

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ОБУСЛОВЛЕННОСТИ МАТРИЦ ПРИ РЕШЕНИИ СИСТЕМ РАЗНОСТНЫХ УРАВНЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Е.В. Боловин, А.С. Глазырин

Томский политехнический университет

E-mail: djon-raptor@mail.ru

Разработан алгоритм идентификации параметров динамических объектов при гармонических входных воздействиях на основе решения систем разностных уравнений. Предложена и проверена методика выбора коэффициента времени при составлении разностных уравнений. Рассмотрены и предложены основные способы улучшения обусловленности матрицы входных величин.

Ключевые слова:

Идентификация, разностные уравнения, коэффициент временной задержки, обусловленность матриц.

Key words:

Identification, difference equations, time delay coefficient, conditionality of matrices.

Введение

В настоящее время проблема идентификации параметров динамических объектов, в частности электродвигателей в составе «бездатчиковых» электроприводов, становится все более актуальной. Одним из направлений развития теории динамической идентификации является оперативная оценка параметров динамических объектов на основе разностных схем [1, 2]. Для решения этого класса задач идентификации необходимо представить системы разностных уравнений в матричном виде. Однако при составлении матриц возникают проблемы их плохой обусловленности.

Цель представленной работы – предложить способы улучшения обусловленности матриц за счет оптимального выбора коэффициента временной задержки при динамической идентификации параметров на основе решения систем разностных уравнений.

Требования к процедуре идентификации и оценкам

Приведем основные требования, предъявляемые к процедуре идентификации и полученным в результате оценкам [3]:

1. Несмещенная оценка.
2. Состоятельная оценка.
3. Эффективная оценка.
4. Высокая точность.
5. Надежность.
6. Наименьшие затраты на процедуру идентификации.

Особенности составления системы разностных уравнений в матричном виде

Динамические процессы, происходящие в объектах, описанные системой дифференциальных уравнений (СДУ) n -го порядка, как правило, в нормальной форме Коши:

$$\frac{dx_j}{dt} = \sum_{i=1}^m a_{ji}(t_j)x_i + f_j(t_j) \quad j = \overline{1, m}, \quad (1)$$

где $\frac{dx_j}{dt}$ – производные переменных состояний;

$a_{ji}(t_j)$ – искомые коэффициенты, x_i – значения переменных состояния, полученные из сигналов дат-

чиков в точках t_j ; $f_j(t_j)$ – независимые свободные члены уравнений, обусловленные внешним воздействием на динамическую систему.

Полученную систему (1) можно записать в матричном виде (2):

$$A \cdot x = B, \quad (2)$$

где $A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$ – матрица входных ве-

личин; $x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix}$ – матрица неизвестных параме-

тров; $B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_n \end{bmatrix}$ – матрица выходных величин.

Способы улучшения обусловленности матрицы входных величин

Одним из способов уменьшения погрешности идентификации параметров является переход к переобусловленной системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с прямоугольной матрицей входных величин. Такой подход положительно себя зарекомендовал в решении задач Навье–Стокса [4]. Переобусловленные СЛАУ являются несовместными.

Определение 1. Система линейных алгебраических уравнений называется несовместной, если для заданной правой части не существует вектора φ , обращающего СЛАУ в тождество. Несовместность может быть вызвана неточностью задания правой части или неточностью задания элементов матрицы системы. Также несовместной является СЛАУ с прямоугольными матрицами, для которых не определена обратная матрица A^{-1} [5].

Примечание. Несовместными могут быть СЛАУ с хорошо обусловленными матрицами.

