

90 лет
БНТУ

It is shown that graphitized steels in some cases due to its intermediate disposition by structure and characteristics among low-carbon steels and cast irons, can provide the necessary combination of characteristics of construction material and consequently to increase safety and durability of details of metallurgical and machine-building industry machines.

И. В. АКИМОВ, И. П. ВОЛЧОК, А. А. МИТЯЕВ, Запорожский национальный технический университет, Н. А. СВИДУНОВИЧ, Д. В. КУИС, С. Е. БЕЛЬСКИЙ, БГТУ, А. П. МЕЛЬНИКОВ, М. А. САДОХА, ОАО «БЕЛНИИЛИТ»

УДК 621.74

ГРАФИТИЗИРОВАННЫЕ СТАЛИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

К графитизированным сталям относятся, как правило, заэвтектоидные сплавы, в которых часть или весь углерод находится в виде графитных включений. Благодаря включениям графита, выполняющего роль смазочного материала и способствующего повышению теплопроводности, стали находят применение в качестве износостойких материалов (штампы для холодной штамповки, волочильный инструмент, била, шары и бронепушечные плиты угольных мельниц, кожуха и лопасти дробеструйных аппаратов, сопла пескоструйных аппаратов и др.), а также для изготовления деталей, работающих при термоциклических нагрузках (кокили, изложницы, стеклоформирующий инструмент, детали печного оборудования и др.). С учетом хорошей демпфирующей способности, малой чувствительности к концентраторам напряжений и сравнительно высоким механическим свойствам графитизированные стали с успехом заменяют высокопрочный чугун, углеродистые и низколегированные стали при изготовлении ответственных деталей механизмов и машин.

Согласно [1], основными легирующими элементами в графитизированных сталях являются углерод (1,2–1,6%), кремний (0,75–2,5%) и марганец (0,2–1,2%). Находят также применение никель, молибден, медь, алюминий, титан [2, 3]. Стали указанного выше состава обладают хорошими литейными свойствами: высокой жидкотекучестью, малой линейной усадкой и низкой склонностью к образованию горячих и холодных трещин. Термическая обработка сталей состоит, как правило, из двух этапов: отжига при 850–950 °С для распада вторичного цементита и образования графитной фазы и отжига при 700–780 °С для формирования структуры металлической основы. В результате соответствующих технологических приемов (ковшовое модифицирование, увеличение содержания

кремния и др.) удается достичь полной графитизации сверхэвтектоидного углерода и получить структуру перлит – графит без применения термической обработки.

Как отмечалось выше, графитные включения придают графитизированным сталям антифрикционные свойства, повышают их демпфирующую способность и снижают чувствительность к концентраторам напряжений. С другой стороны, с увеличением количества графитной фазы снижаются показатели прочности и пластичности. В работе [4] выполнена оценка влияния графитной фазы на механические свойства сплавов с возрастающим содержанием углерода. Между количеством графита и прочностью сплавов наблюдались прямолинейные зависимости: увеличение содержания углерода от 0,48 до 4,02% и соответственно количества графитных включений от 2,1 до 12,3 об.% привело к снижению предела прочности с 652 до 168 МПа при комнатной температуре; с 511 до 152 МПа и со 155 до 48 МПа при температурах 500 и 700 °С соответственно. Показатели твердости при этом снизились с НВ220 до НВ121 (рис. 1).

Количество графитной фазы оказало существенное влияние на интенсивность изнашивания в условиях трения металл по металлу с проскальзыванием при нагрузке 50 Н: с увеличением содержания углерода и уменьшением расстояния между включениями графита интенсивность изнашивания снижалась. При расположении графитной фазы в виде дендритных колоний, когда расстояния между включениями практически сведены до минимума, интенсивность изнашивания была минимальной, что можно объяснить смазывающим действием графита. При повышении содержания углерода свыше 2,5% наблюдалось снижение износостойкости, что связано с охрупчиванием и выкрашиванием металла возле крупных включений графита.

