

образующие с железом твердые растворы внедрения, обеспечивают наиболее значительный эффект упрочнения феррита, что в основном обусловлено их сильным взаимодействием с дислокациями и закреплением последних [8].

На прочность феррита сильно влияет размер его зерна. С измельчением зерна феррита одновременно с дополнительным упрочнением снижается температура вязко-хрупкого перехода [8].

Таким образом, измельчение зерен феррита является эффективным способом упрочнения, поскольку одновременно уменьшается склонность к хрупкому разрушению.

Вязкость сталей с ферритно-карбидной структурой увеличивается при измельчении перлитных колоний и зерен феррита. Эти структурные параметры существенно зависят от размера аустенитного зерна. Поэтому для получения высокой степени механических свойств при проведении термической обработки стремятся получить мелкое аустенитное зерно [8].

Испытания показывают, что структура стали с минимальным содержанием вредных примесей и оптимальной легирующей системой обеспечивает высокий уровень прочности и эксплуатационной надежности. Таким образом, эффективное управление химическим составом и технологиями модифицирования стали позволяет получить оптимальные механические характеристики, необходимые для надежной и безопасной эксплуатации деталей подвижного состава.

#### Список литературы

- 1 ГОСТ 32400-2013. Рама боковая и балка надрессорная литые тележек железнодорожных грузовых вагонов. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2014. – 62 с.
- 2 Металловедение : учеб. для вузов : в 2 т. Т. 2. Термическая обработка. Сплавы / И. И. Новиков, В. С. Золоторевский, В. К. Портной [и др.] ; под общ. ред. В. С. Золоторевского. – 2-е изд., испр. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2014. – 528 с.
- 3 Семин, А. Е. Современные проблемы металлургии и материаловедения : практикум / А. Е. Семин, А. В. Алпатов, Г. И. Котельников. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2015. – 56 с. – ISBN 978-5-87623-890-0.
- 4 Лунев, В. В. Сера и фосфор в стали / В. В. Лунев, В. В. Аверин. – М. : Металлургия, 1988. – 256 с.
- 5 Электрометаллургия стали и ферросплавов : учеб. для вузов / Д. Я. Поволоцкий, В. Е. Рощин, М. А. Рысс [и др.] – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1984. – 568 с.
- 6 Дурынин, В. А. Исследование и совершенствование технологии производства с целью повышения ресурса стальных изделий из крупных поковок ответственного назначения / В. А. Дурынин, Ю. П. Солнцев. – СПб. : Химиздат, 2006. – 272 с. – ISBN 5-93808-127-0.
- 7 ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. – Взамен ГОСТ 5639-65 ; введ. 1983-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 2001. – 15 с.
- 8 Смирнов, М. А. Основы термической обработки стали : учеб. пособие / М. А. Смирнов, В. М. Счастливцев, Л. Г. Журавлев. – М. : Наука и технологии, 2002. – 519 с.

УДК 669.14:536.7

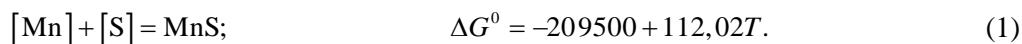
### ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОБРАЗОВАНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В СТАЛИ МАРКИ 20ГЛ

*Н. К. ТУРСУНОВ, А. А. САИДИРАХИМОВ*

*Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан*

Неметаллические включения по природе происхождения разделяются на два вида:

- 1) эндогенные включения – образуются в результате химических реакций в процессе выплавки, раскисления, разливки, а также при кристаллизации вследствие изменения растворимости элементов;
- 2) экзогенные включения – соединения, попавшие в сталь из шихтовых и огнеупорных материалов. Эти включения также могут образовывать комплексные соединения [1]:



$$\lg K_{\text{MnS}} = -\frac{\Delta G^0}{2,3RT} = -\frac{-209500 + 112,02T}{2,3 \cdot 8,31 \cdot T} = \frac{10961,12}{T} - 5,86. \quad (2)$$

$$K_{\text{MnS}} = \frac{a_{\text{MnS}}}{a_{\text{Mn}} \cdot a_{\text{S}}} = \frac{1}{[\text{Mn}] \cdot f_{\text{Mn}} \cdot [\text{S}] \cdot f_{\text{S}}} = \frac{1}{[\text{Mn}] \cdot [\text{S}]}. \quad (3)$$

При  $T = 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$  константа равновесия  $K_{\text{MnS}} = 0,98$  и  $1/K_{\text{MnS}} \approx 1$ . Для стали с содержанием марганца 1,1–1,4 % произведение концентраций марганца и серы  $([\text{Mn}] \times [\text{S}])$  намного ниже  $1/K_{\text{MnS}}$ . Следовательно, в условиях сталеплавильных процессов в жидком металле сульфиды марганца образовываться не могут.

