

В.Д.Нигалатий

Херсонская государственная морская академия, Украина
(E-mail: mv-brailo@yandex.ru)

Исследование влияния химического состава на результаты акустических измерений прочностных свойств материалов

В статье исследовано совместное влияние четырех факторов: процентного содержания углерода, хрома, кремния и марганца на величину резонансной частоты образцов из стали 40Х. Решение данной задачи затруднялось тем обстоятельством, что факторы, влияние которых исследовали, могут оказывать взаимосвязанное влияние и, следовательно, каждая из парных зависимостей будет осложняться. Для ее оценки использованы методы множественной регрессии. Установлено, что колебания химического состава в пределах марки материала не оказывают определяющего значения на величину изменений резонансной частоты и на прочностные свойства материалов по сравнению с ошибками воспроизводимости и разбросом внутри параллельных определений.

Ключевые слова: факторы, резонансная частота, колебания, свойства.

Постановка проблемы. Определение прочностных свойств материалов по результатам разрывных испытаний вносит в оценку и диагностику свойств материалов элементы субъективизма, так как не дается заключение о качестве всего материала, а только о той части изделия, из которой вырезан испытуемый образец, и, кроме того, воспроизводимость результатов измерений невозможна вообще. Прочностные свойства материала оказываются взаимосвязанными с их различными электромагнитными характеристиками. Однако применимость этих методов ограничена, так как существование сильного влияния колебаний химического состава материала даже в пределах его марки вынуждает вводить контроль каждой плавки в отдельности. Поэтому разработка новых методов оценки прочностных свойств материалов представляет научный интерес.

Анализ публикаций по обозначенной проблеме показывает перспективность использования для определения прочностных свойств материалов акустических методов. Современные акустические методы позволяют исследовать состояние вещества по скорости и времени распространения продольных, поперечных и поверхностных волн, по измеренным значениям частот собственных колебаний изделий, проводить структурные исследования по данным измерения коэффициента затухания, с использованием методов акустической спектроскопии, оценивать механические свойства по результатам акустических процессов в инденторе, прогнозировать изменение напряженного состояния объектов методами акустической эмиссии [1–9].

Однако, несмотря на несомненные преимущества акустических методов, связанные с воспроизводимостью результатов и возможностью измерений без повреждения материала, такой важный фактор, как влияние химического состава материала на результаты измерений прочностных свойств металлов ранее не исследовался.

К нерешенным частям общей проблемы измерений прочностных свойств материалов относится установление вклада колебаний химического состава в суммарную погрешность акустических измерений.

Целью работы является оценка раздельного влияния химических элементов, используемых в качестве компонентов состава материала, на точность акустических измерений.

Изложение основного материала. Исследовалось совместное влияние четырех факторов: процентного содержания углерода, хрома, кремния и марганца на величину резонансной частоты образцов из стали 40 Х. Решение данной задачи затруднялось тем обстоятельством, что факторы, влияние которых исследовалось, могут давать взаимосвязанные влияния и, следовательно, каждая из парных зависимостей будет осложняться. Для ее оценки использованы методы множественной регрессии. 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.

Химический состав, определенный по компонентам *Mn, Si, Cr* спектральным методом, а по *C* — химическим анализом, приведен в таблице 1. Образцы, предназначенные для измерений, подби-

рались таким образом, чтобы их химический состав максимально перекрывал диапазон возможного для данной марки стали содержания компонентов (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Химический состав образцов разных плавков из стали 40X, %

№	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>Cr</i>
1	0,43	0,63	0,32	0,83
2	0,43	0,62	0,29	0,85
3	0,43	0,65	0,29	1,03
4	0,42	0,65	0,28	1,00
5	0,39	0,72	0,27	0,83
6	0,43	0,70	0,30	1,03
7	0,39	0,77	0,29	0,81
8	0,41	0,77	0,29	0,87
9	0,39	0,75	0,36	0,81
10	0,41	0,80	0,36	0,79

Функциональная связь между химическим составом и резонансной частотой образцов из стали 40X не установлена, следовательно, имеет смысл говорить только о корреляционной зависимости процентного содержания одного из элементов химического состава в плавке x_i от резонансной частоты. Получаемые в результате измерений объема m (число плавков) состоят из пар значений $x_1f_1, x_2f_2, \dots, x_mf_m$.

