

УДК 620.18: 669-419:621.771, 621.785.532

А.Л. Петелин¹, А.И. Плохих²¹ Научно-исследовательский технологический университет «МИСиС»² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

МОДЕЛЬ ДИФФУЗИИ ПО ГРАНИЦАМ СЛОЕВ В МНОГОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Аннотация. В работе приведены результаты металлографического исследования, показывающие влияние толщины слоев многослойных металлических материалов на глубину диффузии при проведении химико-термической обработки азотированием. Предложена модель ускоренного проникновения диффундирующего элемента по границам слоев.

Ключевые слова: многослойные материалы, химико-термическая обработка, азотирование, границы слоев, диффузия.

THE MODEL OF THE LAYER BOUNDARY DIFFUSION IN MULTILAYER MATERIALS

Abstract. The results of metallographic studies show the effect of the layers thickness of multilayer metal material on the diffusion depth after chemical heat treatment. The accelerate diffusion model of diffusible element along layers boundaries is proposed.

Keywords: multilayer metal materials, chemical heat treatment, nitriding, layers boundaries, diffusion.

При создании современных технических устройств эффективным может оказаться применение нового класса конструкционных металлических материалов, получаемых на основе синтеза многослойных композитных заготовок. Наряду с известными способами получения и использования [1–3], перспективными становятся также гомогенные материалы, имеющие структуру, состоящую из сотен и тысяч слоев, разделенных между собой большеугловыми границами.

Проведенные исследования показали, что получение такой структуры возможно в частности в том случае, если в исходной композиции участвуют сплавы на основе одного металла, имеющие различное кристаллическое строение (например, решетки ОЦК и ГЦК, которые характерны для сталей различных марок). В результате проведенных исследований [4] разработан способ получения (методом горячей прокатки) многослойных заготовок листового сортамента со слоистой структурой с чередованием слоев двух различных марок стали. Применение разработанного экспериментального технологического маршрута позволяет получать заготовки полосового сортамента шириной 100 мм и толщиной от 2 до 10 мм. Микроструктура материала имеет ламинарное строение, которое можно характеризовать как попеременно чередующиеся между собой слои с толщинами от 100 до 0,3 мкм (по расчету). При этом слои имеют кристаллографическую разориентировку от 15 до 20°, что соответствует большеугловым границам зерен в исходных сталях [4]. Ламинарное строение многослойной композиции из сталей 08X18H10 и 40X13 представлено на рис. 1.

Установлено, что при соответствующем выборе исходной композиции заготовки (т.е. выборе соответ-

ствующих марок стали) ламинарное строение межслойных границ сохраняется вплоть до температур начала фазовых переходов в используемых сталях.

Показано, что многослойные материалы, для изготовления которых использованы известные марки сталей, обладают повышенными механическими свойствами вдоль направления слоев ламинарной структуры [5] и могут быть использованы как силовые элементы в технических устройствах. При этом в плоскостях поперечного сечения листовых заготовок, т.е. в направлениях перпендикулярных направлению слоев, требуется проводить упрочняющие поверхностные обработки, например, химико-термическую обработку (ХТО).

Первые опыты по ХТО азотированием в многослойной композиции 08X18H10+08X18 показали, что глуби-

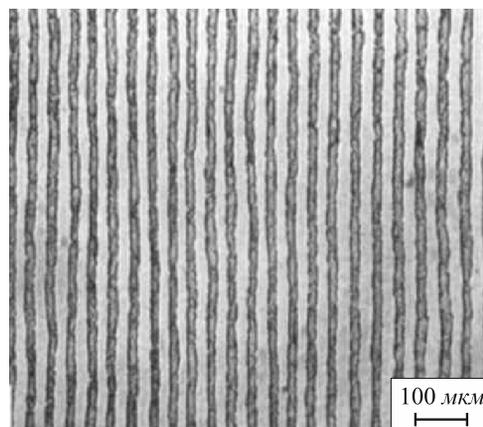


Рис. 1. Микроструктура многослойной листовой заготовки композиции 40X13+08X18H10 после первого технологического передела, толщина заготовки 2 мм, толщина слоя ~ 20 мкм, направление прокатки перпендикулярно плоскости шлифа

на азотирование в многослойном материале больше, чем его глубина в трудно азотируемой стали 08X18N10 [6]. При этом было показано, что глубина азотирования возрастает с уменьшением толщины слоев в образцах многослойного материала, обработанных в одной садке. На рис. 2 показаны глубины азотирования в данной многослойной композиции при толщине слоев 2 мкм (рис. 2, а) в сравнении с глубиной азотирования стали 08X18N10 при одинаковых условиях (рис. 2, б).

