

О СПЕКТРАЛЬНО-АКУСТИЧЕСКОМ СПОСОБЕ ОЦЕНКИ ПОРИСТОСТИ МЕТАЛЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ

© 2022 г. А.А. Хлыбов^{1,*}, А.Л. Углов¹, А.А. Демченко¹

¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Россия 603155 Нижний Новгород, ул. Минина, 24
*E-mail: hlybov_52@mail.ru

Поступила в редакцию 13.09.2022; после доработки 14.10.2022
Принята к публикации 21.10.2022

Рассматривается возможность использования различных вариантов неразрушающего спектрально-акустического метода контроля пористости порошковой стали Х12МФ на различных этапах ее горячего изостатического прессования в диапазоне остаточной пористости от 0 до 5 %. Проанализированы существующие подходы к контролю пористости. Предложены новые алгоритмы, обеспечивающие возможность экспресс-контроля пористости на реальных объектах с односторонним доступом и невозможностью с необходимой точностью измерить толщину металла в зоне контроля. Приведены результаты экспериментальной проверки измерительных методик, базирующихся на предложенных алгоритмах, оценены соответствующие погрешности и границы применимости.

Ключевые слова: ультразвук, поверхностные акустические волны, структурный шум, упругопластическое деформирование, энергия.

DOI: 10.31857/S0130308222120016, **EDN:** BURUUE

ВВЕДЕНИЕ

Одной из проблем деталей, изготовленных методом порошковой металлургии, является наличие в них микропор. Используются различные технологии, направленные на устранение пористости материала, в частности, одной из перспективных технологий получения материалов из порошков является технология горячего изостатического прессования (ГИП) [1, 2]. Технология ГИП представляет собой комбинированное воздействие на обрабатываемый материал высоких температур и всестороннего давления. Источником, передающим давление на материал, является, как правило, инертный газ, например, аргон. Равенство давления во всех направлениях гарантирует изотропность характеристик материала. Приложение высокого давления обеспечивает окончательную плотность материала уже при температурах, ниже требуемых при обычном спекании для порошковой металлургии (до 10—15 %). Благодаря этому, ГИП, как правило, делает возможным более точное воздействие на микроструктуру материала и позволяет получать детали с мелкозернистой кристаллической структурой, повышенными механическими свойствами, высокими эксплуатационными характеристиками [3—6]. В результате ГИП из порошковых материалов становится возможным изготовление компактных беспористых заготовок. Детали, полученные методом ГИП, обладают более высоким уровнем механических характеристик по сравнению с аналогичными по химическому составу литыми изделиями.

Тем не менее при нарушении технологии возможно появление микропор в материале, которые приводят к значительному снижению механических характеристик металла. Необходимость оценки пористости получаемого материала является актуальной задачей.

Этим объясняется тот значительный интерес, который проявляют специалисты в области структурометрии к современным методам количественного контроля пористости.

Безусловное предпочтение имеют неразрушающие методы контроля в силу их дешевизны, оперативности и возможности использования на готовых (нередко весьма дорогостоящих) изделиях. При этом контроль может проводиться как на этапе сдачи-приемки, так и в эксплуатации для оценки их остаточного ресурса и принятия решения о работоспособности.

Анализ имеющихся литературных данных показывает, что среди развитых к настоящему времени методов неразрушающего контроля для задач оценки пористости наиболее информативным и удобным с инженерной точки зрения является акустический метод, эхо-импульсный вариант которого все шире применяется для контроля объемной пористости различных материалов: металлов и сплавов [7—15], композитов [16—23] и даже горных пород [24, 25]

В качестве информативных акустических параметров чаще всего используют скорость звука и коэффициент затухания.

Метод, основанный на измерении скорости звука, при современных аппаратно-программных средствах акустического контроля значительно точнее, что обеспечивает его высокую чувствительность к величине пористости. В условиях реальных деталей или элементов конструкций, как правило, допустим лишь односторонний доступ к поверхности объекта, что делает измерение толщины с приемлемой точностью невозможным. В этой связи для контроля пористости, так же, как и для других методик, основанных на связи скорости звука с определяемыми параметрами (например, в задачах акустоупругости), в качестве измеряемых акустических параметров используются выражения, не содержащие толщину материала в зоне измерения [12].

Целью настоящей работы является разработка и экспериментальная проверка методик неразрушающего определения пористости металлических материалов, изготовленных методом горячего изостатического прессования. При проведении контроля может быть обеспечен односторонний доступ к их поверхности и невозможность определения толщины в зоне контроля. В работе использованы два подхода — классический, базирующийся на измерении отношения скоростей распространения объемных волн различного типа, и оригинальный, основанный на анализе закономерностей трансформации спектров импульсов упругих волн, распространяющихся в пористом материале. Оценены возможности использования результатов измерения коэффициента затухания для оценки пористости.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ

Для получения обозримых результатов в качестве импульсов, распространяющихся в пористой среде, рассмотрим импульсы с гауссовой огибающей, имеющие на входе в материал следующий вид:

$$S(t, 0) = Ae^{-kt^2} \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1)$$

где A , k — постоянные; ω_0 — круговая частота несущей импульса; φ_0 — начальная фаза.

Комплексный спектр импульса (1):

$$F(\omega, 0) = \frac{A}{2} \sqrt{\frac{\pi}{k}} e^{j\varphi_0} e^{-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{4k}}. \quad (2)$$

Спектр импульса на расстоянии x от границы ввода сигнала:

$$F(\omega, x) = F(\omega, 0) K_i(\omega, x), \quad (3)$$

где $K_M(\omega, x)$ — передаточная функция материала, рассматриваемого как акустический четырехполюсник, записываемая в обычном виде:

$$K_i(\omega, x) = \exp \left[-\alpha(\omega)x - j \frac{\omega x}{V(\omega)} \right], \quad (4)$$

где x — акустический путь упругого импульса.

Выражения для частотно зависимых коэффициента затухания и скорости для микропористого материала с величиной пористости в соответствии с выводами работ [26—28] в рэлеевском приближении могут быть записаны следующим образом:

$$\alpha(\omega) = (k_1 + k_2 P)\omega^4; \quad (5)$$

$$V(\omega) = V_0(1 - k_3 P - k_4 P\omega^2), \quad (6)$$

где k_1, k_2, k_3, k_4 — постоянные материала, выражающиеся через усредненные константы упругости; V_0 — скорость упругих волн в беспористом поликристаллическом материале.

