

7. Скребцов А.М. Кривая охлаждения металлического расплава как источник информации о его температуропроводности и изменении строения охлаждения жидкости / А.М. Скребцов, А.О. Секачев // Процессы литья. - 1997. - №1. - С. 3-13.
8. Есин О.А. Физическая химия пирометаллургических процессов ч. II / О.А.Есин, П.В. Гельд. - Свердловск – М.: Металлургия, 1954. - 606 с.

Рецензент: В.Г. Ефременко
д-р техн. наук., проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 28.03.2011

УДК 621.745.435:62-932.2

Троцан А. И.¹, Каверинский В. В.², Бродецкий И. Л.³, Карликова Я.П.⁴

МОДИФИЦИРОВАНИЕ РАСПЛАВА ДИСПЕРСНЫМИ ЧАСТИЦАМИ С УЧЕТОМ ИХ РАЗБРОСА ПО РАЗМЕРАМ

Построена конечноразностная математическая модель растворения частиц модификаторов с учетом их разброса по размерам в условиях охлаждения с переменной скоростью. Определены исходные величины вводимых дисперсных частиц, их общая масса и температура расплава, необходимые для эффективного модифицирования.

Ключевые слова: *растворение, модифицирование, дисперсные порошки, расплав, кристаллизация, конечноразностное моделирование.*

Троцан А. І., Каверинський В. В., Бродецький І. Л., Карлікова Я.П. Модифікування розплаву дисперсними частками з урахуванням їх розбігу за розмірами. Побудована скінченорізна математична модель розчинення твердих часток модифікаторів, яка враховує вплив їх розбігу за розмірами в умовах охолодження з перемінною швидкістю. Визначені початкові величини дисперсних часток, загальна маса і температура розплаву при їх вводиті, необхідні для забезпечення найбільш ефективного модифікування.

Ключові слова: *розчинення, модифікування, дисперсні порошки, розплав, кристалізація, скінченорізне моделювання.*

A. I. Trotsan, V. V. Kaverinskiy, I. L. Brodeckyy, J.P. Karlikova. Melt modifying by the dispersible particles considering their stragglng in the sizes. The finite differences mathematical model of dissolution of solid particles in fluent cooled melt, subject to influence of a scatter of their sizes on process of dissolution is constructed. Initial sizes of dispersible parts, their overall mass and melt temperature during their input, necessary for the most effective modification are determined.

Keywords: *dissolution, modifying, disperse powders, melt, crystallization, method of finite differences.*

Постановка проблемы. Для улучшения структурных характеристик литого металла традиционно используются тугоплавкие, малорастворимые соединения (модификаторы второго рода), вводимые в расплав для получения мелкозернистой структуры [1, 2]. При этом одним из эффективных, но в то же время сложным и дорогостоящим способом модифицирования является ввод в железоуглеродистые расплавы ультрадисперсных порошков (УДП), частицы которых соизмеримы с размерами центров кристаллизации. В то же время технологии производства, хранения и ввода УДП сложны и затратны [3, 4]. Поэтому представляется целесообразным определение технологических параметров введения в расплав более крупных частиц, способных раство-

¹ д-р техн. наук, зав. кафедрой, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

² вед. инженер, Институт проблем материаловедения НАН Украины, г. Киев

³ канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник, Институт проблем материаловедения НАН Украины, г. Киев

⁴ канд. техн. наук, ассистент, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

ряться до размеров центров кристаллизации к моменту ее начала.

Анализ последних исследований и публикаций. В работах [5 – 8] рассмотрено введение в расплав относительно крупных частиц и определены условия, при которых их растворение происходит не полностью, а до размеров близких к размерам зародышей кристаллизации к моменту начала затвердевания. В построенных моделях растворения мы полагали размер всех частиц одинаковым и не учитывали взаимодействия между ними [5, 7], в то время, как учет их разброса по размерам может позволить повысить эффективность модифицирования. Кроме того, ни одна из построенных моделей не учитывала изменение соотношения между жидкой и твердой фазой при охлаждении расплава ниже ликвидуса [6]; количество жидкой фазы принималось постоянным, что справедливо только для температур выше ликвидуса и может использоваться для грубой оценки процессов, происходящих лишь немного ниже ликвидуса [8]. Для более точной оценки поведения частиц в кристаллизующемся расплаве (ниже ликвидуса) следует учесть тот факт, что соотношение между жидкой и твердой фазой в ходе охлаждения изменяется. Во всех моделях количество частиц принималось неизменным на протяжении всего их периода пребывания в расплаве. Это вполне справедливо, но только для частиц абсолютно одинакового размера, «время жизни» которых приходится на их пребывание при температуре выше ликвидуса, так как при таком допущении процесс растворения каждой из частиц абсолютно идентичен. В настоящей работе предложена математическая модель растворения частиц модификатора в железоуглеродистом расплаве, которая учитывает распределение частиц по размерам, что позволяет получать информацию об изменении во времени количества частиц модификатора и о влиянии разброса их размеров на особенности процессов растворения.

