

ем и связанной с ним релаксацией напряжений. При-  
чем введение бора в металл в данном количестве, уве-  
личивая по времени продолжительность  $\gamma \rightarrow \alpha$  превра-  
щения, обуславливает и более длительный процесс ре-  
лаксации напряжений, что значительно отодвигает  
время начала зарождения трещины и, тем самым,  
обеспечивает высокое сопротивление металла уста-  
лостному разрушению. Такие стали целесообразно ис-  
пользовать для упрочнения деталей, работающих в ус-  
ловиях многократного ударного и ударно-абразивно-  
го нагружения.

При концентрации в стали 25X8Г8Т бора до 0,6%  
(Б01–Б06) ее свойства определяются главным обра-  
зом свойствами нестабильного аустенита, то есть его  
способностью к  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращению. Такой металл мо-  
жет обладать высокой износостойкостью при эксплу-  
атации преимущественно в условиях воздействия  
ударных нагрузок.

### Выводы

1. С повышением концентрации бора в метастабиль-  
ной аустенитной стали 25X8Г8Т от 0,14 до 2,02%  
точка прямого мартенситного превращения (Мн)  
понижается на 70°C, то есть бор, стабилизируя  
аустенит, является аустенитообразующим эле-  
ментом.
2. С увеличением в исследуемой хромомарганцевой  
стали бора до 20,0% вязкое разрушение металла  
постепенно переходит в хрупкое.
3. Борсодержащие Fe–Cr–Mn стали со структурой  
метастабильного аустенита Б01–Б2 целесообразно  
использовать для упрочнения деталей, ра-  
ботающих в условиях многократного ударного и  
ударно-абразивного воздействия, а стабильные  
боридно-аустенитные стали Б5–Б20 – для повы-

шения износостойкости деталей, подверженных в  
процессе эксплуатации абразивно-ударному (с  
умеренными ударами) и абразивному нагружению.

### Список литературы

1. **Просвирин В.Н.** Влияние бора на структуру и свойства аус-  
тенитных сталей. – В кн.: Вопросы металловедения аустенит-  
ных сталей. – М.: Машгиз, 1952. – с.185–235.
2. **Медовар Б.И., Пинчук Н.И., Чеботило Л.В.** Аустенитно-  
боридные стали и сплавы для сварных конструкций. – Киев:  
Наукова думка, 1970.–147 с.
3. **Шеенко И.Н., Орешкин В.Д., Репкин Ю.Д.** Современные на-  
плавочные материалы. – Киев: Наукова думка, 1970.–238 с.
4. **Александров В.Л.** Сравнительные исследования поведе-  
ния стабильных и нестабильных аустенитных сталей при цик-  
лическом нагружении. Дисс....канд. техн. наук. – Свердловск:  
УПИ, 1966. – 109 с.
5. **Арнаутов Б.В., Толтых Л.Г., Арнаутова М.Б.** Износостой-  
кая сталь и наплавочная порошковая проволока. Материалы  
международной научно-технической конференции Балттех-  
маш – 98 «Прогрессивные технологии, машины и механиз-  
мы в машиностроении». – Калининград: 1998. – с.78–79.
6. **Лившиц Б.Г.** Физические свойства металлов и сплавов. –  
М.: Машгиз, 1959. – 368 с.
7. **Горелик С.С.** Рентгенографический и электронно-оптичес-  
кий анализ. – М.: Металлургия, 1970. – 370 с.
8. **Уманский Я.С.** Рентгенография металлов и полупровод-  
ников. – М.: Металлургия, 1969. – 496 с.
9. **Арнаутова М.Б., Бекетов А.Р.** Влияние бора на концент-  
рацию элементов в метастабильной Fe–Cr–Mn стали/ Сб.  
науч. тр. III отчетной конф. молодых ученых УГТУ–УПИ.– Ч.1. –  
Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2002. – с.282–283.
10. **Гордеева Т.А., Жегина И.П.** Анализ изломов при оцен-  
ке надежности материалов. – М.: Машиностроение, 1978. –  
200 с.

Д.А.Болдырев (канд. техн. наук, Исследовательский центр ОАО «АВТОВАЗ»)

## Технико-экономический макрокритерий оценки эффективности альтернативного модификатора

Исходя из общей теории управления качеством,  
при анализе затрат для обеспечения качества продук-  
ции одной из целей является изучение возможности  
снижения затрат на единицу продукции:

- при сохранении прежнего уровня качества;
- при улучшении уровня качества.