Выражения для постоянных материала могут быть получены на базе развитого в фундаментальной работе [26] подхода к анализу рассеяния упругих волн в микронеоднородном материале с использованием метода корреляционного приближения теории случайных функций. Однако получаемые при этом результаты оказываются слишком громоздкими для их практического применения с целью построения конкретных инженерных методик. В этой связи представляется более предпочтительным в качестве исходных использовать формулы (5), (6) с неизвестными (но постоянными) коэффициентами, которые в принципе можно трактовать как материальные параметры феноменологической модели. Как показано в дальнейшем, предлагаемые в данной работе

методики определения пористости не требуют знания конкретных величин, входящих в выражения (5), (6) неизвестных коэффициентов. Следует отметить, что коэффициент затухания и скорость звука упругих волн, распространяющихся в исследуемом материале, кроме пористости, зависят от размеров зерен. Однако, как показано ниже, в рассматриваемом температурном диапазоне ГИП размеры зерен меняются достаточно мало по сравнению с изменением уровня пористости, что позволяет при разработке инженерных методик контроля пористости таким изменением пренебречь.

Форма импульса $S(t, x)$, прошедшего расстояние x в пористом материале, определяется с помощью обратного преобразования Фурье:

$$S(t, 0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega, 0) K_i(\omega, x) e^{j\omega t} d\omega. \quad (7)$$

Будем рассматривать достаточно узкополосные сигналы (т.е. достаточно длинные импульсы), обычно излучаемые типичными пьезопреобразователями. Для таких импульсов допустима линеаризация зависимостей $\alpha(\omega)$ и $V(\omega)$ в области несущей частоты ω_0 :

$$\alpha(\omega) = (k_1 + k_2 P) \omega_0^3 (\omega - 3\omega_0), \quad (8)$$

$$V(\omega) = V_0 [1 - k_3 P - k_4 P \omega_0 (2\omega - \omega_0)]. \quad (9)$$

Подставив соотношения (8) и (9) в выражения для передаточной функции (4) и выполнив интегрирование, получим выражение для формы импульса на расстоянии x от границы среды:

$$S(t, x) = A(x) e^{-k(t')^2} \cos\{\omega_0(x) + K_{\text{см}} t' + \varphi_0 - \Delta\varphi(x)\}, \quad (10)$$

где

$$A(x) = A \left[1 - 16k^2 \frac{x}{V_0} (1 + 2k_3 P) k_4^2 P^2 (\omega_0(x))^2 \right] \times \exp \left[- (k_1 + k_2 P) x (\omega_0(x))^4 + 16k \frac{x}{V_0} (1 + 2k_3 P) k_4 P (\omega_0(x))^2 \right]; \quad (11)$$

$$t' = t - \frac{x}{V_0} (1 + k_3 P + k_4 P (\omega_0(x))^2); \quad (12)$$

$$\omega_0(x) = \omega_0 - 8(k_1 + k_2 P) x \omega_0^3; \quad (13)$$

$$K_{\text{см}} = \frac{\partial(\omega_0(x))}{\partial t} = 8k^2 \frac{x}{V_0} (1 + k_3 P) k_4 P (\omega_0(x)); \quad (14)$$

$$\Delta\varphi(x) = 4 \frac{x}{V_0} (1 + k_3 P) K_{\text{см}} \omega_0(x) [k + (\omega_0(x))^2] P. \quad (15)$$

Выражения (11)—(15) показывают, что при распространении импульса в пористой среде имеют место следующие эффекты:

в зависимость амплитуды огибающей импульса от акустического пути в качестве параметра входит величина пористости (формула (11));

возникает линейно возрастающее с расстоянием смещение средней частоты, причем величина нарастания смещения пропорциональна пористости;

появляется линейная частотная модуляция радиоимпульса с коэффициентом модуляции, зависящим от пористости и линейно возрастающим с расстоянием;

возникает линейно возрастающий с расстоянием сдвиг фазы между огибающей и несущей радиоимпульсов, который также зависит от пористости.

Любой из описанных эффектов может быть использован для определения величины пористости. Выбор того или иного эффекта для построения конкретного инженерного алгоритма оценки пористости целесообразно определять в каждом случае отдельно в зависимости от того, на какой из параметров упругого импульса величина пористости оказывает наибольшее влияние.

Выражения (11)—(15), как отмечалось выше, получены при трех сильных предположениях: спектр импульса достаточно узок, форма его гауссова, а частота заполнения постоянна, но практически ни одно из этих предположений строго не выполняется. Однако, как показывают экспериментальные исследования, все эффекты, описываемые этими выражениями, имеют место и в случае обычных упругих импульсов, сформированных пьезоэлектрическими или электромагнитно-акустическими преобразователями. Кроме того, с помощью специального численного эксперимента было установлено, что осциллограммы реальных сигналов могут быть с удовлетворительной точностью аппроксимированы выражениями (11)—(15), в которых величина P рассматривается как параметр. Отсюда следует, что при необходимости реальный упругий импульс, излученный в исследуемую среду, можно рассматривать как первоначально гауссовый, прошедший некоторую модельную среду со своей пористостью. Таким образом, алгоритмы оценки величины P , которые могут быть построены на базе выражений (11)—(15), допустимо использовать, если полученные информативные акустические параметры заменить на разности между соответствующими параметрами для импульса, прошедшего некоторый акустический путь в исследуемом материале и импульсом на входе в материал.

Все приведенные выше соотношения построены для упругих импульсов. Параметры электрических радиоимпульсов, фактически наблюдаемых в эксперименте, могут существенно отличаться, однако если измерительные методики строятся на базе сравнения параметров импульсов, прошедших различный акустический путь, то можно избежать целого ряда отрицательных эффектов, связанных с влиянием электрического тракта.

Будем использовать формулу (6) в качестве базовой для построения методики оценки пористости материала на основе метода оценки скорости упругих волн.

Многими авторами [8, 9, 11, 12 и др.] экспериментально установлено значительное влияние степени пористости на абсолютное значение скорости звука, существенно превышающее значение дисперсионных добавок. В этой связи рассмотрим простой вариант оценки пористости, который, с одной стороны, основан на высокой чувствительности к ней абсолютного значения скорости, а, с другой, не требовал бы эту скорость непосредственно измерять на реальных объектах.

