

УДК 620.179.1

ОБ ОЦЕНКЕ ПОРИСТОСТИ МЕТАЛЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ, НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СТРУКТУРНОГО АКУСТИЧЕСКОГО ШУМА

© 2024 г. А. А. Хлыбов^{а,*}, А. Л. Углов^а

^аНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
ул. Минина 24, Нижний Новгород, 603155 Россия

*E-mail: hlybov_52@mail.ru

Поступила в редакцию 08.03.2024 г.

После доработки 05.07.2024 г.

Принята к публикации 05.09.2024 г.

Рассматривается возможность использования неразрушающего спектрально-акустического метода количественного контроля пористости образцов из стали Х12МФ, полученных методом горячего изостатического прессования. Приведены результаты исследований образцов, полученных на различных этапах горячего изостатического прессования в диапазоне остаточной пористости от 0% до 9%. Методика контроля строится на основе анализа параметров акустического структурного шума. Проанализированы различные методики измерения параметров структурных шумов с точки зрения чувствительности и погрешности измерений используемых информативных параметров структурного шума. Предложены уточненные расчетные алгоритмы определения параметров структурных шумов, приведены результаты их экспериментальной проверки. Полученные результаты могут послужить основой для разработки инженерной методики оценки степени пористости материала деталей и конструктивных элементов, полученных методом горячего изостатического прессования, в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: ультразвук, структурный шум, пористость, энергия шума, горячее изостатическое прессование

DOI: 10.31857/S0320791924050042, **EDN:** XCCWSN

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время к числу перспективных технологий получения материалов из порошков относится 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, газ (обычно инертный, например, аргон) [3].

При нарушении технологии возможно появление микропор в материале, которые приводят к значительному снижению механических характеристик металла, что делает весьма актуальной разработку методик контроля пористости получаемого материала. При создании таких методик безусловное предпочтение отдается неразрушающим методам контроля в силу их дешевизны, оперативности и возможности использования на готовых (нередко весьма дорогостоящих) изделиях.

Анализ имеющихся литературных данных показывает, что среди развитых к настоящему времени методов неразрушающего контроля для задач оценки пористости одним из информативных и удобных с инженерной точки зрения является акустический метод. В частности, эхо-импульсный вариант акустического метода применяется для контроля объемной пористости различных материалов: металлов и сплавов [4–14], композитов [15–23], и даже горных пород [24–26].

В качестве информативных параметров в задачах акустической структурометрии, кроме традиционно используемых скорости распространения и коэффициента затухания упругих волн, все большее внимание привлекают такие их характеристики, как параметры структурного шума (далее — СШ).

В традиционной дефектоскопии структурный шум является фактором, существенно затрудняющим контроль, в связи с чем исследователями

уделяется значительное внимание борьбе со структурными шумами и выделению на их фоне полезного сигнала.

Однако, следует констатировать, что в современных исследованиях структурный шум рассматривается не только как вредная помеха, но и как источник информация о структуре материала, по которой можно судить о ее состоянии [27–30]. Проблема состоит в разработке достоверных алгоритмов получения этой информации.

Достоверность упомянутых алгоритмов определяется, во-первых, корректностью используемых математических приемов обработки результатов акустических измерений с целью определения информативных характеристик структурного шума, а во-вторых, адекватностью этих характеристик контролируемым параметрам исследуемых материалов.

В работе [31] сформулирован подход к оценке структуры металла по значению интегрального уровня акустических структурных шумов, в качестве которого использовалась их усредненная амплитуда, а также экспериментально показано влияние величины зерна стали 45 на величину предложенной характеристики структурных шумов.

Связь структурного шума с пористостью показана в работе [32]. В работе [33] выявлена закономерность резкого снижения уровня структурных шумов при достижении металлом предела текучести, что подтверждает высокую чувствительность метода к изменениям структуры металла. Этот факт позволяет рекомендовать метод измерения акустических структурных шумов для обнаружения подготовительного этапа процесса, связанного с накоплением поврежденности в металле, а именно, стадию накопления микроповреждений, к которым относятся и микропоры.

В работах [34, 35] предложен метод ультразвуковой структуроскопии изделий из сложноструктурных материалов с помощью анализа статистических характеристик структурного шума. Контроль структуры на основе анализа статистических характеристик обратно рассеянного сигнала посвящены работы [36–44].

Сравнительный анализ экспериментальных данных, полученных различными исследователями, показал, что при определении параметров микроструктуры, микропор, микротрещин и других микроповреждений, к числу наиболее информативных характеристик следует отнести параметры энергетического спектра структурного шума. Это объясняется тем, что, несмотря на наиболее часто используемый аппарат вейвлет-анализа, для построения алгоритма количественной оценки параметров СШ представляется более удобным оконное Фурье-преобразование. Вейвлет-преобразование позволяет преодолеть известный принцип

неопределенности Гейзенберга и обеспечивает одновременно высокое частотное и высокое временное разрешение, что, безусловно, чрезвычайно удобно при необходимости подробного анализа сигнала. Однако, при построения интегральных количественных оценок СШ эта прецизионность может привести к неустойчивости расчетных алгоритмов и увеличению погрешностей, в связи с чем использование для этих целей параметров энергетического спектра, имеющего понятный физический смысл, представляется более предпочтительным, чем скалограммы.