Воскобойниковым Ю.Е. рассмотрен случай для матрицы A , имеющей размеры $N \times M$. Вектор φ_{HK} размерностью M называют псевдорешением уравнения (2), с учетом определения 1, если он доставляет минимум следующему функционалу

$$\Psi_{HK}(\varphi) = \|f - A\varphi\|^2 = (f - A\varphi)^T (f - A\varphi)$$

среди всех векторов евклидова пространства E^M . Используя правила векторного дифференцирования, получаем необходимое условие экстремума:

$$\frac{d}{d\varphi} [(f - A\varphi)^T (f - A\varphi)] = A^T (f - A\varphi) = 0_M,$$

из которого следует система уравнений (называемая системой нормальных уравнений) вида:

$$A^T A \varphi_{HK} = A^T f.$$

В отличие от исходной системы $A\varphi=f$ эта система всегда разрешима, т. е. для любой правой части f существует псевдорешение φ_{HK} . Если матрица A имеет ранг, равный M , то

$$\begin{aligned} \varphi_{HK} &= (A^T A)^{-1} A^T f \left| \frac{x_1 - x}{x} \right| \cdot 100 \% \geq \\ &\geq 0,1 \% \left| \frac{y_1 - y}{y} \right| \cdot 100 \% \geq 0,1 \%. \end{aligned}$$

К сожалению, алгоритм построения φ_{HK} является неустойчивым по отношению к погрешностям исходных данных, что является следствием плохой обусловленности решаемых СЛАУ.

При идентификации параметров динамических объектов на основе решения систем разностных уравнений плохая обусловленность матрицы приводит к получению неточных оценок.

Определение 2. Система уравнений считается хорошо обусловленной, если малые изменения в коэффициентах матрицы или в правой части вызывают малые изменения в решении.

Определение 3. Система уравнений считается плохо обусловленной, если малые изменения в коэффициентах матрицы или в правой части вызывают большие изменения в решении.

Примечание. Будем считать, что малые изменения в коэффициентах матрицы и решении – это изменения, составляющие 0,1% от самих значений.

Предположим, есть следующая СЛАУ:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Соответственно, матрица неизвестных параметров $[xy]^T$.

Внесем небольшие изменения в правую часть системы (3):

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $d_1 \approx b_1$, $d_2 \approx b_2$.

Решением (4) является $[x_1 y_1]^T$.

Если

$$\left| \frac{x_1 - x}{x} \right| \cdot 100 \% \leq 0,1 \% \text{ и } \left| \frac{y_1 - y}{y} \right| \cdot 100 \% \leq 0,1 \%,$$

то система является хорошо обусловленной. Если же

$$\left| \frac{x_1 - x}{x} \right| \cdot 100 \% \geq 0,1 \% \text{ и } \left| \frac{y_1 - y}{y} \right| \cdot 100 \% \geq 0,1 \%,$$

то система плохо обусловленная.

Изменим систему (3), внося небольшие изменения в коэффициенты матрицы A :

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $c_{11} \neq a_{11}$, $c_{12} \neq a_{12}$, $c_{21} \neq a_{21}$, $c_{22} \neq a_{22}$.

Решением (5) является $[x_2 y_2]^T$. Если

$$\left| \frac{x_2 - x}{x} \right| \cdot 100 \% \leq 0,1 \% \text{ и } \left| \frac{y_2 - y}{y} \right| \cdot 100 \% \leq 0,1 \%,$$

то система является хорошо обусловленной. Если же

$$\left| \frac{x_2 - x}{x} \right| \cdot 100 \% \geq 0,1 \% \text{ и } \left| \frac{y_2 - y}{y} \right| \cdot 100 \% \geq 0,1 \%,$$

то система плохо обусловленная.

Определение 4. Матрица хорошо обусловлена тогда и только тогда, когда ее строки (столбцы) линейно независимы [6].

Оптимальный выбор коэффициента временной задержки

Одна из основных причин плохой обусловленности матрицы – стремление определителя к нулю и невозможность найти обратную матрицу. Решением данной проблемы является совершенствование метода составления систем линейных алгебраических уравнений на основе разностных схем. Продемонстрируем это на примере RL-цепи.

