

пективным материалом нового поколения для массового производства отливок из ЧВГ, так как естественная оксидная пленка служит дополнительным стабилизирующим фактором образования вермикулярного графита.

Кроме того, сравнительные результаты испытаний показывают, что увеличение «живучести» вермикуляризирующей обработки зависит от наличия кислорода (в виде оксидов) и количества магния + суммы РЗМ в модификаторах. Поэтому для производства отливок повышенной сложности из ЧВГ необходимо в технологическом процессе предусмотреть контроль уровня кислорода путем замера его активности. Измерения,

проведенные прибором «Сталь-4», показывают, что оптимальным должно быть содержание кислорода в пределах 50–80 ppm для формирования вермикулярного графита.

Устойчивость технологического процесса производства отливок повышенной сложности для автомобилестроения требует обязательного контроля целого ряда параметров (исходного содержания серы в чугуне, температуры, количества вводимого модификатора, остаточного содержания магния и др.), а также и активности кислорода, которая напрямую влияет на вермикуляризирующую «живучесть» модифицирования, а значит, на стабильность технологии получения ЧВГ.

Д.А.Болдырев (Исследовательский центр ОАО «АВТОВАЗ»),
С.В.Давыдов (Брянский государственный технический университет)

Износостойкость тормозных дисков из чугуна с оптимизированным углеродным эквивалентом

Наиболее эффективным направлением улучшения комплекса эксплуатационных свойств тормозных дисков, изготавливаемых из серого чугуна, является последовательное проведение следующих мероприятий [1]:

1. Оптимизация содержания серы в чугуне для получения в структуре равномерно распределенных гетерогенных включений (трибофаз) сульфида марганца, обладающих при относительной тугоплавкости (1620°С) достаточно высокой пластичностью и вязкостью.
2. Оптимизация соотношения углерода и кремния при постоянном углеродном эквиваленте $C_3 = \text{const}$ (степени эвтектичности) чугуна для получения годной отливки.

При реализации 1-го направления, повышение концентрации серы в сером перлитном чугуне Gh190 (СЧ26) до 0,12% при постоянном содержании марганца позволило повысить износостойкость тормозных дисков до 35%, снизить износ контртела (тормозных колодок) до 12% и уменьшить прирост разнотолщинности, непосредственно влияющей на отрицательный эксплуатационный эффект «вибрация при торможении», на 35% [2].

Механизм повышения износостойкости чугуна для тормозных дисков за счет введения серы до оптимальной концентрации (0,12%) связан со смазывающим действием включений сульфида марганца (рисунок). Содержание серы в чугуне ограничивается 0,12% в связи с проявлением при дальнейшем ее увеличении охрупчивающего эффекта. При этом размеры включений сульфида марганца начинают превосходить толщину графитных пластин [2].

Снижение отрицательного эксплуатационного эффекта «вибрация при торможении» с одной стороны связано, как уже отмечалось выше, со снижением прироста разнотолщинности рабочих поверхностей тормозного диска, а с другой стороны – за счет улуч-



Микроструктура чугуна Gh190 при содержании серы 0,12%, х500 (включения сульфида марганца показаны стрелками)

шения вибропоглощающих свойств чугуна.

Чугун является материалом с резко выраженной гетерогенной структурой: металлическая матрица и графитные включения. При содержании в сером чугуне серы выше 0,04–0,05% образующиеся сфероиды сульфида марганца являются добавочной структурной составляющей, усиливающей демпфирующие свойства чугуна.

Механизм повышения демпфирующей способности чугуна с дополнительными включениями заключается в протекании локальной пластической деформации во включениях мягкой пластичной фазы – сульфида марганца, а также на межфазной границе «сульфид марганца – перлит» [3].

Необходимость в реализации 2-го направления была обусловлена тем, что вентилируемые тормозные

диски уступают по трещиностойкости невентилируемым сплошным тормозным дискам. Из-за наличия полостей между ребрами жесткости вентилируемые тормозные диски имеют улучшенное охлаждение, однако этот же фактор, как правило, вызывает возникновение и распространение сетки трещин на рабочих поверхностях диска при недостаточных теплофизических характеристиках материала.

