

уровня наполнения ПК или скорости истечения из основного ковша, приводит к более равномерному истечению из стаканов-дозаторов.

Увеличение в два раза диаметра третьего стакана-дозатора создает, практически, равномерную картину истечения расплава из всех трех стаканов-дозаторов. Дальнейшее увеличение диаметра третьего или второго стакана-дозатора не приводит к увеличению массовой скорости истечения расплава. Изменение диаметров второго и третьего стаканов не существенно влияет на расход в первом стакане.

Список литературы

1. Недопекин Ф.В. Математическое моделирование сопряженных процессов гидродинамики, тепломассопереноса и затвердевания при формировании слитков и отливок // ИФЖ, 1989. — Т. 57. — N 3. — С. 450–458.
2. Недопекин Ф.В. Математическое моделирование гидродинамики и тепломассопереноса в слитках (научная монография). — Ижевск, Удмуртский университет, 1995. — 236 с.
3. Белоусов В.В., Недопекин Ф.В., Повх И.Л. Тепломассоперенос в затвердевающем бинарном расплаве в условиях смешанной конвекции с учетом турбулентности // ИФЖ, 1994. — Т. 67. — № 3–4. — С. 202–208.
4. Соболев В.В., Трефилов П.М. Теплофизика затвердевания металла при непрерывном литье. — М.: Металлургия, 1988. — 160 с.
5. Самарский А.А. Теория разностных схем. — М.: Наука, 1989. — 616 с.

© Недопекин Ф.В., Белоусов В.В., 2002

КАЗАНЦЕВ Е.И. (ДонНТУ)

ТОЛЩИНА ОКАЛИНЫ НА СЛИТКАХ (ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ)

Выполнена математическая обработка экспериментальных данных по толщине окалины на слитках при их подготовке под прокатку в нагревательных колодцах.

Влияние температуры посадки слитков в нагревательные колодцы

Перед посадкой в нагревательные колодцы слитки имеют окалину толщиной около 0,2 мм. В продолжение посадки эта окалина увеличивается еще на $S_n=0,02$ мм. В процессе нагревания слиток дополнительно окисляется. Образовавшаяся за время нагрева окалина может быть определена из выражения:

$$SdS = \frac{1}{2} (k_n)^2 dt; \quad (1)$$

$$S_n = \int_{S_p+S_n}^{S_n} SdS = \int_0^{\tau_n} \frac{1}{2} k_n^2 d\tau + C, \quad (2)$$

где τ_n — время нагрева, мин; C — постоянная, которая определяется из условия, что при $t_n=0$ толщина окалины $S_n=S_p+S_n$, окалина, образовавшаяся за время раздевания S_p плюс окалина, образовавшаяся при посадке S_n ; k_n — константа окисления ($\text{мм}/\text{мин}^{1/2}$), определяемая из выражения:

$$k = e^{-\frac{a}{T}+b}; \ln k = -\frac{a}{T} + b, \quad (3)$$

где a, b — постоянные; T — температура, К.

С известными допущениями можно принять, что подъем температуры нагреваемого изделия является линейной функцией времени, т.е.

$$T = T_0 + C_n \cdot \tau,$$

где T_0 — температура тела в момент посадки, К; τ — время, мин.; C_n — скорость подъема температуры, град./мин.

$$C_n = \frac{T_s - T_0}{\tau_n}, \quad (4)$$

где T_s — температура выдержки, К; τ_n — общее время нагрева, потребное для достижения температуры T_s .

Текущая температура тела T , равна:

$$T = T_0 + \frac{T_s - T_0}{\tau_n} \tau = \frac{T_0 \tau_n + (T_s - T_0) \tau}{\tau_n}. \quad (5)$$

После подстановки значения текущей температуры из выражения (5) в формулу (3) и после этого в уравнение (2) закон окисления становится:

$$SdS = \frac{1}{2} \exp \left(- \frac{2a\tau_n}{T_0 \tau_n + (T_s - T_0) \tau} + 2b \right) d\tau. \quad (6)$$

Выражение для толщины окалины на слитке в любой момент времени нагрева τ примет вид:

$$\frac{S^2}{2} = C + \frac{1}{2} \int_0^\tau \exp \left(- \frac{2a\tau_n}{T_0 \tau_n + (T_s - T_0) \tau} + 2b \right) d\tau. \quad (7)$$

Это уравнение не очень удобно для практических вычислений, но оно позволит выяснить роль различных факторов на толщину окалины. Прежде всего, рассмотрим влияние температуры посадки металла.