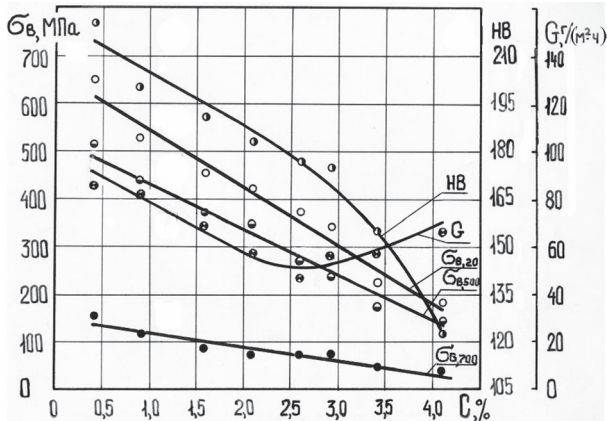


Рис. 1. Влияние углерода на предел прочности σ_B при 20, 500 и 700 °С на твердость НВ и износостойкость G железоуглеродистых сплавов

Несколько иные результаты получены при испытаниях на трещиностойкость (рис. 2). С увеличением содержания углерода до 1,51% вязкость разрушения K_{IC} при температуре 20 °С оставалась неизменной, при 500 °С – снижалась незначительно; более высокие концентрации углерода приводили к резкому снижению этого показателя. При температуре испытаний 700 °С имела место линейная обратно пропорциональная зависимость между содержанием углерода и K_{IC} .

В целом представленные выше результаты показывают, что графитизированные нелегированные стали по прочности, твердости, вязкости разрушения и износостойкости примерно в 2 раза превышают аналогичные показатели серых и высокопрочных чугунов.

Дальнейшее повышение механических и служебных свойств графитизированных сталей может быть достигнуто в результате легирования. В работе [2] исследовали влияние легирования Mn, Cr, Ni и Mo на структуру и механические свойства графитизированных сталей, модифицированных алюминием. С этой целью в 120-килограммовой индукционной печи с основной футеровкой выплавляли стали с базовым химическим составом: 1,38–1,40% C; 0,85–0,90% Si; 0,26–0,28% Al; 0,029–0,031% P; 0,022–0,027% S. Содержание ле-

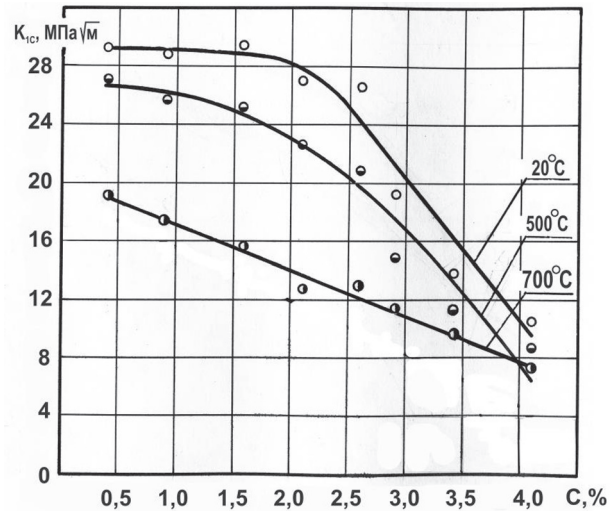


Рис. 2. Влияние углерода на вязкость разрушения K_{IC} железоуглеродистых сплавов при 20, 500 и 700 °С

гирующих элементов изменяли в диапазонах, приведенных в таблице. Жидкий металл разливали в сухие песчано-глинистые формы. Полученные отливки подвергали графитизирующему отжигу при 850 °С в течение 3 ч с последующим сфероидизирующим отжигом, предусматривающим $\alpha \leftrightarrow \gamma$ -превращение. Как показал металлографический анализ, во всех вариантах сталей включения графита имели вид мелких (10–40 мкм) равномерно распределенных выделений шаровидной и вермикулярной формы (рис. 3, а), при этом металлическая матрица практически полностью была представлена зернистым перлитом (рис. 3, б). С увеличением содержания легирующих элементов монотонно возрастали прочность, твердость и условный предел текучести при одновременном снижении относительного удлинения (см. таблицу).

Такое изменение свойств можно объяснить твердорастворным упрочнением металлической матрицы легирующими элементами. Критический коэффициент интенсивности напряжений изменялся от 33,9 до 40,6 МПа · √м и имел максимальное значение для стали 3-го варианта, комплекснолегированной 0,8% Mn, 0,3% Cr и 1,2% Ni.