Коэффициенты корреляции для всех зависимостей резонансной частоты от компонентов химического состава стали 40X и между собой представлены в таблице 2.

Т а б л и ц а 2

Коэффициенты корреляции

№	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>Cr</i>	<i>f</i>
<i>C</i>	–	-0,72	-0,15	-0,41	-0,006
<i>Mn</i>	-0,72	–	-0,41	-0,032	-0,12
<i>Si</i>	-0,15	-0,41	–	-0,56	-0,45
<i>Cr</i>	-0,41	-0,032	-0,58	–	-0,42
<i>f</i>	-0,005	-0,12	-0,45	-0,42	–

Для применения к результатам акустических измерений дисперсионного анализа необходимо, чтобы серии измерений были случайными выборками из генеральной совокупности, подчиняющейся нормальному распределению, и чтобы дисперсии, обусловленные ошибками воспроизводимости для всех серий измерений, были однородными.

Для расчета дисперсий, связанных с ошибками воспроизводимости, было проведено по пять параллельных определений резонансной частоты каждого образца.

Поскольку число степеней свободы для всех выборок одинаково ($\varphi = 4$), то для сравнения дисперсий необходимо использовать критерий Кохрена, основанный на законе распределения отношения максимальной эмпирической дисперсии к сумме всех дисперсий

$$G_{\max} = \frac{S_{\max}^2}{S_1^2 + S_2^2 + \dots + S_m^2}.$$

Гипотеза об однородности принимается, если при заданном уровне значимости табличное значение критерия больше расчетного. Значения дисперсии определяются так

$$S_j^2 = \frac{\sum_{j=1}^{n_j} f_j^2 - \frac{(\sum f_j)^2}{n_j}}{n_j - 1},$$

где $n_j = 5$ — число параллельных определений.

Для упрощения вычислений результаты измерений представлены в виде

$$f_{ji} = \frac{f_{ji} - \alpha}{\beta},$$

где $\beta = 0,01$, а α подобрано для каждого столбца таблицы таким образом, чтобы в результате преобразования получились минимальные целые числа (табл. 3).

Таблица 3

Преобразованные результаты параллельных определений резонансной частоты

Параллельные определения	Номер образца									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	0	1	-1	4	-1	1	4	0	1	1
II	-2	0	0	0	1	0	-1	-2	0	2
III	1	3	2	3	-3	2	0	0	1	4
IV	2	4	2	-1	2	-1	2	1	3	0
V	0	1	0	0	0	0	0	-1	2	1

Расчеты показали, что $S_{\max}^2 = 4,7$, $\sum S_i = 25,7$ и $G_{\max} = 0,183$. Для рассматриваемого случая $G_{\text{ТАБЛ}}$, взятое при 5% уровне значимости для $m = 10$ и $\varphi = 4$, оказалось равным 0,331. Это подтверждает гипотезу об однородности дисперсий.

Если имеет место линейная зависимость между резонансной частотой образца и компонентами химического состава стали 40X, то случайная ошибка, найденная для n_j параллельных определений каждой из m заданных величин x_i , должна находиться в соответствии с разбросом результатов измерений относительно уравнения прямой. Проверку гипотезы линейности производят путем простого дисперсионного анализа. При этом суммарное рассеивание раскладывают на разброс между параллельными определениями и разброс внутри параллельных определений. Величины, необходимые для проверки гипотезы, подсчитывают следующим образом.

Дисперсия разброса результатов измерений между параллельными определениями резонансной частоты испытываемых объектов

$$S_1^2 = \frac{QS_1}{m-1} = \left[\sum_{j=1}^m \frac{\left(\sum_{i=1}^{n_j} f_{ji} \right)^2}{n_j} - \frac{\left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_j} f_{ji} \right)^2}{n} \right] / (m-1),$$

где $n = 50$, $m = 10$, $n_j = 5$.