Выводы работ [8, 12] позволяют пренебречь дисперсионными добавками. Это позволяет записать выражение (6) для объемных волн двух типов — продольной V_l и поперечной V_t — в виде:

$$V_l = V_l^0 (1 - k_l P); \quad (16)$$

$$V_t = V_t^0 (1 - k_t P), \quad (17)$$

где V_l^0 и V_t^0 — скорости упругих волн соответствующих типов для беспористого материала и константы материала.

При разработке измерительных методик мы будем использовать эхо-импульсный метод, высокая информативность которого отмечена выше. Использовались прямые совмещенные преобразователи, что существенно повышает точность расчетных алгоритмов определения временных характеристик, поскольку диаграммы направленности излучателя и приемника в этом случае совпадают.

В качестве информативного измеряемого параметра, не зависящего от толщины материала в зоне измерений целесообразно использовать следующий:

$$d = \frac{V_t}{V_l} = \frac{t_{l,1,n}}{t_{t,1,n}}, \quad (18)$$

где $t_{l,1,n}$, $t_{t,1,n}$ — задержки n -х отраженных импульсов соответствующих типов волн относительно первых отраженных импульсов.

Информативность параметра в задачах контроля рассеянных повреждений показана в работах [29—31 и др.], кроме того, его использование рекомендовано национальным стандартом ГОСТ Р 57283—2016 «Расчеты и испытания на прочность. Акустический метод определения поврежденности при малоцикловой усталости стали. Общие требования»

Как следует из формул (16), (17), связь параметра d с величиной пористости можно записать в виде:

$$d = d_0 \frac{1 - k_t P}{1 - k_p P}, \quad (19)$$

где d_0 — значение параметра d для беспористого материала.

Как экспериментально показано ниже, формулу (19) можно линеаризовать и записать следующим образом:

$$d = d_0 (1 + k_p P), \quad (20)$$

где $k_p = k_l - k_t$.

Из формул (19), (20) следуют расчетное выражение для определения величины пористости:

$$P = \frac{d - d_0}{k_p d_0}. \quad (21)$$

Полученные соотношения показывают, что чувствительность параметра d к величине пористости в решающей степени зависит от разности коэффициентов k_l и k_t .

Кроме достаточно очевидного параметра d , не зависящего от толщины материала, выражения (11)—(15) позволяет получить еще одну характеристику, чувствительную к величине пористости и также не зависящую от толщины.

Подставив выражение (13) в соотношение (6), получим формулу для скорости распространения фазы импульса, соответствующей центральной спектральной частоте:

$$V[(\omega_0(x))] = V_0 [1 - k_3 P - k_4 P (\omega_0(x))^2 + 16 k_1 k_4 P x (\omega_0(x))^4]. \quad (22)$$

Выражение (22) показывает, что скорость перемещения фазы импульса, соответствующей центральной частоте, увеличивается в процессе распространения импульса (своеобразное «ускорение» импульса, причем интенсивность этого увеличения пропорциональна пористости P).

Для многократно отраженных импульсов формула (22) приобретает вид:

$$\frac{2h}{t_{n,n+1}} = V_0 - AP - BP + 2nhCP, \quad (23)$$

где $A = k_3 V_0$, $B = k_4 V_0 \omega_0^2$, $C = 16 k_1 k_4 V_0 \omega_0^4$.

Из (23), пренебрегая поправками второго порядка малости, легко получить соотношение между задержками $t_{1,2}$, $t_{n,n+1}$ и величиной пористости, не содержащее неизвестной толщины материала:

$$R_n = \frac{t_{1,2} - t_{n,n+1}}{t_{1,2}^2} = CP(n-1). \quad (24)$$

Уравнение (24) можно рассматривать как уравнение линейной регрессии без свободного члена функции R_n по переменной $(n-1)$, при этом пористость определяет значение единственного коэффициента регрессии.

В данной работе для сравнения с результатами метода, базирующегося на измерении скорости звука, использовался метод, основанный на измерении коэффициентов затухания для волн обоих типов.

Коэффициенты затухания рассчитывались по уточненной по сравнению с обычными формуле:

$$\alpha(\omega) = \frac{1}{4(n-m)h} \ln \frac{E_m}{E_n} - \Delta\alpha_n, \quad (25)$$

где E_i — энергия i -го отраженного импульса, рассчитываемая по формуле:

$$E_i = \sum_{j=j_{mi}}^{j_{max}} P_j^i, \quad (26)$$

P_j^i — спектральная плотность мощности i -го отраженного импульса, рассчитываемая с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) в диапазоне спектральных частот от f_{\min} до f_{\max} , соответствующих значениям 0,9—0,95 от максимума энергетического спектра импульса;

$$i_{\min} = \text{Int} \left(\frac{f_{\min} N_{\text{БПФ}}}{f_d} \right) \text{ до } i_{\max} = \text{Int} \left(\frac{f_{\max} N_{\text{БПФ}}}{f_d} \right); N_{\text{БПФ}} \text{ — общее число отсчетов сигнала при БПФ}$$

(с учетом добавленных нулей); f_d — частота дискретизации сигнала, составляющая для используемого нами ИВК «АСТРОН» (№ в Государственном реестре средств измерений 67552-17) 180 МГц, число точек $N_{\text{БПФ}}$ при БПФ составляло 2^{13} ; $\Delta\alpha_d$ — дифракционная поправка, определяемая в соответствии с кривой дифракционного ослабления, приведенной в [32].

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе исследовали образцы в форме цилиндров высотой 25 мм и диаметром 15 мм, полученные методом ГИП из стали X12МФ. Образцы изготавливали следующим образом [4]:

вибрационная засыпка порошка в капсулы;

дегазация в вакууме;

нагрев с всесторонним сжатием.

Химический состав исследуемых сплавов показан в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав исследуемых сплавов

Марка	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Ti	Cu	W	Fe
X12МФ	1,45—1,65	0,1—0,4	0,15—0,45	<0,03	<0,03	11—12,5	0,4—0,6	<0,35	0,15—0,3	—	<0,3	—	~84

В результате прессования при различных температурах и давлениях получили образцы с различной плотностью (табл. 2). Плотность образцов измерялась методом гидровзвешивания в соответствии с ГОСТ 18898—89 «Методы определения плотности содержания масла и пористости». В соответствии с ГОСТ 18898—89, относительная плотность определяется как отношение плотности спеченного сплава к плотности литого. Поскольку, как показано ниже, при температуре ГИП, равной 1150 °С, плотность литого и спеченного сплава практически совпадают, плотность последнего использовалась для расчета относительной плотности.

