

сталью вследствие получения однородной мелкозернистой структуры с равномерным распределением высокодисперсной карбидной фазы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Далис Е.Дж. Быстрорежущие стали, полученные методами порошковой металлургии / Е.Дж. Далис // Порошковая металлургия материалов специального назначения. – М., 1977. – 300 с.
2. Петров А.К. Структурные особенности и свойства быстрорежущих сталей, полученных методом порошковой металлургии / А.К.Петров, Г.И.Парабина, А.Н.Осадчий // Сталь.-1981.-№ 6.-С.40-44.
3. Горюшина М.Н Термическая обработка и свойства быстрорежущей стали 10P6M5-MП, полученной распылением и горячим экструдированием / М.Н.Горюшина, Н.Н.Гавриков // МиТОМ.-1980.-№9.-С. 54-56.
4. Абрамов, О.В. Влияние остаточного кислорода и окисных неметаллических включений на механические свойства быстрорежущей стали 10P6M5-MП / О.В.Абрамов, В.Л.Гиршов // МиТОМ.-1986.-№ 8.-С. 35- 37.
5. Осадчий А.Н. Производство порошковой быстрорежущей стали на заводе «Днепро-спецсталь» /А.Н.Осадчий, С.В.Ревякин С.В., Г.В.Кийко // Сталь.-1981.-№11.-С.273-274.
6. Регламентируемая ковка порошковой быстрорежущей стали / В.И.Алимов, Е.Ю.Колягин, В.Г.Оноприенко, С.Ю.Росляков // Кузнечно-штамповочное производство.-1991.-№ 4.-С.2-3.
7. Баранов А.А. О взаимодействии карбидных частиц с поверхностью аустенитных зерен в быстрорежущих сталях / А.А.Баранов, В.И. Алимов, В.Г.Оноприенко // Изв. АН СССР. Металлы.-1988.-№ 3.-С.115-116.

Поступила в гедакцию 15.06.2010

Рецензент д-р техн. наук, проф. В.П. Горбатенко

© Колягин Е.Ю., Оноприенко В.Г., 2010

УДК 669.162.252

В.А. Кравец, В.А. Темнохуд

МЕХАНИЗМ ВЗРЫВА БРЫЗГ МЕТАЛЛА ПРИ ПЕРЕЛИВАХ ЧУГУНА

Предложен механизм образования пузырька СО на поверхности графитовых включений в расплаве чугуна. Показано, что в каплях металла, имеющих диаметр более 30 мкм возможно выделение пузырька газа, что приводит к взрыву капли.

Ключевые слова: чугун, капельки металла, механизм образования СО, гетерогенные включения, взрыв капель, теоретическое исследование.

Введение

Экспериментально установлено, что при переливах чугуна крупные брызги металла в полёте взрываются в результате выделения пузырька газа [1,2]. Однако, согласно классической кинетической теории жидкости, образование новой фазы в гомогенном растворе практически невозможно. Необходим дополнительный теоретический анализ факторов, влияющих на вероятность выделения пузырька СО в реальных условиях переливов чугуна.

Анализ исследований по проблеме и постановка задачи

Из условия существования пузырька монооксида углерода в капле при равенстве внутреннего давления сумме атмосферного и капиллярного давлений (с учётом двух поверхностей кривизны – внешней и внутренней) можно рассчитать минимальный размер пузырька газа [1].

$$r_{\min} = \frac{2\sigma}{P_{\text{CO}} - P_{\text{ат}} - \frac{4\sigma}{d_{\text{к}}}}, \quad (1)$$

где P_{CO} - давление выделения пузырька СО, Па; $P_{\text{ат}}$ - атмосферное давление, Па; σ - поверхностное натяжение жидкого чугуна, Н/м; r_{\min} - минимальный радиус пузырька монооксида углерода, м; $d_{\text{к}}$ - диаметр капли, м.