Дисперсия разброса результатов измерений внутри параллельных определений резонансной частоты одного и того же образца

$$S_b^2 = \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_j} f_{ji}^2 - \frac{\sum (\sum f_{ji})^2}{n_j} \right] / (m-n).$$

Сумма квадратов значений регрессии

$$QS_{11} = \left[\sum_{i=1}^m x_i f_{ji} - n_j \frac{\sum_{i=1}^m x_i \sum_{j=1}^{n_j} f_{ji}}{n} \right]^2 / \left[n_j \sum_{i=1}^m x_i^2 - \frac{\left(n_j \sum_{i=1}^m x_i \right)^2}{n} \right],$$

где x_i — концентрации Mn, Si, Cr и C для всех образцов.

Дисперсия разброса средних значений

$$S_{12}^2 = \frac{QS_1 - QS_{11}}{m-2}.$$

Для окончательного заключения о наличии линейной регрессии составляют отношение $F = \frac{S_{12}^2}{S_b^2}$

и сравнивают найденное значение с табличным при заданных значениях доверительной вероятности и степенях свободы $\varphi_1 = m - 1$ и $\varphi_2 = n - m$. Если $F > F_{ТАБЛ}$, то эксперимент находится в противоречии с проверяемой гипотезой о наличии линейной регрессии. Расчеты показали, что F — критерий для зависимости резонансной частоты от C равен 1,52, от Si — 1,2, от Mn — 1,73, от Cr — 2,31, а $F_{ТАБЛ} = 2,55$, т.е. неравенство $F < F_{ТАБЛ}$ справедливо во всех случаях.

Уравнение прямолинейной множественной регрессии между резонансной частотой и компонентами химического состава имеет следующий вид:

$$f = \bar{f} + A(C - \bar{C}) + B(Mn - \bar{Mn}) + D(Si - \bar{Si}) + E(Cr - \bar{Cr}),$$

где f — ожидаемое значение резонансной частоты при заданном химическом составе C, Mn, Si и Cr (содержание углерода, марганца, кремния и хрома в плавке, для которой определяется значение резонансной частоты); \bar{f} — среднее значение резонансной частоты, соответствующее среднему химическому составу в генеральном распределении f ; $\bar{C}, \bar{Mn}, \bar{Si}, \bar{Cr}$ — среднее значение углерода, магния, кремния и хрома в соответствующих генеральных распределениях; A, B, D, E — коэффициенты регрессии. Их значения находим, решая систему уравнений:

$$\begin{cases} A\sigma_C + B\sigma_{Mn} \cdot r_{C/Mn} + D\sigma_{Si} \cdot r_{C/Si} + E\sigma_{Cr} \cdot r_{C/Cr} = \sigma \cdot r_{C/f} \\ A\sigma_C \cdot r_{C/Mn} + B\sigma_{Mn} + D\sigma_{Si} \cdot r_{Mn/Si} + E\sigma_{Cr} \cdot r_{Mn/Cr} = \sigma \cdot r_{Mn/f} \\ A\sigma_C \cdot r_{Si/C} + B\sigma_{Mn} \cdot r_{Mn/Si} + D\sigma_{Si} + E\sigma_{Cr} \cdot r_{Cr/Si} = \sigma \cdot r_{Si/f} \\ A\sigma_C \cdot r_{Cr/C} + B\sigma_{Mn} \cdot r_{Mn/Si} + D\sigma_{Si} \cdot r_{Si/Cr} + E\sigma_{Cr} = \sigma \cdot r_{Cr/f} \end{cases},$$

где $\sigma_C, \sigma_{Mn}, \sigma_{Si}, \sigma_{Cr}$ — среднеквадратичные отклонения C, Mn, Si и Cr в генеральном распределении химического состава; $r_{C/f}, r_{Mn/f}, r_{Si/f}, r_{Cr/f}$ — коэффициенты корреляции между C, Mn, Si, Cr и f ; $r_{C/Mn}, r_{C/Si}, r_{Mn/Si}, r_{Mn/Cr}, r_{Si/Cr}$ — коэффициенты корреляции между C, Mn, Si, Cr ; σ — среднеквадратичное отклонение f в генеральном распределении, определяемое как