Пример 1. Запишем уравнение по второму закону Кирхгофа для RL-цепи:

$$i(t_j) \cdot R + \frac{di(t_j)}{dt} \cdot L = U(t_j),$$

$$\text{или } i_j \cdot R + \left(\frac{di}{dt} \right)_j \cdot L = U_j,$$

где t_j – время на j -м шаге расчёта; $i(t_j) = i_j$ – ток; R – сопротивление; L – индуктивность; $U(t_j) = U_j$ – гармоническое напряжение, синусоидальное или косинусоидальное.

Для определения оценок двух искоемых параметров \hat{R}_j и \hat{L}_j составим систему уравнений, добавив второе уравнение, полученное на основе задержки по времени $\tau = k \cdot \Delta t$, причём Δt – период дискретизации сигналов датчиков тока и напряжения, а k – количество задержек по времени:

$$\begin{pmatrix} i_j & \left(\frac{di}{dt} \right)_j \\ i_{j-k} & \left(\frac{di}{dt} \right)_{j-k} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \hat{R}_j \\ \hat{L}_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_j \\ U_{j-k} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Решением (6) является:

$$\begin{pmatrix} \widehat{R}_j \\ \widehat{L}_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_j & \left(\frac{di}{dt}\right)_j \\ i_{j-k} & \left(\frac{di}{dt}\right)_{j-k} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} U_j \\ U_{j-k} \end{pmatrix} \Rightarrow \widehat{\beta} = A^{-1} \cdot B.$$

Будем варьировать k так, чтобы временная задержка была в пределах от 0 до половины периода входного гармонического напряжения. Чем определитель матрицы коэффициентов больше, тем более корректной является задача идентификации параметров и наоборот [5]. Среднее значение определителя вычисляется при этом как:

$$DetA_k = \frac{1}{N-k+1} \cdot \sum_{j=k+1}^N \begin{vmatrix} i_j & \left(\frac{di}{dt}\right)_j \\ i_{j-k} & \left(\frac{di}{dt}\right)_{j-k} \end{vmatrix}.$$

При моделировании принималось, что $U(t)=220\sqrt{2}\cos(2\pi 50t)$, $R=0,1$, $L=0,025$, $\Delta t=100\cdot 10^{-6}$, $N=10^4$. Размерности всех величин в единицах системы Си.

Зависимость $DetA_k$ от количества временных задержек k представлена на рисунке.

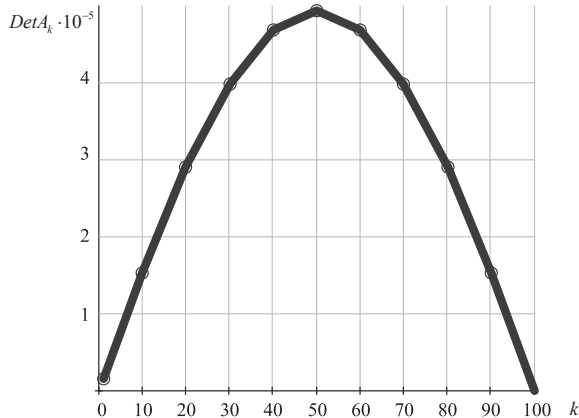


Рисунок. Зависимость $DetA_k$ от количества временных задержек k

Из рис. 1 видно, что определитель имеет максимальное значение при временной задержке равной 50, что соответствует четверти периода входного сигнала. Таким образом, при составлении разностных уравнений динамических объектов, при входном гармоническом сигнале, необходимо учитывать коэффициент временных задержек. В общем случае k должен иметь значение, соответствующее четверти периода входного сигнала, остальные временные задержки равномерно разбиваются от 0 до k в зависимости от количества уравнений.

Однако считается, что большое значение определителя матрицы входных сигналов не является важным критерием обусловленности, более значимо число обусловленности матрицы [6]. Соответственно, необходимо проверить правильность выбора временных задержек k .

Определение 5. Число обусловленности $cond(A)$ является количественной оценкой обусловленности. Если $cond(A) \geq 10^3$, то матрица A плохо обусловлена. Если $1 \leq cond(A) \leq 100$, то матрица считается хорошо обусловленной.

Примечание. Число обусловленности матрицы всегда больше 1, $cond(A) \geq 1$.