Для коэффициента окисления k мм/мин^{1/2} при образовании окалины на железе в атмосфере воздуха получены [1] следующие значения постоянных величин: $a=10100$ и $b=5,25$, тогда выражение (3) приобретает вид:

$$k = \exp \left(- \frac{10.100}{T} + 5,25 \right), \text{ мм/мин}^{1/2}. \quad (8)$$

Текущая температура тела представлена выражением (5). Для упрощения рассматриваемых зависимостей воспользуемся следующей эмпирической формулой для определения времени нагрева слитков в нагревательных колодцах:

$$\tau_n = \frac{T_s - T_0}{2}, \text{ мин.} \quad (9)$$

Подставив в (5) выражение для времени нагрева из (9) и затем в (3) получим:

$$k = \exp \left(- \frac{a}{T} + b \right) = \exp \left[- \frac{a\tau_n}{T_0 \tau_n + (T_s - T_0) \tau} \right] = \exp \left(- \frac{a \frac{T_s T_0}{2}}{\frac{T_0 (T_s - T_0)}{2} + \frac{(T_s - T_0) 2\tau}{2}} \right) =$$

$$= \exp\left(-\frac{a(T_s - T_0)}{(T_s - T_0)(T_0 + 2\tau)}\right) = \exp\left(-\frac{a}{T_0 + 2\tau}\right). \quad (10)$$

Подставив выражения (8) и (10) в (6) получим:

$$SdS = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{10 \cdot 100 \cdot 2}{T_0 + 2\tau} + 10,4\right) d\tau = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{2 \cdot 10 \cdot 100}{T_0 + C_n \tau} + 10,4\right) d\tau. \quad (11)$$

Тогда скорость увеличения окалины описывается уравнением:

$$\frac{dS}{d\tau} = \frac{1}{2S} e^{\frac{2 \cdot 10 \cdot 100}{T_0 + C_n \tau} + 10,4}. \quad (10,а)$$

Это уравнение решено последовательно для температур посадки от 0°C до 1300°C . На рис. 1 представлена толщина окалины, которая получается в конце нагревания в зависимости от температуры посадки, при значении температуры выдержки равной 1300°C . Нагрев изделия в печи предполагается происходящим со скоростью нагрева, указанной на графике. Первичная толщина окалины принята равной 0,2 мм.