Давление выделения пузырька СО, полученное по результатам экспериментальных исследований взрыва капель, составляет в среднем около $2,5 \cdot 10^7$ Па [3,4]. Поверхностное натяжение чугуна составляет 1,35 Н/м. Численные расчёты по формуле (1) показали, что для брызг диаметром более 10^{-6} м минимальный радиус пузырька практически не зависит от размера капли и составляет около $1,4 \cdot 10^{-7}$ м.

Количество углерода, достаточное для образования пузырька минимального размера, содержится в каплях металла диаметром более 2,45 мкм. Это, однако, не значит, что образование пузырька в столь малых каплях возможно, т.к. пузырёк должен находиться в равновесии с определённым количеством молекул СО, находящихся в расплаве.

Число молекул СО, которые находятся в расплаве в равновесии с единичным пузырьком минимального размера можно найти по формуле [5,6]

$$n_{\Sigma} = \exp\left(\frac{E}{kT}\right), \quad (2)$$

где n_{Σ} - число молекул СО, находящихся в расплаве в равновесии с пузырьком минимального размера; E - энергия образования новой фазы, Дж; $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ - константа Больцмана, Дж/К; T - температура капли, К.

Как показано в [5,6], при постоянных давлении и температуре энергия образования зародыша новой фазы составит

$$E = \frac{1}{3} \sigma S + \sum (\Delta\mu_i \cdot m_i), \quad (3)$$

где S - площадь поверхности раздела фаз, m^2 ; $\Delta\mu_i$ - изменение химического потенциала для i -го компонента в результате образования новой фазы, Дж/моль; m_i - масса i -го компонента, кг.

Если система достаточно велика, то образование пузырька минимального размера не повлияет на общее состояние системы и вторым членом в уравнении (3) можно пренебречь, т.к. $\Delta\mu_i \rightarrow 0$. Система может считаться достаточно большой если она содержит в 1000 раз больше молекул углерода, чем в пузырьке СО минимального размера, т.е. если диаметр капли металла превышает 24,5 мкм. В этом случае выражение (3) превращается в известное уравнение Гиббса

$$E = \frac{1}{3} \sigma S \quad (4)$$

Подставляя (4) в (2) и учтя, что $S = 4\pi r_{\min}^2$, получим

$$n_{\Sigma} = \exp\left(-\frac{4\pi r_{\min}^2 \sigma}{3kT}\right) \quad (5)$$

Расчёты по формуле (5) показали, что для зарождения одного пузырька в гомогенной среде требуется примерно $n_{\Sigma} = 10^{2000000}$ молекул СО, что, конечно, говорит о полной невозможности этого процесса. Так, например, в порции чугуна массой 100 т содержится всего около 10^{30} атомов углерода. Таким образом, в реальных условиях количество атомов углерода недостаточно для образования даже одного пузырька газа на ванну.

Тем не менее, известно, что пузырьки образуются и капли взрываются [1,2]. К числу факторов, которые не учтены уравнением (5), и которые теоретически могут облегчать процесс зарождения пузырька, относятся:

- снижение поверхностного натяжения вследствие повышенного капиллярного давления на границе раздела фаз [5];
- наличие гетерогенных включений;
- плохая смачиваемость гетерогенных включений металлом.

Изложение материала и результаты.

Рассмотрим влияние этих факторов в условиях перелива чугуна.

1) *Снижение поверхностного натяжения на межфазных границах.*

В бинарных системах термодинамическое соотношение имеет вид [5]

$$a \left(\frac{d\sigma}{dP} \right)_T = v^{\sigma} - v^{\alpha} - \frac{x^{\sigma} - x^{\alpha}}{x^{\beta} - x^{\alpha}} (v^{\beta} - v^{\alpha}), \quad (6)$$

где a – мольная поверхность для жидкой фазы, $\text{м}^2/\text{моль}$; v^σ – мольный объём в поверхностном слое, $\text{м}^3/\text{моль}$; v^α – мольный объём в жидкой фазе, $\text{м}^3/\text{моль}$; v^β – мольный объём в газовой фазе, $\text{м}^3/\text{моль}$; x^σ – концентрация компонента, образующего новую фазу, в поверхностном слое, $\text{моль}/\text{м}^3$; x^α – концентрация компонента, образующего новую фазу, в жидкости, $\text{моль}/\text{м}^3$; x^β – концентрация компонента, образующего новую фазу, в газовой фазе, $\text{моль}/\text{м}^3$.

