

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ГРАНИЦ ДВУХФАЗНОЙ ЗОНЫ ПРИ ЗАТВЕРДЕВАНИИ СТАЛЬНЫХ СЛИТКОВ

Шенец С. Л., Кабищов С.М.

Белорусский национальный технический университет

Согласно данным Б.А. Баума [1] в любом расплаве даже после расплавления всех компонентов продолжают осуществляться переходы от различных типов ближнего порядка компонентов шихты к более однородной атомной структуре. Допустимо предположить, что формирование кластеров будет сопровождаться вытеснением некоторой доли примесей в межкластерную зону, как это происходит при фазовом переходе. Как следствие, при снижении температуры до границы ликвидуса в твердую фазу в первую очередь будут переходить кластеры, не загрязненные примесями. Очевидно, что температуры кристаллизации для кластеров и жидкости в межкластерной зоне будут различны.

В некоторых работах, например [2], приведены экспериментальные значения температур ликвидуса и солидуса для различных сталей. Но при проведении теоретических исследований и на практике необходимо знать, каким образом изменение концентрации различных легирующих элементов и примесей в расплаве отражается на значениях температур ликвидуса и солидуса. В работе [3] для расчета температур ликвидуса и солидуса сталей предлагается использовать следующую зависимость:

$$T_L = T_{\text{плав Fe}} - (\Sigma(a_0 + a_1 \cdot [i] + a_2 \cdot [i]^2)), \quad (1)$$

где $T_{\text{плав Fe}}$ – температура плавления чистого железа (в соответствии с большей частью известных рекомендаций $T_{\text{плав Fe}} = 1539$ °С); a_0 – коэффициент приведения температуры плавления чистого железа (вводится в случае принятия значения температуры плавления железа отличного от приведенного выше); a_1 и a_2 – коэффициенты значимости 1-го и 2-го порядка для соответствующего элемента i , содержащегося в стали данной марки; $[i]$ – содержание элемента i в стали данной марки, %.

Значения коэффициентов a_0 ; a_1 и a_2 , приведенные в различных источниках, отличаются. И их применение порой приводит к существенной погрешности расчетных значений по сравнению с экспериментальными данными. Согласно данным, представленным в статье [4], наиболее высокой точностью при расчете температуры ликвидус углеродистой стали с повышенным содержанием хрома, марганца и других элементов обладают методики [5] и [6].

Кроме информации о температуре ликвидуса сплава на практике часто необходимы данные о температуре, при которой завершается кристаллизация металла. В монографии [7] для расчета температур ликвидуса и солидуса предлагается использовать зависимость, согласно которой снижение точки плавления железа под влиянием примесей равно:

$$\Delta T = \frac{(1 - k_0) N_L R T_s^2}{L},$$

где N_L – мольная доля примесного элемента в железе; R – газовая постоянная ($R = 8,319$ Дж/(моль·К)); T_S – температура плавления чистого железа, К; L – мольная скрытая теплота затвердевания ($L = 1,53655 \cdot 10^4$ Дж/моль).

Коэффициент k_0 для каждого элемента при расчете температур ликвидуса и солидуса определяются с помощью соответствующей бинарной диаграммы.

Оценим точность расчетных результатов на примере стали ШХ15СГ. Так расчет температуры ликвидус для стали ШХ15СГ, состав которой приведен в таблице 1, с применением коэффициентов согласно рекомендациям [5] и [6] дал следующие результаты:

$$T_L = 1385,89 \text{ } ^\circ\text{C} [6], T_L = 1432,42 \text{ } ^\circ\text{C} [7].$$

Таблица 1 – Химический состав стали ШХ15СГ

Элемент	C	Si	Mn	Cr	Cu	Ni	P	S
Содержание, %	1,0	0,55	1,0	1,45	0,2	0,2	0,022	0,015

Согласно данным [8] температура ликвидус шарикоподшипниковой стали ШХ15СГ равна $1450 \text{ } ^\circ\text{C}$. Как видим, оба значения имеют довольно большую погрешность. Расчет температуры ликвидуса с применением коэффициентов, приведенных в работе [9] дает более точные результаты. Так для стали ШХ15СГ $T_L = 1451,7 \text{ } ^\circ\text{C}$. Погрешность относительно экспериментальных данных составляет чуть более 1 % и может объясняться тем, что состав стали ШХ15СГ, который использовался в расчетах, отличается от того, что рассматривался в работе [10]. Погрешность расчетных значений температуры ликвидус для углеродистых и других низколегированных сталей не превышает 3–5 %. Таким образом, формула (1) с коэффициентами, приведенными в работе [9], может использоваться для оценки температуры ликвидуса сталей, в то числе и с повышенным содержанием хрома, марганца и других элементов.