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^m (\Delta x_i)^2},$$

где Δx_i — отклонение аргументов от среднего значения. Расчеты показали, что $\sigma_C = 0,0176$, $\sigma_{Mn} = 0,066$, $\sigma_{Si} = 0,0317$, $\sigma_{Cr} = 0,098$, $\sigma_f = 1,28$, а значения $A = 13,3$; $B = 2,5$; $D = 11,28$; $E = 4,42$. С учетом их уравнение множественной регрессии имеет вид

$$f = \bar{f} + 13,3(C - \bar{C}) + 2,5(Mn - \bar{Mn}) + 11,28(Si - \bar{Si}) + 4,42(Cr - \bar{Cr}).$$

Для нахождения комплексного влияния элементов химического состава на резонансную частоту определялся коэффициент множественной корреляции

$$\rho = \sqrt{r_{C/f} \cdot r'_{C/f} + r_{Mn/f} \cdot r'_{Mn/f} + r_{Si/f} \cdot r'_{Si/f} + r_{Cr/f} \cdot r'_{Cr/f}},$$

где $r_{C/f}, r_{Mn/f}, r_{Si/f}, r_{Cr/f}$ — коэффициенты парной корреляции; $r'_{C/f}, r'_{Mn/f}, r'_{Si/f}, r'_{Cr/f}$ — парциальные коэффициенты парной корреляции, определяемые как

$$r'_{C/f} = A \frac{\sigma_C}{\sigma}, r'_{Mn/f} = B \frac{\sigma_{Mn}}{\sigma}, r'_{Si/f} = D \frac{\sigma_{Si}}{\sigma}, r'_{Cr/f} = E \frac{\sigma_{Cr}}{\sigma}.$$

Полученное значение коэффициента множественной корреляции $\rho = 0,62$ свидетельствует о наличии связи резонансной частоты с компонентами химического состава. Обозначим выражение $A(C - \bar{C}) + B(Mn - \bar{Mn}) + D(Si - \bar{Si}) + E(Cr - \bar{Cr})$ через Δ . Тогда величина Δ будет показывать, на сколько отклоняется от своего среднего значения резонансная частота при соответствующем отклонении химического состава от генерального среднего значения.

Используя Δ , можно определить степень влияния на резонансную частоту колебания любого аргумента химического состава при средних значениях других. Так, максимальное отклонение содержания C от своего среднего значения вызывает отклонения резонансной частоты на 0,225 кГц,

Mn — на 0,235 кГц, Si — на 0,62 кГц, Cr — на 0,67 кГц. Величина Δ_{\max} для рассматриваемого случая равна 1,52 кГц. Это значение значительно меньше других рассмотренных выше источников погрешностей. Следовательно, учет колебаний химического состава стали не является определяющим фактором при нахождении суммарной погрешности метода.

Вывод. Колебания химического состава в пределах марки материала не оказывают определяющего значения на величину изменений резонансной частоты и на прочностные свойства материалов по сравнению с ошибками воспроизводимости и разбросом внутри параллельных определений.

Список литературы

- 1 Скальский В.Р., Сулим Г.Т. Основы акустичних методів неруйнівного контролю: Навч. посіб. — Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2010. — 386 с.
- 2 Гудошник В.А., Губский С.А., Попов В.А., Чмырь Ю.В. Исследования и практика применения магнитной структуроскопии при техническом диагностировании кранов-перегрузателей завода «Сибтяжмаш» // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. — 2011. — № 2. — С. 51–57.
- 3 Бобров В.Т., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Состояние и тенденции развития акустических (ультразвуковых) методов, средств и технологий неразрушающего контроля и технической диагностики // Территория NDT. — 2014. — № 2. — С. 24–26.
- 4 Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении. — 2014. — 312 с.
- 5 Ботвина Л.Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. — М.: Наука, 2008. — 334 с.
- 6 Горкунов Э.С., Драгошанский Ю.Н., Миховски М. Эффект Баркгаузена и его использование в структуроскопии ферромагнитных материалов // Дефектоскопия. — 2006. — № 6. — С. 3–38.
- 7 Анисимов С.Д., Ананченко Л.Н., Виноградова И.Ю., Rogov И.Е. Электромагнитный неразрушающий контроль упроченного слоя на поверхности стальных изделий // Дефектоскопия. — 2006. — № 1. — С. 18–30.
- 8 Шарко А.В., Погребняк И.Ф., Нигалатий В.Д. Физические методы оценки технологических свойств материалов // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. Всеукраїнська науково-практична конференція, 1–3 жовтня 2014 р. — Херсон: Херсонська державна морська академія, 2014. — С. 343, 344.
- 9 Шарко А.В., Погребняк И.Ф., Нигалатий В.Д. Вероятностные оценки технической диагностики металлов при эксплуатации технологических конструкций // Сучасні інформаційні та інноваційні техно-логії на транспорті (MINTT — 2014) [Збірка матеріалів VI Міжнародної науково-практичної конференції, 27–29 травня 2014 р. — Херсон: Херсонська державна морська академія, 2014. — С. 311–313.

