



МОДЕЛЬ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ СОПУТСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ СЕТИ БАЙЕСА

А. С. БАБИЧЕВ, С. А. БАБИЧЕВ, А. В. ШАРКО

Представлена модель учета влияния сопутствующих факторов на точность акустических измерений, обработка данных в которой осуществляется байесовской сетью. Разработана база данных, на основании которой определяется структура взаимосвязей сети Байеса и априорное вычисление вероятностей значений взаимодействующих факторов. В результате компьютерного моделирования получены вероятностные характеристики сопутствующих факторов при различных значениях относительного изменения скорости ультразвука, что позволяет предсказать характер влияния каждого фактора в отдельности и их совокупного влияния на скорость распространения ультразвука в металле.

The paper presents a model of allowing for the influence of concurrent factors on the accuracy of acoustic measurements, in which data processing is performed by Bayesian network. A data base was developed from which the correlation structure of the Bayesian network is established and a priori calculation of the probabilities of interacting factor values is performed. Computer simulation allowed derivation of probability characteristics of the concurrent factors at different values of relative change of ultrasound velocity, this allowing prediction of the nature of the influence of each factor separately and of their totality on the velocity of ultrasound propagation in the metal.

В настоящее время в различных областях промышленного производства особую актуальность приобретает повышение точности определения механических характеристик металлов методами неразрушающего контроля (НК), что связано с увеличением требований, предъявляемых к действующему промышленному оборудованию. Механические свойства металлов определяются, в первую очередь, технологическими процессами воздействия на металл, а точность их определения — погрешностью измерений, в качестве основных источников которой являются условия контроля, колебания химического состава, колебания размеров изделий, непараллельность поверхностей. Отдельную группу причин, обуславливающих погрешность измерений методами НК, составляют технологические факторы, часто встречающиеся на производстве повторные закалки, закалка и разный отпуск, различное время закалки и отпуска и т. д. Выделение из комплекса таких определяющих факторов и разработка мероприятий по их учету и стабилизации при использовании различных методов контроля составляет одну из основных задач измерительной техники.

Вопросам повышения точности определения механических характеристик металлов посвящено достаточно много работ. В работе [1] авторами определены закономерности влияния структурных факторов на скорость распространения ультразвука в металлах при акустическом методе НК,

представлены результаты экспериментальных исследований по определению изменения скорости ультразвука при различных режимах термической обработки. В работе [2] рассмотрена возможность использования нескольких методов контроля для определения физико-механических характеристик нефтегазового оборудования, проведен сравнительный анализ эффективности использования различных комбинаций методов. В работах [3–5] предложены методы автоматизации процесса контроля состояния исследуемых объектов. Основным недостатком существующих систем технической диагностики является ограниченное использование системного подхода, что способствует повышению погрешности решения поставленной задачи. Учет влияния всех мешающих или воздействующих факторов существенно повышает трудоемкость обработки данных, однако использование современных компьютерных и информационных технологий позволяет получить требуемый результат при минимальных временных затратах на обработку информации.

Целью работы является разработка системы учета влияния технологических факторов на точность определения механических характеристик металлов при использовании акустического метода НК, обработка данных в которой осуществляется сетью Байеса. Выбор сети Байеса определяется вероятностным характером эмпирических данных, получаемых в результате контроля состояния объекта, поэтому установление причинно-следственных закономерностей между техно-



логическими и физико-механическими характеристиками металлов позволит повысить точность определения требуемых механических и прочностных характеристик, что уменьшит вероятность возникновения аварийной ситуации на промышленных предприятиях.

Пусть Ω — выборочное пространство случайных событий, а E и H — две переменные, которые каким-либо образом взаимосвязаны между собой. Если переменная H принимает конкретное значение, то условная вероятность события E , т. е. вероятность, с которой переменная E примет конкретное значение, определяется из выражения:

$$p(E | H_k) = \frac{p(E \cap H_k)}{p(H_k)}. \quad (1)$$

Взаимоисключающие события формируют исчерпывающее множество, если

$$\cup_{i=1}^n E_i = \Omega. \quad (2)$$

Две переменные не пересекаются, если они не имеют одинаковых значений. Теория построения сетей Байеса основывается на предположении, что события являются исчерпывающими и не пересекаются. В этом случае вероятность события E можно вычислить при помощи условных вероятностей:

$$p(E) = \sum_{i=1}^n p(E \cap H_i) = \sum_{i=1}^n p(E | H_i)p(H_i). \quad (3)$$

Используя формулу (1), вероятность пересечения событий E и H можно выразить следующим образом:

$$p(E \cap H_k) = p(E | H_k)p(H_k) = p(H_k | E)p(E), \quad (4)$$

откуда получаем:

$$p(H_k | E) = \frac{p(E | H_k)p(H_k)}{p(E)}. \quad (5)$$

С учетом (3) формулу (5) можно представить так:

$$p(H_k | E) = \frac{p(E | H_k)p(H_k)}{\sum_{i=1}^n p(E | H_i)p(H_i)}. \quad (6)$$

Полученная формула называется формулой Байеса.