Таблица 2

Результаты измерения плотности образцов X12МФ

Марка	Цикл ГИП		Плотность, кг/м ³ ×10 ⁻³	Относительная плотность
	Температура, °С	Давление, МПа		
X12МФ	670	98	6,07	0,79
	700	93,6	6,13	0,80
	750	97,6	6,65	0,87
	800	106	6,96	0,91
	900	113	7,26	0,95
	1150	160	7,65	1,00

Микроструктурные исследования образцов проводили на металлографическом микроскопе Keyence VHX-1000. Для выявления структурных составляющих стали X12МФ применяли электрохимическое травление в 10 % растворе щавелевой кислоты по режиму 5В, 2А в течение 30 с.

Для различных температур и давлений ГИП были получены изображения микроструктур исследуемого сплава (рис. 1).

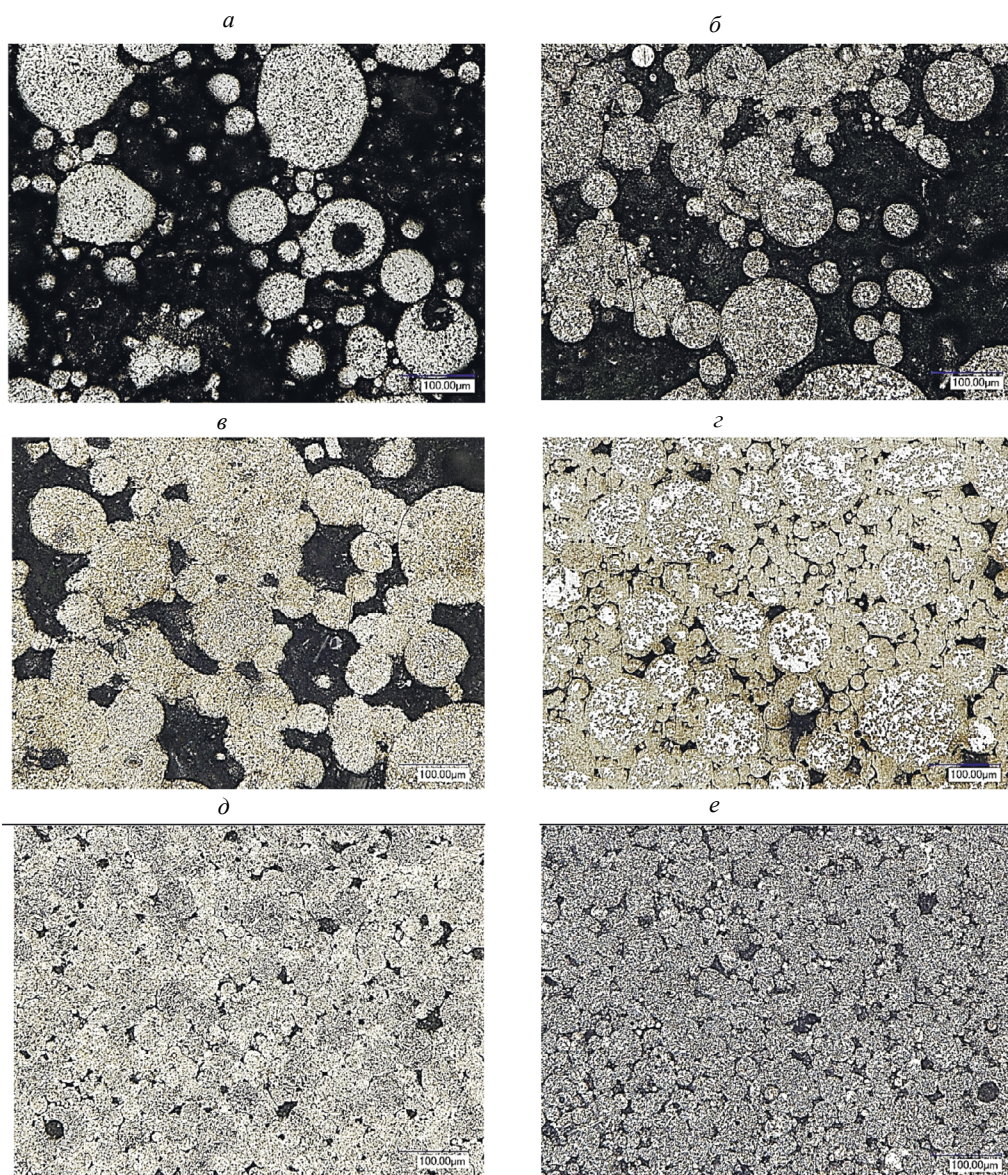


Рис. 1. Микроструктура сплава X12МФ после различных температур ГИП, $\times 500$:
a — 670 °С; *б* — 700 °С; *в* — 750 °С; *г* — 800 °С; *д* — 900 °С; *е* — 1150°С.

Как видно из результатов микроструктурных исследований, представленных на рис. 1, при температуре 670 °С в структуре наблюдаются практически неспеченные в результате ГИП частицы порошка. Дальнейшее повышение температуры ГИП выше 800 °С и давления в газостате приводит к уменьшению пористости материала и спеканию частиц материала. При 1150 °С и давлении 160 МПа наблюдается зеренная структура материала с размером зерна, определяемым исходными размерами частиц. При таких значениях параметров ГИП имеем наибольшую плотность, совпадающую с плотностью литого сплава.

На рис. 2 приведены результаты оценки относительной плотности материала, полученного при каждой температуре ГИП.

Полученные зависимости относительной плотности от температуры ГИП коррелируют с результатами проведенных ранее исследований для никелевого сплава ВЖ159 [4].

