

МЕТАЛЛУРГИЯ

УДК 621.74

А.И. Куценко, И.Ф. Селянин, В.Б. Деев, С.Н. Старовацкая, А.А. Куценко

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ХРОМИСТОГО ЧУГУНА ПРИ ТОКОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА КРИСТАЛЛИЗУЮЩИЙСЯ РАСПЛАВ

Повышение эффективности и надежности работы колосников, применяемых в теплоэнергетике, во многом определяется достигнутым уровнем служебных характеристик литых изделий из жаропрочных сплавов¹.

Для деталей, работающих в данных условиях, применяют специальные высоколегированные стали, однако они обладают невысокими литейными свойствами и производство из них литых изделий вызывает существенные трудности. Получение колосников именно методом литья обусловлено тем, что готовые изделия имеют высокую твердость и могут обрабатываться только специальным дорогим инструментом, работающим в условиях повышенного нагрева режущей кромки, а при литье такая обработка не требуется или она минимальна. Помимо этого, для выплавки сталей со специальными свойствами необходимо применять дорогостоящие низкоуглеродистые ферросплавы. Менее дорогой высокоуглеродистый феррохром вносит в расплав излишний углерод, а в период плавки его невозможно удалить известными технологическими приемами.

Чугуны, легированные хромом, имеют высокие механические и литейные свойства, износостойкость и жаростойкость, являются эффективным конструкционным материалом с низкой

стоимостью. Несмотря на явные преимущества технологии производства колосников на основе легированных чугунов, их применение сдерживается высокой стоимостью легирующих компонентов.

В существующих технологиях производства колосников, как правило, применяют объемное легирование металла. Большинство колосников для топок конструктивно имеют две части: рабочая, которая подвергается воздействию высоких температур и газовой химически агрессивной среды; и затылочная, работающая при более низких температурах, т.к. всегда обдувается холодным дутьевым воздухом. Экономия дорогостоящих ферросплавов может быть достигнута за счет увеличения содержания легирующих элементов в рабочей части колосника или за счет образования на поверхности сплава плотного оксидного защитного слоя, прочно связанного с основным металлом и препятствующим его окислению [1].

Целью настоящего исследования являлась отработка технологии энергетического воздействия на кристаллизующийся расплав в литейной форме для получения более высокой концентрации хрома в рабочей части колосника и меньшей концентрации – во внутреннем объеме колосника.

На начальном этапе были проведены исследования отработавших эксплуатационный срок колосников, изготовленных из жаропрочного высокохромистого чугуна марки ЧХ16, Полученные результаты приведены ниже.

Химический состав компонентов в металле² рабочей и затылочной части колосников, за ис-

Таблица 1 – Результаты спектрального анализа

Номер пробы*	Массовая доля элементов, %								
	V	Ni	Cu	Mn	Cr	Ti	Mo	Si	W
1	0,034	1,377	0,067	0,472	17,221	0,006	0,052	0,350	0,008
2	0,035	1,381	0,067	0,474	18,994	0,006	0,053	0,353	0,008

* 1 – химический состав рабочей части колосника;

2 – химический состав затылочной части колосника.

ключением хрома, изменяется незначительно (табл. 1).

При визуальном анализе на поверхности колосников видны следы интенсивно протекавшей высокотемпературной газовой коррозии и, как следствие, окисление и растрескивание, что привело к необратимому увеличению объема изделий

¹ Работа выполнена в рамках реализации Минобрнаукой России проекта развития кооперации российских вузов и производственных предприятий по созданию высокотехнологичного производства. Шифр 2010-218-02-174.

² Химический состав исследуемого металла определяли спектральным методом на многоканальном спектрометре ДФС-71 путем сжигания анализируемых проб в потоке аргона



Рис. 1. Поверхностное окисление и растрескивание колосников в процессе эксплуатации

(рис. 1).

Микроструктуру чугуна изучали на поперечных образцах после травления металла в 4 % растворе азотной кислоты. Исследование проводилось с помощью инвертированного металлографического микроскопа OLIMPUS GX-51 при различных увеличениях.

