



*Influence of thickness of casting wall and the carbon and silicon contents on structure formation processes in modified graphitized steels is investigated.*

С. Б. БЕЛИКОВ, И. П. ВОЛЧОК, В. А. САВЧЕНКО, ЗНТУ,  
Н. А. СВИДУНОВИЧ, С. Е. БЕЛЬСКИЙ, Д. В. КУИС, БГТУ

УДК 669.017.11:669.15–194.5

## СТРУКТУРНАЯ ДИАГРАММА ГРАФИТИЗИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Основными сплавами в современном машиностроении являются сплавы на основе железа – стали и чугуны. Среди них особое место занимают графитизированные стали, чаще всего это заэвтектоидные сплавы с повышенным содержанием кремния и наличием в структуре включений свободного графита. Благодаря своему химическому составу и структуре они сочетают в себе положительные свойства чугуна (высокие демпфирующие свойства, термостойкость, окалиностойкость и т. д.) и конструкционных сталей (более высокие по сравнению с высокопрочным чугуном предел прочности, пластичность и вязкость). Основными факторами, сдерживающими широкое использование отливок из графитизированных сталей, являются недостаточно изученные процессы структурообразования этих материалов и необходимость проведения длительного и энергоемкого графитизирующего отжига для разложения структурно свободного цементита и получения феррито-перлитной структуры с включениями графита.

При производстве чугуна для приблизительного определения его структуры пользуются так называемыми структурными диаграммами [1], на которых обозначены области белого, половинчатого, перлитного, феррито-перлитного и ферритного чугунов, т. е. диаграммы иллюстрируют влияние элементов-графитизаторов (углерода и кремния) и скорости охлаждения (толщины стенки отливки) на степень графитизации чугунов. Для графитизированных сталей такие диаграммы отсутствуют, что в значительной мере сдерживает совершенствование процессов их производства.

В данной работе была поставлена задача исследовать влияние толщины стенки отливки и содержания углерода и кремния на процессы структурообразования в модифицированных графити-

зированных сталях. Для этого были проведены опытные плавки на сплавах с содержанием углерода от 0,6 до 1,2% и кремния от 1,0 до 1,6%. Модифицирование проводили путем присадки измельченных ферросилиция ФС-65 (ДСТУ 4127-2002) и алюминия марки А99 (ГОСТ 11069-74) в ковш перед заливкой жидкого металла. Для получения заданного содержания углерода сталь 20 науглероживали чугуном Л5, который, кроме того, менял начальное содержание кремния. Для получения заданного содержания кремния (за счет легирования и модифицирования) для каждой плавки отдельно рассчитывали общее количество ФС-65. Полученные сплавы имели химический состав: 0,61–1,19%С, 1,00–1,67%Si, 0,32–0,37%Mn; 0,12–0,17%Al, 0,008–0,014%S и 0,016–0,025%P.

Заливку металла проводили в сухие песчано-глинистые литейные формы, в которых получали ступенчатые отливки, ступени имели толщину  $h$  от 10 до 50 мм, что обеспечивало различную скорость охлаждения.

Результаты исследований показали, что в результате модифицирования алюминием и ферросилицием в структуре сталей вследствие графитизирующего действия кремния и алюминия в литом состоянии образовалась графитная фаза. При этом включения структурно свободного цементита в количестве 1–4% наблюдались лишь в заэвтектоидных сталях.

В зависимости от толщины стенки отливки и содержания углерода и кремния изменялись количество графитной фазы  $V_g$ , параметр формы графитовых включений  $\lambda_r$  и их количество  $n$ . По результатам количественной металлографии в зависимости от химического состава и скорости охлаждения отливок в структуре металлической основы литых графитизированных сталей присут-