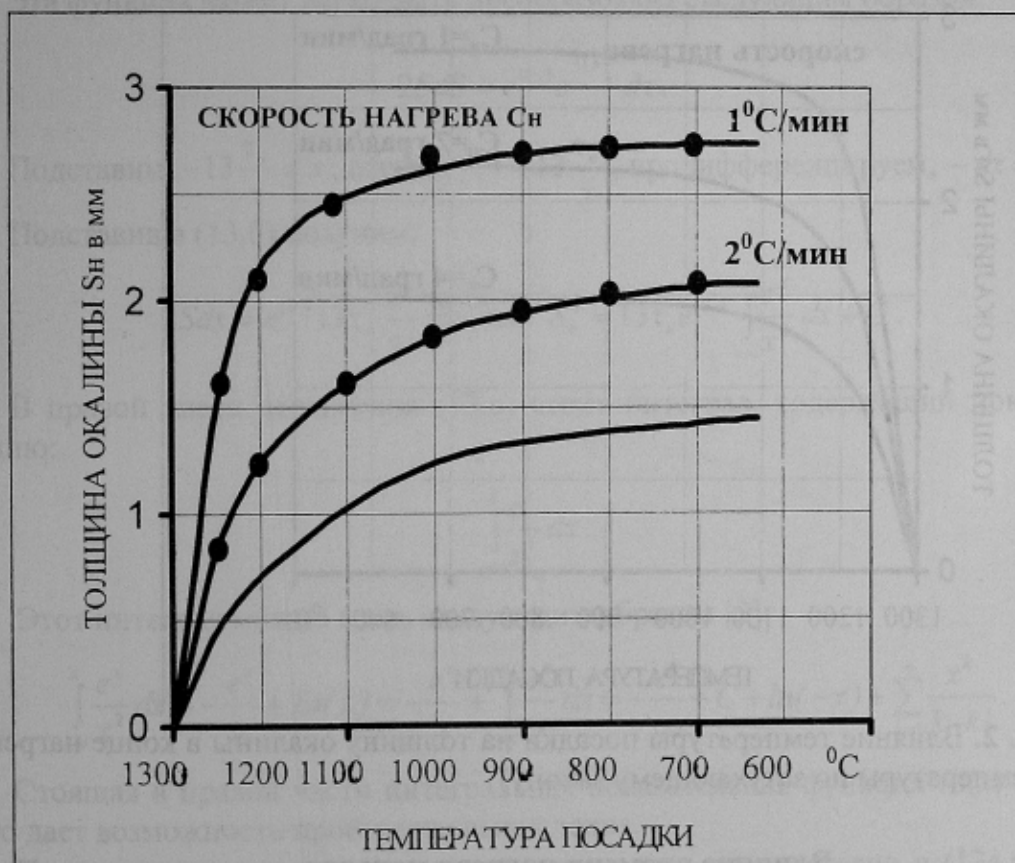


Рис. 1. Влияние температуры посадки на толщину окалины в конце нагрева (линейный подъем температуры)

Если произвести посадку слитков при температуре 1300°C , нагревание было бы весьма незначительным и мы не получили бы окалины. Если температура посадки уменьшается, толщина окалины в конце нагревания резко возрастает. При посадке слитков с температурой ниже 850°C влияние температуры посадки практически незначительно и не сказывается на конечной толщине окалины.

Так как слитки в основном садят в колодцы при температуре от 0°C до 900°C и очень редко с более высокой температурой, то толщина окалины в конце нагрева практически остается неизменной от нагрева к нагреву и меняется в пределах порядка 2–

5%. Если посадка слитков производится при температуре 1000°C , то слой окалины « S_n » уменьшается на 10%, что дает 3% от общей толщины окалины с размером в 6 мм. Существенное уменьшение угара произойдет лишь тогда, когда слитки будут посажены с температурой выше 1100°C , но такие условия редко встречаются на практике.

Рис. 1 также показывает, что температура посада T_0 практически не влияет на толщину окалины вне зависимости от скорости подъема температуры печи.

Представленный на рис. 2 график свидетельствует о том, что на практике это влияние проявляется еще слабее. Многие металлургические печи и в частности нагревательные колодцы имеют слишком слабую тепловую мощность, чтобы поддерживать линейную скорость подъема температуры печи. Подъем температуры производят по кривой, замедляющей свой рост по мере приближения к температуре T_n . В этом случае температура посадки слитков в районе температур 0°C – 1100°C не дает существенного влияния на толщину окалины. Таким образом, практически T_0 не влияет на толщину окалины и ее можно заменить в предыдущих формулах любым значением между 0°C и 1300°C , величиной, которая позволяет более удобно производить вычисления.