Следует отметить, что число обусловленности матрицы напрямую связано с понятием норма матрицы. Как и определитель квадратной матрицы, норма матрицы – это число. Норма матрицы всегда является положительным числом.

Различают несколько норм матрицы.

Определение 6. ∞ -норма – это максимальная из сумм модулей элементов строки. Для предыдущего примера:

$$\begin{aligned} \|A\|_{\infty} &= \sup_{1 \leq j \leq n} \sum_{i=1}^m |a_{ji}| \cdot X_{51} = A_{51}^{-1} \cdot B_{51} = \\ &= \begin{bmatrix} i_{51} & \left(\frac{di}{dt}\right)_{51} \\ i_{51-50} & \left(\frac{di}{dt}\right)_{51-50} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} U_{51} \\ U_{51-50} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -7,853 \\ 2,559 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Определение 7. 1-норма – это максимальная сумма модулей элементов каждого из столбцов матрицы:

$$\|A\|_1 = \sup_{1 \leq j \leq n} \sum_{i=1}^m |a_{ji}|.$$

Определение 8. 2-норма (евклидова норма) – длина векторов в n -мерном пространстве:

$$\|A\|_2 = \sqrt{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m |a_{ji}|^2}.$$

Пример 2. Определим зависимость числа обусловленности от нормы матрицы. Рассчитаем ∞ -норму матрицы A для примера 1.

Перепишем систему (6) с учетом, что коэффициент временной задержки $k=50$, $j=51$.

$$A_{51} \cdot X_{51} = B_{51} \Rightarrow \begin{pmatrix} i_{51} & \left(\frac{di}{dt}\right)_{51} \\ i_{51-50} & \left(\frac{di}{dt}\right)_{51-50} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \widehat{R}_{51} \\ \widehat{L}_{51} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{51} \\ U_{51-50} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Соответственно матрица A_{51} :

$$\begin{aligned} A_{51} &= \begin{bmatrix} i_j & \left(\frac{di}{dt}\right)_j \\ i_{j-k} & \left(\frac{di}{dt}\right)_{j-k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{51} & \left(\frac{di}{dt}\right)_{51} \\ i_{51-50} & \left(\frac{di}{dt}\right)_{51-50} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} 39,72 & 118,064 \\ 1,245 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

∞ -норма матрицы A_{51} равна:

$$\begin{aligned} \|A_{51}\|_{\infty} &= \max_{1 \leq j \leq 2} \sum_{i=1}^2 |a_{ji}| = \\ &= \max[(|39,72| + |118,064|), (|1,245| + |0|)] = \\ &= \max[(157,784), (1,245)] = 157,784. \end{aligned}$$

Найдем ∞ -норму матрицы X_{51} :

$$X_{51} = A_{51}^{-1} \cdot B_{51} = \begin{bmatrix} i_{51} & \left(\frac{di}{dt}\right)_{51} \\ i_{51-50} & \left(\frac{di}{dt}\right)_{51-50} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} U_{51} \\ U_{51-50} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -7,853 \\ 2,559 \end{bmatrix};$$

$$\|X_{51}\|_{\infty} = 7,853.$$

На основании определений 6 и 7 внесем небольшие изменения в левую часть системы (7):

$$A'_{51} \cdot X'_{51} = B_{51} \Rightarrow \begin{pmatrix} i_{51} + 0,001 & \left(\frac{di}{dt}\right)_{51} + 0,001 \\ i_{51-50} + 0,001 & \left(\frac{di}{dt}\right)_{51-50} + 0,001 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \hat{R}'_{51} \\ \hat{L}'_{51} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{51} \\ U_{51-50} \end{pmatrix}.$$

Найдем ∞ -нормы матриц A'_{51} и X'_{51} :

$$\|A'_{51}\|_{\infty} = 157,784;$$

$$\|X'_{51}\|_{\infty} = 7,848.$$

Таким образом, изменение левой части равно:

$$[\Delta A] = [A'] - [A] = \begin{bmatrix} 49,721 & 118,065 \\ 2,246 & 0,001 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 39,72 & 118,064 \\ 1,245 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,001 & 0,001 \\ 0,001 & 0,001 \end{bmatrix},$$