Сеть Байеса, формируемая на основании формулы (6), представляет собой направленный ациклический граф, где каждый узел представляет собой переменную, а каждая дуга — вероятностную зависимость, определяемую количественно использованием условного распределения вероят-

ностей для каждого узла. В состав сети Байеса входят следующие компоненты:

- множество узлов, определяющих компоненты системы;
- множество направленных связей между компонентами системы.

Для адекватной работы сети необходимо выполнение следующих условий:

- каждая переменная может принимать только одно из конечного множества взаимоисключающих значений;
- переменные вместе со связями образуют ориентированный граф без циклов;
- каждой переменной потомка A с переменными предками B_1, \dots, B_i приписывается таблица условных вероятностей $P(A/B_1, \dots, B_i)$.

Для проведения исследований использовали следующие факторы, определяющие точность контроля прочностных характеристик акустическим методом технической диагностики:

А. Условия контроля

- S — аппаратная погрешность;
- KS — толщина контактного слоя;
- T — температура окружающей среды.

Б. Размер и материал контролируемого изделия

- Q — добротность колебательной системы;
- NP — непараллельность поверхностей ввода и приема ультразвуковых колебаний;
- HS — химический состав контролируемого металла.

В. Технологические факторы

- T_3 — температура закалки;
- T_o — температура отпуска;
- T_{ay} — температура аустенизации.

В качестве выходной переменной использовали относительную скорость распространения продольной ультразвуковой волны $\Delta v/v$.

Оценка погрешностей условий контроля дана в работе [6]. Аппаратурная погрешность измерения акустических параметров характеризуется среднеквадратичной ошибкой, которую называют среднеквадратичной ошибкой воспроизводимости и определяют по независимым измерениям на одном и том же образце. Общая аппаратурная погрешность является результатом совместного действия ошибки измерений, проведенных на разных установках $S_{уст}$ и ошибки воспроизводимости S_B :

$$S^2 = S_B^2 + n_j S_{уст}^2, \quad (7)$$

где n_j — количество параллельных измерений одной и той же величины на j -й установке.

В эксперименте использовали шесть экспериментальных установок, на каждой из которых было проведено по шесть измерений резонансной частоты одного из пиков амплитудно-частотной зависимости ультразвукового сигнала, прошедше-



го через образец из стали 40X. Расчеты показали, что $S_{уст} = 0,13$ кГц, $S_b = 0,13$ кГц, $S = 0,34$ кГц. Относительное изменение скорости ультразвука составило при этом приблизительно 0,09 %. Анализ результатов эксперимента позволяет дискретизировать диапазон изменений аппаратурной погрешности следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta C}{C} &\leq 0,04 \%, S — \text{низкая (1);} \\ 0,04 \% &< \frac{\Delta C}{C} \leq 0,09 \%, S — \text{средняя (2);} \\ \frac{\Delta C}{C} &> 0,09 \%, S — \text{высокая (3).} \end{aligned} \quad (8)$$

В работе [6] показано, что в случае бесконечно протяженной пластины при небольших колебаниях толщины пластины Δl , вызванных изменением температуры Δt , происходит изменение частоты на величину

$$\Delta f = -f \left[\frac{\Delta l}{l} + (\alpha + \beta) \Delta t \right], \quad (9)$$

где α — коэффициент линейного теплового расширения; β — температурный коэффициент скорости распространения ультразвука материала. Первое слагаемое в квадратных скобках уравнения (9) описывает поправку к частоте, возникающую вследствие отклонения размера изделия от первоначального значения, второе учитывает влияние температуры на изменение размеров изделия и на скорость распространения упругих волн в материале. Согласно теоретическим расчетам по формуле (9) для стали 40X при изменении температуры на 20 °С резонансная частота должна уменьшаться на 5...6 кГц, что составляет приблизительно 3 %. Следует отметить, что теоретические расчеты в пределах допустимой ошибки совпали с результатами экспериментальных исследований.