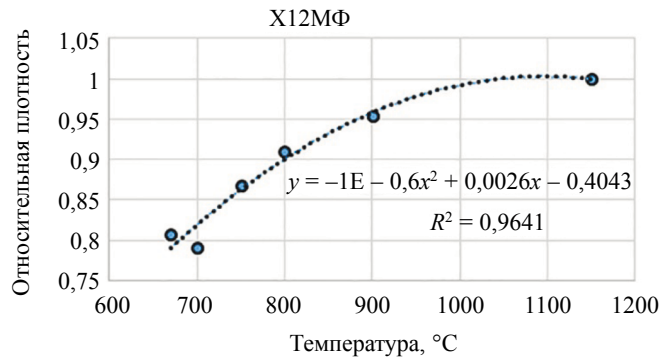


Рис. 2. Зависимости относительной плотности от температуры ГИП.

Величину пористости по P рассчитывали по формуле:

$$P = 1 - \rho_{\text{отн}}, \quad (27)$$

где $\rho_{\text{отн}}$ — величина относительной плотности.

Как видно из табл. 2 и рис. 2, значения пористости от 0 до 5 %, реально встречающейся в деталях, изготовленных по технологии ГИП, реализуются в диапазоне температур прессования от 900 до 1150 °C. Акустические измерения проводили на образцах, изготовленных в данном диапазоне температур ГИП.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Акустические измерения проводили с использованием измерительно-вычислительного комплекса «АСТРОН», позволяющего проводить прецизионное измерение амплитудно-временных параметров акустических импульсов и программную обработку результатов в реальном масштабе времени. Метрологически обеспеченная погрешность определения временных интервалов составляет 2 нс, а при дополнительной обработке недетектированных сигналов средствами программного обеспечения ИВК соответствующая погрешность уменьшается до 1 нс.

Использовали прямые совмещенные пьезопреобразователи продольных и поперечных волн с пьезопластинками в форме квадрата со стороной 4 мм.

Для первого (классического) варианта определения пористости с помощью информативного параметра d с целью исключения влияния неравенства акустических путей в случае двухкомпонентных (содержащих продольно и поперечно поляризованные пьезопластинки) преобразователей применяли оригинальный преобразователь, изготовленный в соответствии с патентом [33]. Особенностью данного преобразователя является то, что его активный элемент — пластинка из пьезокерамики ЦТС 19, вырезанная из поляризованного полуфабриката под углом 20° к направлению поляризации полуфабриката. Такой преобразователь излучает одновременно продольные и поперечные горизонтально поляризованные упругие импульсы из одной точки ввода, что обеспечивает абсолютное равенство акустических путей для импульсов обоих типов. Частота поперечных волн составляла 5 МГц, продольных — 8 МГц. Для уменьшения помех поперечные и продольные импульсы возбуждались поочередно с использованием цифровой фильтрации и соответствующей перестройки параметров зондирующего генератора, что обеспечивалось средствами программного обеспечения ИВК «АСТРОН».

Для второго, оригинального метода использовали преобразователи поперечных волн с частотой 5 МГц.

Коэффициенты затухания измеряли на частоте 5 МГц для обоих типов волн.

В соответствии с [32], длину ближней зоны можно оценить по формуле:

$$N \approx 1,37 \frac{a^2 f}{V}, \quad (28)$$

где a — сторона квадрата.

Формула (28) в нашем случае дает значение порядка 20 мм для продольных и порядка 35 мм для поперечных волн, это означает, что для наших образцов отсчеты сигналов, соответствующие первому донному импульсу, находятся заведомо в дальней зоне, где звуковое давление изменяется монотонно.

На рис. 3 приведены типичные осциллограммы импульсов поперечных волн для цилиндрических образцов.

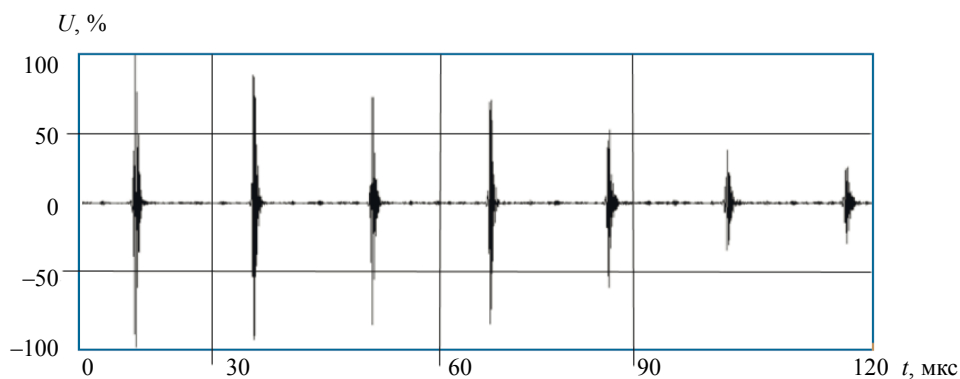


Рис. 3. Типичные осциллограммы отраженных импульсов.

Для проверки эффективности первого варианта метода, основанного на использовании независимого от толщины параметра d , рассчитываемого по формуле (18), проводили измерения задержек $t_{t,1,4}$, $t_{l,1,4}$ четырех отраженных импульсов относительно первых отраженных.

На рис. 4 приведены зависимости скоростей продольных и поперечных волн от степени пористости P .

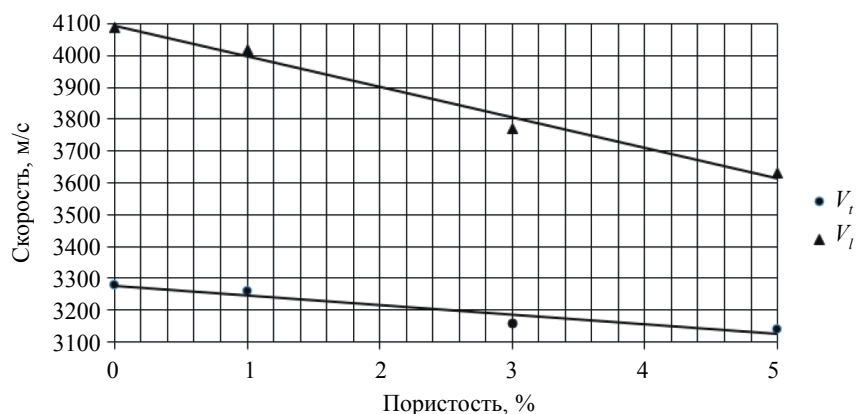


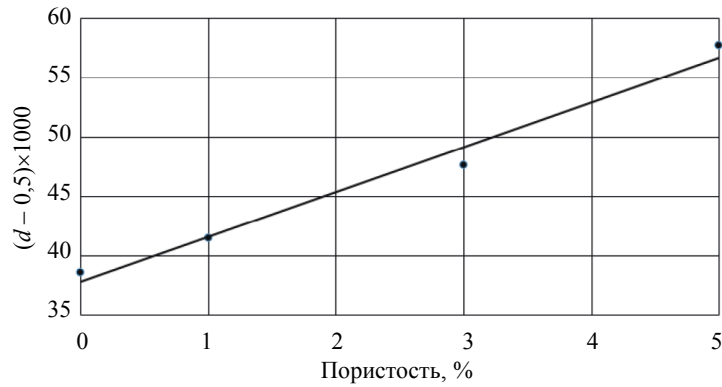
Рис. 4. Зависимости скоростей упругих волн от степени пористости.