Мольный объём CO в газе намного превышает мольный объём для жидкой фазы и поверхностного слоя, т.е. $v^\beta \gg v^\alpha$; v^σ . Учитывая малую растворимость CO в чугуна и большое пересыщение на межфазной границе, $x^\beta \approx x^\sigma \gg x^\alpha$. Тогда уравнение (6) преобразуется к виду

$$a \left(\frac{d\sigma}{dP} \right)_T \approx -v^\beta. \quad (7)$$

Считая газ идеальным, можно записать $v^\beta = \frac{RT}{P}$ и тогда

$$a \left(\frac{d\sigma}{dP} \right)_T \approx -\frac{RT}{P}. \quad (8)$$

После интегрирования и преобразования получим

$$\sigma = \sigma_{AT} + \frac{RT}{a} \ln \frac{P_{AT}}{P_{CO}}, \quad (9)$$

где σ_{AT} – поверхностное натяжение на границе расплав – газ при атмосферном давлении, $\text{Н}/\text{м}$.

Мольную поверхность рассчитаем в предположении, что она представляет собой монослой атомов железа на границе раздела фаз. Тогда

$$a = \pi d_{Fe}^2 \cdot N_A = 1,2 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{моль},$$

где $d_{Fe} = 2,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ – диаметр атомов железа; $N_A = 6 \cdot 10^{23}$ – число Авогадро.

Подставляя в (9) численные значения $R = 8,314 \text{ Дж}/(\text{моль К})$; $T = 1623 \text{ К}$; $P_{CO} = 2,5 \cdot 10^7 \text{ Па}$; $\sigma_{AT} = 1,35 \text{ Дж}/\text{м}^2$, получаем $\sigma = 0,8 \text{ Дж}/\text{м}^2$.

Таким образом, на сильно искривленной поверхности пузырьков на границе раздела фаз существенно падает поверхностное натяжение чугуна. Это делает возможным существование пузырьков меньшего диаметра. Из выражения (1) найдём, что минимальный размер пузырька CO для капель диаметром более 10^{-6} м составит $r_{\min} = 0,7 \cdot 10^{-7} \text{ м}$.

2) Наличие гетерогенных включений

Как показано в [6,7] при наличии гетерогенных включений процесс зарождения новой фазы облегчается, и для плоской твёрдой поверхности

количество молекул CO, которые должны находиться в равновесии с пузырьком минимального размера может быть подсчитано из выражения

$$n_{\Sigma} = \exp \left(\frac{\pi r_{\min}^2 \cdot \sigma \cdot (1 + \cos \theta)}{3kT} \right), \quad (10)$$

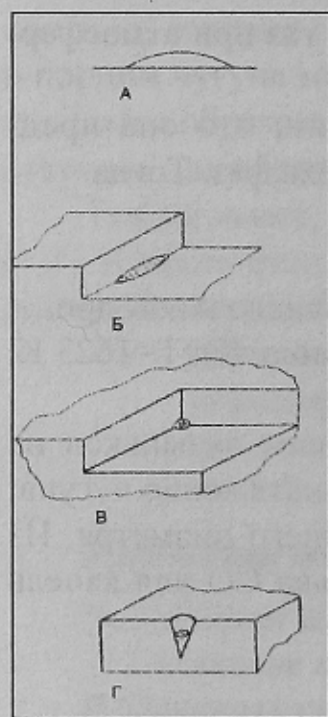
где θ – краевой угол смачивания металлом поверхности гетерогенного включения.