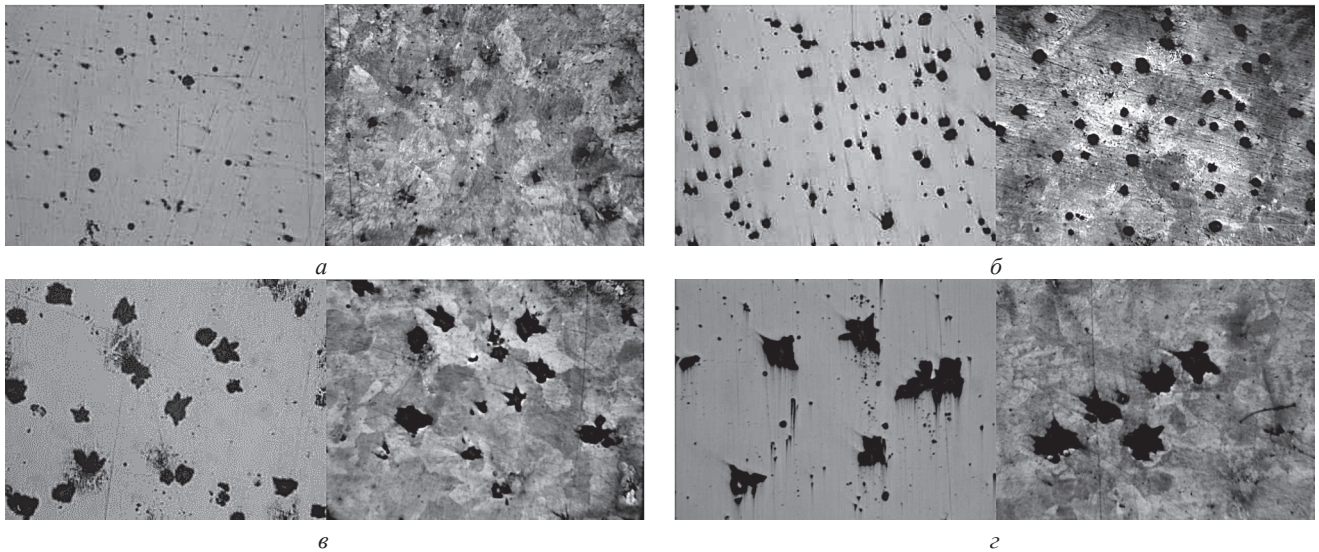


Рис. 1. Структура модифицированных сталей: *a, в* – не травленные образцы; *б, г* – травленные образцы.  $\times 200$ ; *a* – 0,61%С, 1,62%Si,  $h = 10$  мм; *б* – 1,19%С, 1,21%Si,  $h = 10$  мм; *в* – 1,19%С, 1,21%Si,  $h = 50$  мм; *г* – 1,19%С, 1,61%Si,  $h = 50$  мм

ствовали графит, ферритная, перлитная и цементитная фазы. При этом распределение графитных включений изменялось от ШГ2 (рис. 1, *a*) до ШГ10 (рис. 1, *б*) по ГОСТ 3443-87 [2].

Объем графитной фазы  $V_r$  увеличивался с повышением как толщины стенки отливки, так и количества модификатора. С увеличением содержания углерода от 0,61 до 1,04% и толщины стенки отливки с 10 до 50 мм в сплавах наблюдалось увеличение количества графитной фазы  $V_r$  и изменение размеров шаровидных включений, равномерно распределенных по сечению образцов. Для сплавов с 1,19% С при толщине стенки 10 мм включения графита имели шаровидную форму и равномерно распределялись по площади шлифа (рис. 1, *б*). С увеличением толщины стенки отливки этих сплавов форма включений графита изменялась на неблагоприятную, почти хлопьевидную (рис. 1, *в*), а с ростом содержания кремния увеличивались размеры этих включений (рис. 1, *г*).

В результате регрессионной обработки экспериментальных данных было получено уравнение, характеризующее зависимость объема графитной фазы сталей  $V_r$  от содержания углерода, кремния и скорости кристаллизации (толщины стенки  $h$ ) отливок. В натуральном масштабе уравнение и соответствующий коэффициент корреляции  $r$  имели следующий вид:

$$V_r = 3,85 - 0,01h - 3,25C - 3,83Si - 0,08hC + 0,02hSi + 4,17CSi + 0,08hCSi, r = 0,98. \quad (1)$$

На основании полученных в работе данных металлографического анализа структур и регрессионного анализа были построены структурные диаграммы в координатах: содержание углерода, толщина стенки отливки для сталей с содержа-

нием кремния 1,2 и 1,6%. При этом для сталей в литом состоянии ставилась задача на диаграмме отобразить зоны, соответствующие структурам перлит + цементит, перлит + графит + цементит, перлит + графит и перлит + феррит + графит. По данным металлографического анализа, было установлено, что структура перлит + графит + цементит имела место при низком содержании углерода и толщине стенки отливки 10 и 20 мм; структуру перлит + графит независимо от толщины стенки отливки и содержания кремния имели стали, в которых количество графита превышало  $2 \pm 0,3$  об.%; структуру перлит + графит + феррит – стали, в которых количество графита превышало  $3 \pm 0,3$  об.%.

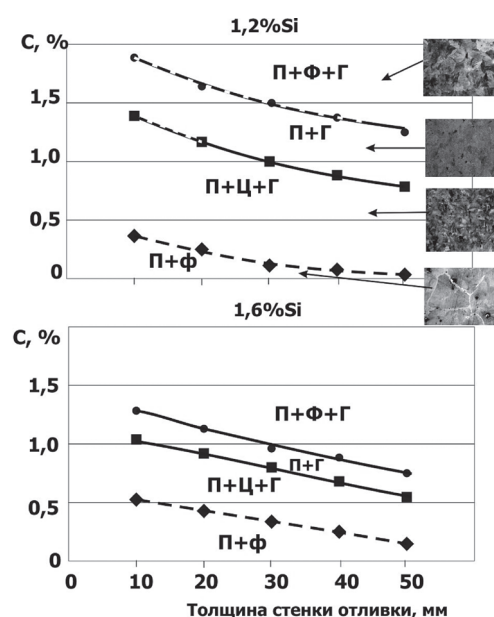


Рис. 2. Структурные диаграммы графитизированных сталей: сплошные линии – содержание углерода в пределах эксперимента; пунктирные – интерполяция на основе уравнения регрессии

Исходя из этого, в уравнении регрессии (формула (1)) задавались количеством графита 0, 2, 3 об.% и постоянным содержанием кремния 1,2 и 1,6% и рассчитывали содержание углерода для различной толщины отливки. Полученные структурные диаграммы показаны на рис. 2.

Сопоставления структур реальных сталей, в том числе с содержанием углерода от 0,6 до 1,2%, и полученных диаграмм показали хорошее соответствие между собой.

Анализируя полученные диаграммы, следует отметить, что наибольшее практическое значение имеют линии, разделяющие между собой зоны П + Ц + Г и П + Г. Эти линии позволяют определить условия (содержание углерода и кремния, и толщина стенки отливки), по которым возможно получение сталей без структурно свободного вторичного цементита, т. е. условия, исключающие необходимость проведения графитизирующего отжига.

#### Литература

1. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение. М.: Машиностроение, 1980.
2. Савченко В. О. Вплив модифікування на властивості графітованих сталей // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. тр. Вып.55. Днепропетровск: ПГАСА, 2010. С. 118–122.