

С. И. ПОПЕЛЬ, О. А. ЕСИН и Ю. П. НИКИТИН

## ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДА НА МЕЖФАЗНОЕ НАТЯЖЕНИЕ ЖЕЛЕЗА НА ГРАНИЦЕ СО ШЛАКОМ

(Представлено академиком А. Н. Фрумкинм 10 I 1952)

До настоящего времени этот вопрос экспериментально не изучался, несмотря на его большое значение для черной металлургии. В ряде работ выяснялось лишь влияние углерода на поверхностное натяжение железа на границе с газами (<sup>1,2</sup>). Хотя в них использовался один и тот же метод максимального давления пузырька, однако найденные отдельными авторами величины сильно различались между собой. Общим в приведенных исследованиях являлось только падение поверхностного натяжения с ростом концентрации углерода (по крайней мере, начиная с 0,2% С). Иначе говоря, в них констатировалась положительная адсорбция углерода на границе металл — газ.

Применив метод лежащей капли в сочетании с рентгенофлуоресцентным методом (³), мы определили межфазное натяжение ряда железоуглеродистых сплавов на границе со шлаком ( $\sigma_{m-m}$ ) при температурах 1450—1500°.

Опыты проводились в графитовых тиглях, на дне которых располагалась корундовая подкладка с покоящейся на ней каплей. Химические анализы подтвердили отсутствие заметного науглероживания металла. Капли имели одинаковый вес (9 г) и готовились сплавлением безуглеродистого железа с графитом в различных пропорциях. Шлак служила синтетическая смесь состава 39% CaO, 36% SiO<sub>2</sub> и 26% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, не содержащая FeO. После опыта концентрация глинозема в нем повышалась на 3—4%, в то время как Fe (общее) составляло  $\leq 0,8\%$ . Так как шлак смачивает подкладку лучше металла, то краевой угол у всех капель был острый.

Необходимые значения плотностей для железоуглеродистых сплавов были взяты из справочников, а для шлака ориентировочно оценены по правилу смешения (³).

Как отмечалось ранее (³), существующие интегральные формулы для приближенного расчета межфазного или поверхностного натяжения дают сильно расходящиеся результаты, когда капля имеет в вершине заметную кривизну. Кроме того, некоторые из них неудобны для практического применения вследствие своей громоздкости. В связи с этим мы воспользовались более удобным и достаточно точным методом расчета, основанном на графическом интегрировании\*.

Как известно, дифференциальное уравнение поверхности капли, находящейся под действием сил тяжести и поверхностного натяже-

\* Ценная помощь в этом вопросе была оказана нам Н. Н. Красовским.

ния, имеет вид:

$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{\Delta d}{\sigma} x + \frac{2}{R_0} \quad (1)$$

Здесь  $R_1$  и  $R_2$  — главные радиусы кривизны в любой точке поверхности,  $\Delta d$  — разность плотностей контактирующих фаз,  $\sigma$  — межфазное или поверхностное натяжение,  $x$  — расстояние данной точки от вершины капли по вертикали и  $R_0$  — радиус кривизны в вершине.

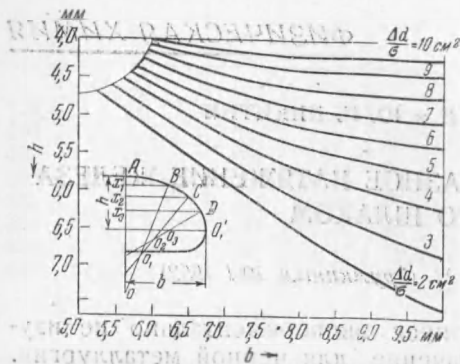


Рис. 1. Кривые для определения межфазного или поверхностного натяжений по форме лежащей капли

Графическое интегрирование этого уравнения может быть осуществлено, например, следующим путем\*. Задаваясь произвольным значением  $R_0$ , проводим в каком-либо масштабе малую дугу  $AB$  (см. рис. 1) из точки  $O$ , лежащей на вертикальной оси симметрии капли. Затем подставляем в выражение (1) найденную из чертежа ординату  $x_1$  точки  $B$ , а также произвольно выбранное значение  $\Delta d/\sigma$  и  $R_1 = R_0$ , что позволяет подсчитать  $R_2$  в точке  $B$ .

Далее радиусом  $R_2$  проводим из центра, лежащего на отрезке  $BO$ , дугу  $BC$ . По чертежу отыскиваем  $x_2$  и радиус кривизны  $R_1$ . Под-

ставляем их в уравнение (1) и определяем  $R_2$ , и т. д. Построение ведется до тех пор, пока центр кривизны не окажется на одном уровне с точкой  $O_1$ , лежащей на экваторе капли.

Повторяя построения для различных  $R_0$ , но для принятого значения  $\Delta d/\sigma$ , получим ряд точек  $O_i$ . Проходящая через них плавная кривая отвечает, следовательно, условию  $\Delta d/\sigma = \text{const}$ . Проводя аналогичные построения для других  $\Delta d/\sigma$ , находим семейство кривых, представленное на рис. 1. Последний может быть использован для определения межфазного натяжения по экспериментально найденным плотностям фаз  $\Delta d$ , расстоянию вершины капли от экватора  $h$  и ее радиусу  $b$ . Методика расчета проста: зная размеры капли ( $h$  и  $b$ ), отыскиваем на рис. 1 соответствующее им отношение  $\Delta d/\sigma$ , а по нему и величине  $\Delta d$  получаем значение  $\sigma$ .

Результаты наших измерений  $h$  и  $b$ , пересчитанные указанным способом на  $\sigma$ , представлены на рис. 2. Из него вытекает, что межфазное натяжение железа на границе со шлаком закономерно понижается с увеличением концентрации углерода. Другими словами, углерод остается здесь, как и на границе с воздухом, поверхностно-активным компонентом расплава.

Следует также отметить, что величины межфазного и поверхностного натяжений (взятые по данным (1)) не слишком отличаются друг от друга. Это объясняется, повидимому, тем, что входящие

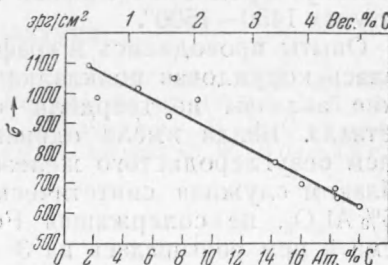


Рис. 2. Влияние углерода на межфазное натяжение в системе Fe, C/CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при 1450—1500°

\* Аналогичный путь используется при расчете каплевидных резервуаров (4).

в состав использованного шлака окислы практически совершенно нерастворимы в металлической фазе, а железо и углерод (при выбранных условиях) — в шлаке. Поэтому энергетическое состояние любой частицы в одной жидкости существенно иное, чем в другой, и для перехода ее из одной фазы в другую необходимо преодолеть значительный потенциальный барьер.

Уральский политехнический институт  
им. С. М. Кирова  
Свердловск

Поступило  
4 I 1952

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Б. В. Старк и С. И. Филиппов, Изв. АН СССР, ОТН, № 3, 413 (1949).  
<sup>2</sup> F. Sauerwald u. B. Krause, Zs. anorg. allg. Chem., **223**, 84 (1935).  
<sup>3</sup> С. И. Попель, О. А. Есин и П. В. Гельд, ДАН, **74**, 1097 (1950); **75**, 227 (1950). <sup>4</sup> Г. М. Чичко, Расчет каплевидных резервуаров, М.—Л., 1951.