



It is determined that graphitized steels are perspective construction material, the breakage resistance and mechanical characteristics of which are determined to a considerable degree by form of graphitic impurities.

И. П. ВОЛЧОК, И. В. АКИМОВ, А. А. МИТЯЕВ, Запорожский национальный технический университет, И. М. АНДРЕЙКО, Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины, Н. А. СВИДУНОВИЧ, С. Е. БЕЛЬСКИЙ, Д. В. КУИС, БГТУ, А. П. МЕЛЬНИКОВ, М. А. САДОХА, ОАО «БЕЛНИИЛИТ»

УДК 539.43: 669.14.017

РАЗРУШЕНИЕ ГРАФИТИЗИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Графитизированные стали представляют собой заэвтектоидные железо-углеродистые сплавы, в которых определенная часть углерода находится в виде графитных включений. Благодаря более низкому по сравнению с чугунами содержанию углерода (1,2–1,8%) и соответственно графита этим сплавам присущи, с одной стороны, положительные качества чугунов (низкая чувствительность к концентраторам напряжений, высокая демпфирующая способность, невысокая стоимость и др.), с другой – более высокие по сравнению с чугунами механические свойства [1].

В зависимости от содержания элементов-графитизаторов – углерода и кремния, а также от скорости охлаждения образование графита в графитизированных сталях возможно как в процессе кристаллизации, так и в твердом металле путем распада цементита. В первом случае графит имеет пластинчатую форму, во втором – компактную, близкую к шаровидной, или хлопьевидную, типичную для ковких чугунов. Таким образом, изменяя содержание углерода и кремния, а также других элементов, оказывающих влияние на про-

цессы графитизации, представляется возможным управлять формой, размерами и распределением графитовых включений, а следовательно, и свойствами графитизированных сталей.

Согласно [2], форма графитовых включений играет значительную роль в процессах зарождения и роста усталостных трещин и определяет долговечность чугунов при циклическом нагружении. Сопротивление графитизированных сталей разрушению при циклических нагрузках изучено недостаточно, поэтому анализ микромеханизма процессов усталостного разрушения этого материала представляет теоретический и практический интерес.

Объектом исследований в данной работе были графитизированные стали с базовым химическим составом: 1,55–1,65% С; 0,18–0,22% Мn; 0,03–0,07% Cr; 0,025–0,030% S и 0,032–0,04% Р и с переменным содержанием кремния 0,96–2,57%, меди 0,50–1,51% и алюминия 0,053–0,259% (табл. 1). Стали выплавляли в 60-килограммовой индукционной печи и подвергали графитизирующему отжигу по режиму, применяющемуся для отжига

Таблица 1. Химический состав и свойства графитизированных сталей

Вариант стали	Химический состав, %			Параметр формы графита λ	Количество феррита, %	Предел прочности σ _b , МПа	Относительное удлинение δ, %	Твердость НВ
	Si	Cu	Al					
1	0,98	0,51	0,058	2,2	29	336	2,8	170
2	0,96	0,51	0,261	1,4	33	570	7,4	166
3	1,11	1,51	0,054	2,5	13	339	3,1	187
4	1,03	1,49	0,263	1,4	15	545	8,6	197
5	2,51	0,53	0,053	17,2	93	121	1,4	170
6	2,49	0,50	0,261	19,1	97	43	1,0	170
7	2,49	1,48	0,057	20,5	89	129	1,0	187
8	2,57	1,45	0,259	26,7	98	170	1,0	197
9	1,74	0,97	0,153	1,4	51	386	2,4	187

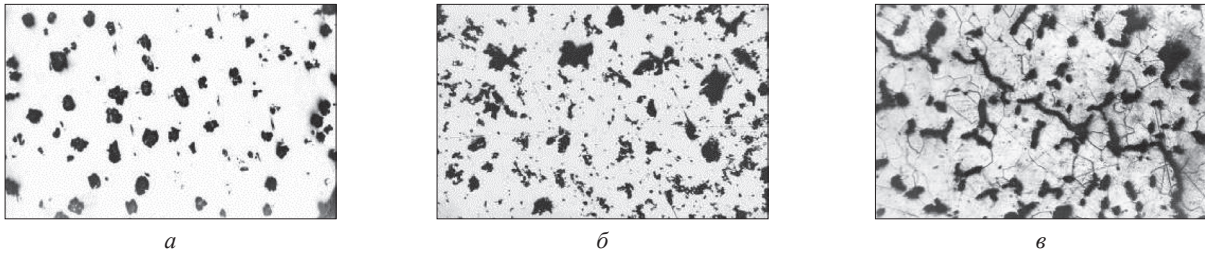


Рис. 1. Типичные структуры графитизированных сталей с различным содержанием кремния. $\times 100$

белых чугунов на ковкие. Для характеристики степени сфероидизации включений графита применяли параметр формы λ [2], который определяли по результатам металлографических исследований как среднее отношение максимальных размеров включений к минимальным. Предел прочности и относительное удлинение определяли на 5-кратных цилиндрических образцах диаметром 5 мм.