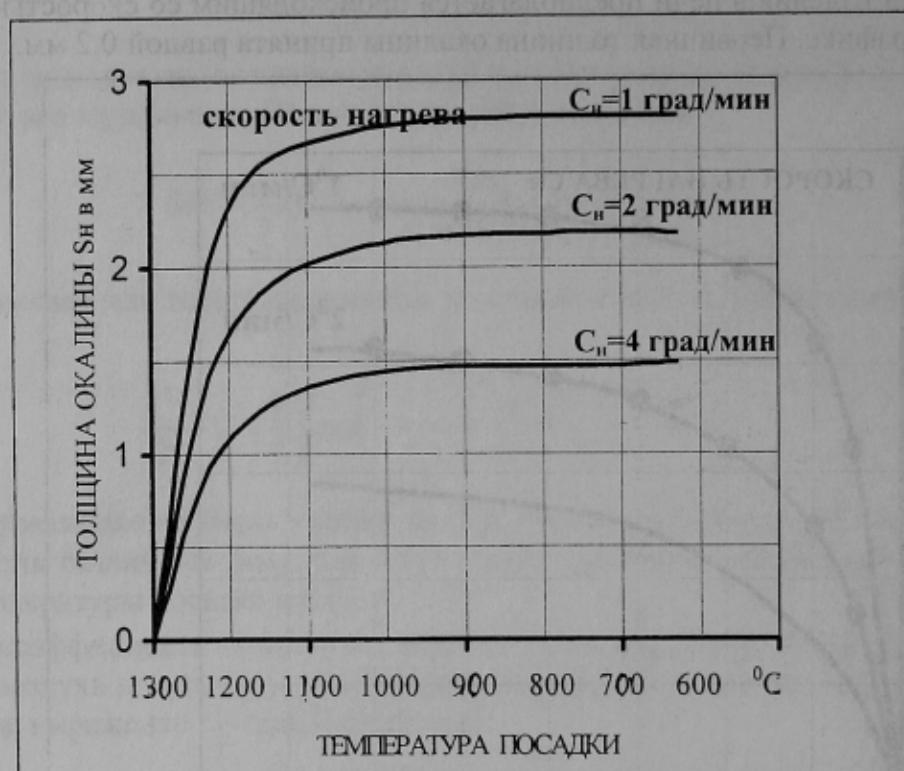


Рис. 2. Влияние температуры посадки на толщину окалины в конце нагрева (подъем температуры по затухающему закону)

Влияние времени нагрева металла

Собственно время нагрева слитков, без учета процесса выравнивания или томления можно найти по формуле:

$$\tau_n = \frac{T_n - T_0}{C_n},$$

где t_n — время нагрева в минутах; C_n — скорость подъема температуры, град./мин.

Скорость подъема температуры C_n меняется в зависимости от тепловой мощности печи. В формулы можно помещать либо значение скорости нагрева C_n либо значение времени нагрева τ_n . Поскольку время нагрева употребляется в инструкциях и реже применяется скорость подъема температуры, то далее нами используется величина τ_n .

Используя выражение (6) и данные из формулы (8) можем записать уравнение для скорости окисления в следующем виде:

$$\frac{dS}{d\tau} = \frac{1}{2S} \exp \left[-\frac{10.100\tau_n 2}{T_0(\tau_n - \tau) + T_g \tau} + 10,4 \right]. \quad (12)$$

Выше было показано, что практически температура посяда металла T_0 не оказывает влияния на процесс окисления и можно взять любое значение T_0 от 0°C до 1300°C ; мы примем $T_0=0^{\circ}\text{C}$, тогда выражение (12) примет вид:

$$\frac{dS}{d\tau} = \frac{1}{2S} \exp \left(-\frac{20.200\tau_n}{T_g \tau} + 10,4 \right). \quad (13)$$

В среднем, T_g при 1275°C равно 1550 К, тогда:

$$\frac{dS}{d\tau} = \frac{1}{2S} \exp \left(-\frac{20.200}{1550} \frac{\tau_n}{\tau} + 10,4 \right). \quad (13,а)$$

Эта функция может легко быть преобразована следующим образом:

$$2SdS = e^{10,4} e^{-13 \frac{\tau_n}{\tau}} d\tau. \quad (13,б)$$

Подставим: $-13 \frac{\tau_n}{\tau} = x$, отсюда $-\tau = 13 \frac{\tau_n}{x}$, продифференцируем, $-d\tau = -13 \frac{\tau_n}{x^2} dx$.