Причиной увеличения толщины азотированного слоя в многослойных материалах может являться ускоренная диффузия азота по границам слоев (ГС) с последующим насыщением объемов слоев от ГС, как от источников диффундирующего элемента. Для анализа этого предположения в настоящей работе предлагается модель диффузии по ГС многослойного материала, базирующаяся на известной модели Фишера для зернограничной диффузии [7].

Рассмотрим систему параллельных слоев толщиной l , разделенных границами слоев, имеющих толщину $\delta \ll l$ (рис. 3). Будем считать, что диффузия по ГС происходит также, как и диффузия по границам зерен (ГЗ), т.е. при температурах $T < 0,7T_{пл}$ материала матрицы коэффициент диффузии по ГС – $D_b \gg D$ – коэф-

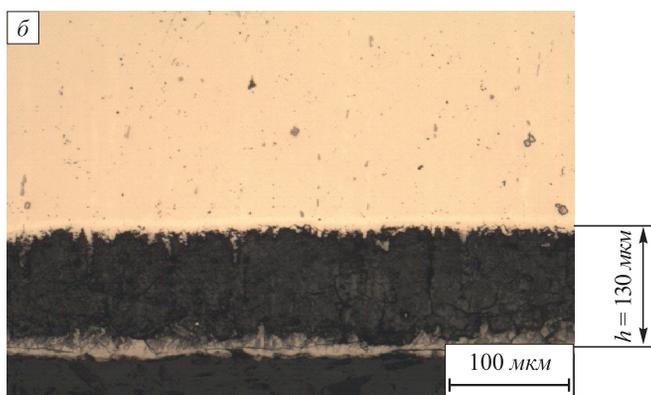
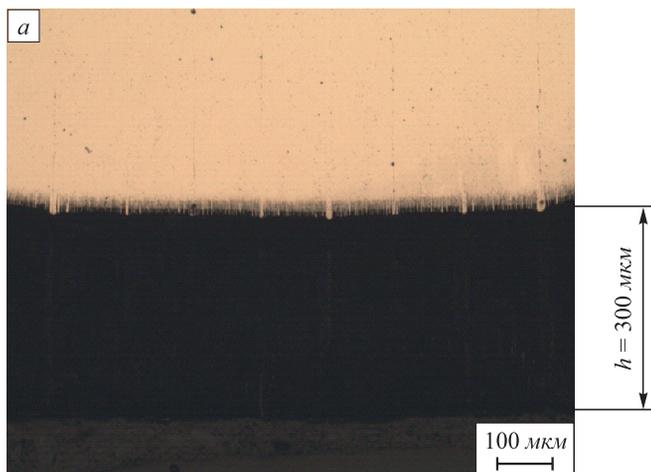


Рис. 2. Азотированные слои, h – глубина азотирования: а – в многослойной композиции 08X18N10+08X18, толщина ламинарного слоя 2 мкм; б – в стали 08X18N10, контрольный образец. Режим азотирования: $T = 540$ °С; длительность 45 ч

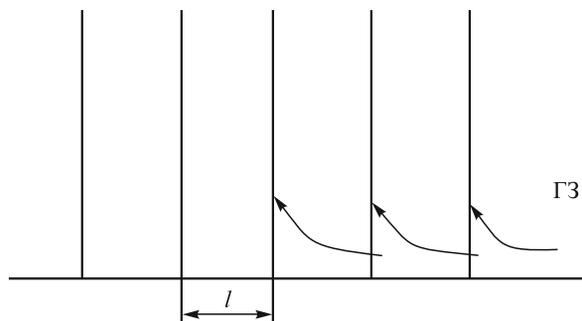


Рис. 3. Система параллельных слоев

фициента диффузии в объеме слоя. Также отметим, что ГС, как это следует из микроскопических исследований, являются сплошными по всей своей длине и не претерпевают структурных изменений в условиях, соответствующих рассматриваемым диффузионным процессам (химико-термическая обработка внешней поверхности с проникновением упрочняющего элемента – азота внутрь многослойного материала).