На рисунке 1 представлена стандартная энергия образования оксида и сульфида марганца.

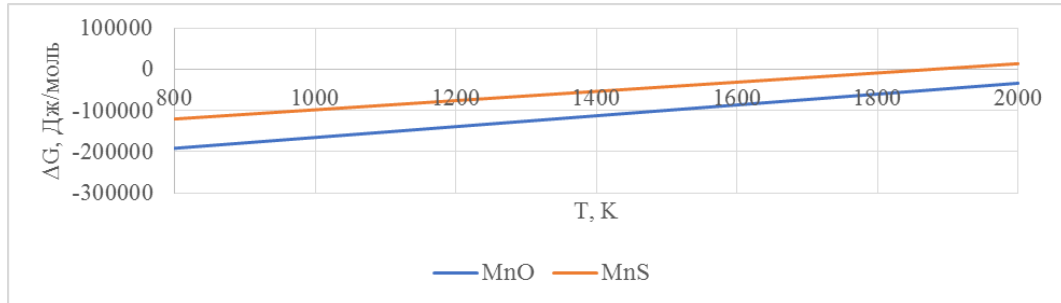


Рисунок 1 – Зависимость стандартной энергии образования оксида и сульфида марганца от температуры

Образование оксида марганца более термодинамически выгодно, чем сульфида ( $\Delta G_{\text{MnO}}^0 < \Delta G_{\text{MnS}}^0$ ). Образование сульфида марганца возможно при низком содержании кислорода в стали.

Рисунок 2 показывает образование оксида и сульфида марганца с содержанием марганца в стали 1,15 %.

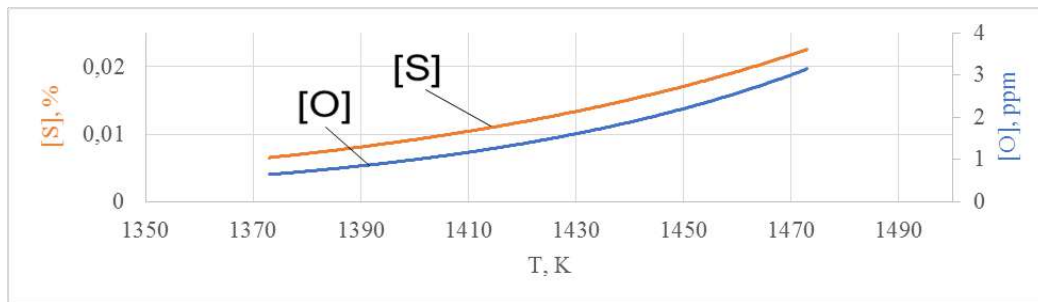
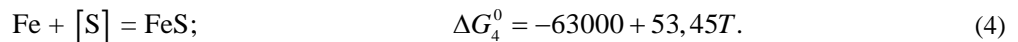


Рисунок 2 – Образование соединений марганца в стали

Из рисунка 2 видно, что содержание кислорода во время кристаллизации при температуре  $\sim 1473\text{ K}$  должно быть не более 3,1 ppm, чтобы марганец с содержанием 1,15 % эффективно связывал  $\sim 0,023\text{ \%}$  серы. Это очень низкое содержание кислорода, достижимое в условиях глубокого раскисления:



$$\lg K_{\text{FeS}} = -\frac{\Delta G_4^0}{2,3RT} = -\frac{-63000 + 53,45T}{2,3 \cdot 8,31 \cdot T} = \frac{3296,2}{T} - 2,8. \quad (5)$$

$$K_{\text{FeS}} = \frac{a_{\text{FeS}}}{a_{\text{Fe}} \cdot a_{\text{S}}} = \frac{1}{[\text{S}] \cdot f_{\text{S}}} = \frac{1}{[\text{S}]}. \quad (6)$$

При  $T = 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , константа равновесия  $K_{\text{FeS}} \approx 0,091$  и  $1/K_{\text{FeS}} \approx 11$ . Следовательно, в условиях сталеплавильных процессов в жидком металле сульфиды железа образовываться не могут. Во время кристаллизации и охлаждения стали вследствие понижения растворимости сера выделяется из раствора в виде включений сульфидов FeS или окисульфидов FeS–FeO [2].

