigma_{\text{тек}}, \text{ МПа}$	$HВ, \text{ МПа}$	$HВ_{\text{ср}}, \text{ МПа}$
100Х27С2Л	1	без присадки	0,90	1,26	430	102	2750	3100
	2	0,07% Al	0,87	1,27	438	108	2750	3160
	3	0,07% Al + 0,4% Ti	0,56	1,76	597	131	3050	3280
	4	0,07% Al + 0,1% P3M	0,82	1,36	502	117	2790	3010
	5	0,07% Al + 0,1% W3M	0,74	1,46	519	127	2850	3200
	6	0,07% Al + 0,4% Ti + 0,1% P3M	0,51	2,01	601	134	3060	3270
	7	0,07% Al + 0,4% Ti + 0,1% W3M	0,40	2,30	670	144	3200	3370
100Х27Н3С2Л	8	без присадки	0,42	1,89	560	127	2800	3200
	9	0,07% Al	0,44	2,08	569	130	2840	3210
	10	0,07% Al + 0,4% Ti	0,35	2,61	750	162	3210	3410
	11	0,07% Al + 0,1% P3M	0,45	2,11	605	134	2820	3280
	12	0,07% Al + 0,1% W3M	0,40	2,19	619	139	2990	3280
	13	0,07% Al + 0,4% Ti + 0,1% P3M	0,34	2,62	676	150	3290	3420
	14	0,07% Al + 0,4% Ti + 0,1% W3M	0,27	2,80	798	169	3375	3500

цам зерна образуют жесткий каркас, что способствует трещинообразованию и усилению процессов межкристаллитной коррозии.

Повышение содержания присадок силицидов ЦЗМ и РЗМ свыше 0,25 % приводило к загрязнению металла комплексными оксидными соединениями пленочного типа по границам зерен и резкому снижению свойств.

Таким образом, составы марок 100Х27С2ТЧ1, 100Х27Н3С2ТЧ1 модифицированные алюминием, титаном и ЦЗМ, имели на 50-80 % выше значения исследуемых свойств и рекомендованы к применению для деталей печей спекания шихты глинозема.

Исследование микроструктуры и изучение характера разрушения опытных марок сплавов проводили на металле до и после высокотемпературных испытаний с использованием петрографического и рентгеноспектрального анализов. Структура предлагаемых сплавов ферритокарбидная, в отличие от аустенитной и аустенито-ферритной в серийных сталях. Феррит в сплавах представляет собой высоколегированный α -твердый раствор (α_1). Второй структурной составляющей является карбидная эвтектика, состоящая из α -твердого раствора (α_2) отличного состава (C_1 - 22%) и выделений карбидной фазы.

Установлено, что эта структура металла после длительной высокотемпературной выдержки претерпевает изменения, где в результате диффузионных процессов происходит равномерное перераспределение элементов и фаз между твердым раствором феррита и карбидной составляющей, положительно влияющие на весь комплекс свойств.

Было показано, что в процессе эксплуатации происходит науглероживание металла (до 1,64 % С) и некоторое насыщение его азотом и кислородом (до 0,08 %). Это способствует образованию комплексных, весьма тугоплавких ($t_{пл} = 2000^\circ\text{C}$) и твердых (более 20 ГПа, НМ) соединений: карбонитридов типа $TiC \cdot TiN$, окси-

карбидов $TiO \cdot TiC$, титлата $Al_2O_3 \cdot TiO_2$, шпинели $FeO \cdot Cr_2O_3$ и других соединений более сложного состава.

Анализ металла опытных марок сплавов взаимодействующих со спеком глинозема выявил, что процесс разрушения в отличие от износа ранее изученных сталей носит длительный характер и происходит на глубине всего нескольких десятков микрон (30-50 мкм).

Таким образом, разработанные сплавы марок 100X27C2TЧ1 и 100X27H3C2TЧ1 с феррито-карбидной эвтектической микроструктурой, содержащей комплекс стойких химических соединений, обеспечили высокие показатели служебных характеристик металла.

ПЯТАЯ ГЛАВА посвящена промышленным испытаниям литых деталей из сплавов 100X27H3C2Л и 100X27C2TЧЛ, а также внедрению результатов исследования в производство.

Испытания литых деталей и внедрение результатов исследования проводили на печах спекания Павлодарского алюминиевого зав-да. Из сплавов 100X27H3C2Л и 100X27C2TЧЛ были изготовлены брони, безболтсовые полки, футеровки и другие детали, ранее производившиеся из серийных хромоникелевых сталей марок 35X23H7СЛ, 40X24H12СЛ, 35X18H24СЛ.

Результаты промышленных испытаний ответственных литых деталей печей спекания показали полное отсутствие поломок и увеличение срока их службы в 1,5-2,0 раза по сравнению с серийными из стали 40X24H12СЛ, при этом экономия дорогого и дефицитного никеля на одной тонне литья составила в среднем 100 кг.

Показано, что основными факторами, определяющими износостойкость в среде высокотемпературного спека глинозема, является стабильно-устойчивая структура легированного хромо-кремнистого феррита с равномерно распределенными в ней дисперсными вы-

сокоуглеплазменными неразстворимыми соединениями стехиометрического состава и оптимальные показатели пластичности, твердости и жаростойкости предлагаемых сплавов.

На основании результатов этого исследования и промышленного опробования разработаны технологические инструкции регламентирующие производство, монтаж и эксплуатацию деталей печей спекания глинозема.

Экономический эффект от внедрения материалов настоящей работы на Павлодарском алюминиевом заводе составил 128811 рублей (данные 1991 г.).