Подставив в (13,б) получим:

$$2Sds = e^{10,4} 13\tau_n \frac{e^x}{x^2} dx, \text{ или } S_n^2 = 13\tau_n e^{10,4} \int_{-\infty}^x \frac{e^x}{x^2} dx + C. \quad (13,в)$$

В правой части выражения (13,в) стоит интеграл, содержащий показательную функцию:

$$\int_{-\infty}^x \frac{e^x}{x^2} dx. \quad (13,г)$$

Этот интеграл можно взять следующим образом [2]:

$$\int_{-\infty}^x \frac{e^x}{x^2} dx = -\frac{e^x}{x} + Ei(x) = -\frac{e^x}{x} + \int_{-\infty}^x \frac{e^x}{x} dx = -\frac{e^x}{x} + C + \ln(-x) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{x^k}{k \cdot k!}. \quad (13,д)$$

Стоящая в правой части интегральная показательная функция $Ei(x)$ табулирована, что дает возможность произвести вычисления.

Поскольку нас интересует случай, когда $\tau=\tau_n$, то подставив в (13а,б) получаем при $\tau=0$; $x=-\infty$; при $\tau=\tau_n$; $x=-13$.

По таблице [3] находим значение интегральной показательной функции $Ei(x)$.

Подставив числовые значения в (13,д) и затем в (13,а) получаем:

$$S_n^2 = 13e^{10,4} \left(-\frac{e^{-13}}{-13} + 1,622 \cdot 10^{-7} \right) \tau_n + C = 0,1457 \cdot \tau + C. \quad (14)$$

Постоянная C может быть определена из условия, что при $\tau_n = 0$ т.е. к началу нагрева, металл уже покрыт слоем окалины, образовавшимся за время разведения и посядки слитка.

$$S=S_p+S_n=0,22, \text{ тогда } C=S^2=(0,22)^2=0,0484 \approx 0,05.$$

Подставив в (14) получаем:

$$S_n^2 = 0,1457\tau_n + 0,05, \quad (15)$$

откуда

$$S_n = \sqrt{0,1457\tau_n + 0,05}. \quad (16)$$

На рис. 3 приведена по опытным данным толщина окалины в зависимости от времени нагрева τ_n . Измеренная толщина окалины включает в себя и окалину, образовавшуюся во время томления металла и за время выдержки или подставив из (16) выражение для S_n будет:

$$S_k = S_n + S_m + S_o,$$

имеем

$$S_k = \sqrt{0,1457\tau_n + 0,05} + S_m + S_o. \quad (16,a)$$

Это параболическая зависимость в функции от τ_n .