Критерии циклической трещиностойкости $\Delta K_{th\,eff}$, ΔK_{th} , ΔK_{fc} , ΔK^* и показатель n в уравнении Пэриса определяли на дисковых образцах с краевой трещиной (базовый размер $W = 64$ мм, толщина $t = 6-8$ мм) при частоте циклического нагружения 10–15 Гц и коэффициенте асимметрии $R = 0,05$ в среде лабораторного воздуха по стандартной методике [3]. Длину усталостной трещины измеряли катетометром КМ-6 с 25-кратным увеличением.

Исследование малоциклового усталости проводили в соответствии с ГОСТ 2860-65 на установке ИП-2М повторно-переменным чистым изгибом плоских образцов толщиной 2 мм с жестким нагружением и частотой 50 циклов/мин по симметричному циклу с контролируемой деформацией 0,15; 0,25; 0,35 и 0,5%. Микромеханизм усталостного разрушения изучали при деформации 0,35% на образцах, имеющих с одной стороны полированную поверхность.

Как показал металлографический анализ, при содержании кремния 0,96% графит отжига имел форму, близкую к шаровидной (рис. 1, а), металлическая матрица при этом была представлена ферритной и перлитной фазами. При 1,74% кремния образовался менее компактный хлопьевидный графит отжига (рис. 1, б), металлическая матрица при этом также была представлена фазами перлита и феррита. При содержании кремния 2,57% графит имел пластинчатую форму (рис. 1, в), матрица была ферритной. Структура металлической основы и форма включений графитной фазы обуславливали значительное изменение прочности (43–570 МПа) и пластичности (1–9%) и в меньшей степени твердости (170–200 НВ) исследуемых сталей (табл. 1).

Характеристики циклической трещиностойкости оказались структурно чувствительными показателями в особенности в средне- и высокоамплитудных участках диаграммы усталостного разрушения (рис. 2). Снижение параметра формы графита в результате легирования алюминиием в низкокремнистых сталях привело к повышению критической трещиностойкости ΔK_{fc} от 51 до 83 МПа $\cdot\sqrt{м}$ (вариант 2 против варианта 1). Эти значения ΔK_{fc} для стали варианта 2 в 1,5–1,6 раза превышали аналогичную характеристику лучших высокопрочных чугунов перлитно-ферритного и перлитного классов [4]. Микромеханизм усталостного разрушения такой стали оказался достаточно энергоемким. Наблюдался преимущественно ямочный с интенсивными деформационными гребнями микрорельеф излома, где практически отсутствовали характерные для чугунов участки скола, причем как в низко- (рис. 3, а), так и в высокоамплитудных (рис. 3, б) участках диаграммы циклической трещиностойкости. Обра-

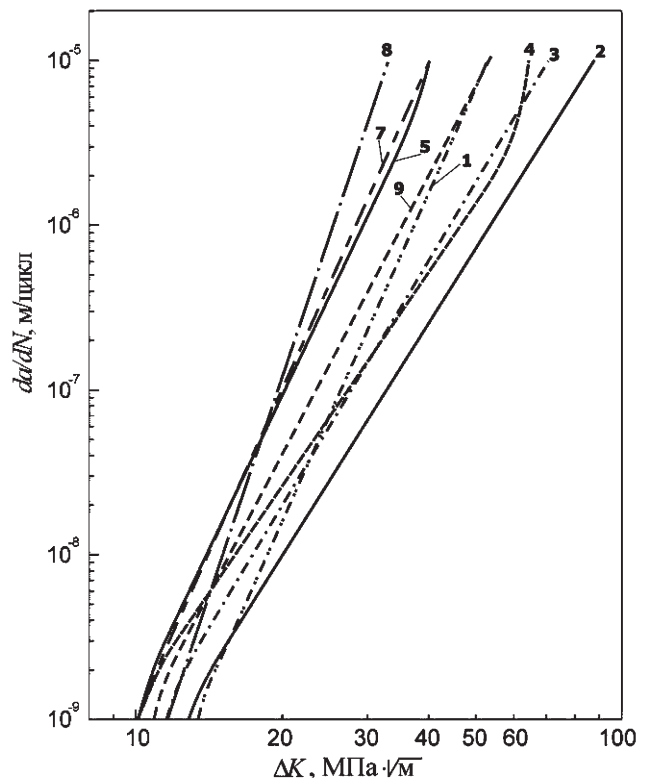


Рис. 2. Кинетическая диаграмма усталостного разрушения графитизированных сталей. Варианты кривых согласно табл. 1