Равновесие железо – марганец – сера описывается реакцией



Температурная зависимость в интервале  $1100\text{--}1190\text{ }^{\circ}\text{C}$  представлена уравнением [2]

$$\lg K = \lg \frac{a_{\text{MnS}}}{a_{\text{FeS}} \cdot a_{\text{Mn}}} = \lg \frac{a_{\text{MnS}}}{a_{\text{FeS}} \cdot [\text{Mn}]} = \frac{6914}{T} - 3,546. \quad (8)$$

Например, при концентрации марганца 1,1–1,4 % отношение  $a_{\text{MnS}} / a_{\text{FeS}}$  в сульфидной фазе при 1200 °С составляет 15–20. При 1100 °С – 33–42. При понижении температуры отношение активности сульфида марганца к активности сульфида железа увеличивается, марганец связывает серу. Также с повышением концентрации марганца увеличивается активность сульфида марганца.

Ослабление вредного действия серы, которое достигается в присутствии марганца, связано с образованием MnS при охлаждении стали [3]:

$$[\text{Al}] + [\text{N}] = \text{AlN}; \quad \Delta G_4^0 = -277700 + 120,43T. \quad (9)$$

$$\lg K_{\text{AlN}} = -\frac{\Delta G_4^0}{2,3RT} = -\frac{-277700 + 120,43T}{2,3 \cdot 8,31T} = \frac{14529,38}{T} - 6,3. \quad (10)$$

$$K_{\text{AlN}} = \frac{a_{\text{AlN}}}{a_{\text{Al}} \cdot a_{\text{N}}} = \frac{1}{[\text{Al}] \cdot f_{\text{Al}} \cdot [\text{N}] \cdot f_{\text{N}}} = \frac{1}{[\text{Al}] \cdot [\text{N}]}. \quad (11)$$

При  $T = 1600$  °С константа равновесия  $K_{\text{AlN}} \approx 28,66$  и  $1/K_{\text{AlN}} \approx 0,035$ . Для стали с содержанием алюминия в количестве 0,02–0,06 % произведение концентраций алюминия и азота  $([\text{Al}] \cdot [\text{N}])$  намного ниже  $1/K_{\text{AlN}}$ . Следовательно, в условиях сталеплавильных процессов в жидком металле нитриды алюминия образовываться не могут.

При введении алюминия в сталь для раскисления (0,02–0,06 % Al) удаление включений нитрида алюминия происходит вообще не может, поскольку образуются они только в твердом металле [4].

На рисунке 3 представлено образование нитрида и оксида алюминия с содержанием алюминия 0,040 % в стали.

Из рисунка 3 видно, что после затвердевания по мере охлаждения стали при температуре ~1400 К алюминий с содержанием 0,040 % связывает ~51 ppm азота. При этом концентрация кислорода должна быть не более ~0,001 ppm.

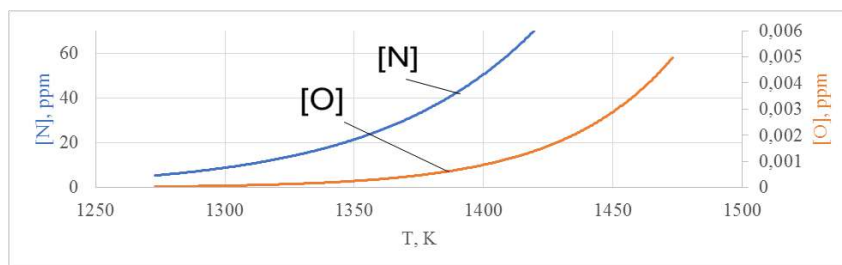


Рисунок 3 – Образование соединений алюминия в стали

Конструкционные стали практически всегда раскисляются алюминием, который обеспечивает значительно более низкое содержание кислорода в металле (0,003–0,005 %). Кроме того, алюминий связывает растворенный азот в стали, в результате чего можно получить наследственно мелкозернистую структуру. Получение мелкозернистой структуры является эффективным средством упрочнения стали и повышения ее сопротивляемости разрушению [5]. На рисунке 4 представлена стандартная энергия образования соединений алюминия.