В работе [7] авторами проведены исследования по оценке влияния нестабильности слоя контактной жидкости в трехслойной системе: пьезопреобразователь, контактная жидкость, изделие. Показано, что наличие контактной жидкости приводит к уменьшению резонансной частоты системы из-за эффекта присоединенной массы пьезоэлемента и прослойки и дополнительного набегга фазы в них. Эксперимент проводили на стальном образце толщиной 90 мм, толщина слоев воды с двух сторон одинаковая и изменяется от 0,1 до 1 мм. Анализ результатов эксперимента показал, что в исследуемом диапазоне толщин частота резонанса отклоняется от среднего не более, чем 0,1 кГц, что составляет приблизительно 0,06 %.

Добротность колебательной системы — это отношение энергии, запасенной в системе, к энергии, теряемой системой за один период колебаний. Величина добротности связана с шириной резонансного пика соотношением

$$Q = \frac{f}{2\Delta f}, \quad (10)$$

где $2\Delta f$ — ширина резонансного пика на уровне 0,7.

Расчеты показали, что отклонение частоты от резонансной на уровне 0,7 вычисляется по формуле:

$$\Delta f = f \frac{2}{n\pi} \frac{|R|}{\mu \sqrt{1 - |R|^2}}. \quad (11)$$

Здесь n — количество длин волн, укладываемых на толщине изделия; R — коэффициент отражения плоской монохроматической ультразвуковой волны от плоского слоя в отсутствии поглощения; μ — отношение волновых сопротивлений образца и контактной жидкости:

$$\mu = \frac{\rho C}{\rho_0 C_0}, \quad (12)$$

где ρ , C и ρ_0 , C_0 — плотность и скорость ультразвука в образце и контактной жидкости соответственно.

Из формулы (11) следует, что чем больше n , тем больше влияние изменения частоты на величину R , т. е. тем острее будет резонансный пик, и, следовательно, тем достовернее можно будет зафиксировать его положение и точнее определить величину резонансной частоты и соответственно скорости ультразвука. Экспериментальные исследования показали, что для образцов длиной 50 мм погрешность резонансной частоты составила 0,1 кГц или 0,06 %, а для образцов длиной 15 мм ошибка определения резонансной частоты не превышала 0,5 кГц или 0,3 %. Исходя из изложенных выше соображений, была принята следующая градация добротности колебательной системы:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta C}{C} &\leq 0,4 \%, Q — \text{высокая (3);} \\ 0,4 \% &< \frac{\Delta C}{C} \leq 1 \%, Q — \text{средняя (2);} \\ \frac{\Delta C}{C} &> 1 \%, Q — \text{низкая (1).} \end{aligned} \quad (13)$$

Оценка погрешности, возникающей вследствие непараллельности поверхностей ввода и приема ультразвуковых колебаний, проведена авторами в работе [7]. В качестве модели использовали цилиндрический резонатор, стенками которого служат две дуги больших радиусов ρ_1 и

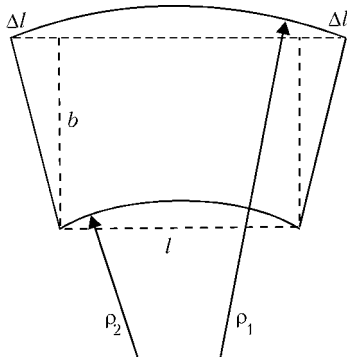


Рис. 1. Форма акустического резонатора, используемая в теоретических расчетах

$\rho_2 = \rho_1 + b$, а боковые торцы образованы отрезками двух радиусов, образующих друг с другом малый угол α (рис. 1). Расчеты показали, что при $l = 25$ мм, $b = 50$ мм, $\Delta l = 0,1$ мм и $f = 2000$ кГц изменение резонансной частоты равно $\Delta f = 2$ кГц или 0,1 %. Анализ экспериментальных данных позволяет оценить качество обработки поверхностей ввода и приема ультразвука следующим образом:

$$\frac{\Delta C}{C} \leq 0,06 \%, NP \text{ — высокая (3);}$$

$$0,06 \% < \frac{\Delta C}{C} \leq 0,12 \%, NP \text{ — средняя (2); (14)}$$

$$\frac{\Delta C}{C} > 0,12 \%, NP \text{ — низкая (1).}$$

Оценка влияния химического состава на точность определения механических характеристик акустическим методом проведена в работе [8]. Авторы исследовали совместное влияние четырех факторов: процентного содержания углерода, хрома, кремния и марганца на величину резонансной частоты образцов из стали 40Х. Методика проведения эксперимента заключалась в следующем: у десяти цилиндрических образцов разных плавок диаметром 22 мм и длиной 90 мм были измерены амплитудно-частотные характеристики, выполнена идентификация одного из характерных резонансных пиков, присущего всем исследованным образцам, и зарегистрирована его частота. Образцы, предназначенные для измерений, подбирали таким образом, чтобы их химический состав максимально перекрывал диапазон возможного для данной марки стали содержания компонентов. Обработку результатов проводили методами математической статистики. В результате экспериментальных исследований было установлено, что максимальное отклонение содержания углерода от своего среднего значения вызывает отклонение резонансной частоты на 0,225, марганца — на 0,235, кремния — на 0,62, хрома — на 0,67 кГц. Величина максимального отклонения резонансной частоты составила при этом $\Delta f_{\max} = 1,52$ кГц, что составляет приблизительно 0,9 %. На основании изложенного выше можно предложить следующую градацию учета влияния химического состава на точность акустических измерений:

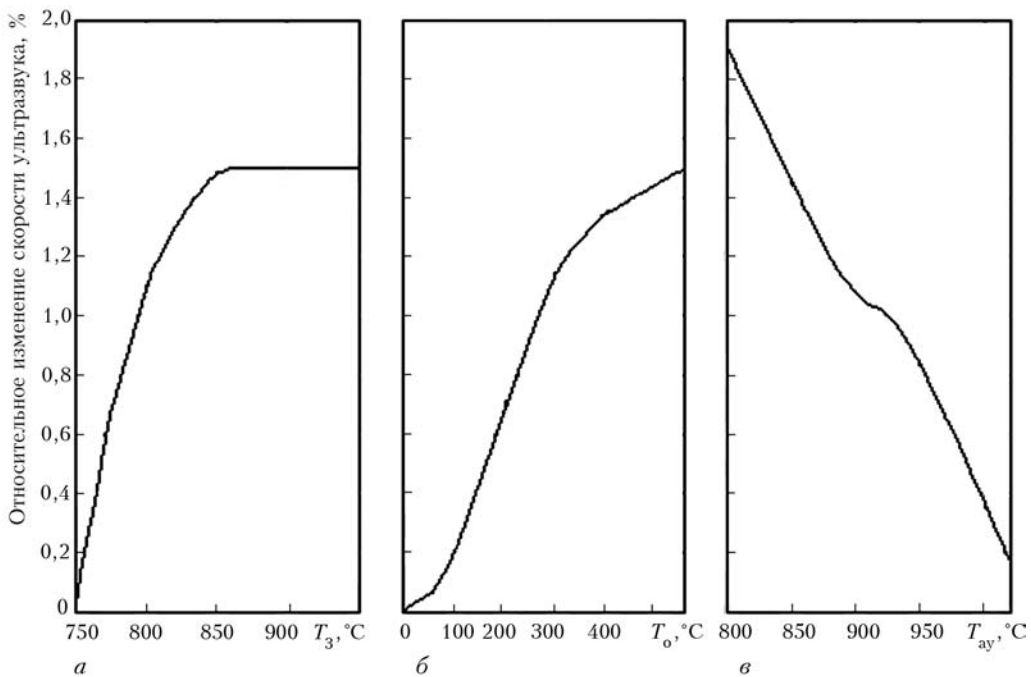


Рис. 2. Графики зависимости относительного изменения скорости ультразвука стали У8А от температуры закалки (отпуск при 550 °С в течение 1 ч) (а), температуры отпуска (б) и температуры аустенизации (в)



$$\frac{\Delta C}{C} \leq 0,32 \%, HS — \text{маленький разброс (1);}$$

$$0,32 \% < \frac{\Delta C}{C} \leq 0,64 \%, HS — \text{средний разброс (2);}$$

$$\frac{\Delta C}{C} > 0,64 \%, HS — \text{высокий разброс (3).} \quad (15)$$

Экспериментальные исследования по учету влияния технологических факторов на точность акустических измерений представлены в работе [1]. Влияние структур, полученных при различных температурах и времени выдержки под закалку, скорости охлаждения, режимах отпуска исследовали на стали У8А. В экспериментах использовали цилиндрические образцы диаметром 14 мм и длиной 25 мм с шероховатостью поверхности 2,5...6,3 мкм. Были выбраны следующие режимы термообработки: закалка от 753 до 953 °С с интервалом 40 °С в течение 0,3 ч с охлаждением в воде комнатной температуры, затем отпуск при 160, 200, 250, 350, 550 °С в течение 1 ч. Измерение скорости ультразвука в образцах определяли резонансным и импульсным методами, при этом измеряли резонансную частоту и рассчитывали относительное изменение частоты, равное отношению изменению скорости распространения ультразвуковых колебаний. За исходную частоту принимали резонансную частоту отожженных образцов. Результаты исследований представлены на рис. 2.