Из рис. 4 видно, что $k_t = -\frac{1}{V_t^0} \frac{\partial V_t}{\partial P} > k_l = -\frac{1}{V_l^0} \frac{\partial V_l}{\partial P}$, поэтому параметр d должен быть чувстви-

телен к степени пористости.

Этот вывод подтверждает рис. 5, на котором приведен график зависимости $d(P)$.

Достоверность линейной аппроксимации зависимости $d(P)$ составляет 0,99. Таким образом, в рамках данной методики возможна оценка пористости на основании измерения параметра d с использованием расчетной формулы (21).

Рис. 5. Зависимость параметра d от степени пористости.

Оценим погрешность определения пористости по формуле (21), ее значение можно рассчитать как

$$\Delta P \approx \frac{\sqrt{(d_0)^2 (\Delta d)^2 + (\bar{d})^2 (\Delta d_0)^2}}{k_p (d_0)^2}. \quad (29)$$

Абсолютная погрешность определения параметра d по формуле (19) определяется относительными погрешностями определения задержек $t_{t,1,4}$, $t_{l,1,4}$, приблизительно равных 50 и 25 мкс соответственно:

$$\Delta d = \sqrt{\left(\frac{\Delta t}{t_{t,1,4}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t_{l,1,4}}\right)^2}, \quad (30)$$

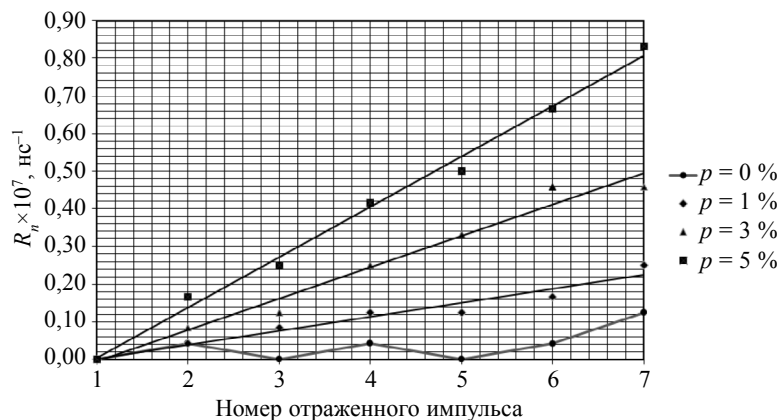
где Δt — абсолютная погрешность определения задержки, равная для ИВК «АСТРОН» 2 нс.

Из (30) получаем $\Delta d \approx 10^{-4}$.

Если рассматривать формулу (20) как уравнение линейной регрессии, то для погрешности коэффициента k_p получим:

$$\Delta k_p = \frac{\Delta d}{d_0 \sqrt{\sum_{i=1}^{N_p} (P_i - \bar{P})^2}}, \quad (31)$$

где P_i — значения пористости исследуемых образцов; \bar{P} — среднее значение пористости; N_p — количество образцов.

Рис. 6. Зависимость параметра «ускорения» R_n от номера отраженного импульса.

Из (31) следует: $\Delta k_p \approx 0,5 \times 10^{-4}$.

Таким образом, погрешность определения с помощью данной методики в соответствии с (29) составляет $\Delta P \approx 0,2 \%$.

Для оценки возможности второго варианта метода, основанного на эффекте «ускорения» отраженных импульсов (формула (23)), измеряли задержки между n -м и $n+1$ -м импульсами для $n=1, 2 \dots 7$.

Зависимость параметра «ускорения» импульсов $R_n = \frac{t_{1,2} - t_{n,n+1}}{t_{1,2}^2}$ (формула (24)) от номера отраженного импульса приведена на рис. 6.

Для беспористого образца зависимость $R_n(n)$ не выявляется (достоверность аппроксимации $R^2 = 0,36$), для остальных образцов величина R^2 превышает значение 0,95, что позволяет говорить о корректности линейной аппроксимации для пористых образцов.

Из формулы (24) следует, что коэффициенты регрессионной зависимости $R_n(n)$ связаны с величиной CP .

На рис. 7 приведен график зависимости $CP(P)$.

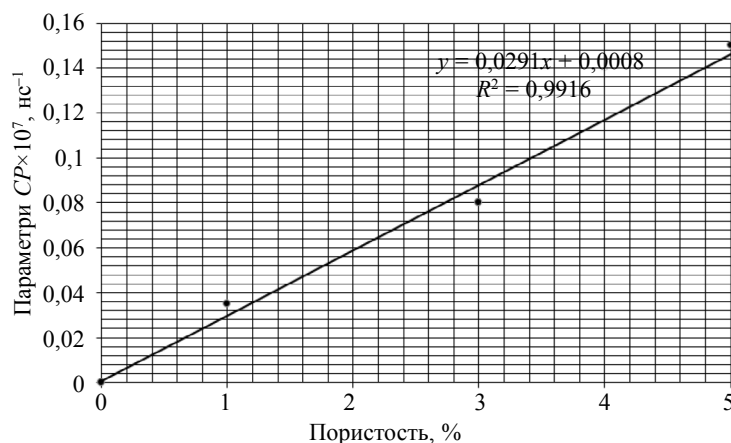


Рис. 7. График зависимости $CP(P)$.

Из рис. 7 видно, что зависимость $CP(P)$ с высоким уровнем достоверности (более 0,99) аппроксимируется прямо пропорциональной зависимостью, из чего следует, что величина коэффициента C в формуле (24) действительно постоянна и для исследуемого материала $C \approx 2,9 \times 10^{-9} \text{нс}^{-1}$.