Цель статьи – анализ влияния разброса по размерам вводимых частиц модификатора на их поведение в расплаве до начала и в ходе кристаллизации и уточнение на его основе оптимальных технологических параметров модифицирования.

Изложение основного материала. Концентрация растворяемых элементов модификатора в жидком металле изменяется за счёт растворения находящихся в расплаве его частиц. Мелкие частицы при этом растворяются быстрее, следовательно (особенно в начальный момент, пока они ещё полностью не растворились) в большей степени влияют на изменение концентрации растворяемых элементов в расплаве. За счёт растворения уменьшается градиент концентрации между поверхностью частицы (где имеет место равновесие реакции диссоциации) и расплавом, тем самым растворение тормозит само себя. Крупные частицы, хотя растворяются более медленно [7, 8], также влияют на изменение градиента концентрации и скорости растворения частиц всех размеров. При достижении полного растворения частиц прекращается их влияние на градиент концентрации. Растворяясь, частицы уменьшаются в размере, что приводит к увеличению скорости растворения, но и скорость насыщения расплава растворяющимся веществом за счёт частиц данной группы и исходного размера возрастает [5]. Ниже температуры солидуса частицы могут уходить из расплава не только посредством растворения, но также вследствие поглощения их твердой фазой в виде неметаллических включений, что может произойти с любой частицей независимо от размера. Частицы, вросшие в твердую фазу, можно считать не растворяющимися в жидкости (диффузия в твердом состоянии идёт во много раз медленнее) и не оказывающими влияния на изменение градиента концентрации и скорости растворения частиц, ещё находящихся в жидкости.

Исходя их вышеизложенного, для описания растворения частиц в расплаве с учётом разброса по размерам нами разработана расширенная конечноразностная математическая модель их поведения в жидком металле перед началом и в ходе кристаллизации.

Сущность модели в следующем. Задаваемые начальные условия: максимальный и минимальный размер вводимых частиц, начальные равновесные концентрации компонентов модификатора в расплаве при температуре ввода (вычисляются через константу равновесия), температура расплава при вводе модификатора, масса введённого модификатора на тонну расплава, начальный размер частицы, для которой будут производиться вывод результатов расчета изменения размеров. Распределение частиц по размерам полагаем нормальным. Задаёмся шагом по времени (от 0,01 до 0,05 с) и числом интервалов разбиения по размерам частиц (для достоверных результатов берём ~ 100 интервалов, так как при меньшем количестве, как установлено нами в ходе вычислений, будет заметна дискретность расчёта; большее количество не добавляет существенной точности). Внутри каждого интервала полагаем размер частиц усреднено-одинаковым, количество частиц в каждом интервале принимается соответственно заданному нормальному

закону их распределения по размерам. Расчёт количества общего количества частиц и количества частиц в каждой группе исходя из массы вводимого модификатора и закона распределения по размерам для данной фракции производится соответствующей подпрограммой, написанной нами компьютерной программой. До момента достижения расплавом температуры ликвидуса проводим вычисления по следующему алгоритму.

Берём из массива первое значение размеров частиц (частицы из первой группы), вычисляем, каким станет размер через заданный нами малый промежуток времени (шаг по времени). Сохраняем в массив новое значение размера частицы. Вычисляем разницу масс исходных частиц группы и частично растворившихся за заданный шаг по времени. Прибавляем эту разницу масс к общему изменению массы за данный шаг по времени. Полагаем, что число частиц в группе не изменяется. Принимаем, что группа исчезает вся полностью, если вычисления показывают, что новый диаметр через заданный шаг по времени будет нулевым. Количество частиц в интервале, независимо от того, стало ли оно равным нулю или осталось прежним, сохраняем в массиве. Затем берём значение размера частиц из следующего интервала и продельваем ту же операцию. И так пока не переберём все интервалы. Зная, какая масса была растворена с частиц из всех групп, вычисляем изменение концентрации элементов модификатора.