Запишем уравнения диффузионной модели проникновения вещества с внешней поверхности вдоль ГС с одновременным распространением внутрь слоя от ГС, как от источников диффузии. На рис. 4 показано направление диффузионных потоков при миграции атомов диффундирующего вещества по ГС и внутрь слоя.

Так же как в модели зернограничной диффузии будем считать, что диффузией от внешней поверхности через объем материала (вдоль направления y) в слое можно пренебречь. Тогда модель диффузии для отдельно взятой ГС и для одного слоя будет иметь вид

$$\frac{\partial c_b}{\partial t} = D_b \frac{\partial^2 c_b}{\partial y^2} + \frac{2}{\delta} D \frac{\partial c_b}{\partial x} \Big|_{x=\pm \frac{\delta}{2}}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где c_b – концентрация диффундирующего элемента в ГС, c – концентрация в объеме слоя.

Отличие данного варианта модели от модели Фишера [7] в том, что диффузия внутри слоя определяется

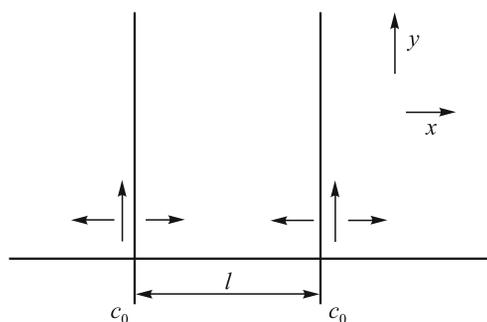


Рис. 4. Направление диффузионных потоков при диффузии по границам слоев

двумя источниками, двумя слоевыми границами, т.е. она будет зависеть от толщины слоя l . Это также повлияет на распределение концентрации в каждой ГС, так как второй член в уравнении (1) учитывает сток в объем слоя и зависит от концентрации в слое и от ее толщины l .

Для получения решения уравнения (2) запишем начальные и граничные условия для $c(x, y, t)$:
 начальные условия: $c(0, y, 0) = c(l, y, 0) = 0$,
 граничные условия: $c(x, 0, t) = c_0$; $c(x, y, t) = c_b$.

Решение (2) при $t > \frac{0,5l^2}{D} \left(\frac{Dt}{l^2} > 0,05 \right)$ с точностью до 1 % можно представить в виде следующей формулы [8]:

$$\frac{c(x, y, t)}{c_b} = 1 - \frac{4}{\pi} \exp\left(-\frac{\pi^2 Dt}{l^2}\right) \sin \frac{\pi x}{l}. \quad (3)$$

Для подстановки решения (3) в уравнение (1) найдем величину $\frac{\partial c(x, y, t)}{\partial x} \Big|_{x=0}$, считая, вслед за Фишером, что δ – толщину границы можно не учитывать, как реальный размер:

$$\frac{\partial c(x, y, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\frac{4c_b}{l} \exp\left(-\frac{\pi^2 Dt}{l^2}\right). \quad (4)$$

Подставим решение (4) в уравнение (1), записанное для квазистационарного случая:

$$D_b \frac{\partial^2 c_b}{\partial y^2} - \frac{8D}{\delta l} \exp\left(-\frac{\pi^2 Dt}{l^2}\right) c_b = 0. \quad (5)$$

Введем обозначение: $b = \frac{\pi^2 Dt}{l^2}$. Тогда решение уравнения (5) можно представить в виде

$$c_b = c_0 \exp\left[\left(-\frac{8D}{D_b} \frac{1}{\delta l} \exp(-b)\right)^{0,5} y\right]. \quad (6)$$

Из решения (6) можно выразить диффузионную длину L_b , которая показывает, на какой глубине от внешней поверхности концентрация в ГС падает в e раз:

$$L_b = \left(\frac{D_b \delta l}{8D} e^b\right)^{0,5}. \quad (7)$$

Сравним диффузионную длину по границе слоя для рассматриваемого случая L_b и диффузионную длину решения задачи Фишера для отдельно взятой индивидуальной границы зерна L_b^F .