Решение задачи построения сети Байеса проводили с использованием программной среды GeNIe 2.0. Дискретизация переменной — относительное изменение скорости ультразвука $\Delta v/v$ —

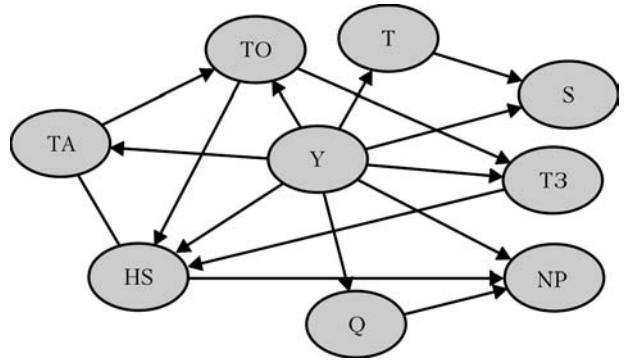


Рис. 3. Структура связей байесовской сети

была проведена следующим образом: $s1 = 0...0,3$; $s2 = 0,31...0,6$; $s3 = 0,61...0,9$; $s4 = 0,91...1,2$; $s5 = 1,21...1,5$. Дискретизацию температур внешней среды, закалки, отпуска и аустенизации проводили путем их разбиения на пять приблизительно равных поддиапазонов.

Для построения структуры связей байесовской сети использовали знания эксперта в данной предметной области. Первоначально был построен граф взаимного влияния размерных и технологических факторов и относительного изменения скорости ультразвука. Затем данный граф был расширен посредством введения экспертом визуальных связей между сопутствующими факторами и относительным изменением скорости ультразвука. Полученная структура байесовской сети представлена на рис. 3.

Распределение вероятностей в построенной сети Байеса при априори заданном значении относительного изменения скорости ультразвука 1% ($s4$) показано на рис. 4. Распределение вероятностей

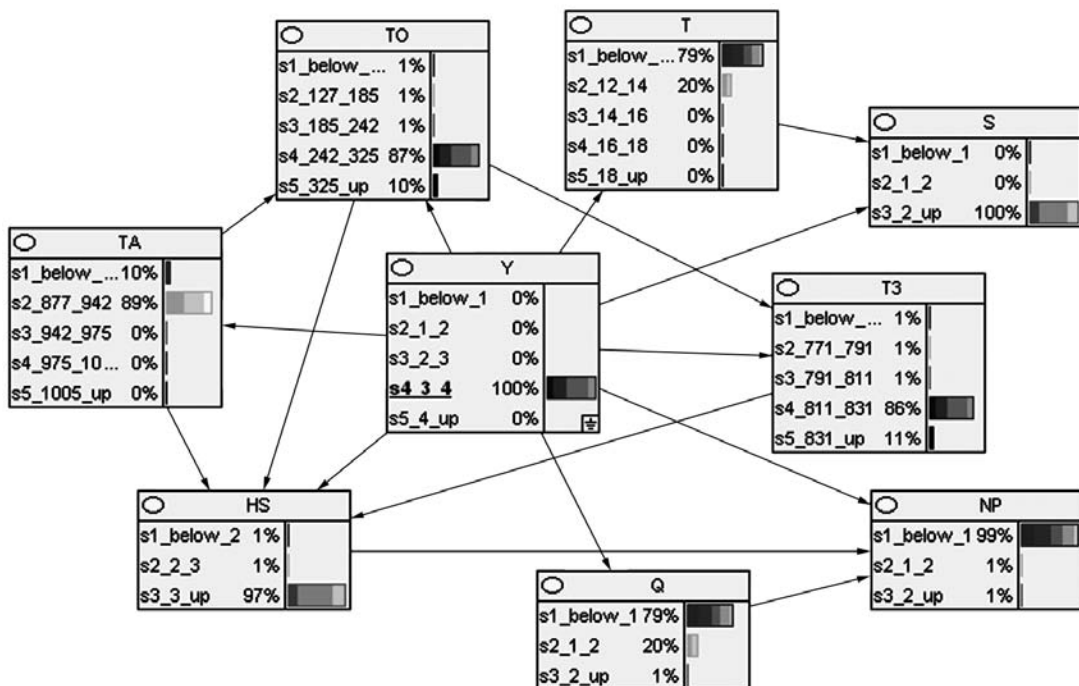


Рис. 4. Распределение вероятностей при заданном значении относительного изменения скорости ультразвука