Затем вычисляем изменение температуры за заданный шаг по времени, изменение вязкости расплава, коэффициента диффузии, константы равновесия, изменение равновесных концентраций элементов модификатора. Проводим подсчёт полностью растворившихся частиц (частицы из исчезнувших групп) и не растворившихся. Вычисляем изменение размеров частицы с исследуемым заданным начальным размером. Переходим к следующему шагу по времени, конечные параметры предыдущего интервала становятся начальными для следующего. Вновь выполняем вышеуказанные операции для новых начальных условий. Результаты расчётов каждый раз сохраняем в файл Excel каждый раз в новую строчку, получая тем самым информацию о ходе изменения параметров во времени. И так пока не дойдём до температуры ликвидуса. Температура ликвидуса вычисляется автоматически в зависимости от заданного нами содержания углерода (аппроксимация линий диаграммы Fe-C).

Алгоритм расчёта при температурах ниже линии ликвидус по своим основным принципам сходен с таковым, выше неё, но имеются некоторые особенности. Скорость охлаждения задаётся значительно более медленной, так как выделяющаяся теплота кристаллизации существенно замедляет охлаждение. При каждом следующем шаге по времени пересчитывается соотношение жидкой и твёрдой фазы согласно диаграмме состояния. Приращение доли частиц оказавшихся на данный момент внутри твёрдой фазы считаем пропорциональным приращению доли твёрдой фазы. Долю растворившихся и остающихся на данный момент в жидкости в твёрдой фазе (неметаллических включений). Приращение концентрации компонентов модификатора на каждом промежутке времени рассчитываем с учётом того, что количество жидкой фазы, в которую переходит вещество частиц уменьшается, а количество самих частиц снижается не только за счёт растворения, но и за счёт образования неметаллических включений. Расчёт ведём до тех пор, пока не дойдём до температуры солидуса (для содержания углерода $>0,1\%$) или до начала перитектического превращения. Ниже считать нет смысла, так как в этих условиях жидкости уже мало и, если частицы сохранились до того времени, то они скорее станут неметаллическими включениями, чем центрами кристаллизации.

Для расчета растворения частиц на основе предложенной модели и алгоритма ее расчета написана компьютерная программа на языке Delphi. В качестве примера показано применение разработанной модели для анализа растворения порошка TiN (частицы размером 15...25 мкм), вводимого в железоуглеродистый расплав при температуре 1550 °С. Содержание углерода прием равным 0,1 %. Начальное содержание Ti и N – по 0,006 %. Скорость охлаждения до температуры ликвидуса 0,5 град./с, ниже температуры ликвидуса 0,1 град./с. (выделяющаяся скрытая теплота кристаллизации замедляет охлаждение). Масса модификатора 0,05 кг/т.

На рис.1а показано изменение размеров во времени для частиц с разным исходным диаметром, входящих в вышеуказанный интервал. Сравним его с кривыми рис.1б, где приведена кинетика растворения таких же частиц, в тех же условиях, но все частицы полагаем одинакового размера и не учитываем изменение количества жидкости и частиц во времени. Из расчётов и приведенных графиков видно, что если у нас присутствуют частицы разного размера, то самые мелкие из них растворяются несколько быстрее, чем, если бы все частицы были одинаковы. Это связано с тем, что мелкие частицы растворяются интенсивнее, тем самым, быстрее крупных

снижают градиент концентрации и замедляют растворение. Если все частицы одинаково мелкие, замедление растворения сильнее, чем, если часть из них более крупная.

Частицы с исходным размером 20 мкм в случае присутствия одинакового количества больших и меньших (средняя кривая на рис.1а) частиц будут растворяться чуть медленнее, чем, если бы все частицы были одинаковыми. Это связано с тем, что наличие мелких частиц тормозит растворение более крупных сильнее, чем если бы все частицы были столь же крупными. Тот же эффект, но в значительно большей степени мы наблюдаем с частицами 25 мкм. Быстро растворившиеся вначале мелкие частицы уменьшили градиент концентрации и замедлили их без того не слишком интенсивное растворение.