В.Д.Нигалатий

Материалдардың берік болу қасиеттері акустикалық өлшемдер нәтижелеріне химиялық құрамның әсерін зерттеу

Мақалада 40 X болаттың үлгісіне резонансты жиіліктің өлшеміне төрт фактордың: көміртегінің, хромның, кремнийдің және марганецтің пайыздық құрамының біріккен әсері зерттелді. Берілген есепті шешуде әсер етуі зерттелінген факторлар өзара байланысымды әсер беруі мүмкіндігімен, демек, әрбір жұпты тәуелділік күрделене түсуімен қиындық туғызды. Оның бағалануына жиындық регрессия әдістері қолданылған. Материал маркасының шегінде химиялық құрамның өзгеруі резонансты жиіліктің өзгеруі мөлшеріне және өндіру қателіктерімен салыстырғанда материалдың беріктігін анықтайтын қасиеттеріне және паралель анықтамалардың ішіндегі таралуына мәнді әсерін тигізбейтіні анықталған.

V.D.Nigalatiy

Investigation of the influence of chemical composition on the results of acoustic measurements of the strength properties of materials

A combined effect of four factors: the percentage of carbon, chromium, silicon and manganese on the value of the resonant frequency of the samples of steel 40X. The solution to this problem is made difficult by the fact that the factors which influence investigated, can give the effect of inter-related and therefore each pair of dependencies will be complicated. To estimate used multiple regression methods. Found that fluctuations in the chemical composition within the material does not have a brand value by determining changes in the resonance frequency and determines the mechanical properties of materials as compared with errors of reproducibility and spread inside parallel determinations.

References

- 1 Skalskiy V.R., Sulim G.T. *Basics of akustichnih metodiv neruynivnogo Control*: Navch.posib., Lviv: Vidavnichy center of LNU imeni Ivana Frank, 2010, 386 p.
- 2 Gudoshnik V.A., Gubskiy S.A., Popov V.A., Chmyr Y. *Technical diagnostics and non-destructive testing*, 2011, 2, p. 51–57.
- 3 Bobrov V.T., Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G. *Territory NDT*, 2014, 2, p. 24–26.
- 4 Kretov E.F. *Ultrasonic testing in power*, 2014, 312 p.
- 5 Botvina L.R. *Destruction: kinetics, mechanisms, general laws*, Moscow: Nauka, 2008, 334 p.
- 6 Gorkunov E.S., Dragoshanskiy Yu.N., Mikhovski M. *Defectoscopy*, 2006, 6, p. 3–38.
- 7 Anisimov S.D., Ananchenko L.N., Vinogradov I.Yu., Rogov I.E. *Defectoscopy*, 2006, 1, p. 18–30.
- 8 Sharko A.V., Pogrebnyak I.F., Nigalatiy V.D. *Physical methods for evaluation of technological properties of materials. Sioux chasni energetichni installation transporti i tehnologii that obladnannya for ih obslugovuvannya. Vseukraïnska NAUKOVO-practical konferentsiya 1–3 Zhovtnya 2014 p.*, Kherson: Hersons'ka Derzhavna morskа akademiya, 2014, p. 343, 344.
- 9 Sharko A.V., Pogrebnyak I.F., Nigalatiy V.D. *Probabilistic evaluation of technical diagnostics metals at expo-luatatsii technological designs. Suchasni informatsiyi that innovatsiyi techno logii on transporti (MINTT - 2014)* [Zbirka materialiv VI Mizhnarodnoi NAUKOVO-praktichnoi konferentsii 27–29 Travnia 2014 p.], Kherson: Hersons'ka Derzhavna morskа akademiya, 2014, p. 311–313.