Известно, что степень соответствия между свой-  
ствами продукта и удовлетворяемыми с его помощью  
потребностями определяет качество продукта. Обоб-  
щенной мерой качества продукта служит соотношение  
стоимости и ценности (потребительской стоимости)  
продукта<sup>1</sup>:

$$K_{II} = УП = \frac{Ц_{II}(ПЦ_{II})}{C_{II}} \rightarrow MAX$$

В настоящее время в работе практически всех  
чугунолитейных производств прослеживается тен-  
денция к постепенному снижению использования и  
выводу из обращения в качестве графитизирующих  
модификаторов для внепечной обработки чугуна чи-  
стых ферросплавов (например ФС75, ФС65) с пе-  
реходом на более эффективные сплавы ферросили-  
ция с различными стимулирующими графитообра-  
зование, добавками бария, кальция, стронция, цир-  
кония, РЗМ и др.

Для первичного графитизирующего модифициро-  
вания высокопрочного чугуна в ЧЛП МтП ОАО «АВТО-  
ВАЗ» используется ФС75лб (табл. 1) с размером гра-  
нул от 3,2 до 10 мм.

<sup>1</sup> Герасимов Б. И., Злобина Н. В., Спиридонов С. П. Управление качеством. – М.: Кнорус, 2005. – 272 с.

Таблица 1. Химический состав ФС75л6, %

Si	C	S	P	Al	Mn	Cr
74–80	max 0,1	max 0,02	max 0,04	max 3,0	max 0,4	max 0,3

Таблица 2. Химический состав модификатора ФС65Ба4, %

Si	Ba	Mn	Al	Fe
62–70	2,0–4,0	max 0,4	max 3,0	ост.

Известно, что графитизирующее модифицирование чугуна позволяет дополнительно создавать в нем зародыши графитных включений, а также стимулировать их рост и равномерно распределять по объему чугуна. Это обеспечивается за счет создания в жидком чугуне концентрационных неоднородностей по кремнию. В центры областей с повышенным содержанием кремния ликвидируются содержащиеся в модификаторе поверхностно-активные или зародышеобразующие элементы (или и те и другие), которые обеспечивают правильное и равномерное формирование графита. Однако в используемом ферросилиции, как простом ферросплаве, такие высокоактивные элементы, как барий, стронций, цирконий, РЗМ практически отсутствуют, а, например, содержание кальция достигает только порядка 0,5%, в результате чего эффект модифицирования проявляется недостаточно эффективно. Поэтому для полноценного модифицирования расплава чугуна необходимо существенно увеличивать навеску модификатора. Новые графитизирующие модификаторы уже содержат в своем составе необходимое количество активных щелочно- или редкоземельных металлов, что позволяет получать требуемые характеристики структуры и свойств чугуна в отливках, используя меньшее количество модификатора.

Барийсодержащие модификаторы на основе ферросилиция, в частности, такой модификатор, как ФС65Ба4, можно отнести к новому поколению графитизирующих модификаторов (табл. 2). Барий в модификаторе на основе ферросилиция усиливает и пролонгирует во времени процесс образования и роста графитных включений, что позволяет снизить склонность чугуна к отбелу. Повышение инокулирующего действия модификатора достигается путем увеличения его суммарной площади поверхности за счет уменьшения размера его фракции.

Обобщенно показатель работоспособности модификатора может быть оценен по формуле:

$$A_{\text{мод}} = K_{\text{вф}} K_{\text{дф}} M_{\text{Si}} \sum_{i=1}^n K_i^a \frac{C_i}{C_{\text{пр}}},$$

где  $A_{\text{мод}}$  – показатель эффективности работы модификатора;  $K_{\text{вф}}$  – коэффициент, зависящий от величины фракции модификатора;  $K_{\text{дф}}$  – коэффициент, зависящий от фракционного диапазона модификатора;  $M_{\text{Si}}$  – доля содержания кремния в модификаторе;  $K_i^a$  –

коэффициент активности  $i$ -го элемента в модификаторе;  $C_i$  – концентрация  $i$ -го элемента в модификаторе;  $C_{\text{пр}}$  – предельная концентрация  $i$ -го элемента, обеспечивающая максимальную эффективность модификатора.

Таким образом, применительно к модифицирующим материалам выражение для меры качества продукта выглядит следующим образом:

$$K_{\text{П}} = \text{УП} = \frac{A_{\text{мод}}}{C_{\text{М}}} \rightarrow \text{МАХ},$$

где  $C_{\text{М}}$  – стоимость модификатора.

Из анализа данного соотношения следует, что для достижения максимального значения показателя качества необходимо:

- увеличение показателя эффективности работы модификатора при сохранении его стоимости;
  - снижение стоимости модификатора при неизменном показателе эффективности его работы;
- но наилучших результатов можно достичь при
- увеличении показателя эффективности работы модификатора при одновременном снижении его стоимости.