Проведенный металлографический анализ проб показал наличие в литой структуре исследуемого чугуна (до эксплуатации) аустенитной матрицы и карбидной эвтектики $(Cr,Fe)7C3$, образующей разветвленный упрочняющий каркас.

За счет направленного затвердевания при кристаллизации местами наблюдаются волокна эвтектических карбидов, расположенных параллельно друг другу.

При нагревах до температур эксплуатации в агрессивной среде окисление развивается не только на поверхности, но и внутри изделий. В микроструктуре чугуна наблюдаются внутренние трещины, разрывы. Видно, что растрескивание произошло вследствие окисления каркаса первичных эвтектических карбидов (рис. 2).

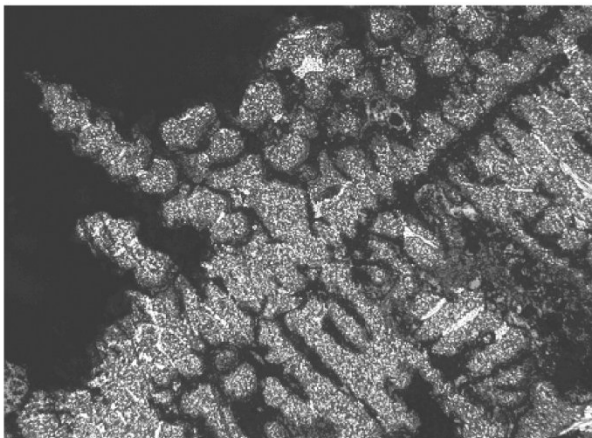


Рис. 2. Микрорельеф поверхности разрушения хромистого чугуна в условиях эксплуатации ($\times 500$)

Хорошо наблюдаются следы окисления по границам аустенитных дендритов. В процессе эксплуатации колосника в агрессивной среде при высоких температурах в микроструктуре происходят изменения, заключающиеся в интенсивном окислении междендритных карбидов, приводящем к появлению внутренних разрывов, трещин; обеднению матрицы легирующими элементами и образованию вторичных карбидов типа $Me_{23}C_6$; дальнейшем укрупнении вторичных карбидов, их коагуляции и слияния с образованием сегрегаций.

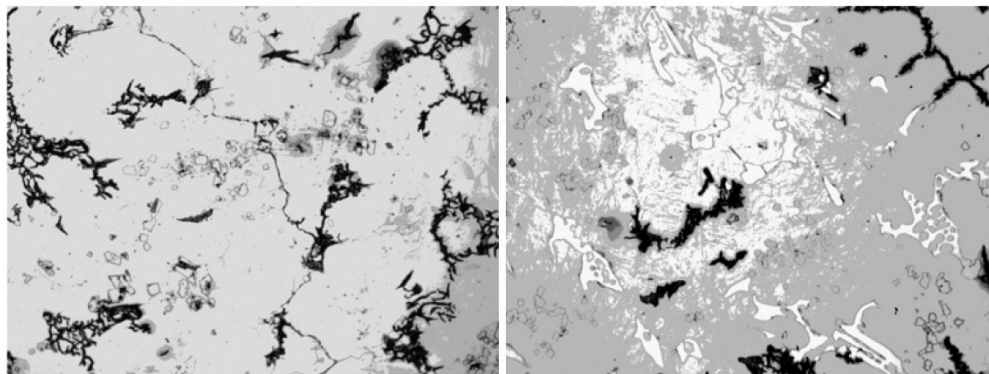
Результаты измерения твердости колосников в исходном литом состоянии и после эксплуатации приведены в табл. 2. Видно, что твердость уменьшается и в среднем это снижение составляет около 15 единиц или 36%.

