

оказывает влияния на этот показатель. Для колес с содержанием углерода 0,51-0,55 % глубина мартенситного слоя увеличивается в несколько раз. Еще более значимо этот показатель увеличивается для колес с содержанием углерода 0,56-0,60 % (0,035 мм). И, наконец, для колес с содержанием углерода 0,61-0,65 % и 0,66-0,69 % этот показатель имеет максимальное значение и равен 0,050 и 0,064 мм, соответственно.

Выводы

1. В работе показано, что показателями стойкости колес к образованию на поверхности катания дефектов теплового происхождения являются глубина мартенситного слоя, который образуется при нагреве колеса в процессе торможения и последующем охлаждении, его твердость и формируемая микроструктура. Установлено, что изменение исходной твердости (прочности) колес не оказывает влияния на глубину мартенситного слоя.

2. Установлено, что повышение содержания углерода в колесах приводит к увеличению глубины мартенситного слоя. Зависимость между указанными характеристиками описывается уравнением второй степени. Показано, что с повышением содержания углерода в колесах интенсивность его отрицательного влияния на стойкость к образованию дефектов на поверхности катания возрастает.

Библиографический список

1. Контактно-усталостное повреждение колес грузовых вагонов / Тр. ВНИИЖТ; под ред. С.М. Захарова.- М.: Интекст, 2004. - 160 с.

Таблица 3. Влияние содержания углерода в железнодорожных колесах на их стойкость к образованию дефектов на поверхности катания

Интервал изменения содержания углерода, %	Среднее увеличение глубины мартенситного слоя (мм/0,01 %)
0,45-0,50	0,004
0,51-0,55	0,019
0,56-0,60	0,035
0,61-0,65	0,050
0,66-0,69	0,064

2. «Інструкція з формування, ремонту та утримання колісних пар тягового рухомого складу залізниць України колії 1520 мм» 305-Ц Міністерство транспорту України, Державна адміністрація залізничного транспорту України, Укрзалізниця, 2001 р.

3. Колесная сталь / Узлов И.Г., Гасик М.И., Есаулов А.Т. и др. – К.: Техника, 1985. – 168 с.

4. Исследование причин образования дефектов на поверхности катания высокопрочных колес в процессе эксплуатации / А.И. Бабченко, А.А. Кононенко, Ж.А. Дементьева и др. // Залізничний транспорт України. - 2010. - № 5. - С. 35-38.

5. Дружинін М.О., Сухомлин В.І., Нестеренко А.М., Книш А.В. Особливості структури білих шарів на поверхні катання залізничних коліс // Металознавство та обробка металів.. – 2008. - № 2. – С. 3-7.

6. Курдюмов Г.В., Максимова О.П., Никанорова А.И. Об активизирующем влиянии пластической деформации на мартенситное превращение. «Доклады АН СССР» 1957, № 4.

Поступила 20.11.2012

УДК 669.15-194.55

Волчок И.П. /д.т.н./, Акимов И.В. /к.т.н./
Запорожский НТУ

Наука

Термостойкость графитизированных сталей

Рассмотрена возможность применения графитизированных сталей взамен чугунов для деталей, работающих в условиях термоциклических нагрузок. Проведены сравнительные испытания графитизированных сталей и чугунов и определен ряд характеристик, определяющих стойкость материала при работе в условиях термоциклирования. Эффективность применения графитизированных сталей подтверждена результатами опытно-промышленного опробования. Ил. 2. Табл. 2. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: графитизированная сталь, теплопроводность, термо-, окислостойкость

The possibility of using graphitized steel instead of cast iron for parts operating under thermal cycling loads is considered. Comparative tests of graphitized steels and cast irons are conducted and a number of characteristics that determine the resistance of the material when working in cycling are identified: strength, ductility, thermal conductivity, heat resistance, scaling resistance, high temperature endurance. Effectiveness of graphitized steels is confirmed by the results of pilot testing.

Keywords: graphitized steel, thermal conductivity, heat resistance, resistance to scaling

К графитизированным сталям относятся, как правило, заэвтектоидные сплавы, в которых часть или весь углерод находится в виде графитовых включе-

ний. Основными легирующими элементами в таких сталях являются С (0,8-1,6 %), Si (0,75-2,5 %) и Mn (0,2-1,2 %). Находят также применение Cr, Ni, Mo, Cu, Al, Ti, Ce, PЗМ. С учетом хорошей демпфирую-

© Волчок И.П., Акимов И.В., 2013 г.