Таким образом, величина пористости может быть определена на основании регрессионной обработки экспериментально полученной зависимости:

$$R_n = f(n-1). \quad (32)$$

При этом зависимость (26) аппроксимируется уравнением линейной регрессии без свободного члена с коэффициентом K_R , а величина пористости вычисляется по простой формуле:

$$P = \frac{K_R}{C}, \quad (33)$$

где величина C , как видно из формулы (23), зависит от скорости упругих волн в материале V_0 и используемой частоты преобразователя ω_0 , являясь постоянной в конкретных условиях эксперимента.

Значение погрешность определения пористости по формуле (33) записывается следующим образом:

$$\Delta P = \sqrt{\frac{(\Delta K_R)^2}{(\bar{C})^2} + \frac{(\bar{K}_R)^2 (\Delta C)^2}{(\bar{C})^4}}, \quad (34)$$

где \bar{C} , \bar{K}_R — средние значения величин C , K_R ; ΔC , ΔK_R , ΔC — их абсолютные погрешности, определяемые путем статистической обработки экспериментальных результатов, приведенных на рис. 6, 7.

Для нашего случая получено: $\bar{C} \approx 2,9 \times 10^{-9} \text{ нс}^{-1}$, $\bar{K}_R \approx 0,08 \times 10^{-9} \text{ нс}^{-1}$, $\Delta C \approx 0,2 \times 10^{-9} \text{ нс}^{-1}$, $\Delta K_R \approx 0,01 \times 10^{-9} \text{ нс}^{-1}$, откуда получаем погрешность измерения пористости данным способом: $\Delta P \approx 0,7 \%$.

Таким образом, обе представленные методики дают достаточно хорошие результаты. Хотя второй вариант дает меньшую точность, однако он не требует использования двух преобразователей разных типов. Данный недостаток можно обойти, если использовать электромагнитно-акустические преобразователи, но их существующие варианты не обеспечивают требуемую метрологически обеспеченную точность измерений временных интервалов.

Для сравнения рассмотрим результаты контроля пористости методом, основанный на измерении коэффициентов затухания используемых типов упругих волн.

На рис. 8 приведены графики зависимости коэффициентов затухания поперечных и продольных волн от степени пористости



Рис. 8. Зависимость коэффициентов затухания от пористости.

С учетом погрешности определения коэффициента затухания порядка ± 2 Нп/м абсолютная ошибка определения величины пористости на основании зависимостей коэффициентов затухания для волн обоих типов оказывается не менее $\pm(2-3) \%$. Такая погрешность представляется слишком большой для контроля пористости в реальном диапазоне, допустимом для современных ГИП-материалов.

ВЫВОДЫ

1. В работе рассмотрены возможности использования различных вариантов неразрушающего спектрально-акустического метода контроля пористости порошковой стали Х12МФ на различных этапах ее горячего изостатического прессования в диапазоне остаточной пористости от 0 до 5 %.

2. Показана перспективность использования двух вариантов метода, базирующихся на использовании информативных параметров, допускающих возможность измерения временных параметров упругих импульсов на реальных объектах с односторонним подходом и неизвестным точным значением толщины в зоне измерений.

3. Экспериментальная проверка предложенных методик показала их эффективность и достаточно высокую точность определения остаточной пористости образцов из порошковой стали Х12МФ при их изготовлении методом ГИП.

4. Для сравнения проведены исследования влияния пористости на коэффициент затухания поперечных и объемных продольных волн. Несмотря на наличие выраженной регрессионной связи коэффициентов затухания с величиной остаточной пористости, ее определение на реальных объектах с использованием данной методики вряд ли может быть рекомендовано для современных материалов, изготовленных по технологии ГИП.

Исследование выполнено по гранту РФ №19-19-00332-П «Разработка научно обоснованных подходов и аппаратно-программных средств мониторинга поврежденности конструкционных