Таблица 2. Результаты измерения твердости

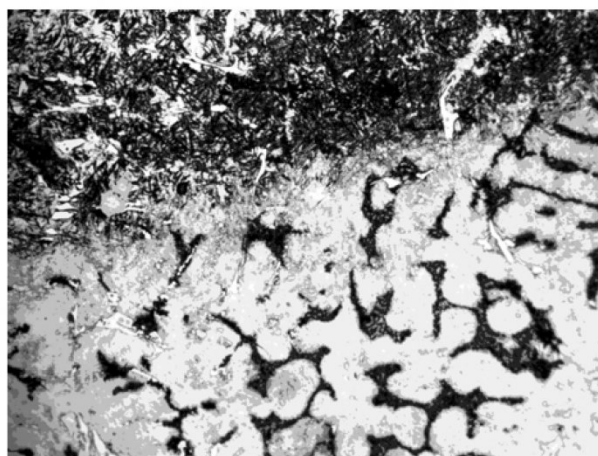
№ пробы	Твердость HRC
литое состояние	
1	41
после эксплуатации	
2	29
3	25
4	24

С целью изучения влияния постоянного электрического тока на процессы формирования структуры легированного хромом чугуна в лабораторных условиях проведена апробация технологии обработки расплава в литейной форме.

Литой колосник изготавливали в песчаной форме. Дополнительно в литейной форме располагали электроды, обеспечивая их контакт с расплавом в рабочей (плюсовой электрод) и затылочной (минусовой электрод) частях колосника. Одновременно в процессе экспериментов заливалась контрольная литейная форма, в которой получали отливку колосника без токового воздействия на расплав.



до травления без обработки, $\times 500$ рабочая часть, $\times 500$



рабочая часть после травления, $\times 200$

Рис. 3. Микроструктура отливок до и после травления

Плавку чугуна осуществляли в печи ППИ-0,06. Температура заливки расплава в форму превышала температуру ликвидус на 100°C . В период заливки, кристаллизации и охлаждения по отливкам пропускали постоянный ток с плотностью от 1,8 до $3,8 \text{ A/cm}^2$.

С целью установления факта изменения концентрации хрома по сечению отливки за счет электропереноса, который фактически проявляется только в движении примесей (если концентрация их невелика) и с целью исключения влияния неравномерного легирования расплава хромом (при большом его содержании в расплаве) за счет разных скоростей охлаждения различных объемов отливки, содержание хрома в исходном расплаве поддерживали на уровне 1,5 %.

В процессе экспериментов установлено, что объемная доля карбидов хрома изменяется в зависимости от плотности токового воздействия на расплав. Причем следует заметить, что при плотности тока в отливке более $2,8 \text{ A/cm}^2$ увеличивается объемная доля карбидов хрома и уменьшаются их средние размеры в рабочей части колосника. При меньшей плотности тока существенных изменений в размерах и доле карбидов по сечению колосника не наблюдали.

На рис. 3 приведена микроструктура отливок, на которой хорошо видны четко очерченные кар-

биды хрома. В полученных отливках без специальной токовой обработки карбиды имеют размеры порядка 2-3 мкм, а в случае применения токовой обработки расплава становятся дисперснее, значительно уменьшаясь в размерах до 0,5-1 мкм.

На поверхности шлифов хорошо заметны участки разной травимости в виде чередующихся полос, что является следствием химической неоднородности отливки, возникшей при кристаллизации. Твердость контрольной отливки без токовой обработки по сечению не меняется и составляет 42-43 ед. HRC. Твердость отливки с токовой обработкой на участках нормальной травимости составляет 41-43 HRC, на слаботравящихся участках достигает 46-47 HRC.

Данные по микротвердости основы также значительно различаются. Микротвердость мартенсита, выявленного травлением, составляет в среднем 760 HV, что соответствует нормальной твердости нелегированного мартенсита; микротвердость светлых участков, где структура основы не выявляется травлением, значительно выше - 1260 HV, что также позволяет сделать вывод о том, что твердый раствор на отдельных участках обогащен хромом.

Для подтверждения гипотезы о неоднородном распределении легирующих элементов по сечению отливки было проведено исследование эле-

ментного состава методом пошагового картирования на рентгенофлуоресцентном волнодисперсионном спектрометре последовательного действия XRF-1800 (Shimadzu, Япония). Графическая зависимость распределения хрома в отливке представлена на рис. 4.