Как видно из формулы (10), при наличии плохо смачиваемых жидкостью включений ($\theta > 90^\circ$), образование зародышей значительно облегчается. В предельном случае, при полной несмачиваемости, $\theta = 180^\circ$, а $\cos \theta = -1$. Тогда, теоретически, одна молекула CO может находиться в равновесии с зародышем новой фазы. Следует отметить, что на практике всегда $\theta < 180^\circ$.

Формула (10) описывает процесс зарождения пузырька на плоской твёрдой поверхности гетерогенных включений, однако она не учитывает, что поверхность может иметь сложный рельеф. При наличии неровностей рельефа площадь поверхности сегмента газового пузырька уменьшается, что можно выразить введением в формулу (10) коэффициента А. Тогда формула приобретёт вид

$$n_{\Sigma} = \exp \left(A \frac{\pi r_{\min}^2 \cdot \sigma \cdot (1 + \cos \theta)}{3kT} \right), \quad (11)$$

где А – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа.



По физическому смыслу коэффициент А представляет собой отношение поверхности сегмента пузырька, формирующегося на неровности рельефа гетерогенного включения, к поверхности полушария, сформированного на гладкой плоскости, при равных радиусах кривизны.

На рис. 1 показано как уменьшается поверхность пузырька при зарождении на уступе, в точке, образованной пересечением трёх поверхностей, в узкой щели, или в порах.

- А) – пузырёк в форме полусферы на плоскости;
- Б) – четверть пузырька на уступе;
- В) – восьмая часть пузырька в углу;
- Г) – сегмент пузырька в порах.

Рисунок 1 – Зарождение пузырьков газа на твёрдой гетерогенной поверхности в жидкости.

Для гомогенного расплава $A=2$, $\theta=360^\circ$, $\cos\theta=1$ и выражение (11) превращается в известное выражение (5). Для плоской поверхности $A=1$ и выражение (11) превращается в формулу (10).

В табл.1 приведены значения коэффициента рельефа A .

Таблица 1 – Значения коэффициента рельефа A .

Характер поверхности, на которой образуется газовая фаза	A
Гомогенный расплав	2
Твёрдая плоская поверхность	1
Уступ	0,5
Угол	0,25
Поры, глубина и радиус которых превышает радиус пузырька минимального размера	Менее 0,25

Подставляя в (11) выражение (9), получим общую зависимость описывающую количество молекул, находящихся в равновесии с пузырьком СО минимального размера

$$n_{\Sigma} = \exp \left(A \frac{\pi r_{\min}^2 \cdot (\sigma_{AT} + \frac{RT}{a} \ln \frac{P_{AT}}{P_{CO}}) \cdot (1 + \cos\theta)}{3kT} \right). \quad (12)$$

По выражению (12) можно оценить количество молекул углерода, которые должны находиться в расплаве для образования пузырька газа. В табл. 2 приведены результаты расчёта. Как видно из табл. 2, необходимое число молекул резко уменьшается при наличии в расплаве плохо смачиваемых включений со сложным рельефом. Это делает возможным процесс выделения пузырька и взрыва капли.

Оценим объём металла, необходимый для образования пузырька минимального размера:

$$V_m = \frac{M_C \cdot n_{\Sigma}}{[C] \rho N_A} \cdot 100\%, \quad (13)$$

где V_m – объём металла, в котором находится число атомов углерода, достаточных для образования одного пузырька СО, м³; $M_C=12 \cdot 10^{-3}$ – масса одного моля углерода, кг (в предположении, что углерод в расплаве находится в одноатомном состоянии); $N_A=6 \cdot 10^{23}$ – число Авогадро; $\rho=6500$ – плотность расплава чугуна, кг/м³; $[C]=4$ – среднее содержание углерода в чугуне, % по массе.