Значение температуры солидуса согласно экспериментальным данным, приведенным в работе [10], для стали ШХ15СГ составляет $1317 \text{ } ^\circ\text{C}$, а стали ШХ15 – $1331 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Расчет по методике [9] для стали ШХ15СГ дает результат $T_S = 1370 \text{ } ^\circ\text{C}$. В данном случае применение коэффициентов, рекомендованных в работе [9], не позволяет получить результаты с приемлемой погрешностью.

Учитывая предположение относительно вытеснения примесей из кластеров, температуру солидуса сплава можно рассчитать, как температуру кристаллизации жидкости в межкластерной зоне [11].

$$T_S = T_L - \Sigma(a_0 + a_1 \cdot [i] \cdot (1 + k_i)) \quad (2)$$

где k_i – коэффициент распределения элемента между твердой и жидкой фазой при кристаллизации [9].

С целью проверки точности коэффициентов из работы [9] при расчете температуры ликвидус и предлагаемой формулы (2) при расчете температуры солидус выполним расчеты для некоторых сталей. Полученные значения приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчетные и экспериментальные [2] значения температур ликвидуса и солидуса сталей

Марка стали		ШХ15СГ	P18	Сталь 20	20ХН3А	12Х13
T_L	расчет	1451,78	1450,91	1516,14	1509,18	1507,94
	эксперимент	1451	1454	1518	1508	1504
T_S	расчет	1312,96	1313,09	1480,62	1468,24	1465,29
	эксперимент	1317	1312	1480	1470	1470

Сравнение полученных результатов и опытных данных показывает достаточно высокую точность предложенной методики. Так для стали ШХ15СГ измеренные температуры ликвидуса и солидуса равны 1451 °С и 1317 °С соответственно, а расчетные – 1451,78 °С и 1312,96 °С. Полученные расхождения объясняются тем, что в расчетах принимался усредненный состав стали, который, вероятнее всего, отличается от экспериментального.

Литература:

1. Баум Б.А. Взаимовлияние жидкого и твердого состояний сплавов /Б.А. Баум, Е.Г. Клименков, Г.В. Тягунов // Изв. АН СССР. Металлы. 1986. – №3. – С. 19-24.
2. Баландин, Г.Ф. Основы теории формирования отливки. // М.: Машиностроение, 1976. – 328 с.
3. Задумкин С.Н. Приближенная оценка критических температур металлических жидкостей // М.: Металлургия, 1960. – 63 с.
4. Смирнов А.Н. Расчет температуры ликвидус стали / Смирнов А.Н., Неделькович Л., Джурджевич М. [и др.]// Сталь, 1996. – №3. – С.15-19.
5. Hirai M., Kanamru K., Mori H. II Tetsu to Hagane 52, 1969 – P. 85.
6. Andrews K. W. Solidification ranges of steel // A note submitted to the alloy phase diagram date Committee of the Metals Society, 1981. – P. 1–8.
7. Yayas, A., Chipman, J. Trans. AIME, – 1939. – 135 с.
8. Хасин Г.А., Дьяконова Л.В.. Теплофизические и электрические характеристики ряда легированных сталей и сплавов при высоких температурах. Сб. Проблемы стального слитка. 1969. том 4. с. 71 – 85.
9. Смирнов А.Н. Крупный слиток: [монография] / [Смирнов А.Н.](#), Макуров С.Л., Сафонов В.М., Цупрун А.Ю.// Донецкий национальный технический ун-т. – Донецк : Вебер, 2009. – 279 с.
10. Самойлович, Ю.А. Стальной слиток. Т. 2. Затвердевание и охлаждение /Самойлович Ю.А., Тимошпольский В.И., Трусова И.А. [и др.]// Мн.: Беларуская навука, – 2000. – 637 с.
11. Кабишов, С.М. Определение границ двухфазной зоны углеродистых и легированных сталей/ Кабишов С.М. [и др.]// Литье и металлургия. – 2015. – №2. – С. 82-88.