щей способности, малой чувствительности к концентраторам напряжений и сравнительно высоких механических свойств графитизированные стали с успехом заменяют высокопрочный чугун, углеродистые и низколегированные стали при изготовлении ответственных деталей машин и механизмов.

Анализ структуры, физических и механических свойств графитизированных сталей позволяет сделать вывод о целесообразности их более широкого применения, прежде всего, взамен серых и высокопрочных чугунов для деталей, работающих в условиях термоциклических нагрузок: изложниц, прокатных валков, кокилей, пресс-форм и др. Возможность такой замены, на наш взгляд, должна определяться сравнительными результатами определения термостойкости чугунов и графитизированных сталей. Под термостойкостью в нашем случае понимается комплекс характеристик, определяющих сопротивление изделия росту, деформации (короблению), а также разрушению вследствие образования термических и термоусталостных трещин, высокотемпературной эрозии (окалинообразованию) и пр.

Объектами исследований в данной работе были графитизированные стали 150СД2Л (1,53 % С; 1,12 Si; 0,33 Mn; 2,27 Cu; 0,24 Al; 0,03 S и 0,04 % P) и 160С2Д3Л (1,67 % С; 2,25 Si; 0,64 Mn; 3,19 Cu; 0,23 Al; 0,03 S и 0,04 % P), серый СЧ20 (3,45 % С; 2,41 Si; 0,71 Mn; 0,12 S и 0,08 % P) и высокопрочный ВЧ40 (3,30 % С; 1,92 Si; 0,46 Mn; 0,02 S и 0,1 % P) чугуны. Опытные стали и чугуны выплавляли в 60-кг индукционной печи с основной футеровкой. Разливка жидкого металла осуществлялась в сухие песчано-глинистые формы, которые обеспечили получение слитков прямоугольного (40x60) и круглого (Ø50) поперечного сечения для последующего изготовления из них образцов для испытаний. При этом требуемые концентрации легирующих элементов и модификаторов получали путем присадки в печь ферросилиция ФС65 и меди М1, а в разливочный ковш – сплава алюминия АЛ1 и силикокальция СК30. Применение указанного модифицирующего комплекса способствовало получению перлитной металлической основы без вторичного цементита в структуре. Так как серый и высокопрочный чугуны в литом состоянии имели феррито-перлитную структуру металлической основы, для идентичности условий испытаний графитизированные стали были подвергнуты отжигу при 720 °С для получения феррито-перлитной структуры. Прочность и пластичность определяли на пятикратных образцах Ø 5 мм согласно ГОСТ 1497-73.

Определение термостойкости N проводили с использованием цилиндрического образца, имеющего два сквозных отверстия, оси которых расположены во взаимно-перпендикулярных плоскостях [1]. Такая конфигурация образца, вследствие значительной разностенности, вызывает термические напряжения в его сечении при изменении температуры, приводящие к образованию трещин термоусталости. Термоциклирование проводили по режиму 20↔800 °С с охлаждением в проточной воде. О термостойкости

материала судили по числу циклов, которые выдерживал образец до появления сквозной трещины или до его разрушения (разделения на две части).

Высокотемпературную выносливость N_f определяли с использованием установки ЛО2-727-00-00-СБ на плоских образцах сечением 5x10 мм. Испытания осуществлялись при симметричных изгибающих ($\sigma_{изг} = 4$ МПа) и растягивающих ($\sigma_{ст} = 25, 30, 35, 40$ и 45 МПа) напряжениях при температуре 750 °С. Такая схема нагружения вызывала в рабочем сечении образца сложнапряженное состояние, имитируя, таким образом, условия реальных изделий при повторных нагревах и охлаждениях. Критерием выносливости служило количество циклов N_f (для каждого значения $\sigma_{ст}$), которое выдерживал образец до появления на рабочей части макротрещин, либо до его разрушения.