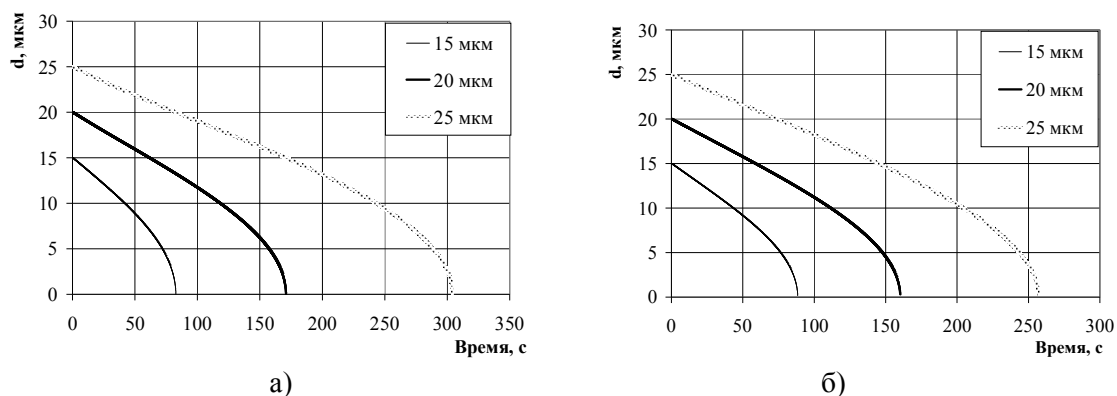


Рисунок 1 – Изменение размера частиц TiN во времени при растворении в зависимости от начального диаметра. Исходные размеры частиц: от 15...25 мкм, масса порошка 0,05 кг/т: а) во вводимой фракции присутствуют частицы всех размеров от минимального до максимального, распределение по размерам нормальное; б) во вводимой фракции присутствуют частицы только одного определённого размера

Следует отметить, что даже для самой маленькой частицы для растворения требуется некоторое время, поэтому, до определённого момента количество частиц в жидкости остаётся постоянным (если мы вводим частицы при температуре расплава выше ликвидуса), затем их количество уменьшается за счёт растворения наиболее мелкой фракции. После достижения температуры ликвидуса, частицы начинают уходить из жидкости не только за счёт растворения, но и за счёт образования ими неметаллических включений. Если температура расплава при вводе слишком низкая, скорость охлаждения достаточно высокая или вводимые частицы слишком крупные, то к моменту достижения температуры ликвидуса может не оказаться полностью растворившихся частиц и они будут уходить из расплава, преимущественно становясь неметаллическими включениями. Это указывает на то, что использование слишком крупной фракции частиц может оказаться скорее вредным, чем полезным.

На рис.2 приведена зависимость числа частиц TiN, находящихся в расплаве, от времени. Первые 38 секунд количество частиц в расплаве неизменно.

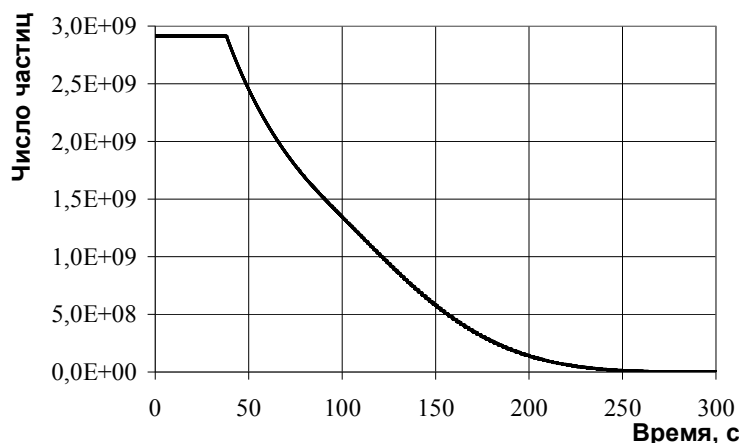


Рисунок 2 – Изменение во времени количества частиц TiN, находящихся в расплаве; исходные размеры частиц: от 15 до 25 мкм, масса вводимого порошка 0,05 кг/т

Далее расплав в условиях данной скорости охлаждения достигает температуры согласно расчётам, 1531°C что соответствует температуре начала кристаллизации.