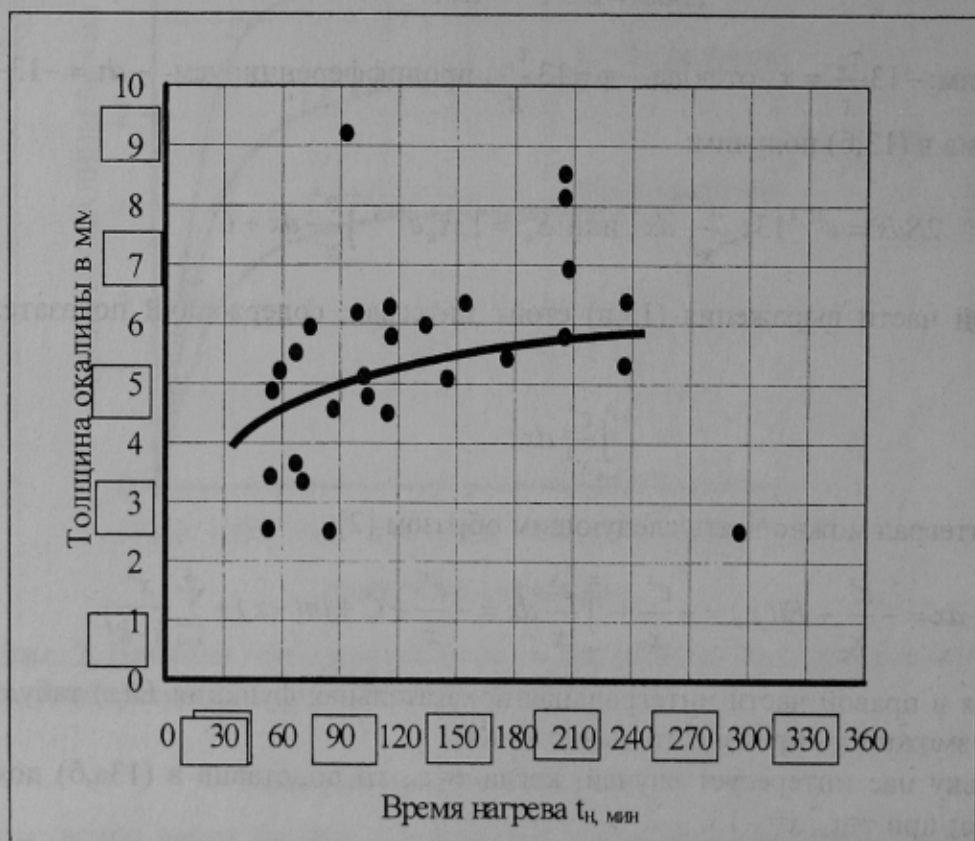


Рис. 3. Влияние времени нагрева на конечную толщину окалины

Продифференцировав уравнение (16) получим скорость окисления при $\tau_n = 0$.

$$\left(\frac{dS}{d\tau_n}\right)_{\tau_n=0} = \frac{0,0728}{\sqrt{0,05}} = \frac{0,0728}{0,224} = 0,326.$$

Итак, формулы дают скорость окисления несколько меньше, чем получается из практических данных.

С другой стороны, когда $\tau_n=0$ график дает значение толщины окалины порядка $S_k \approx 3,6$ мм.

Конечная толщина окалины S_k состоит из окалины, образовавшейся за время разведения S_p , посадки S_n , нагрева S_h , томления S_m и выдачи S_v . По формуле (10,а) получаем среднее значение $S_g=0,74$ мм; $S_n+S_p=0,22$, тогда $S_m=3,6-0,22-0,74=2,65$ мм.

Таким образом, при выдержке получается окалина толщиной в 2,65 мм значение, которое будет также получено ниже.

Рис. 3 дает, что при нагреве образуется окалина $5,3-3,6=1,7$ мм толщиной. Ввиду того, что среднее время нагрева равно 120 минут по формуле (16) получаем:

$$S_n^2 = 0,1457\tau_n + 0,05 = 0,0066 \cdot 120 + 0,05; S_n=4,18 \text{ мм.}$$

Порядок величин достаточно близок, но очевидно нами принято большое значение коэффициента окисления в процессе нагрева. Тем не менее, теоретическая формула может быть использована для расчетов, если подставить практическое значение коэффициента окисления. По этой причине нами были дополнительно рассмотрены образцы окалины и проведены дополнительные расчеты на ЭВМ.

Влияние продолжительности нагрева (выдержки) слитков

Перед началом томления окалина имеет толщину $S_n=1,7$ мм. В дальнейшем окалина увеличивается согласно зависимости:

$$SdS = \frac{k^2}{2} d\tau.$$

В течение томления толщина окалины увеличивается до величины, определяемой следующим образом:

$$\int SdS = \int \frac{k^2}{2} d\tau; S^2 = k_m^2 \cdot \tau + C_m \quad (17)$$

для $\tau = 0$; $S^2 = S_n^2$ и $C_m = S_n^2$, тогда:

$$S^2 = S_n^2 + k_m^2 \cdot \tau. \quad (18)$$

В конце томления время τ_m равно продолжительности выдержки и толщина окалины, образовавшейся за время томления может быть определена по формуле:

$$S_T = \sqrt{S_n^2 + k_m^2 \cdot \tau_m} - S_n, \quad (19)$$

или

$$S_m = k_m \sqrt{\tau_m + \left(\frac{S_n}{k_m}\right)^2} - S_n. \quad (20)$$

На рис. 4 приведены экспериментальные данные и дано значение функции S_k в зависимости от τ_m :

$$S_k = S_n + \left(k_m \sqrt{\tau_m + \left(\frac{S_n}{k_m}\right)^2} - S_n\right) + S_n,$$

для $\tau_m = 0$; $S_k=S_g+S_n$ так как $S_n=1,7$ мм и $S_g=0,74$ мм, то $S_k=2,44$ мм.