При разработке чугуна для тормозных дисков одним из основных требований является достижение наименьшей склонности к образованию трещин. Известно, что свойства чугуна определяются содержанием углерода и кремния, а также углеродным эквивалентом [4]:

$$C_3 = \%C + \frac{\%(Si + P)}{3} \quad (1)$$

Серый чугун с пластинчатым графитом при данном углеродном эквиваленте, обладает улучшенными теплофизическими характеристиками (теплопроводностью, коэффициентом линейного расширения) при повышенном содержании свободного графита и низком содержании кремния [5]. Вместе с тем уменьшение содержания кремния в металлической матрице позволяет ослабить процесс графитизации чугуна при нагреве и рост содержания феррита.

В диапазонах содержания углерода от 3 до 4% и кремния от 1 до 3% [6], теплопроводность чугуна λ , Вт/(м·К), можно определить, с достаточной степенью точности, используя следующее уравнение регрессии:

$$\lambda = 17,4 (\%C) - 6,3 (\%Si) \quad (2)$$

Таким образом, повысить трещиностойкость вентилируемых тормозных дисков можно за счет улучшения теплофизических свойств чугуна с увеличением содержания углерода и снижением содержания кремния при неизменном углеродном эквиваленте. По уравнению (2) можно прогнозировать, что теплопроводность чугуна с содержанием углерода и кремния 3,7% и 1%, соответственно, может быть повышена на 30% по сравнению с содержанием этих элементов в чугуне Gh190, используемом для изготовления тормозных дисков на ОАО «АВТОВАЗ», – углерода 3,35% и кремния 2,17%.

Известно, что снижение углеродного эквивалента в сером чугуне предполагает переход на более высокие марки. В данном случае при неизменных условиях ведения процесса выплавки структура серого чугуна претерпевает качественные изменения. Повышение содержания металлической основы в сером чугуне при одной и той же скорости охлаждения вызывает появление таких структурных составляющих, как вторичный цементит и ледебурит. Было установлено, что уменьшение содержания кремния с 1,30–1,62 до 0,95% при относительно постоянном содержании углерода (3,30–3,39%) кардинально изменяет морфологию графитных включений. Если изначально в чугуне преобладали равномерно распределенные (тип А) графитные включения и присутствовали розеточные (тип В) с междендритными ненаправленными (тип D), то при недостатке кремния типы графита меняются местами – типы В и D преобладают, а тип А – присутствует.

Таким образом, при проведении опытных работ было установлено, что на практике содержание крем-

ния в отливке не должно быть ниже 1,3% во избежание появления в структуре чугуна структурно-свободного цементита (отбела). После проведения комплекса исследований на стандартных образцах $\varnothing 30$ мм длиной 220 мм, обеспечивающих близкие условия к условиям структурообразования отливки, была подготовлена и реализована программа работ по отработке технологии выплавки и оптимизации углеродного эквивалента серого чугуна перлитного класса Gh190 для вентилируемых тормозных дисков.

Диапазон содержания химических элементов в отливках тормозных дисков из чугуна Gh190 (СЧ26): 3,25–3,5% С; 1,8–2,2% Si; 0,5–0,7% Mn; $\leq 0,1\%$ P; 0,09–0,13% S; 0,1–0,2% Cr; 0,1–0,3% Ni; 0,2–0,5% Cu (Cu + Ni $\leq 0,60\%$).