Таким образом, частиц растворившихся полностью до начала кристаллизации в данном случае нет. Как следует из рис. 1а, даже частицы минимального размера (15 мкм) растворяются в данных условиях около 80 с, при этом расплав охладится ниже ликвидуса. Затем, общее количество частиц находящихся в жидкости уменьшается. До ~80-й секунды, как показали расчёты, уменьшение количества частиц в жидкости идёт только за счёт уменьшения доли жидкой фазы (так как размер частиц достаточно крупный и даже самые мелкие из них до этого момента не растворятся). После истечения этого времени начинает работать механизм полного растворения части введённых частиц; тогда же могут появиться и первые дополнительные центры кристаллизации.

Количество частиц, ставших неметаллическими включениями, составит $\sim 1,2 \cdot 10^9$ штук на тонну, что составляет около 42% от общего числа введённых частиц. Дальнейшее исключение частиц из жидкой фазы идёт как за счёт растворения, так и за счёт образования включений.

Каждая частица, которая растворяется полностью, проходит стадию, когда она имеет размер, соизмеримый с центром кристаллизации и длится, согласно расчётам, доли секунды. Если за это время на частицу осели атомы железа, то она становится центром кристаллизации, если нет, то растворяется полностью. По прошествии 250 секунд (рис.2) количество частиц, ещё находящихся в жидкости становится крайне малым ($\sim 1,2 \cdot 10^7$ штук на тонну или 0,4% от числа введённых); через 300 секунд в жидкости останется около 1000 частиц на тонну и через 302 секунды частиц, находящихся в жидкости не останется. При этом ещё ~6,3% объема металла будет оставаться жидким. Количество растворившихся частиц $\sim 7,2 \cdot 10^8$ на тонну, что составляет 24,7% от общего числа введённых частиц. Среди них есть и те, которые растворились не полностью, а стали центрами кристаллизации, но большая часть частиц в данном случае, как показывают расчёты по программе, становятся достаточно крупными неметаллическими включениями, так моменту начала кристаллизации размеры частиц порошка, согласно вычислениям, составляют от 8 до 22 мкм. Следовательно, фракция частиц нитрида титана с размерами 15...25 мкм в данных условиях является слишком крупной и малоэффективной в качестве модификатора второго рода и представляется скорее вредной, чем полезной добавкой.

При увеличении массы порошка растворение идёт ещё медленнее, эффективность также снижается. Если масса уменьшается, то уменьшается и количество самих вводимых частиц. Таким образом, основная тенденция в повышении эффективности состоит в увеличении массы при уменьшении размеров частиц. Но уменьшение размера ведёт к ускорению растворения, в то время как увеличение массы фракции растворение замедляет.

В табл.1 приведены основные результаты расчета процесса растворения порошка нитрида титана с учётом разброса частиц по размерам, проведенные на основе вышеизложенных представлений с использованием конечноразностной модели.

Таблица 1

Характеристики поведения частиц модификатора (TiN) в расплаве стали в зависимости от размеров фракции вводимых частиц, их массы и температуры ввода

| Размер фракции, мкм | Масса частиц, кг/т | Температура ввода, °C | Общее количество вводимых частиц | Растворятся до начала кристаллизации, % | Станут неметаллическими включениями, % | Растворятся после начала кристаллизации, % | Максимальный размер включений, мкм | Время жизни частиц, с |
|---------------------|--------------------|-----------------------|----------------------------------|---|--|--|------------------------------------|-----------------------|
| 15...25 | 0,05 | 1550 | $2,9 \cdot 10^9$ | 0 | 75,3 | 24,7 | 22 | 38...302 |
| 10...20 | 0,05 | 1550 | $6,9 \cdot 10^9$ | $\leq 0,04$ | 47 | ≤ 53 | 17 | 34...190 |
| 10...15 | 0,05 | 1550 | $1,2 \cdot 10^{10}$ | ~ 0 | 29 | ≤ 71 | 11 | 38...90 |
| 5...10 | 0,05 | 1550 | $5,5 \cdot 10^{10}$ | 98,9 | 0,024 | 1,076 | 2 | 8...44 |
| 1...5 | 0,05 | 1535 | $7,5 \cdot 10^{11}$ | 95,8 | 0,058 | 4,14 | <1 | 0,3...11,7 |
| 2...3 | 0,10 | ~ 1532 | $3,0 \cdot 10^{12}$ | ~ 0 | 3,7 | 96 | <1 | 2...8,7 |
| 1...2 | 0,10 | ~ 1530 | $1,3 \cdot 10^{13}$ | 0 | <1 | >99 | ~ 1 | 0,4...4,1 |