Испытания на окалиностойкость проводили на газодинамической установке в потоке продуктов сгорания пропана в кислороде на плоских образцах размерами 50x10x2 мм. Закрепленные на подвижной платформе образцы (по 3 шт.) подвергались циклическим нагревам в пламени до 900 °С, выдержке 1 мин, свободному охлаждению на воздухе до 600 °С, выдержке 1 мин и снова нагреву до 900 °С. Длительность испытаний составляла 100 циклов. О сопротивлении окалинообразованию судили по приросту массы образцов. Теплопроводность стали измеряли на приборе ИТЭМ-1М Актюбинского завода «Эталон».

Расчетную оценку стойкости материала в условиях термоциклического нагружения определяли по критериям, предложенным в работе [2]: параметру тепловых напряжений K и критерию термической стойкости C

$$K = \frac{\lambda \cdot \sigma_B}{\alpha \cdot E}, \quad (1)$$

$$C = \frac{\lambda \cdot \sigma_B \cdot \delta}{\alpha \cdot E}, \quad (2)$$

где σ_B – предел прочности при растяжении, МПа; δ – относительное удлинение, доли единицы; λ – теплопроводность, Вт/(м·°С); α – коэффициент термического расширения, 1/°С; E – модуль упругости, МПа.

Из приведенных формул (1, 2) следует, что термостойкость материала повышается с увеличением теплопроводности (в результате уменьшения градиента температур и, соответственно, величины термических напряжений в стенке изделия), предела прочности и пластичности, с увеличением которых тормозится зарождение и распространение термоусталостных трещин, а также с уменьшением коэффициента термического расширения и модуля упругости, приводящим к снижению величины деформации и, соответственно, термических напряжений.

Результаты исследование и их обсуждение

Согласно результатам металлографического анализа (рис. 1, табл. 1), в сером чугуне графитовые

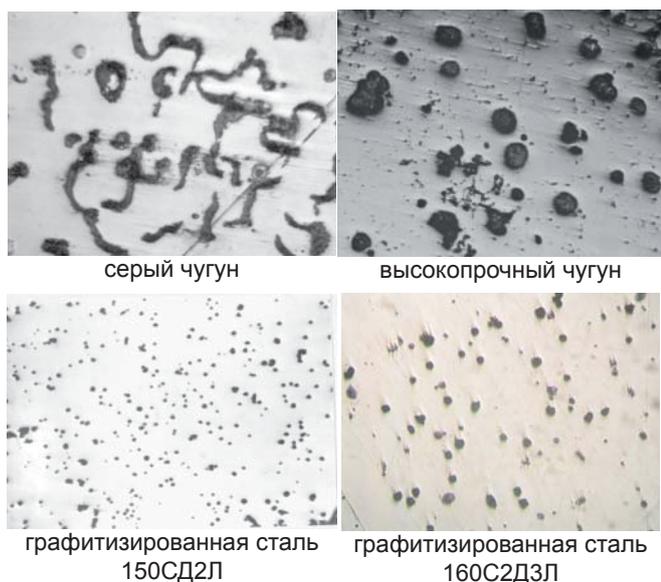


Рис. 1. Структуры графитной фазы чугунов и графитизированных сталей (x400)

включения имели пластинчатую форму, в высокопрочном чугуне и в сталях – шаровидную. При этом включения в сталях имели размеры значительно меньше, чем в чугунах, а их объёмная доля V_g была примерно в 2 раза меньше. Так как графитовые включения являются наиболее низкопрочной структурной составляющей и при термоциклическом воздействии окисляются и разрушаются, можно утверждать о преимуществе графитизированных сталей по сравнению с чугунами как конструкционного материала для изделий, работающих в условиях повторных нагревов и охлаждений, а также в контакте с расплавленными металлами.

Анализ физико-механических свойств исследуемых сплавов показывает, что графитизированные стали, несколько уступая серому и высокопрочному чугунам по теплопроводности и коэффициенту термического расширения, значительно превосходят эти материалы по механическим свойствам (σ_B и δ), что явилось основным фактором, определяющим величину показателей K и C (табл. 2). Так, по параметру K графитизированная сталь 150CД2Л более чем в три раза превосходила серый и в 1,5 раза высокопрочный чугуны, а по критерию C она практически в четырнадцать раз превосходила СЧ20 и более чем в два раза ВЧ40.