Таблица 2 – Число молекул углерода n_{Σ} в расплаве, находящихся в равновесии с пузырьком газа минимального размера, в зависимости от краевого угла смачивания и коэффициента рельефа A твёрдой гетерогенной поверхности

A	Краевой угол смачивания, θ , град.						
	0° (360°)	90°	120°	150°	170°	175	180
2	10^{500000}	-	-	-	-	-	-
1	10^{260000}	10^{130000}	10^{65000}	10^{17500}	10^{2000}	10^{500}	1
0,5	10^{130000}	10^{65000}	10^{32500}	10^{8700}	10^{1000}	10^{250}	1
0,25	10^{65000}	10^{32600}	10^{16300}	10^{4350}	10^{500}	10^{125}	1
0,1	10^{26000}	10^{13000}	10^{6500}	10^{1740}	10^{200}	10^{50}	1
0,01	10^{2600}	10^{1300}	10^{650}	10^{174}	10^{20}	10^5	1
0,001	10^{260}	10^{130}	10^{65}	10^{17}	100	3	1
$5 \cdot 10^{-4}$	10^{130}	10^{65}	10^{33}	10^9	1	1	1

Отсюда, учитывая, что $V_m = \frac{\pi}{6} d_k^3$ получим

$$d_k = 3 \sqrt{\frac{6 \cdot M_C \cdot n_{\Sigma} \cdot 100\%}{\pi [C] \rho N_A}} \quad (14)$$

В таблице 3 показаны результаты расчёта по формуле (14) диаметра капли металла, обеспечивающего зарождение пузырька газа с учётом влияния смачиваемости и рельефа гетерогенной поверхности.

Таблица 3 – Диаметр капли металла d_k , (в метрах), обеспечивающего образование пузырька газа в зависимости от краевого угла смачивания и коэффициента рельефа A твёрдой гетерогенной поверхности

A	Краевой угол смачивания, θ°						
	0 (360)	90	120	150	170	175	180
2	$5 \cdot 10^{170000}$	-	-	-	-	-	-
1	$5 \cdot 10^{86700}$	$5 \cdot 10^{43300}$	$5 \cdot 10^{21700}$	$5 \cdot 10^{6000}$	$5 \cdot 10^{660}$	$5 \cdot 10^{160}$	$5 \cdot 10^{-10}$
0,5	$5 \cdot 10^{43300}$	$5 \cdot 10^{21700}$	$5 \cdot 10^{10800}$	$5 \cdot 10^{2900}$	$5 \cdot 10^{320}$	$5 \cdot 10^{73}$	$5 \cdot 10^{-10}$
0,25	$5 \cdot 10^{21600}$	$5 \cdot 10^{10900}$	$5 \cdot 10^{5400}$	$5 \cdot 10^{1440}$	$5 \cdot 10^{160}$	$5 \cdot 10^{35}$	$5 \cdot 10^{-10}$
0,1	$5 \cdot 10^{8600}$	$5 \cdot 10^{4300}$	$5 \cdot 10^{2160}$	$5 \cdot 10^{570}$	$5 \cdot 10^{57}$	$5 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^{-10}$
0,01	$5 \cdot 10^{856}$	$5 \cdot 10^{423}$	$5 \cdot 10^{206}$	$5 \cdot 10^{48}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-10}$
0,001	$5 \cdot 10^{77}$	$5 \cdot 10^{33}$	$5 \cdot 10^{12}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-10}$
$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{33}$	$5 \cdot 10^{12}$	50	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-10}$

Из табл. 3 видно, что наличие на поверхности плохо смачиваемых включений различных неровностей рельефа (пор, узких щелей и т.д.) делает реальным процесс взрыва брызг диаметром более 50 мкм при крайних углах смачивания более 150 градусов. Это хорошо согласуется с экспери-

ментальними даними, согласно которым капли начинают взрываться при диаметре более 30 мкм, причём вероятность взрыва тем выше, чем больше диаметр капли [1,2].