Рис. 4 дает примерно такое же значение $\tau_m = 0$. С другой стороны, если мы возьмем производную от S_k по τ_m , мы должны снова получить константу окалинообразования k_m , которая прежде была определена приблизительно $k_m \approx 0,279$ мм/мин^{1/2}.

Теперь мы найдем:

$$\frac{dS_k}{d\tau_m} = \frac{k_m}{2\sqrt{\tau_m + \left(\frac{S_n}{k_m}\right)^2}}; \quad \frac{dS_k}{d\tau_m} = \frac{k_m^2}{2\sqrt{\tau_m \cdot k_m^2 + S_n^2}} \quad (21)$$

Для $\tau_m = 0$:

$$\frac{1}{2S_n} \cdot k_m^2 = \left(\frac{dS_k}{d\tau_m}\right)_{\tau_m=0} \quad (21,a)$$

Рис. 4 дает значение порядка:

$$\left(\frac{dS_k}{d\tau_m}\right)_{\tau_m=0} = 1,5 \cdot 10^{-2}$$

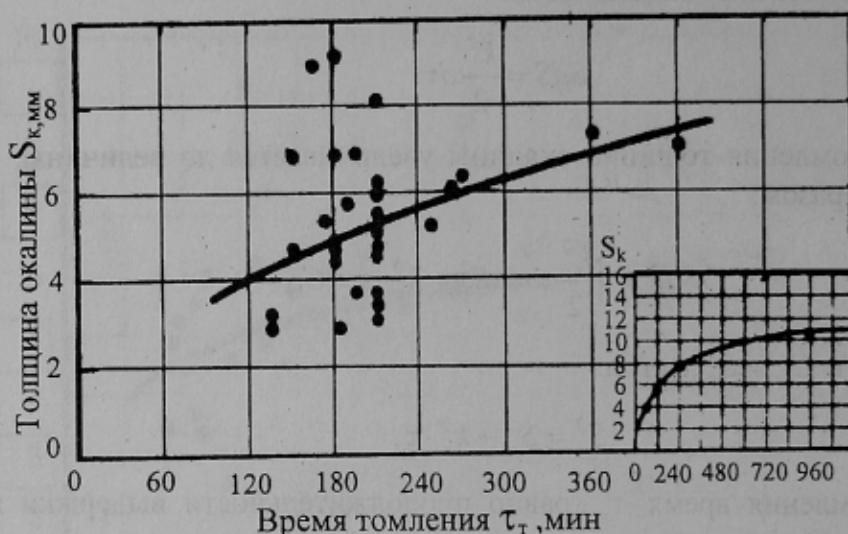


Рис. 4. Влияние продолжительности томления-выдержки τ_m на конечную толщину окалины S_k

Тогда из (21,а) имеем:

$$k_m = \sqrt{2 \cdot 1,7 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2}} = 0,22 \text{ мм/мин}^{1/2}$$

Таким образом, расчеты близко сходятся, что позволяет их использовать с большей уверенностью.

Рис. 4 дает для окалины, образовавшейся в течение томления величину порядка 3 мм, так что можно найти общую толщину окалины:

до посадки в колодцы	$S_p = 0,20$ мм – 3,7%
в течение посадки	$S_n = 0,02$ мм – 0,3%
в течение нагрева	$S_n = 1,70$ мм – 32%
в течение томления	$S_\tau = 2,64$ мм – 50%
в течение выдачи	$S_n = 0,74$ мм – 14%
	<hr/>
	$S_k = 5,30$ мм – 100%

Итак, главная часть окалины образуется в течение томления и почти вся толщина окалины образуется в течение продолжительности нагрева и томления металла в печи.