Среди двух марок рассматриваемых сталей наиболее высокими значениями параметра тепловых напряжений K и критерия стойкости при термоциклическом нагружении C обладала сталь 160C2Д3Л, что можно объяснить более высокими показателями прочности σ_B и теплопроводности λ при незначительном снижении пластичности δ в сравнении со сталью 150CД2Л. Следует заметить, что значение C для всех исследуемых материалов хорошо коррелирует с экспериментально определенными показателями термостойкости N . Это подтверждает определяющее влияние на данное свойство факторов, учитываемых в расчетной формуле (2). При этом наиболее высокой

Таблица 1. Параметры графитной фазы чугунов и сталей

Сплав	Объёмная доля V_g , %	Параметр формы λ (отношение длины к ширине включения)
СЧ20	15,3	18,3
ВЧ40	15,1	1,4
150CД2Л	6,2	1,6
160C2Д3Л	7,1	1,8

термостойкостью N обладала сталь 160C2Д3Л, легированная 3,0-3,5 % Cu (табл. 2). По данным [3-6], присутствие меди в составе сталей и чугунов положительно сказывается на их механических и теплофизических свойствах. Это связано с выделениями избыточной медистой фазы (ϵ -фаза) в виде обособленных компактных включений-кластеров и прослоек по границам раздела фаз - графит-металлическая матрица, способствующих повышению твердости, прочности и теплопроводности железоуглеродистых сплавов.

Скорость высокотемпературного окисления, определяемая изменением прироста массы образцов ΔP , зависела, прежде всего, от количества и формы включений графита. Так, при примерно одинаковом количестве графитной фазы более высокую окислительную стойкость имел чугун с глобулярным графитом ВЧ40, превосходивший по этому показателю СЧ20 на 28 %. Обе марки графитизированных сталей характеризовались примерно одинаковым значением окислительной стойкости (табл. 2), превосходя при этом серый и высокопрочный чугуны соответственно в 2 и 1,5 раза.

Высокотемпературная выносливость N_t чугунов и сталей равномерно снижалась по мере увеличения растягивающего напряжения $\sigma_{ст}$ (рис. 2). Наихудшим сопротивлением разрушению при высокотемпературном циклическом нагружении характеризовался серый чугун, так, при $\sigma_{ст} = 40$ МПа его показатель N_t не превышал 10^4 циклов, а при $\sigma_{ст} = 45$ МПа испытательный образец разрушался при первых же циклах нагружения. Графитизированные стали по данному показателю существенно превосходили серый и высокопрочный чугуны. Наиболее высокую N_t продемонстрировала сталь 160C2Д3Л при всех значениях $\sigma_{ст}$. Так, при наибольшем статическом напряжении $\sigma_{ст} = 45$ МПа, данная сталь превосходила сталь 150CД2Л примерно в три раза и более чем на порядок высокопрочный чугун. Полученные результаты можно объяснить достаточно высокими показателями механических свойств (прежде всего прочности, пластичности, предела выносливости) сталей, а также благоприятной формой графитовых включений.

Из стали 150CД2Л были изготовлены изложницы, работающие в условиях конвейерной разливки сплавов на основе алюминия, и подвергающиеся в процессе работы термоциклическим нагрузкам и ударам об упоры при вытряхивании слитков. При испытаниях температура заливаемого металла составляла от 730-700 °С (начало заливки) до 710-680 °С (конец заливки). Рабочий цикл изложниц имел продолжительность 14-18 мин, при этом через 3,5 мин после заливки производилось их охлаждение водой, че-

Таблица 2. Физико-механические свойства (средние данные) серого и высокопрочного чугунов и опытных графитизированных сталей (данные α и E для СЧ20 и ВЧ40 взяты из [7, 8])

Показатель	Сплавы			
	СЧ20	ВЧ40	150СД2Л	160СД3Л
Теплопроводность, λ Вт/(м \times °С)	48	45	38	42
Коэффициент термического расширения $\alpha \times 10^6$, 1/°С при изменении t от 20 до 700 °С	10,5	11,5	11,9	11,7
Модуль упругости $E \times 10^{-5}$, МПа	1,3	1,9	2,0	2,0
Предел прочности при растяжении σ_v , МПа	230	415	810	930
Относительное удлинение δ , доли единицы	0,03	0,15	0,23	0,18
Параметр тепловых напряжений $K \times 10^{-3}$, Вт/м	80,9	85,4	129,3	166,9
Критерий стойкости при термоциклическом нагружении S , Вт/м	2,4	12,8	29,7	30,1
Термостойкость N , циклов	15	34	48	52
Окалиностойкость, ΔP , г	0,62	0,48	0,28	0,31

рез 6-7 мин – извлечение слитка (чушки). Результаты испытаний подтвердили данные лабораторных исследований и показали, что применение стали взамен высокопрочного ВЧ45 обеспечило повышение долговечности изложниц на 42 %.