Передельный чугун содержит только одну гетерогенную примесь, которая плохо смачивается расплавом – это графит. По данным [8], краевой угол смачивания графита чистым насыщенным железоуглеродистым расплавом составляет более 142° при температуре 1600°C . В реальных условиях сильное влияние на поверхностные свойства чугуна оказывает химический состав и температура металла. В работе [9] показано, что наличие углерода, серы, кислорода, азота и фосфора, а также незначительные примеси цветных металлов, например, меди или ванадия, сильно увеличивают θ , что облегчает зарождение пузырька монооксида углерода. Это хорошо согласуется с практическими наблюдениями, согласно которым интенсивность выделения бурого дыма возрастает при переливе ванадийсодержащего чугуна или чугуна со значительным содержанием серы. Все эти факторы облегчают процесс образования пузырьков газа в жидкости.

Таким образом, наличие графита в расплаве делает возможным образование пузырька CO и взрыв капли.

Реальный чугун микрогетерогенен уже в момент выпуска из доменной печи, в результате образования при охлаждении насыщенного расплава из первичного углерода пластин графита характерной гексагональной структуры.

Рассчитаем объём металла, приходящийся на одну частичку графита. Масса графита, выделяющегося из расплава при охлаждении, может быть определена с помощью уравнения [10]

$$[C] = k_1 + k_2 T_m - k_3 [Si], \quad (15)$$

где $[C]$ – максимальное содержание углерода в расплаве, % по массе; $k_1=1,27\%$; $k_2=2,57 \cdot 10^{-3} \text{ \%}/\text{K}$; $k_3=0,34$ – эмпирические коэффициенты; T_m – температура металла, K; $[Si]$ – содержание кремния в расплаве, % по массе.

На участке от доменной печи до сталеплавильного агрегата чугун охлаждается примерно на $50-100^\circ\text{C}$. Учитывая, что кремний при таком изменении температуры практически не выделяется из расплава, т.к. реальные концентрации $[Si]$ далеки от равновесной концентрации, его содержание можно считать постоянной величиной.

Тогда количество графита, выделившегося из 1 м^3 расплава, составит

$$m_{\text{гр}} = \rho \cdot k_2 \cdot \Delta T \cdot 10^{-5}, \quad (16)$$

где $m_{\text{гр}}$ – масса графита, кг; ρ – плотность жидкого чугуна, равная $6500 \text{ кг}/\text{м}^3$; $k_2=2,57 \cdot 10^{-3} \text{ \%}/\text{K}$ – эмпирический коэффициент; ΔT – снижение температуры чугуна, K.

Число частиц графита N в 1 м^3 расплава составит

$$N = \frac{6m_{гр}}{\pi d_{гр}^3 \rho_{гр}}, \quad (17)$$

где $d_{гр}$ – эквивалентный (с учётом плоской формы) диаметр частиц графита, м; $\rho_{гр}$ – плотность частиц графита, кг/м^3 .

Рассчитанное по выражению (16) количество выделившегося графита на 1м^3 расплава составит $m_{гр}=9\div 18$ кг. Наиболее вероятный продольный размер включений графита в расплаве составляет около $a=7,5\cdot 10^{-6}$ м при толщине пластины около $b=2\cdot 10^{-6}$ м [10]. Эквивалентный диаметр частицы

составляет $d_{гр.эkv} = \sqrt[3]{\frac{3a^2b}{2}} = 5,5\cdot 10^{-6}$ м.

Минимальный объём металла, приходящийся на одну частичку графита, может быть определён из выражения

$$\frac{\pi d_{min}^3}{6} = \frac{1}{N} = \frac{\pi d_{гр.эkv}^3 \cdot \rho_{гр}}{6m_{гр}}. \quad (18)$$

Из выражения (18) найдём минимальный размер капли чугуна, в которой может зародиться пузырёк СО (из условия наличия частички графита)

$$d_{min} = \sqrt[3]{\frac{d_{гр.эkv}^3 \rho_{гр}}{m_{гр}}}. \quad (19)$$

Подставив численные значения $d_{гр.эkv} = 5,5\cdot 10^{-6}$ м; $\rho_{гр} = 2200$ кг/м^3 ; $m_{гр} = 9\div 18$ кг; получим $d_{min} = 2,7\cdot 10^{-5} - 3,4\cdot 10^{-5}$ м при среднем диаметре около 30 мкм.