материалов на основе подходов искусственного интеллекта для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов в арктических условиях».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Levashov A.V., Sentyurina E.A., Loginov Z.A., Logachev P.A., Samokhin I.A.* Microstructure and thermomechanical behavior of heusler phase Ni₂AlHF-strengthened NiAl—Cr(Co) alloy produced by HIP of plasma spheroidized powder // *Materials Science and Engineering: A*. 2018. V. 729. P. 398—410.
2. *Агеев С.В., Гиришов В.Л.* Горячее изостатическое прессование в порошковой металлургии // *Металлообработка*. 2015. № 4 (88). С. 56—60.
3. *Хлыбов А.А., Рябов Д.А., Аносов М.С., Беляев Е.С.* Исследование особенностей микроструктуры и свойств металлов, полученных путем горячего изостатического прессования // *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. 2021. Т. 24. № 4. С. 4—10.
4. *Хлыбов А.А., Беляев Е.С., Рябцев А.Д., Беляева С.С., Гетмановский Ю.А., Явтушенко П.М.* Влияние технологии горячего изостатического прессования на структуру и свойства изделий из порошка жаропрочного сплава ВЖ159 // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2021. Т. 19. № 1. С. 44—48.
5. *Khomutov M., Cheverikin V., Petrovskiy P., Travyanov A., Logachev I., Smurov I., Potapkin P., Sova A.* Effect of hot isostatic pressing on structure and properties of intermetallic NiAl—Cr—Mo alloy produced by selective laser melting // *Intermetallics*. 2020. V. 120. Art. Number 106766.
6. *Huang S., Li Z., Xiong B., Zhang Y., Li X., Liu H., Yan H., Yan L.* Microstructure and Porous Defects of a Spray-Formed and Hot-Worked 7000 Aluminium Alloy // *Materials Science Forum*. 2017. V. 879. P. 1778—1782.
7. *Алешин Н.П., Григорьев М.В., Щипаков Н.А., Прилуцкий М.А., Мурашов В.В.* Применение методов неразрушающего контроля для оценки качества готовых деталей аддитивного производства // *Дефектоскопия*. 2016. № 10. С. 63—75.
8. *Алешин Н.П., Григорьев М., Щипаков Н.А., Неруши С.В.* Исследование ультразвукового метода оценки пористости изделий аддитивного производства // *Цветные металлы*. 2019. № 5. С. 45—52. DOI: 10.17580/tsm.2019.05.05
9. *Slotwinski J.A., Garboczi E.J., Hebenstreit K.M.* Porosity Measurements and Analysis for Metal Additive Manufacturing Process Control // *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2014. V. 119. P. 494—528. DOI:10.6028/jres.119.019
10. *Wong B.S., Ong M.Y.* Non-Destructive testing of metallic 3D printed specimens. Saarbrucken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. 75 p.
11. *Ren F., Case E.D., Morrison A., Tafesse M., Baumann M.J.* Resonant ultrasound spectroscopy measurement of young's modulus, shear modulus and poisson's ratio as a function of porosity for alumina and hydroxyapatite // *Philosoph. Mag.* 2009. V. 89. No. 14. P. 1163—1182.
12. *Пермикин В.С.* О диагностике ползучести теплостойких сталей по результатам изменения скорости ультразвуковых волн при неразрушающем контроле энергооборудования. 1. Датчики и устройства для измерения скорости ультразвука // *Дефектоскопия*. 2004. № 1. С. 46—58.
13. *Савченко Н.Л., Саблина Т.Ю., Севостьянова И.Н., Буякова С.П., Кульков С.Н.* Деформация и разрушение пористых хрупких материалов при различных схемах нагружения // *Известия ВУЗов. Физика*. 2015. Т. 58. № 11. С. 56—60.
14. *Adler L.* Ultrasonic method to determinate gas porosity in aluminium alloy castings: theory and experiment // *J. Appl. Phys.* 1986. V. 59. No. 2. P. 336—347.
15. *Thompson D.O., Wormley S.J., Rose James H., Thompson R.B.* Elastic wave scattering from multiple voids (porosity) // *Rev. Progr. Quant Nondestruct. Eval. Proc. S. Annu. Rev. San Diego, Calif.* 1983. V. 2A. P. 867—882.
16. *Мурашов В.В.* Определение пористости углепластиков в авиаконструкциях лазерно-акустическим способом ультразвукового контроля // *Авиационная промышленность*. 2011. № 3. С. 33—36.
17. *Мурашов В.В., Мишуров К.С.* Определение пористости углепластиков в авиационных конструкциях ультразвуковым методом // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 2 (35). С. 88—92.
18. *Бойчук А.С., Мурашов В.В., Чертищев В.Ю., Диков И.А.* Определение пористости в монолитных конструкциях из углепластиков ультразвуковым эхо-методом с использованием лазерного возбуждения ультразвуковых колебаний // *Труды ВИАМ*. 2016. № 12 (48). С. 10—14.
19. *Бойчук А.С., Диков И.А., Чертищев В.Ю., Генералов А.С.* Определение пористости монолитных зон деталей и агрегатов самолета, изготавливаемых из ПКМ, с применением ультразвукового эхоимпульсного метода // *Дефектоскопия*. 2019. № 1. С. 4—9. DOI: 10.1134/S01303082190100019
20. *Бойчук А.С., Чертищев В.Ю., Диков И.А., Генералов А.С., Славин А.В.* Влияние морфологии пор на ультразвуковой контроль пористости в углепластике эхо-импульсным методом // *Контроль. Диагностика*. 2018. № 8. С. 22—29. DOI: 10.14489/td.2018.08. pp.022-029
21. *Sokolovskaya Yu.G., Podymova N.B., Karabutov A.A.* Quantitative Evaluation of Porosity in Unidirectional CFRPs Using Laser Ultrasonic Method // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020.

- V. 56. No. 3. P. 201—208. [Соколовская Ю.Г., Подымова Н.Б., Карабутов А.А. Количественная оценка пористости однонаправленных углепластиков с использованием лазерно-ультразвукового метода // Дефектоскопия. 2020. № 3. С. 14—22.]
22. Potapov A.I., Makhov V.E. Methods for Nondestructive Testing and Diagnostics of Durability of Articles Made of Polymer Composite Materials // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 3. P. 151—163.
23. Sokolovskaya Y.G., Podymova N.B., Karabutov A.A. Application Of Broadband Laser-Ultrasonic Spectroscopy For Nondestructive Testing Of The Porosity In Carbon Fiber Reinforced Plastics With Various Volume Contents Of Carbon Fibers // Inorganic Materials: Applied Research. 2021. V. 12. No. 5. P. 1428—1433.
24. Cheng W., Ba J., Fu L.-Y., Lebedev M. Wave-velocity dispersion and rock microstructure // J. Petroleum Sci. and Eng. 2019. V. 183. Art. Number 106466.
25. Nikolenko P.V., Shkuratnik V.I., Chepur M.D. The effect of limestone porosity on the velocity of p- and s-waves under mechanical and thermal loading National University of Science and Technology. Moscow: MISIS, 2020. V. 56. No 5. P. 695—705.
26. Шермергор Т.Д. Теория упругости микронеоднородных сред. М.: Наука, 1977. 399 с.
27. Adler L. Ultrasonic method to determinate gas porosity in aluminium alloy castings: theory and experiment // J. Appl. Phys. 1986. V. 59. No. 2. P. 336—347.
28. Романишин Р.И., Романишин И.М. Оценка рассеянной поврежденности конструкционных материалов // Дефектоскопия. 2019. № 2. С. 25—36.
29. Хлыбов А.А., Пичков С.Н., Углов А.Л. Исследование накопления рассеянных микроповреждений в образцах из стали 08X18H10T при малоциклового усталости // Контроль. Диагностика. 2011. № 4. С. 55—61.
30. Мишакин В.В., Данилова Н.В., Курашкин К.В., Ключников В.А., Гончар А.В. Диагностика материалов конструкций на ранних стадиях усталостного разрушения и оценка НДС материала конструкций методами неразрушающего контроля // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2011. № 3 (27). С. 299—307.
31. Хлыбов А.А., Углов А.Л. Экспериментальное исследование закономерностей накопления усталостных повреждений в стали 08X18H10T при малоциклового блочном нагружении с использованием акустического метода // Физическая мезомеханика. 2015. Т. 18. № 6. С. 111—115.
32. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль / Справочник. В 8 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2008. 864 с.
33. Углов А.Л., Андрианов В.М., Баталин О.Ю., Жуков А.Ю. Ультразвуковой датчик / Патент РФ № 2244918 G01N029/04. Опубл. 20.01.2005. Бюл. № 2.