Влияние температуры печи во время выдержки металла

Температура печи во время томления имеет большое значение для получения высокого качества нагрева металла. Повышение температуры печи во время томления приводит к увеличению слоя окалины, что является нежелательным явлением. В то же самое время повышение температуры печи может привести к повышению температуры нагрева металла, т.е. к повышению этого показателя качества нагрева. Влияние температуры печи во время томления на толщину окалины представлено на рис. 5 по данным нагрева слитков в нагревательных колодцах. На основании этих данных можно считать, что толщина окалины увеличивается примерно на 0,26 мм при возрастании температуры печи во время томления на каждые 10 градусов. В нашем случае это составляет порядка 6,5%. Это значение увеличения толщины окалины является существенным и должно быть учтено на практике.

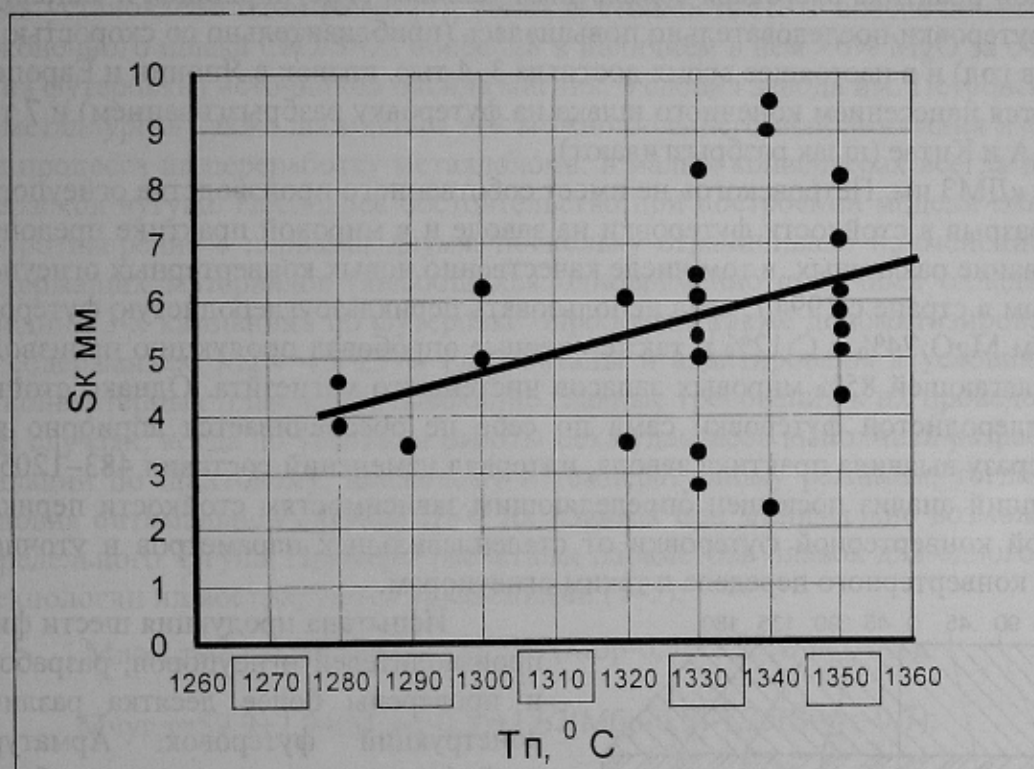


Рис. 5. Влияние температуры печи во время томления на конечную толщину окалины

На основании опытных материалов получены формулы для определения толщины окалины, образующейся в различные периоды нагрева на слитках в нагревательных колодцах.

Список литературы

1. Казанцев Е.И. Промышленные печи. — М.: Металлургия, 1975. — 368 с.
2. Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов, произведений. — М.-Л.: Техтеориздат, 1948. — 360 с.
3. Янке Е., Эмде Ф. Таблицы функций. — М.: Техтеориздат, 1975. — 220 с.

© Казанцев Е.И., 2002