Полученные результаты пошагового картирования показывают, что за счет токового воздействия на кристаллизующийся расплав в литейной форме удалось обеспечить содержание хрома в рабочей части колосника около 1,6 %, что не-

сколько больше содержания в исходном жидком металле. Максимальный приток хрома в рабочую часть колосника обеспечили слои, находящиеся на удалении 5-10 мм от центра картирования, где содержания хрома в металле снизилось до 0,4-0,6 %. Затылочная часть колосника в меньшей степени обеднена хромом. Данный факт связан с особенностью затвердевания отливки в литейной форме, а именно, с высокой скоростью затвердевания тонкой затылочной частью. Место сопряжения тонкой затылочной и более толстой рабочей

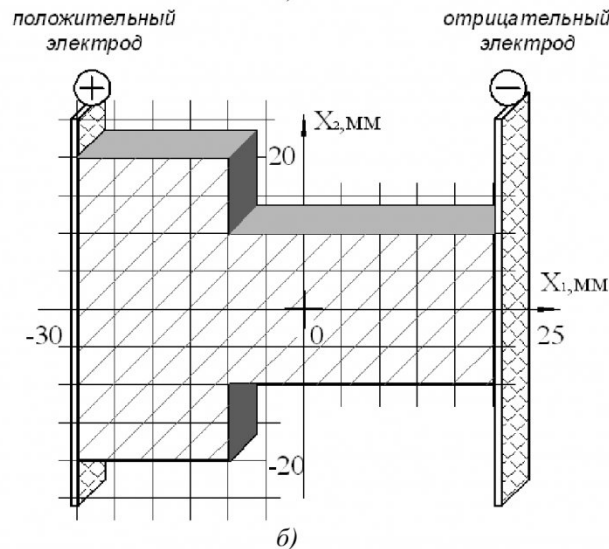
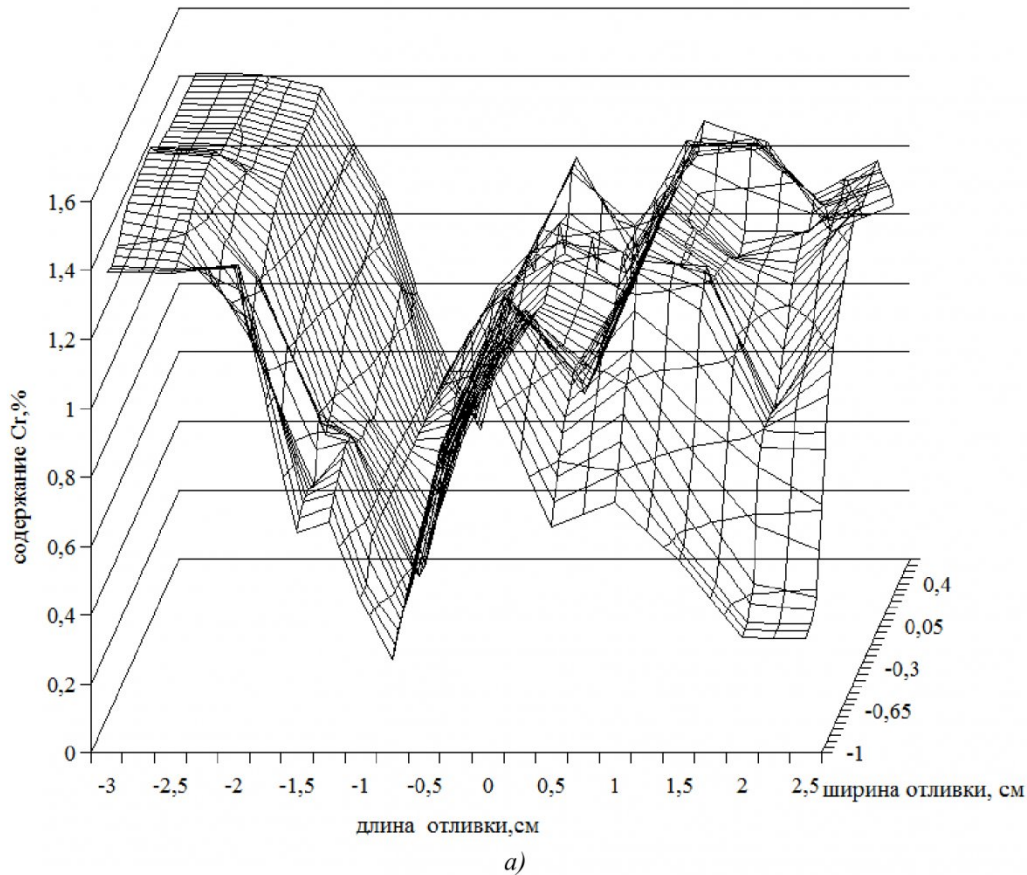