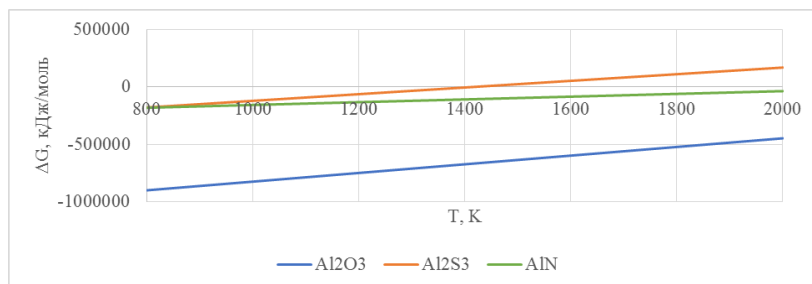
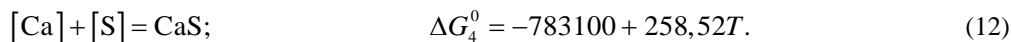


Рисунок 4 – Зависимость стандартной энергии образования соединений алюминия от температуры

Из рисунка 4 видно, что  $\Delta G_{\text{Al}_2\text{O}_3}^0 < \Delta G_{\text{AlN}}^0 < \Delta G_{\text{Al}_2\text{S}_3}^0$ , образование оксида алюминия термодинамически более выгодно, чем образование нитрида и сульфида алюминия:



$$\lg K_{\text{CaS}} = -\frac{\Delta G_4^0}{2,3RT} = -\frac{-783100 + 258,52T}{2,3 \cdot 8,31T} = \frac{40972,11}{T} - 13,526. \quad (13)$$

$$K_{\text{CaS}} = \frac{a_{\text{CaS}}}{a_{\text{Ca}} \cdot a_{\text{S}}} = \frac{1}{[\text{Ca}] \cdot f_{\text{Ca}} \cdot [\text{S}] \cdot f_{\text{S}}} = \frac{1}{[\text{Ca}] \cdot [\text{S}]}. \quad (14)$$

При  $T = 1600^\circ\text{C}$  константа равновесия  $K_{\text{CaS}} \approx 2,24 \cdot 10^8$  и  $1/K_{\text{CaS}} \approx 0,44 \cdot 10^{-8}$ . Для стали с содержанием кальция 0,0001 % произведение концентраций кальция и серы  $([\text{Ca}] \cdot [\text{S}])$  намного выше  $1/K_{\text{CaS}}$ . Следовательно, в условиях сталеплавильных процессов в жидком металле образуются сульфиды кальция.

На рисунке 5 показано взаимодействие кальция с кислородом и серой.

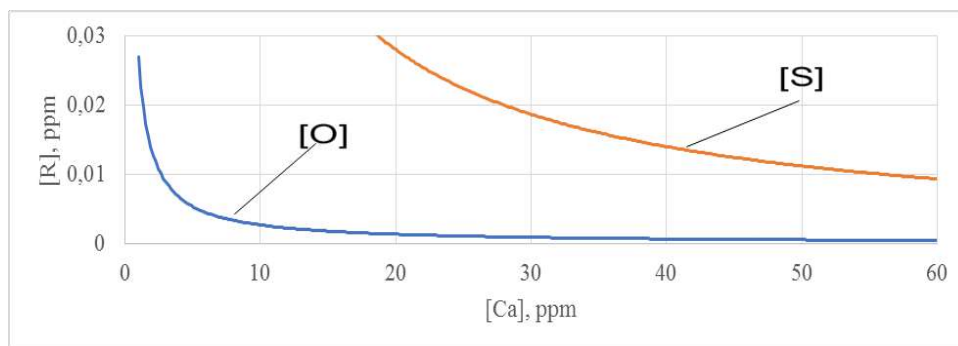


Рисунок 5 – Образование оксида и сульфида кальция в стали

Кальций является летучим и реакционноспособным элементом, что обеспечивает его низкую растворимость в стали. Из графика (см. рисунок 5) видно, что при температуре  $1600^\circ\text{C}$ , для равновесного образования CaS, кальций с содержанием 50 ppm связывает примерно 0,011 ppm серы. При этом содержание кислорода должно быть примерно  $[\text{O}] \leq 0,00054 \text{ ppm}$ . На рисунке 6 представлена стандартная энергия образования соединений кальция в стали.