Анализ данных таблицы 1 показывает следующее. В случае фракции 1...5 мкм, вводимой при температуре 1535°C, время жизни составит от 0,3 секунд (для частиц 1 мкм) до 11,7 секунды (для частиц 5 мкм). До начала кристаллизации растворится ~95,8 % частиц, станет неметаллическими включениями $4,4 \cdot 10^8$ частиц (0,058% от начального числа). Остальные $3,11 \cdot 10^{10}$ (4,14%) растворятся при температуре ниже ликвидуса. Таким образом, мы видим, что мелкие частицы нитрида титана (1...5 мкм), вводимые перед началом кристаллизации более эффективны. Эффект достигается за счёт того, что при более мелких частицах и той же массе порошка число частиц больше. Время жизни мелких частиц меньше и многие из них успевают раствориться либо выше ликвидуса (нейтральные, таких в данном случае большинство) либо ниже ликвидуса, способные не только полностью раствориться, но и стать центрами кристаллизации). Растворение их заканчивается, когда жидкости ещё много, то есть лишь малая часть таких частиц станет неметаллическими включениями. При этом образующиеся неметаллические включения будут более мелкими, чем в первом случае, так как сами частицы мельче.

При уменьшении интервала варьирования фракции до 2...3 мкм, эффекты, связанные с замедлением растворения более крупных частиц за счёт растворения более мелких, будут не столь значительными. Очевидно, что при большей массе вводимого порошка, частиц будет больше, поэтому увеличим массу до 0,1 кг/т. Если ввести частицы при температуре близкой к температуре ликвидуса (~1531...1532°C), то, как показали расчёты, растворение самых мелких (2 мкм) частиц до размеров центров кристаллизации произойдёт как раз к моменту ее начала (через ~2 секунды). Частицы размером 3 мкм растворятся через 8,7 с при температуре незначительно ниже ликвидуса. К этому моменту количество твёрдой фазы составит ~9%. Так как частицы вводятся непосредственно перед началом кристаллизации, то неметаллическими включениями становятся ~3,7% частиц, растворившихся до начала кристаллизации частиц практически не будет. Таким образом, не менее 96% частиц, а это $2,9 \cdot 10^{12}$, будут растворены ниже температуры ликвидуса. Если предположить, что центрами кристаллизации в данном случае становятся одна из 200...300 частиц [9], то количество дополнительных центров кристаллизации в данном случае составит $\sim 1 \cdot 10^{10}$ частиц на тонну.

При использовании частиц с размерами 1...2 мкм можно получить ещё большую эффективность модифицирования. В этом случае растворение самых мелких частиц, согласно расчётам, произойдёт через 0,4 с. Таким образом, для повышения доли эффективных частиц, модификатор следует вводить практически при температуре ликвидуса (1530 – 1531°C). Самые крупные частицы данной фракции (2 мкм) растворятся через $\approx 4,1$ с. Существенное замедление растворения связано с присутствием в расплаве более мелких частиц (~1 мкм), растворение которых идёт намного интенсивнее, замедляя тем самым (за счёт более быстрого снижения градиента концентраций) растворение более крупных частиц (≤ 2 мкм). Если ввести модификатор при температуре ликвидуса, то растворившихся выше ликвидуса частиц не будет. Частицы, ставшие неметаллическими включениями составят в этом случае не более 2 % от общего числа частиц, причем их размер, согласно расчётам, будет достаточно малым (~1...1,5 мкм). Центрами кристаллизации в данном случае станет ~0,5% от общего числа вводимых частиц (по сравнению с $< 0,1\%$ в случае фракции 5...10 мкм, как показано в работе [9]), то есть на одну тонну расплава (при вводе 0,1 кг/т модификатора) будет приходиться $\sim 6,7 \cdot 10^{10}$ дополнительных центров кристаллизации, что более эффективно измельчит структуру литого металла.

Проведенные расчёты для случая введения в расплав порошка TiN применимы и для других подобных соединений. Характер полученных зависимостей остаётся аналогичным, при некотором различии численных параметров. Результаты определения оптимальных параметров ввода разных типов модификаторов, обеспечивающих в стали, содержащей 0,1% С, порядка $10^{10} \dots 10^{11}$ дополнительных центров кристаллизации на тонну, приведены в табл.2.