На практике, увеличение показателя качества достигается при более сильном росте эффективности (как связи или отношения между достигнутым результатом и использованными ресурсами) модификатора по сравнению с его стоимостью. Данный показатель как составная часть входит в критерий интегрального качества отливки<sup>1</sup>:

$$k_{\Sigma} = \frac{Q}{C_{\Sigma}} \rightarrow \text{МАХ},$$

где  $Q$  – комплексный показатель качества;  $C_{\Sigma}$  – совокупные затраты на изделие.

С учетом подхода, связывающего показатель работоспособности модификатора с мерой его качества и, соответственно, с критерием интегрального качества отливки, были проведены испытания графитизирующего модификатора ФС65Ба4 (2–4% Ba) фракции 1–5 мм на всей номенклатуре отливок из высокопрочного чугуна, получаемых ковшовым модифицированием в чугунолитейном производстве ОАО «АВТОВАЗ». Цель проводимых испытаний – снижение расхода модификатора ФС65Ба4 фракции 1–5 мм по сравнению с модификатором ФС75л6 фракции 3,2–10 мм для первичной ковшовой обработки расплава чугуна. Объектами исследования являлись отливки деталей из вы-

Таблица 3. Программа производства отливок деталей из высокопрочного чугуна, получаемого с помощью ковшевого модифицирования и нормы расхода модификаторов ФС75лб и ФС65Ба4

Деталь	Программа на 2006 г.		Расход ФС75лб, кг		Расход ФС65Ба4*, кг	
	в тоннах	в ковшах (1,2 т)	на ковш, кг	на программу, т	на ковш***, кг	на программу, т
Вал коленчатый 2101-, 2103-, 21083-, 11183-, 2110-1005020	32495,65	27080	3	81,24	2 (-33%)	54,16
Вал коленчатый 1111-, 21213-1005020	1140,14	951	6	5,7	5 (-16,7%)	4,755
Валик привода масляного насоса 2101-1011237	1620,1	1350	8	10,8	5 (-37,5%)	6,75
Маховик 2108-, 2110-1005120	13561,66	11302	7	79,114	6 (-14,3%)	56,51
Суппорт переднего тормоза 2101-3511017	7708,45	6424	13	83,512	10 (-23,1%)	64,24
Суппорт переднего тормоза 2108-3511017	2535,58	2113	8	16,904	5 (-37,5%)	10,565
Суппорт переднего тормоза 2110-3511017	3744,58	3121	8	24,968	5 (-37,5%)	15,605
Суппорт переднего тормоза 2121-3511017	2317,55	1932	12	23,184	8 (-33,3%)	15,456
Коробка дифференциала 2108-2303018	6355,11	5296	12	63,552	5 (-58,3%)	26,48
Коллектор выпускной 2108-1008025	4765,72	3972	11	43,692	7 (-36,4%)	27,804
Кронштейн переднего моста 2121-2301063	40,91	35	15	0,525	9 (-40%)	0,315
Кронштейн задней опоры 2121-1001042	133,89	112	15	1,68	10 (-33,3%)	1,12
Направляющая колодок переднего тормоза 21213-3501155	1191,92	994	15	14,91	12 (-20%)	11,928
Картер редуктора заднего моста 2101-2402018	5191,86	4327	12	51,924	10 (-16,7%)	43,27
Ступица переднего колеса 2101-3103015	3916,87	3265	11	35,915	7 (-36,4%)	22,855
Ступица заднего колеса 2110-3104015	6117,65	5099	12	61,188	8 (-33,3%)	35,693
Коллектор выпускной 2123-1008025	6169,98	5142	7	35,994	5 (-28,6%)	20,568
Звездочка коленчатого вала 2101-1005030	527,48	1759**	1,3	2,2876	0,9 (-30,8%)	1,5831
Гайка подшипника коробки дифференциала 2121-2303064	721,87	2407**	5	12,035	4 (-20%)	9,628
<b>Σ</b>	100256,97	86681		649,1246		429,2851

\* Фактическое содержание бария в модификаторе – 2,2%; \*\* На ковш объемом 300 кг; \*\*\* В скобках указано выраженное в процентах снижение расхода модификатора ФС65Ба4 в сравнении с ФС75лб по каждой отливке.

сокопрочного чугуна марок ВЧ50, Gh56-40-05, Gh65-48-05 и Gh75-50-03.

Металлографический анализ микроструктуры отливок выполнен на металлографическом микроскопе UNIMET 8585 фирмы Бюллер. Замеры твердости по Бринеллю материала отливок производились (ГОСТ 9013-59) на твердомере ТБ 5006.