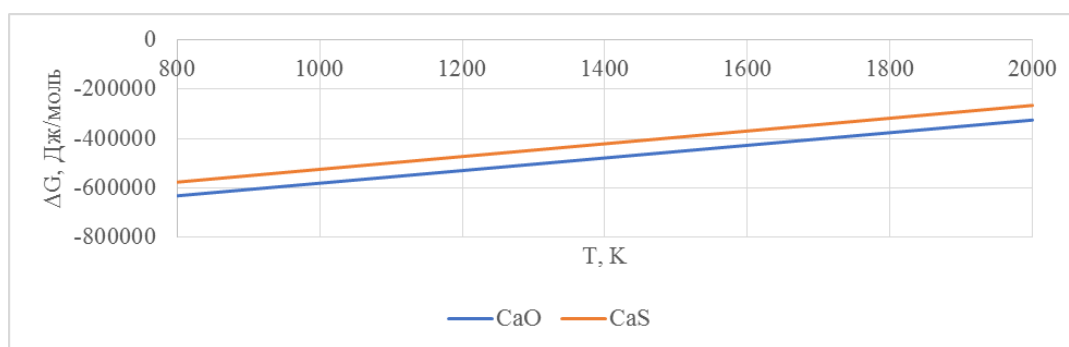


Рисунок 6 – Зависимость стандартной энергии образования соединений кальция от температуры

Из термодинамических данных можно увидеть, что отрицательное значение стандартной энергии Гиббса реакции образования сульфида кальция говорит о том, что кальций имеет высокую термодинамическую склонность к связыванию серы. Однако  $\Delta G_{\text{CaO}}^0 < \Delta G_{\text{CaS}}^0$  что способствует активному связыванию кальция и кислорода. Поэтому при избытке кислорода кальций сначала образует оксид. После глубокого раскисления, при очень низком содержании кислорода, образуется сульфид кальция в стали.

Образование неметаллических включений в стали – неизбежный процесс, поэтому необходимо более тщательное удаление их из расплава или перевод из «опасных» во включения с нейтральными характеристиками.

#### Список литературы

- 1 Гольдштейн, М. И. Специальные стали : учеб. для вузов / М. И. Гольдштейн, С. В. Грачев, Ю. Г. Векслер. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : МИСИС, 1999. – 408 с.
- 2 Процессы раскисления и образования неметаллических включений в сталях / отв. ред. Н. В. Агеев. – М. : Наука, 1977. – 207 с.
- 3 Григорян, В. А. Теоретические основы электросталеплавильных процессов : учеб. для вузов / В. А. Григорян, Л. Н. Белянчиков, А. Я. Стомахин. – М. : Металлургия, 1987. – 272 с.
- 4 Поволоцкий, Д. Я. Раскисление стали / Д. Я. Поволоцкий. – М. : Металлургия, 1972. – 208 с.
- 5 Дурынин, В. А. Исследование и совершенствование технологии производства с целью повышения ресурса стальных изделий из крупных поковок ответственного назначения / В. А. Дурынин, Ю. П. Солнцев. – СПб. : Химиздат, 2006. – 272 с. – ISBN 5-93808-127-0.

УДК 621.742

### ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ СМЕСЕЙ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

*Н. К. ТУРСУНОВ, О. Т. ТОИРОВ*

*Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан*

Производство качественных стальных отливок ответственного назначения сопряжено с необходимостью строгого соблюдения температурного режима процесса разливки. Снижение температуры металла во время транспортировки и заливки в форму приводит к значительным тепловым потерям, что является одной из основных причин возникновения таких дефектов, как недоливы, спай, усадочные раковины и повышенная газонасыщенность [1, 2]. Особенно остро эта проблема стоит при разливке крупногабаритных отливок, таких как «боковая рама» вагона, где время между выпуском металла из печи и окончанием заливки может быть значительным [3, 4].

Эффективным технологическим приемом, направленным на минимизацию тепловых потерь с открытой поверхности металла в изложнице или ковше, является применение теплоизоляционных смесей (ТИС). Формируя на поверхности расплава защитный теплоизоляционный слой, ТИС позволяют поддерживать температуру металла в заданном технологическом интервале, что напрямую влияет на повышение качества отливок и экономию энергоресурсов [5]. ТИС применяются в виде порошка (пудры) или гранул, что обеспечивает равномерное распределение по поверхности металла и формирование сплошного изолирующего слоя (рисунок 1).



Рисунок 1 – Общий вид ТИС на поверхности жидкого металла