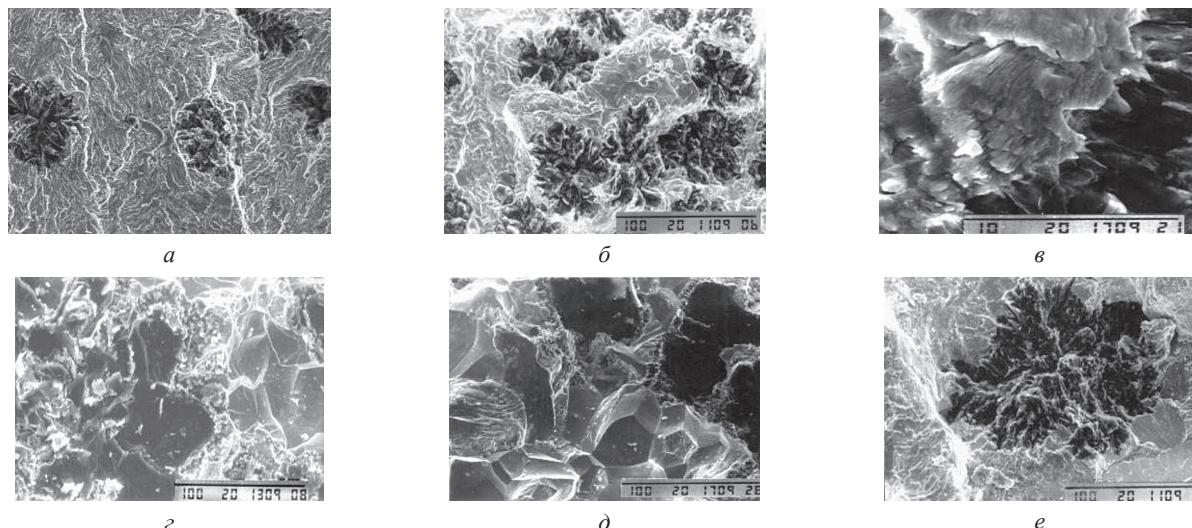


Рис. 3. Микрофрактограммы изломов образцов вариантов (по табл. 1): 2 (а, б и в), 7 (з), 8 (д) и 9 (е) при $v \approx 10^{-8}$ m/cycle (а) и $v \approx 10^{-6}$ m/cycle (б, в, з, д, е). а, б, з, д, е – $\times 500$; в – $\times 5000$

щает на себя внимание наличие в изломе участков с бороздчатым микрорельефом (рис. 3, в), характерных для усталостного разрушения пластичных сплавов.

В случае высококремнистых графитизированных сталей (варианты 5, 7 и 8 на рис. 2) критическая трещиностойкость ΔK_{fc} существенно снижалась, особенно при легировании 1,5%Cu и 0,25%Al (вариант 8). Показатели $\Delta K_{fc} = 30-40$ МПа $\cdot\sqrt{м}$ (табл. 2) этих сталей соответствовали уровню ферритных высокопрочных чугунов [4]. Микрофрактографический анализ показал, что такие стали разрушались в значительной мере по механизмам транс- и межкристаллитного скола (рис. 3, з). Образование четких откольных межзеренных фасеток (рис. 3, д) и низкое сопротивление хрупкому разрушению высококремнистых сталей можно объяснить способностью кремния к снижению пластичности в результате твердорастворного упрочнения и межзеренной ликвации.

Таблица 2. Циклическая вязкость разрушения графитизированных сталей

Вариант стали	$\Delta K_{th\,eff}$	ΔK_{th}	ΔK_{fc}	ΔK^*	n
	МПа $\cdot\sqrt{м}$				
1	6,3	12,6	51	25,7	6,38
2	6,3	12	83	32,8	4,38
3	6,3	11	65	27,9	4,96
4	6,2	10	72	27,6	4,72
5	5,1	10	40	20,2	6,14
6	Разрушение на начальной стадии				
7	4,9	10	38	20	6,57
8	5,9	11	32	19,8	8,90
9	5,9	10,7	50	23,5	5,66

Циклическая трещиностойкость графитизированных сталей промежуточного легирования

(вариант 9) была невысокой, что подтвердилось ростом усталостной трещины не только по вязкому механизму, но и путем транскристаллитного скола (рис. 3, е).

Микроструктура графитизированных сталей оказала слабое влияние на пороговую циклическую трещиностойкость (рис. 3, табл. 2): $\Delta K_{th} = 10-13$ МПа $\cdot\sqrt{м}$ у всех исследованных вариантов легирования. В среднем для графитизированных сталей с пластинчатой формой графита $\Delta K_{th} = 10-11$ МПа $\cdot\sqrt{м}$, а для сталей с компактным графитом $\Delta K_{th} = 10-13$ МПа $\cdot\sqrt{м}$. Можно утверждать, что в целом порог ΔK_{th} графитизированных сталей незначительно превосходит аналогичный показатель серых чугунов. То же самое можно отметить и для порога $\Delta K_{th\,eff}$ (табл. 2).