Таблица 2

Оптимальные технологические параметры дисперсных модификаторов

| Тип модификатора | Фракция, мкм | Расход, кг/т | Температура расплава, °С |
|------------------|--------------|--------------|--------------------------|
| TiN | 1,0 – 2,0 | 0,12 | 1530 - 1535 |
| TiC | 0,5 – 2,0 | 0,14 | |
| ZrN | 2,0 – 5,0 | 1,10 | |
| NbN | 1,5 – 3,0 | 0,33 | |

Выводы

Разработана математическая модель и компьютерная программа для анализа поведения вводимых в расплав частиц модификатора с учётом их разброса по исходным размерам, позволяющая рассчитывать скорость и продолжительность растворения.

На основе проведенных расчетов показано, что наличие мелких частиц замедляет растворение крупных; чем больше разброс фракции по размерам, тем замедление значительнее по сравнению со случаем частиц одинакового размера. Установлено, что используя более мелкие фракции и вводя их при температуре близкой к ликвидусу, можно повысить эффективность модифицирования за счёт уменьшения доли частиц, растворяющихся выше ликвидуса и снижения количества частиц, образующих неметаллические включения. Тем самым обеспечивается увеличение количества частиц, образующих дополнительные центры кристаллизации.

Определены оптимальные технологические параметры (размер частиц, их общая масса и температура ввода) 4-х типов модификаторов для сталей, содержащих ~0,1% С: TiN - 1,0...2,0 мкм, масса 0,12 кг/т; TiC - 0,5...2,0 мкм, 0,14 кг/т; ZrN - 2,0...5,0 мкм, 1,1 кг/т; NbN - 1,5...3,0 мкм, 0,33 кг/т; температура расплава при вводе 1530...1535°C.

Список использованных источников:

1. Стеценко В.Ю. Особенности процессов модифицирования чугуна и стали / В. Ю. Стеценко, Е.И. Марукович // *Металлургия машиностроения*. – 2006. – №3. – С. 10 – 13.
2. Панфилова Л.М. Уникальные свойства сталей нового поколения, микролегированных ванадием и азотом / Л.М. Панфилова, Л. А. Смирнов // *Сталь* / 2010 №5, С. 116 – 121.
3. Гаврилин В.И. Плавление и кристаллизация металлов и сплавов / В. И. Гаврилин. – Владимир: Изд.-во Владимирского государственного университета, 2000. – 260 с.
4. Исследование модифицирования металла нанопорошковыми инокуляторами в кристаллизаторе сортовой машины непрерывного литья заготовок. Теоретическое обоснование / В. П. Комшуков, А.Н Черепанов, Е.В. Протопопов [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия*. – 2008. – №8. – С. 10 – 11.
5. Троцан А.І. Оцінка розмірів тугоплавких часток, що вводяться у розплав, здатних ставати центрами кристалізації / А.І. Троцан, В.В. Каверинський, І.Л. Бродецький // *Металознавство та обробка металів*. – 2010. – №4. – С. 49 – 52.
6. Троцан А.І. Определение оптимальных размеров дисперсных частиц для модифицирования расплава в кристаллизаторе МНЛЗ на основе математического моделирования процесса / А.І. Троцан, В.В. Каверинський, І.Л. Бродецький // *Збірник "Науков. праць ДонНТУ"*, серія: *Металургія*, вип. 12(171), Донецьк. – 2010. – С. 149 – 156.
7. Исаев О.Б. Определение оптимальных размеров тугоплавких частиц, вводимых в расплав для модифицирования / О. Б. Исаев, А. И. Троцан, В. В. Каверинский, И. Л. Бродецкий // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. – №7. – С. 87 – 89.
8. Троцан А.И. Моделирование процесса растворения ультрадисперсных порошков для определения их оптимальных размеров при регулируемой кристаллизации расплава / А.И. Троцан, В.В. Каверинский, И.Л. Бродецкий, Ф.С. Крейденко // *Вісник приазовського державного технічного університету*, вип. 20, Маріуполь. – 2010. – С. 61 – 66.
9. Троцан А.И. Анализ распределения вводимых в жидкий металл дисперсных частиц модификатора по типу их действия в расплаве / А. И. Троцан, В. В. Каверинский, И. Л. Бродецкий // *Материалы 8-й Межд. научно-техн. конф. "Тепло и массообменные процессы в металлургических системах"*. – Мариуполь. – ПГТУ. – 2010. – С. 211 – 215.

Рецензент: А.М. Скребцов
д-р техн. наук., проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 28.03.2011