Содержание легирующих элементов в составе графитизированных сталей и механические свойства

| Вариант стали | Количество легирующих элементов, % | | | | Механические свойства | | | | |
|---------------|------------------------------------|------|-----|------|-----------------------|----------------------|--------------|-----|--|
| | Mn | Cr | Ni | Mo | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | НВ | K_{IC} , $\text{МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$ |
| 1 | 0,80 | – | – | – | 418 | 288 | 8,3 | 195 | 33,9 |
| 2 | 0,80 | 0,30 | – | – | 582 | 334 | 7,6 | 197 | 38,3 |
| 3 | 0,80 | 0,30 | 1,2 | – | 697 | 348 | 7,5 | 217 | 40,6 |
| 4 | 1,80 | 0,30 | 1,2 | – | 775 | 433 | 5,0 | 241 | 39,8 |
| 5 | 1,80 | 0,30 | 1,2 | 0,32 | 917 | 479 | 4,5 | 255 | 36,6 |
| 6 | 1,80 | 0,60 | 1,2 | 0,32 | 920 | 525 | 3,0 | 255 | 34,7 |

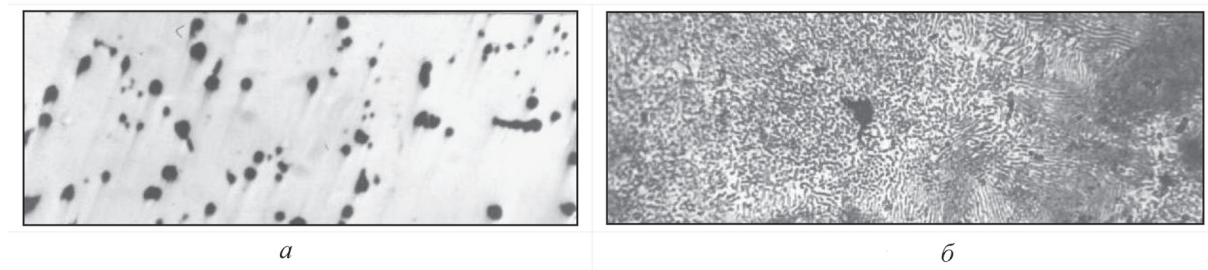


Рис. 3. Типичная структура сталей после термической обработки: *а* – нетравленные. $\times 100$; *б* – травленные. $\times 500$

Таким образом, легирование марганцем, хромом, никелем и молибденом повышает механические свойства графитизированных сталей в результате твердорастворного упрочнения. Установлено, что графитизированная сталь состава 1,38–1,40% С; 0,85–0,90% Si; 0,7–0,8% Mn; 0,25–0,3% Cr; 1,0–1,2% Ni; 0,25–0,28% Al; 0,029–0,031% P; 0,022–0,027% S после графитизирующего и последующего сфероидизирующего отжига имела вязкость разрушения $K_{IC} = 40\text{--}45 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$, что практически в 1,5 раза превышает аналогичные характеристики феррито-перлитных высокопрочных чугунов.

Выводы

Приведенные результаты показывают, что графитизированные стали в ряде случаев благодаря своему промежуточному расположению по составу и свойствам между низкоуглеродистыми сталями и чугунами могут обеспечить необходимое сочетание свойств конструкционного материала, например теплопроводности и прочности – для металлических форм, сопротивление изнашиванию – для деталей, работающих в условиях сухого трения, и, следовательно, повысить надежность и долговечность деталей машин металлургической и машиностроительной промышленности.

Литература

1. Г о д о р о в Р. П., Н и к о л о в М. В. Структура и свойства отливок из графитизированной стали. М.: Металлургия, 1976.
2. А н д р е й к о І., В о л ч о к І., О с т а ш О. и др. Міцність та циклічна тріщиностійкість низьколегованих графітованих сталей // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій: Зб. наук. праць. Львів ФМІ, 2004. С.691-696.
3. Я к о в л е в А. Ю., В о л ч о к І. П. Материалы для изготовления металлических форм // Литье и металлургия. 2007. № 4. С. 118–121.
4. К о л о т і л к і н О. Б. Розробка матеріалів для склоформувального устаткування з урахуванням дії силікатних розплавів: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Львів, 2004.