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. На основании литературных данных, анализа условий работы и причины выхода из строя ответственных деталей печей спекания глиноземной промышленности, установлены критерии их высокотемпературного изнашивания. Показано, что хромоникелевые стали аустенитного и аустенито-ферритного классов не удовлетворяют существующим требованиям эксплуатации деталей печей спекания глинозема.

2. С помощью методик, разработанных с участием автора в Запорожском машиностроительном институте, исследован микромеханизм разрушения литых серийных сплавов при высоких температурах (900-1100°C) в условиях абразивной среды глинозема. Установлены особенности разрушения сплавов. Показано, что аустенитные и аустенито-ферритные структуры способствуют формированию легкоплавких соединений нестехиометрического состава и как следствие образованию трещин и дефектов газового происхождения в отливках.

3. Исследовано влияние углерода, хрома, кремния и никеля

на механические свойства, жаростойкость и износостойкость литых сплавов. На основании полученных математических зависимостей и экспериментальных данных предложен феррито-карбидный сплав марки 100X27H3C2Л, обеспечивающий высокий ресурс работы деталей печей спекания и позволивший сэкономить дефицитные легирующие компоненты.

4. Разработаны рациональные варианты модифицирования (алюминий, титан, ЦЗМ, РЗМ), на основании которых предложены сплавы марок 100X27C2ТЧЛ, 100X27H3C2ТЧЛ, обеспечивающие повышение сопротивления металла изнашиванию при высоких температурах эксплуатации.

5. Новизна разработанных составов высокохромистых сплавов подтверждена авторскими свидетельствами № 1652372 от 01.02.91г. и № 1705399 от 15.09.91г.

6. Внедрение технологии получения сплавов феррито-карбидного класса в условиях Павлодарского алюминиевого завода, взамен аустенитных, аустенито-ферритных марок сталей, позволило повысить стойкость деталей в среднем 1,5-2,0 раза. Промышленные испытания ответственных деталей (безболтовые полки, футеровки, брони и др.) печей спекания глинозема показали полное отсутствие поломок оборудования. Экономический эффект от внедрения сплавов на заводе составил 128811 рублей (данные 1991 г.).

7. Внедрение результатов работы будет осуществлено на предприятиях Украины: Запорожском алюминиевом комбинате (ЗАЛК), Верхнеднепровском государственном горно-металлургическом комбинате (ВдГГМК) и ГОКах Кривбасса.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

1. Лукев В.В., Ивахненко Е.И., Фельмов В.А. Вопросы abra-

завно-коррозионной износостойкости хромоникелевых сплавов // Новые конструкционные материалы, методы их получения и обработки, повышения надежности и долговечности деталей машин и конструкций: -Об. научн. тр. - Киев, УМК ВО, 1991, - С.53-54.

2. Изучение абразивного износа литейных сплавов при высоких и низких температурах / Ивахненко Е.И., Фельков В.А., Лунев В.В. и др., Запорожский машиностроительный институт, Запорожье, 1991, - 9 с., Деп. в УкрЛИНТИ 12.03.91, №325-Ук-91.

3. Повышение стойкости литых деталей горно-металлургического оборудования / Лунев В.В., Ивахненко Е.И., Фельков В.А., Минакова В.И. // Литейное производство, 1992, № 10, - С.15-16.

4. А.С. № 1652372 СССР МКИ⁴ С22С. Литой износостойкий сплав / Е.И. Ивахненко, В.А. Фельков, В.В. Лунев и др. - Заявл. 2.01.89, № 4630857/С2; Опубл. Б.И., 1991, № 20.

5. Лабораторная установка для ускоренных испытаний износостойких сплавов на абразивный износ при высоких и низких температурах / Фельков В.А., Ивахненко Е.И., Лунев В.В. и др. // Заводская лаборатория, 1992, т.58, № 12, - С.55-56.

6. А.С. № 1705399 СССР МКИ⁴ С22С. Литой термостойкий сплав / В.А. Фельков, Е.И. Ивахненко, В.В. Лунев и др. - Заявл. 15.04.90, № 4813932/02; Опубл. Б.И., 1992, № 2.

7. Влияние легирования на высокотемпературную абразивную износостойкость железоуглеродистых сплавов / Лунев В.В., Ивахненко Е.И., Фельков В.А. // Неметаллические включения и газы в литейных сплавах: Тез. докл. научн.-техн. конф. - Запорожье, 1991, - С.104.

8. О причинах износа литых деталей изготавливаемых из сплава 4СХ24Н12СЛ // Пырожкова В.П., Чеботарь Л.К., Ивахненко Е.И. и др. // Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий: Тез. докл. Всес. научн.-техн. конф. - Запорожье, 1992, - С.191.

9. Влияние легирования на жаростойкость сплавов при абразивном изнашивании / Лунев В.В., Ивахненко Е.И., Фельков В.А. и др. // Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий: Тез. докл. Всес. научн.-техн. конф. - Запорожье, 1992, - С.63.

10. Влияние состава на абразивно-коррозионную стойкость литых сплавов / Фельков В.А., Ивахненко Е.И., Минакова В.И. и

др. // Пути повышения качества и экономичности литейных процессов: Тез. докл. научн.-техн. конф. - Одесса, 1993, - С.46-47.

II. О механизме износа литых хромоникелевых сталей /
Луцев В.В., Ивахненко Е.И., Пирожкова В.П. и др. // Пути повышения качества и экономичности литейных процессов: Тез. докл. научн.-техн. конф. - Одесса, 1993, - С.63.

Смф-

Подписано к печати 23.02 1994 г.

Формат бумаги 60x84 1/16; Объем 2 и.л.

Заказ № 68; Тираж 100 экз; Ротапринт.

Типография ЗММ, г. Запорожье.

л.Луковского 64.

100001

AB 29.467

AB 29.467