Чугун для изготовления тормозных дисков выплавлялся в индукционной среднечастотной печи. Заливка тормозных дисков производится на автоматической линии DISA с модифицированием чугуна на струю модификатором Superseed Extra (ф. Elkem, Норвегия) фракции 0,2–0,7 мм в количестве 0,15% от металлоемкости формы. Температура выпуска расплава чугуна из печи – 1510–1530°C. Температура заливки чугуна в формы – 1400–1440°C. Шихта состояла из литейного чугуна; лома стального марок 1А, 2А, 8А–10А; возврата от нирезиста ЧП16Д7ГХШ; меди катодной, медных отходов, меди без полуды и пайки марок Мок, М1к, М2к, Моок, М1; феррохрома марок ФХ800А, Б; ФХ850А, Б; FeCr70C70Si2 или его заменителя – FeCr60C70Si2; ферромарганца марки ФМн70 или его заменителей – ФМн78, ФМн88; ферросеры ФСу30 или ее заменителей ФСу25, ФСу35; олова марки О1 и графита искусственного измельченного марки ГИИ–А. Все шихтовые материалы, кроме олова и ферросеры, давали в завалку. Ферросеру вводили в жидкий металл за 10–12 минут до выпуска чугуна, а олово – за 2–3 минуты до выпуска. Разливка чугуна велась в песчаноглинистые формы.

Целью исследований являлось изменение содержания углерода и кремния в химическом составе чугуна при неизменном углеродном эквиваленте $C_3 = \%C + \%Si/3$, без изменения содержания других элементов и процесса модифицирования. Предполагаемый оптимальный с точки зрения теплофизических характеристик химический состав чугуна должен быть следующим: 3,5–3,7% С; 1,2–1,4% Si; 0,5–0,7% Mn; $\leq 0,1\%$ P; 0,09–0,13% S; 0,1–0,2% Cr; 0,1–0,3% Ni; 0,2–0,5% Cu (Cu + Ni $\leq 0,60\%$).

Фактические параметры чугуна в отливках тормозных дисков были следующими:

1. Химсостав: 3,59% С; 1,46% Si; 0,64% Mn; 0,034% P; 0,134% S; 0,12% Cr; 0,13% Ni; 0,53% Cu.
2. Твердость по Бринеллю: HB 202–207.
3. Временное сопротивление на разрыв: $\sigma_b = 286$ –330 МПа.

Согласно прогнозу по уравнению (2) опытные тормозные диски имеют теплопроводность на 20% больше, чем серийные.

Методика испытаний. Испытания по определению фрикционных характеристик колодок проведены в натурном узле переднего дискового тормоза модели

ВАЗ-2112. Момент инерции маховых масс стенда 43,8 кг · м², что соответствует полной массе автомобиля ВАЗ-2111 – 1580 кг (при радиусе колеса R_к = 0,281 м). На испытаниях «Fade» скорость охлаждающего воздушного потока 3,2 м/с.

При испытании на износостойкость момент инерции маховых масс стенда – 43,8 кг · м².

При испытании на трещиностойкость момент инерции маховых масс стенда 34,2 кг · м², что соответствует частичной массе автомобиля ВАЗ-2111 – 1155 кг (при радиусе колеса R_к = 0,281 м); скорость автомобиля: начальная – 162 км/ч, конечная – 81 км/ч; температура тормозного диска начальная – 100°С; среднее замедление при торможении – 7,8 м/с²; количество торможений – 300.

После приработки колодок и после завершения испытаний производился замер осевого биения поверхностей трения диска (на расстоянии 8 мм от внешнего края), замер толщины тормозных колодок и диска (для расчета износа) а также осмотр поверхностей трения диска на наличие трещин.

При фрикционных испытаниях с серийным и опытным тормозными дисками было испытано по два комплекта тормозных колодок с фрикционным материалом шифра ТИИР-240 (фирма «ТИИР», г. Ярославль), отобранных из одной партии. По результатам проведенных испытаний фрикционные характеристики тормозных колодок в паре как с серийным, так и с опытным тормозными дисками, не имеют систематических различий. Разброс характеристик носит случайный, а не закономерный характер. Средний износ тормозных колодок в паре с опытным тормозным диском (0,98 мм) ~ на 10% меньше, чем с серийным (1,08 мм). Средний износ опытного и серийного тормозных дисков различаются незначительно – различие не превышает погрешность измерения.