а изменение решения:

$$[\Delta X] = [X'] - [X] = \begin{bmatrix} -7,853 \\ 2,559 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -7,848 \\ 2,558 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4,251 \cdot 10^{-3} \\ 1,385 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix}.$$

Найдем ∞ -нормы векторов ΔA и ΔX : $\|\Delta A\|_{\infty} = 0,001$, $\|\Delta X\|_{\infty} = 4,251 \cdot 10^{-3}$.

Отношение ∞ -нормы векторов ΔA , ΔX соответственно к A_{51} , X_{51} равно:

$$\frac{\|\Delta X\|_{\infty}}{\|X_{51}\|_{\infty}} \cdot 100 \% = \frac{4,251 \cdot 10^{-3}}{7,853} \cdot 100 \% = 6,367 \cdot 10^{-2} \leq 0,1 \%,$$

$$\frac{\|\Delta A\|_{\infty}}{\|A_{51}\|_{\infty}} \cdot 100 \% = \frac{0,001}{157,784} \cdot 100 \% = 1,268 \cdot 10^{-3} \leq 0,1 \%.$$

Видно, что изменение левой части, равное $1,268 \cdot 10^{-3} \% \leq 0,1 \%$, вызвало малое изменение в решении $6,367 \cdot 10^{-2} \% \leq 0,1 \%$. Отношение изменения решения к изменению левой части:

$$\frac{\|\Delta X\|_{\infty} / \|X_{51}\|_{\infty}}{\|\Delta A\|_{\infty} / \|A_{51}\|_{\infty}} = \frac{6,367 \cdot 10^{-4}}{1,268 \cdot 10^{-5}} = 50,213.$$

Таким образом, на основании определений 6, 7 и 10 можно утверждать, что выбор коэффициента временной задержки является оптимальным и не противоречит законам обусловленности матрицы.

Примечание. Идентификация параметров начинается с 51 значения, что связано с временной задержкой и особенностью процедуры идентификации. Таким образом, первым значением процесса идентификации параметров динамических объектов при гармоническом входном сигнале является решение (2), приведенное в общем виде к следующему уравнению:

$$A_H \cdot x = B_H,$$

где $A_H = \begin{bmatrix} a_1(t_{51}) & a_2(t_{51}) & \dots & a_m(t_{51}) \\ a_1(t_{50}) & a_2(t_{50}) & \dots & a_m(t_{50}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_1(t_1) & a_2(t_1) & \dots & a_m(t_1) \end{bmatrix}$ – матрица вход-

ных величин; $x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix}$ – матрица неизвестных пара-

метров; $B_H = \begin{bmatrix} b(t_{51}) \\ b(t_{50}) \\ \dots \\ b(t_1) \end{bmatrix}$ – матрица выходных величин.

Таким образом, после учета всех представленных выше способов улучшения обусловленности матрицы входных величин для идентификации параметров динамических объектов при гармонических входных воздействиях решение уравнения (2) выглядит следующим образом:

$$\hat{x} = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot B.$$

Выводы

1. Сформулированы основные требования, предъявляемые к процедуре идентификации и полученным в результате оценкам.
2. Определены основные причины плохой обусловленности матриц входных величин, и предложены способы улучшения обусловленности таких матриц.
3. Рассмотрен оптимальный выбор коэффициента временной задержки, необходимый для составления разностных уравнений. Выявлено, что максимальное значение определителя получено при коэффициенте временной задержки, соответствующем четверти волны входного сигнала. В результате проверки на противоречие обусловленности матриц можно утверждать, что методика данного выбора является работоспособной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глазырин А.С., Боловин Е.В. Разработка и лабораторное апробирование метода идентификации параметров электродвигателей на основе разностных схем // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 4. – С. 112–115.
2. Глазырин А.С., Боловин Е.В. Разработка метода идентификации параметров асинхронных электродвигателей с неподвижным короткозамкнутым ротором на основе разностных схем // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 5. – С. 101–105.
3. Овчаренко В.Н. Оптимизация входных сигналов в задаче идентификации линейных динамических систем // Автоматика и телемеханика. – 1997. – № 5. – С. 72–81.
4. Ольшанский М.А. Равномерные по параметру многосеточные и итерационные методы: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – М., 2006. – 284 с.
5. Воскобойников Ю.Е., Мицель А.А. Современные проблемы прикладной математики. Ч. 1. – Томск: Изд-во Томского государственного университета управления и радиоэлектроники, 2010. – 136 с.
6. Цей Р., Шумафов М.М. Число обусловленности матрицы как показатель устойчивости при решении прикладных задач // Труды ФОРА. – 2011. – № 16. – С. 61–67.

Поступила 20.12.2012 г.

УДК 539.219.3:546.82

ДИФфуЗИЯ ВОДОРОДА В СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ТИТАНЕ

Г.П. Грабовецкая, Н.Н. Никитенков*, И.П. Мишин, И.В. Душкин*, Е.Н. Степанова*, В.С. Сыпченко*

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

*Томский политехнический университет

E-mail: grabg@ispms.tsc.ru

Проведены сравнительные исследования диффузии водорода в крупно- и субмикроструктурном титане методом сопряжения электролитической ячейки с вакуумной камерой через мембрану. Установлено, что формирование субмикроструктурной структуры приводит к уменьшению эффективного коэффициента диффузии водорода в титане и повышению способности накапливать водород в объеме, что обусловлено большей протяженностью границ зерен в субмикроструктурных образцах по сравнению с крупнокристаллическими. Проанализировано влияние плотности дислокаций и протяженности границ зерен на способность титана накапливать водород в объеме.

Ключевые слова:

Титан, субмикроструктурная структура, диффузия, водород, метод мембраны.

Key words:

Titanium, submicrocrystalline structure, diffusion, hydrogen, membrane method.

Введение

Наличие в металлах примесей внедрения оказывает ощутимое влияние на их эксплуатационные характеристики [1, 2]. Особое место в ряду примесей внедрения по влиянию на физико-механические свойства металлов занимает водород. Это связано с тем, что водород, благодаря высокой диффузионной подвижности в металлах, может перераспределяться в объеме материала под действием полей упругих напряжений, образуя скопления в наиболее напряженных участках и увеличивая тем самым вероятность выделения гидридов и образования пор и трещин [3]. Известно [4, 5], что диффузия водорода в металле зависит не только от типа кристаллической решетки металла, но и от степени ее совершенства. Наиболее существенно дефекты кристаллической решетки влияют на коэффициенты диффузии и растворимости водорода в металле.

В последнее время активно разрабатываются и исследуются ультрамелкозернистые (нано- и субмикроструктурные) (СМК) материалы, инте-

рес к которым связан с их уникальными физико-химическими свойствами по сравнению с крупнокристаллическими (КК) материалами. Вместе с тем нано- и СМК-металлические материалы имеют большую протяженность границ зерен и часто высокую плотность дефектов кристаллической решетки (дислокаций и вакансий) в объеме зерен, которые являются ловушками для водорода. Так, по данным, приведенным в [6–8], объемная доля границ в субмикроструктурных металлических материалах, полученных методами интенсивной пластической деформации, составляет 0,1...1,0 %, плотность дислокаций – $10^{14}...10^{15} \text{ м}^{-2}$, а плотность вакансий может достигать 10^{-4} (в хорошо отожженных металлах плотность дислокаций составляет $10^4...10^8 \text{ м}^{-2}$, а плотность вакансий – $10^{-23}...10^{-22}$). Это дает основание предполагать, что коэффициенты диффузии и способность накапливать водород в объеме из водородосодержащей среды для нано- и СМК-материалов будут существенно отличаться от соответствующих величин для КК-материалов.