Как известно [8]

$$L_b^F = \left(\frac{D_b \delta \sqrt{\pi t}}{2\sqrt{D}}\right)^{0,5} = \left(\frac{D_b \delta}{8D} 4\sqrt{\pi} \sqrt{Dt}\right)^{0,5}. \quad (8)$$

Найдем отношение $\alpha = \frac{L_b}{L_b^F}$:

$$\alpha = \left(\frac{l}{(Dt)^{0,5}} \frac{e^b}{4\pi^{0,5}}\right)^{0,5} = \left(\beta \frac{\exp\left(\frac{\pi}{\beta}\right)^2}{4\pi^{0,5}}\right)^{0,5}, \quad (9)$$

где β – это отношение толщины слоя к диффузионной длине объемной диффузии, $\beta = \frac{l}{(Dt)^{0,5}}$.

Численные оценки α из уравнения (9) показывают, что, если толщина слоев много больше пути объемной диффузии, т.е. $l \gg (Dt)^{0,5}$, то диффузия по ГС происходит согласно решению Фишера, $L_b \rightarrow L_b^F$ и $\alpha \approx 1$. Но с уменьшением толщин слоев, когда путь объемной диффузии $(Dt)^{0,5} \gg l$, решение Фишера становится непригодным, глубина проникновения по слоевой границе возрастает, $L_b > L_b^F$ и $\alpha > 1$. Вследствие этого при малых величинах l (малых β) из-за оттока из ГС внутрь слоев при тех же условиях должно происходить возрастание глубины проникновения диффундирующего вещества по объемам слоев – возрастание общей глубины диффузионного фронта в многослойном материале. Для определения положения диффузионного фронта в любой точке слоя необходимо получить общее решение уравнений (1) и (2). Оно имеет следующий вид:

$$c(x, y, t) = c_0 \exp\left(-\frac{y}{L_b}\right) \left(1 - \frac{4}{\pi} \exp(-b) \sin \frac{\pi x}{l}\right). \quad (10)$$

При известных величинах D , D_b и l уравнение (10) позволяет построить профиль диффузионного фронта, т.е. провести изоконцентрационную линию для заданного отношения c/c_0 через весь слой от $x = 0$ до $x = l$.

С помощью уравнения (10) проведем оценку глубины азотирования композиции 08X18H10+08X18 с толщиной слоев $l = 5$ мкм. Режим азотирования выберем тот же, что использовался в опытах для данной композиции: $T = 540$ °С, длительность 45 ч. Для оценки глубины диффузии в условиях азотирования многослойного материала примем, что отношение диффузионной длины объемной диффузии к средней толщине слоя $(Dt)^{0,5}/l$ составляет величину, ненамного большую единицы, например 1,1. Коэффициент диффузии по границам слоев D_b будем считать близким к коэффициентам диффузии по границам зерен, что означает, что $D_b/D \approx 10^3$. В соответствии с уравнением (10) путь проникновения по объему L_V на середине каждого слоя определяется выражением

$$L_V = L_b \left[1 + \ln\left(1 - \frac{4}{\pi} e^{-b}\right)\right]. \quad (11)$$

Подстановка всех приведенных данных в выражение (11) приводит к оценочному значению $L_V \approx 320$ мкм.

Данное значение близко к экспериментальным данным, полученным для глубины азотированного слоя композиции 08X18H10+08X18 [6]. Можно считать, что путь диффузии азота, т.е. глубина, на которой концентрация азота падает в e раз, с достаточной достоверностью характеризует глубину азотирования.