Распределения вероятностей влияния сопутствующих факторов на относительное изменение скорости ультразвука

Значения	$\Delta v/v = 0...0,3 \%$								$\Delta v/v = 1,21...1,5 \%$							
	S	Q	NP	T	HS	TЗ	ТО	ТА	S	Q	NP	T	HS	TЗ	ТО	ТА
s1	10	1	64	79	88	87	88	0	1	99	99	79	67	1	1	98
s2	17	1	18	20	10	10	9	0	1	1	1	21	23	1	1	0
s3	73	98	18	1	2	1	1	0	99	1	1	0	10	1	1	0
s4	–	–	–	0	–	1	1	1	–	–	–	0	–	1	1	0
s5	–	–	–	0	–	1	1	99	–	–	–	0	–	95	97	0

тей сопутствующих факторов при крайних значениях изменения скорости ультразвука представлено в таблице. Анализ данных таблицы позволяет сделать вывод, что наиболее существенное влияние на относительное изменение скорости ультразвука оказывает добротность колебательной системы, а также режимы термообработки металла. Влияние добротности колебательной системы можно уменьшить за счет более тщательной подготовки исследуемых образцов. Выбор режима термообработки металла во многом определяет его прочностные свойства, поэтому резкое изменение скорости ультразвука при изменении режимов термообработки свидетельствует о высокой чувствительности акустического метода НК к изменению прочностных характеристик металлов.

Выводы

Представлена модель учета влияния размерных и технологических факторов на относительное изменение скорости ультразвука на основе сети Байеса. Создана база данных, включающая взаимосвязанные размерные и технологические факторы и относительное изменение скорости распространения ультразвука в стали У8А. Показана перспективность использования байесовской сети при оценке весового вклада каждого фактора в процесс изменения акустических характеристик, что позволяет определить пути повышения точности измерения прочностных характеристик акустическим методом НК. Рассмотрена методика построения байесовской сети на основе дискретных данных. В результате компьютерного моделирования получены вероятностные характеристики сопутствующих факторов при различных значениях относительного изменения скорости ультразву-

вука, что позволяет предсказать характер влияния каждого фактора в отдельности и их совокупного влияния на скорость распространения ультразвука в металле.

В дальнейшем планируется исследование более детальных соотношений физико-механических характеристик металлов с использованием многокритериального анализа и современных компьютерных методов обработки многомерной информации.

1. Муравьев В. В., Зуев Л. Б., Комаров К. Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. — Новосибирск: Наука, 1996. — 180 с.
2. Карнаш М. О., Кісіль І. С., Карнаш О. М., Молодецький І. А. Застосування комплексного підходу до визначення фізико-механічних характеристик нафтогазового обладнання // Техн. діагностика і неразруш. контроль. — 2006. — № 2. — С. 49–52.
3. Автоматизированная система диагностики промышленного оборудования / А. Ю. Варфоломеев, А. В. Микулович, В. И. Микулович, В. Т. Шнитко // Там же. — 2006. — № 4. — С. 8–14.
4. Бабичев С. А. Разработка автоматизированной системы технической диагностики прочностных характеристик металлов // Вестн. Херсон. гос. техн. ун-та. — 2003. — № 18. — С. 154–162.
5. Бабичев С. А., Литвиненко В. И., Шарко А. В. Автоматизированная система технической диагностики прочностных характеристик металлов на основе гибридных нейронных сетей // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2004. — № 4. — С. 5–10.
6. Левитан Л. Я., Храпцов Г. И., Шарко А. В. К вопросу о погрешности измерений механических свойств металлов ультразвуковым методом // ВИНТИ, рег. № 1970–76. — 1976. — 20 с.
7. Ботаки А. А., Ульянов В. Л., Шарко А. В. Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов. — М.: Машиностроение, 1983. — 179 с.
8. Лебедев А. А., Левитан Л. Я., Шарко А. В. Оценка влияния химического состава на результаты измерений механических свойств стали 40Х акустическим методом // Дефектоскопия. — 1979. — № 3. — С. 107–109.

Херсон. нац. техн. ун-т

Поступила в редакцию
07.12.2008