Объем длительных износных испытаний – два серийных и два опытных тормозных диска; с каждым тормозным диском испытывался отдельный комплект тормозных колодок. На протяжении всех испытаний систематические различия в уровне коэффициента трения, связанные с влиянием вариантов тормозных дисков, отсутствуют. Результаты сравнительного анализа износа тормозных колодок в зависимости от температуры в паре с двумя вариантами тормозных дисков показали, что износ тормозных колодок с опытным тормозным диском за все испытание в среднем на 7,3%

меньше, чем с серийным тормозным диском, причем в зависимости от температуры эффект колебался от 0,4 до 11%.

При испытании на износостойкость серийного и опытного тормозных дисков замерялся только их общий износ (за весь цикл испытаний), при этом износ опытного тормозного диска (0,068 мм) получился на 11,4% меньше, чем серийного (0,077 мм). В процессе проведения испытаний производился контроль изменения разнотолщинности тормозных дисков на протяжении всего цикла. В целом разнотолщинность обоих тормозных дисков от начала до конца испытаний оставалась практически без изменений – различие не превышает погрешность измерения.

Также были проведены усталостные испытания серийных и опытных тормозных дисков по определению биения и растрескиваемости. Полученные результаты показали, что при удовлетворительной величине термического коробления по итогам испытаний на всех дисках не было обнаружено трещин, длина которых превышала бы 10 мм, а также не было обнаружено сквозных трещин.

Сравнительный анализ износа тормозных дисков (серийных и опытных) и колодок после проведения всего объема усталостных испытаний (усредненные значения по двум дискам) приведен в таблице.

Анализ результатов проведенных испытаний показал, что опытные тормозные диски обладают преимуществом перед серийными по износостойкости, износу работающих с ними в паре тормозных колодок и стойкости к усталостному растрескиванию, а по остальным показателям находятся на уровне серийных дисков.

Оптимизация углерода и кремния при постоянном углеродном эквиваленте C_э = const заключается в правильном балансе содержания этих элементов. Доказано, что при увеличении содержания углерода и снижения содержания кремния повышается прочность и теплопроводность, а в результате этого и трещиностойкость чугуна без ухудшения остальных его характеристик и показателей. Механизм данного явления объясняется обеднением по кремнию силикоферрита перлита при одновременном увеличении содержания свободного графита, что благотворно влияет как на теплофизические (за счет высокой теплопроводности графита и феррита с низким содержанием кремния), так и на износно-фрикционные свойства чугуна (за

Сравнительный износ элементов триботехнической пары «тормозной диск-колодка»

Элемент трибопары	Износ, мм						Эффект, %
	Диск				Диск (средние значения)		
	Серийный		Опытный		Серийный	Опытный	
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4			
Диск	0,062	0,042	0,021	0,023	0,052	0,022	58
Колодка	2,23	3,89	2,19	2,21	3,06	2,20	28

счет пониженной хрупкости феррита с низким содержанием кремния и повышенного содержания свободного графита, являющегося твердой смазкой).

Выводы:

1. По результатам проведенных испытаний фрикционные характеристики колодок при работе как с серийными, так и с опытными тормозными дисками идентичны.

2. На всех испытаниях опытные диски показали меньший износ, чем серийные. В зависимости от условий испытаний преимущество составляло 10% и более. Износ колодок с опытными дисками также меньше, чем с серийными. В зависимости от условий испытаний преимущество составляло от 2,6 до 28%.

3. По степени растрескивания и величине термического коробления все тормозные диски с запасом соответствуют нормативным требованиям.

4. Опытные тормозные диски показали более высокую стойкость к растрескиванию, чем серийные, и оцениваются более предпочтительно.

Список литературы

1. **Болдырев Д. А.** Эффективные методы повышения износостойкости деталей из серого чугуна, работающих в условиях сухого абразивного трения и теплосмен // XVI Петербургские чтения по прочности, посвященные 75-летию со дня рождения В. А. Лихачева: Сб. – Санкт-Петербург, 2006. – С. 62.
2. **Болдырев Д. А.** Повышение работоспособности и ресурса пары трения «тормозной диск – колодка»: Автореф. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. – Тольятти, 2004. – 26 с.
3. **Метод внутреннего трения** в металловедческих исследованиях / Под ред. М. С. Блантера и Ю. В. Пигузова. – М.: Металлургия, 1991. – 248 с.
4. **Чугун** / Под ред. канд. тех. наук А. Д. Шермана и докт. тех. наук А. А. Жукова. – М.: Металлургия, 1991. – 576 с.
5. **Bungardt K., Spyra W.** Wdrmeleitfhdigkeit von legierten und unlegierten Stdhlen und Legierungen bei Temperaturen zwischen 20 und 700°C. Arch. Eisenhittenwesen 26. 1971
6. **Severin D., Franke U., Lampic M.** Steigerung der Lebensdauer von Bremsscheiben // ATZ. 2002. №11. S. 1016–1023.