Таким образом, с точки зрения циклической трещиностойкости оптимальным оказался вариант 2 (см. табл. 1 и 2), что можно объяснить, в первую очередь, благоприятной формой графитовых включений.

Анализ микромеханизма разрушения при испытаниях на малоцикловую выносливость показал, что в наибольшей степени процессам трещинообразования способствовали включения графита пластинчатой и некомпактной хлопьевидной формы. Возле таких включений происходило зарождение микротрещин, отдельные из которых приводили к образованию магистральной трещины при дальнейшем увеличении числа нагружений. В области включений компактной формы также образовывались трещины, однако интенсивность их зарождения и роста была значительно ниже, чем в области включений некомпактной формы.

В стали с компактными графитовыми включениями (0,96%Si) трещины усталости возникали,

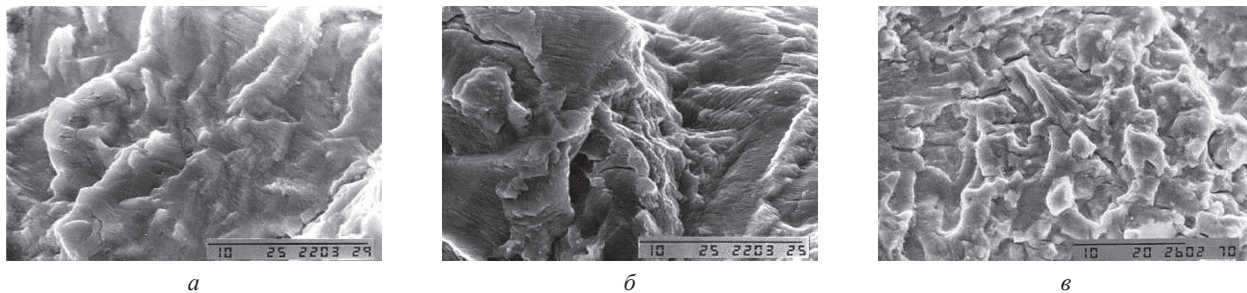


Рис. 4. Фрактограммы усталостных изломов графитизированных сталей: а – 0,96% Si; б – 1,74; в – 2,57% Si. $\times 1000$

как правило, у включений графита и распространялись в нормальном направлении к продольной оси образца. Наблюдались также зарождение и рост микротрещин в зонах скопления мелких включений графита. Данная сталь имела наиболее высокие показатели сопротивления малоциклового усталостному разрушению.

В стали с хлопьевидными включениями (1,74%Si) зарождение и рост трещин имели место в основном около графитовых включений протяженной формы.

Сталь с 2,57% кремния, имеющая пластинчатый графит, разрушалась без заметной пластической деформации. При этом трещины проходили в основном по пластинчатым включениям графита.

Анализ фрактограмм усталостных изломов (рис. 4) показал, что на микрорельефе излома сталей с содержанием кремния 0,96 и 1,74% присутствовали ярко выраженные усталостные бороздки с четко определяемым направлением роста уста-

лостной трещины, причем в стали с 0,96% Si имелись участки с интенсивными деформационными гребнями, свойственными для сталей с большим запасом пластичности. Такие виды микрорельефа свидетельствуют о значительной энергоемкости работы разрушения. Разрушение высококремнистых сталей происходило по механизму транс- и межкристаллитного скола, при этом на фрактограммах наблюдались квазихрупкие фасетки с поперечными надрывами.

Результаты выполненных исследований свидетельствуют о том, что графитизированные стали являются перспективным конструкционным материалом, сопротивление разрушению и механические свойства которого в значительной мере определяются формой графитовых включений. Стали с компактной формой графитовых включений по показателям прочности, циклической трещиностойкости и малоцикловой выносливости не уступают высокопрочным чугунам, обладая при этом более высокими значениями пластичности.

Литература

1. Литовка В. И., Бех Н. И., Шинский О. И. Усталостная прочность и разрушение чугуна // Литейное производство. 1994. №6. С. 3–8.
2. Волчок И. П., Колотилкин О. Б., Шейко С. П. Конструкционные материалы для стеклоформирующего инструмента. Запорожье: Издательский центр «Павел», 1997.
3. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособ. в 4-х т. Киев: Наукова думка, 1990.
4. Остап О. П., Костик Є. М., Андрейко І. М., Дронюк М. М. Вплив мікроструктури на низькотемпературну циклічну тріщинотривкість високоміцних чавунів // Фізико-хімічна механіка руйнування. 1997. № 1. С. 57–69.