Модифицирование проводили согласно действующему технологическому процессу путем размещения навесок модификатора ФС65Ба4 и «тяжелой» лигатуры NiMg15Ce на днище ковша перед его заполнением расплавом чугуна из печи ожидания.

Ввиду того, что при 2-х стадийном процессе графитизирующего модифицирования, первичное графитизирующее модифицирование оказывает влияние, главным образом, только на структуру и механические свойства металлической матрицы чугуна, оценку действия модификатора на опытно-промышленном этапе производили анализируя твердость по Бринеллю опытных отливок. Отливки для исследований отбирали из первых форм и из форм, залитых через 8 минут с момента замера температуры, в процессе разлива ковша.

Нормы расхода серийного (ФС75л6) и опытного (ФС65Ба4) модификаторов и программа производства всей номенклатуры отливок деталей из высокопрочного чугуна, получаемых ковшовым модифицированием, приведены в табл. 3.

Вопрос о целесообразности применения модификатора ФС65Ба4 взамен ФС75л6 (частный случай) может быть разрешен исходя из следующего неравенства:

$$C_M(\text{ФС65Ба4}) < k \cdot C_M(\text{ФС75л6}),$$

где  $C_M(\text{ФС65Ба4})$ ,  $C_M(\text{ФС75л6})$  – стоимости опыт-

ного (ФС65Ба4) и серийно применяемого (ФС75л6) модификаторов, руб./т;  $k$  – коэффициент разницы расхода серийного и опытного модификаторов (согласно данным таблицы):

$$k = \frac{P_{\Sigma}(\text{ФС75л6})}{P_{\Sigma}(\text{ФС65Ба4})} = \frac{649,1246}{429,2851} = 1,51,$$

Таким образом, зная стоимость серийного материала ФС75л6 и коэффициент разницы расхода серийного и опытного модификаторов (согласно данным табл. 3) данное неравенство позволяет определить минимальную экономически целесообразную стоимость опытного модификатора ФС65Ба4.

В общем виде данное неравенство может быть записано следующим образом:

$$C_M(B) < C_M(A) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\Pi_i}{K_i} \cdot P(A)_i^k}{\sum_{i=1}^n \frac{\Pi_i}{K_i} \cdot P(B)_i^k},$$

где  $C_M(B)$ ,  $C_M(A)$  – стоимости опытного (B) и серийно применяемого (A) модификаторов, руб./т;  $K_i$  – коэффициент емкости ковша, используемого для заливки  $i$ -й отливки;  $\Pi_i$  – годовая программа производства  $i$ -й отливки, т;  $P(A)_i^k$  – ковшовая норма расхода на ковш серийного модификатора A для заливки  $i$ -й отливки, т;  $P(B)_i^k$  – ковшовая норма расхода на ковш опытного модификатора B для заливки  $i$ -й отливки, т.

Таким образом, данное неравенство может служить производственным макрокритерием оценки эффективности использования альтернативного модификатора, позволяет ускорить и упростить процедуру принятия решения о целесообразности применения опытного модификатора взамен существующего.

А.Н.Бестужев, Н.И.Бестужев, А.Н.Крутилин, В.Л. Трибушевский (БНТУ, г. Минск)

## Перспективные литейные материалы для деталей, работающих в условиях интенсивного ударно-абразивного износа

Материалы для изготовления деталей, работающих в условиях интенсивного ударно-абразивного износа, должны обладать высокими значениями взаимно исключаящих механических свойств – твердостью (износ) и ударной вязкостью (ударостойкость). Обеспечение благоприятного сочетания этих эксплуатационных свойств является сложной технической задачей, решение которой, несомненно, имеет широкое практическое значение.

Представителями литых деталей, эксплуатирующихся в таких экстремальных условиях, являются мелющие тела. Следует отметить, что поиску оптимального конструкционного материала и технологиям изготовления таких деталей уделяется исключительное внимание, ввиду их широкого использования в рудной,

цементной промышленности, а также на машиностроительных предприятиях.

Традиционное широкое практическое использование легированных (низколегированных) высокоуглеродистых сталей в качестве материала, из которого изготавливают мелющие тела, обусловлено относительно низкой стоимостью этого вида продукции. Однако стальные катаные мелющие шары характеризуются повышенным износом, что приводит к высоким дополнительным затратам, возникающим у потребителей при их эксплуатации (частая перегрузка мельниц, простой дорогостоящего высокопроизводительного оборудования и т.д.).

С точки зрения авторов, гораздо более перспективным в качестве литого конструкционного материала