В.Б. Деев (канд. техн. наук, доцент), В.А. Дегтярь (д-р хим. наук, профессор),
И.Ф. Селянин (д-р техн. наук, профессор, ГОУ ВПО «Сибирский государственный
индустриальный университет», г. Новокузнецк)

Устройство для контроля качества литейных сплавов

Методы анализа качества сплавов в процессе их приготовления имеют огромное значение в условиях современной металлургии и литейного производства. Существуют разнообразные методики, позволяющие в той или иной степени оценивать химический состав, свойства сплавов в жидком и твердом состояниях, влияние примесей и т.д. Недостатком большинства способов контроля является технологическая длительность, что обуславливает их применение только в научно-исследовательских целях. В промышленности, как правило, используются методы количественного контроля химического состава и содержания газовых и неметаллических примесей, а также различные технологические пробы для определения эксплуатационных и литейных свойств, степени модифицирования сплавов и т.д.

В последние десятилетия для оценки качества получаемых сплавов широкое распространение получил метод термического анализа [1, 2]. Однако очень часто получаемая с помощью данного метода информация может являться недостаточной для решения вопросов, связанных с управлением свойствами сплава посредством изменения химического состава, интенсификации процессов модифицирования и рафинирования расплавов.

В связи с этим, интерес представляет метод исследования термоЭДС сплавов [3], который является достаточно чувствительным к малейшим изменениям

химического состава и содержанию примесей в расплаве. Представляется целесообразным совместить оба этих метода и исследовать термическую кривую охлаждения и кривую термоЭДС сплава одновременно из одной пробы.

На кафедре «Литейное производство» СибГИУ разработано многофункциональное устройство, позволяющее оценивать структурные изменения в процессе кристаллизации сплавов, обусловленные воздействием различных технологических факторов (рис. 1). Для этого в устройство вво-

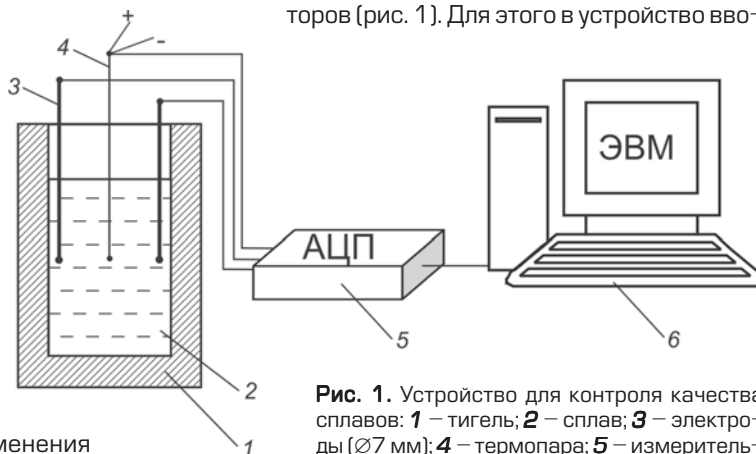


Рис. 1. Устройство для контроля качества сплавов: 1 – тигель; 2 – сплав; 3 – электроды (∅7 мм); 4 – термопара; 5 – измерительный модуль (24-битовый аналого-цифровой преобразователь ICP CON 7018, обеспечивающий 16-битовую точность, и преобразователь промышленного интерфейса (RS485) в последовательный интерфейс (RS232 – com port) ICP CON 7520; 6 – ЭВМ

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48