Выводы

Таким образом, в каплях чугуна диаметром более 30 мкм на поверхности графитовых включений могут зародиться пузырьки монооксида углерода, вследствие чего капли должны взрываться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кравец В.А. Механизм образования бурого дыма при переливах чугуна / В.А. Кравец, В.А. Темнохуд, В.Н. Саржевский // Труды ДонГТУ. Металлургия. - 1999. - Вып. 14. - С. 9-15.
2. Кравец В.А. Подавление бурого дыма при переливах чугуна / В.А. Кравец – Донецк: УкрНТЭК, 2002 - 186 с.
3. Казаков А.А. Разработка методов управления процессом окисления углерода, повышающих эффективность сталеплавильного производства: дис.... д-ра техн. наук: 05.16.02 / А.А.Казаков : ДонНИИчермет. Защита 24.12.1986. - Донецк, 1986 - 265 с.

4. Баптизманский В.И. Физико-химические основы кислородно-конвертерного процесса / В.И. Баптизманский, В.Б. Охотский. - К.-Донецк: Выща школа, 1981.-184 с.
5. Русанов, А.И. Фазовые равновесия и поверхностные явления / А.И. Русанов. – Л.: Химия, 1967. - 388 с.
6. Hiwaman, C. Thermodynamic and kinetic aspects of fat crystallization / C. .Hiwaman, V.M. Starov, A.G.F. Stapley // j. Advances in colloid and interfase science. – 2006.- v.122.- P. 3-33.
7. Aqualiano, D. Crystallization processes in fats and lipid systems / D. Aqualiano, G. Sgualdino // In: Sato K., Garti N., editors. - New York: Dekker; 2001. - P.1.
8. Ниженко В.И. Смачивание графита сплавами на основе железа / В.И. Ниженко, Л.И. Флока // Смачиваемость и поверхностные свойства расплава и твёрдых тел. - К.: Наукова думка, 1972. - С. 93-95.
9. Влияние состава передельного чугуна на смачивание частиц графитовой спели / М.А. Шестобитов, Н.Н. Зверева, П.В. Губчевский, Б.А. Буданов // Смачиваемость и поверхностные свойства расплава и твёрдых тел. - К.:Наукова думка, 1972. – С. 247-249.
10. Слепушова Л.И. Факторы, влияющие на переход углерода в чугун / Л.И. Слепушова // Сталь. – 1958. - №4. – С. 298-300.

Поступила в редакцию 16.07.2010

Рецензент д-р техн. наук, проф. Н.А. Маняк

© Кравец В.А., Темнохуд В.А., 2010

УДК 669.788–699.234.002.5

Е.Н. Любименко, М.В. Гольцова

ФОРМИРОВАНИЕ ГРАДИЕНТНОГО Pd-H СПЛАВА И ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ ПАЛЛАДИЕВОЙ ПЛАСТИНКИ ПРИ ОДНОСТОРОННЕМ НАСЫЩЕНИИ ВОДОРОДОМ

Создана новая водородо-вакуумная установка для исследований формоизменений палладиевой пластины при её одностороннем насыщении водородом при температурах выше 150 °С. Проведены исследования в широком интервале температур и давлений. Обсуждены физические причины индуцированного водородом обратимого формоизменения (изгибов) палладиевой пластины. Сделан вывод о природе изучаемого явления.

Ключевые слова: водород, водородоупругость, формоизменение, водородо-концентрационные напряжения, насыщение

Введение

Внутренние напряжения в металлах и сталях, их возникновение, перераспределение, релаксация, а также эффекты, вызванные ими при термической, пластической и иных видах обработки, составляют важную проблему