Рис. 4. Поверхность отклика функции распределения хрома по сечению отливки (а) и вид отливки с нанесенной координатной сеткой (б)

части колосника образует термический узел, в котором максимально долго находится расплав в жидком состоянии и из которого под действием электрического тока хром перемещается в сторону положительного электрода – рабочей части колосника.

Таким образом, на основе пошагового картирования установлено, что содержание хрома в разных частях отливки различается более чем в два раза, что подтверждает выводы, сделанные при металлографическом исследовании.

Из литературных источников известно [2], что в карбидах переходных металлов атом углерода заряжен положительно, атом металла – отрицательно. Лабораторные эксперименты показали, что ион Cr^- в легированном чугуна заряжен отрицательно, ион углерода C^+ – положительно. Установлено, что акцепторная способность атомов металла увеличивается с ростом недостроенности их внутренней $(n-1)$ d -оболочки. Cr имеет электронное строение $3d^5 4s^1$, $Fe - 3d^6 4s^2$. В соответствии с электронным строением d -оболочки карбид хрома имеет большую энергию связи, а заряд иона Cr имеет более отрицательное значение, чем ион Fe в сложном карбиде. У атома Ni с электронным строением $3d^8 4s^2$ d -оболочка почти застроена, по-

этому он не входит в состав сложного карбида, а растворяется в дендритах аустенита. Движение ионов Cr^- и C^+ под действием электрического тока объясняется растворением в одном и кристаллизацией в другом концах включения по направлению электропереноса [3, 4]. Данный факт подтвержден результатами проведенных лабораторных экспериментов.

В результате проведенных исследований установлено, что в процессе эксплуатации колосников из жаропрочного чугуна в топочных устройствах основной причиной их выхода из строя является окисление каркаса первичных эвтектических карбидов, окисление по границам аустенитных дендритов, диффузионный распад легированного хромом аустенита с образованием вторичных карбидов и их последующее укрупнение и коагуляция с образованием больших сегрегаций. Экспериментально доказано, что воздействие электрического постоянного тока плотностью $3,0-3,5$ А/см² на затвердевающий в литейной форме расплав позволяет получить неравномерность содержания легирующего элемента по сечению отливки с целью получения более высокого его содержания на поверхности, тем самым обеспечивая более высокие эксплуатационные свойства литых изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Миронов О.А. Влияние химического состава на формирование структуры и свойств жароизносостойких чугунов. Известия вузов. Черная металлургия. – 2007. № 3. С. 44-47.
2. Тот Л. Карбиды и нитриды переходных металлов. – М.: Мир. 1974. – 294 с.
3. Михайлов В.А., Богданова Д.Д. Электроперенос в жидких металлах. Теория и приложения. – М.: Наука. 1978. – 224 с.
4. Белащенко Д.К. Явления переноса в жидких металлах и полупроводниках. – М.: Атомиздат. 1970. – 397 с.

□ Авторы статьи:

Куценко
Андрей Иванович,
канд.техн.наук., до-
цент, начальник
Управления научных
исследований
СибГИУ
Тел. +7 906 979 3237
E-mail:
aik_mail@mail.ru

Селянин
Иван
Филиппович
докт.техн.наук, про-
фессор каф. литей-
ного производства
СибГИУ
Тел.
8 (3843) 74-94-33

Деев
Владислав
Борисович,
канд.техн.наук, до-
цент, зав.каф. литей-
ного производства
СибГИУ
Тел.
8 (3843) 74-94-33

Старовацкая
Светлана
Николаевна,
канд.техн.наук, ди-
ректор Центра кол-
лективного пользо-
вания СибГИУ «Ма-
териаловедение»
Тел. 8 (3843) 46-27-
66

Куценко
Андрей
Андреевич,
аспирант каф. ли-
тейного производст-
ва СибГИУ
Тел.
8 (3843) 74-94-33