Выводы

Выполнено сравнение физико-механических свойств и термостойкости графитизированных сталей, серого и высокопрочного чугунов. Установлено, что по прочности, пластичности, высокотемпературной выносливости, окалиностойкости, а также по критериям тепловых напряжений и термической стойкости графитизированные стали существенно превосходят серый и высокопрочный чугуны. Результаты лабораторных испытаний и опытно-промышленной проверки дают основания рассматривать графитизированные стали как перспективный материал для изготовления изделий, работающих при термоциклических нагрузках (изложницы, прокатные валки, кокили, пресс-формы, стеклоформы и др.).

Библиографический список

- 1 Пат. Украины UA 53976A, 7G01N3/60. Образец для определения термостойкости / А.Б. Черняк, О.Б. Колотилкин, И.П. Волчок; заявитель и патентообладатель Запорожский национальный технический университет. - № 2002042960; заявл. 12.04.2002; опубл. 17.02.2003, Бюл. № 2.
2. Твердопаливні ракетні двигуни. Матеріали і технології / Ф.П. Санін, Л.Д. Кучма, Є.О. Джур, А.Ф. Санін. – Дніпропетровськ: Вид. ДДУ, 1999. – 318 с.
3. Медь в черных металлах / И. Ле-Мей, Л.М. Шётки. – М.: Металлургия, 1988. – 310 с.
4. Медь в низколегированных чугунах / В.П. Половинчук, А.А. Жуков // Литейное производство. – 1992. – № 5. – С. 43-44.

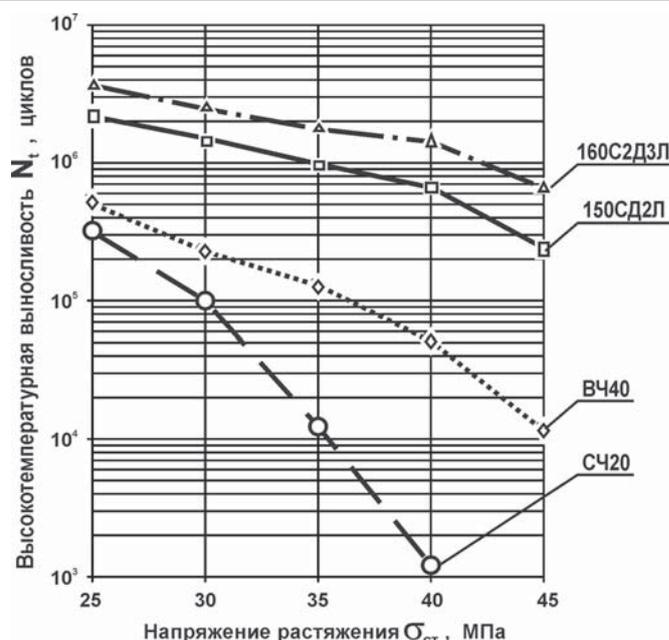


Рис. 2. Высокотемпературная выносливость графитизированных сталей и чугунов

5. Экономнолегированный чугун для деталей машин ЛНД / А.А. Жуков, В.П. Половинчук, В.В. Савицкий, Н.Д. Билан // Литейное производство. – 1990. – № 3. – С. 32.
6. О графитизирующем и карбидостабилизирующем влиянии меди на структурообразование в чугуне / Г.И. Сильман, А.А. Жуков, В.П. Половинчук // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1989. – № 4. – С. 90-94.
7. Термоуравновешенная изложница / В.В. Абрамов, В.А. Курганов. – М.: Металлургия, 1988. – 144 с.
8. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике. Справочник / Под ред. Б.Е. Неймарка. – М.-Л.: Энергия, 1967. – 240 с.

Поступила 25.10.2012