Более точное прогнозирование толщины азотированного слоя в многослойных материалах требует дальнейшего уточнения предложенной модели. В частности, требуется учет различия в скоростях оттока азота от ГС в соседние (граничащие друг с другом) отличающиеся по составу слои. Стали соседних слоев в многослойных материалах имеют существенно разные свойства и структуру. Соответственно диффузионные подвижности азота в этих слоях также будут отличаться, что приведет к неравенству диффузионных потоков в объемы слоев по разные стороны от ГС.

Кроме того, необходимо включить в рассмотрение диффузию по границам зерен внутри самих слоев, обуславливающую наличие дополнительных путей отвода азота от слоевых границ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Производство слоистых композиционных материалов. / А.Г. Кобелев, В.И. Лисак, В.Н. Чернышов и др. – М.: Интермет-Инжиниринг, 2002. – 496 с.
2. Трыков Ю.П., Гуревич Л.М., Шморгунов В.Г. Слоистые композиты на основе алюминия и его сплавов. – М.: Металлургия, 2004. – 230 с.
3. Карпов М.И., Внуков В.И., Волков К.Г. и др. // Материаловедение. 2004. № 1. С. 48 – 53.
4. Колесников А.Г., Плохих А.И., Комисарчук Ю.С., Михальцев И.Ю. // Металловедение и термическая обработка металлов. 2010. № 6. С. 44 – 49.
5. Колесников А.Г., Плохих А.И. // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. «Приборостроение». 2010. С. 44 – 50.
6. Плохих А.И., Власова Д.В., Ховова О.М., Полянский В.М. // «Наука и образование» – электронное научное издание. 2011. № 11. Страница размещения: <http://technomag.edu.ru/262116.html>
7. Бокштейн Б.С., Копецкий Ч.В., Швиндлерман Л.С. Термодинамика и кинетика границ зерен в металлах. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.
8. Бокштейн Б.С. Диффузия в металлах. – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.

© 2013 г. А.Л. Петелин, А.И. Плохих

Поступила 28 августа 2012 г.

УДК 669.01

В.В. Конашков¹, В.С. Цепелев¹, О.А. Чикова¹, А.В. Белоносов²

¹ Уральский федеральный университет

² Уральский государственный педагогический университет

О ВЛИЯНИИ СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ НА ВЯЗКОСТЬ ЖИДКОЙ СТАЛИ 100Г13Х2Л

Аннотация. Проведено вискозиметрическое исследование жидкой стали 100Г13Х2Л в режиме нагрева и последующего охлаждения образцов. Образцы для исследования отобраны от слитков, полученных различными способами: методом окисления и путем переплава. По результатам измерений температурных и временных зависимостей кинематической вязкости жидкого металла определен оптимальный режим температурно-временной обработки расплава перед кристаллизацией.

Ключевые слова: вязкость, жидкая сталь, температурно-временная обработка.

THE INFLUENCE OF THE VISCOSITY OF THE PROCESS FOR PRODUCING LIQUID STEEL 100G13H2L

Abstract. Viscometric study conducted liquid steel 100G13H2L in heating and subsequent cooling of the samples. The samples were selected for the study from ingots produced by different methods: the method of oxidation and by remelting. The results of measurements of the temperature and time dependence of the kinematic viscosity of the liquid metal determined optimal time-temperature treatment before the melt crystallization.

Keywords: viscosity, liquid steel, temperature-time processing.

Вопрос о влиянии способа получения на литейные свойства расплавов сталей, которые определяются их структурным состоянием, является актуальным. Известно, что жидкотекучесть расплава предопределяет процесс кристаллизации и механические характеристики готовых стальных изделий [1 – 4].

Авторы настоящей работы предлагают перспективный способ улучшения качества изделий из ста-

ли 100Г13Х2Л – гомогенизирующую термическую обработку металлической жидкости [3]. Этот способ позволяет получить металл с повышенным уровнем механических свойств и не требует высоких скоростей охлаждения [3 – 4]. Идея метода основана на предположении о том, что при температурах выше температуры ликвидус в металлической жидкости в течение длительного времени могут существовать