Для решения задачи контроля структурных особенностей материала с помощью характеристик СШ требуется прямо противоположный по сравнению с традиционным подход: в качестве источника информации полезный сигнал (донный сигнал, сигнал от дефекта) и сигнал структурного шума меняются местами.

В этой связи параметры контроля в нашем случае должны быть следующими:

- использование небольшой нефокусирующей пьезопластинки с целью озвучивания максимального объема материала и получения структурного шума большей мощности;

- использование достаточно длительных импульсов, преследующее ту же цель — увеличение озвучиваемого объема;

- применение совмещенных преобразователей, что существенно увеличивает точность расчетных алгоритмов определения характеристик СШ, поскольку диаграммы направленности излучателя и приемника в этом случае совпадают.

Целью настоящей работы является разработка и экспериментальная проверка оригинальной методики неразрушающего определения пористости металлов в составе готовых изделий, изготовленных методом горячего изостатического прессования. В работе применен подход, основанный на анализе ультразвуковых сигналов, содержащих коррелированную составляющую в виде структурного шума.

Использованы современные приемы радиотехнической обработки сигналов, обеспечивающие повышенную чувствительность предлагаемых информативных параметров к степени пористости исследуемых металлов.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ

Классические методы оценки энергетических спектров дискретных сигналов обычно основаны на применении процедур, использующих быстрое преобразование Фурье (БПФ). Они эффективны в вычислительном отношении и обеспечивают получение асимптотически достоверных оценок для

весьма обширного класса сигналов, удовлетворяющих гипотезе стационарности и эргодичности. К сожалению, эти требования являются нетипичными для большинства практических приложений, что заставляет исследователей заниматься поиском новых методов.

Структурный шум является случайным процессом, нестационарным по дисперсии, связанной с важнейшей характеристикой СШ — энергетическим спектром. Это накладывает особенности на применение развитых к настоящему времени приемов обработки случайных процессов. В работе [45] предложено два варианта преодоления этих трудностей. Первый связан с так называемой процедурой «выстационаривания» СШ, заключающейся в том, что принятый сигнал, в том числе и СШ, умножают на коэффициент, зависящий от времени (т.е. некоторую компенсирующую функцию времени), чтобы скомпенсировать убывание дисперсии шума. Получающийся при этом процесс можно считать стационарным. Определение энергетического спектра для обработанного таким образом СШ не вызывает затруднений. На наш взгляд данная обработка принятого сигнала может привести к заметному увеличению погрешности определения энергетического спектра. Это связано со следующим. Характер убывания структурного шума определяется не только коэффициентами

$\frac{1}{r}$, связанным с расхождением пучка, и $e^{-\alpha r}$, определяемым затуханием в материале, но и особенностями используемых преобразователей, а также свойствами зондируемого материала. Это приводит к сложности подбора функции, умножение на которую приводит к постоянству дисперсии анализируемого сигнала и тем самым заведомо увеличивает погрешность искомых алгоритмов определения пористости материала на основе использования параметров энергетического спектра СШ. Кроме того, спектр произведения двух функций — компенсирующей и исходного сигнала — приводит к необходимости анализа свертки соответствующих спектров и появлению эффекта растекания спектра с появлением дополнительных шумов в виде

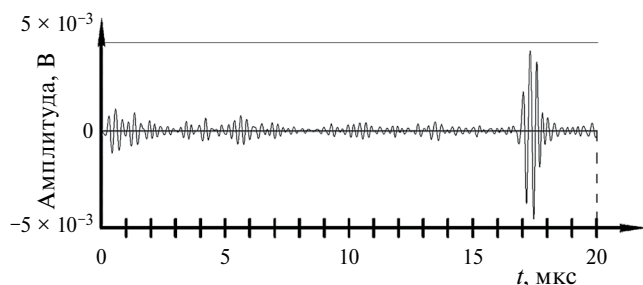


Рис. 1. Типичная осциллограмма для образца со степенью пористости 9 %.

боковых лепестков, которые могут существенно исказить истинный сигнал СШ.

Второй путь решения описанной проблемы состоит в использовании понятия мгновенного спектра. Для этого реализацию СШ умножают на весовую функцию и вычисляют энергетический спектр выделенного участка при допущении стационарности реализации на данном участке. Для типичных конструкционных материалов (в отличие от сложноструктурных) как методами математического моделирования, так и экспериментально показана допустимость предположения о локально стационарном характере шума на участках оконного Фурье-анализа [46]. В данном случае при умножении на весовую функцию (в отличие от выше описанной корректирующей) эффект растекания спектра и влияния на параметры СШ боковых лепестков может быть значительно уменьшен за счет оптимального выбора оконной функции. В настоящее время одной из оконных функций, обладающих наименьшим уровнем боковых лепестков, порядка –43 дБ, считается окно Хэмминга [47, 48], которое мы и будем в дальнейшем использовать:

$$w_n = \begin{cases} 0.53836 - 0.46164 \cos \frac{2\pi}{N} n, & n = 0, 1, \dots, N-1, \\ 0, & n \geq N. \end{cases} \quad (1)$$

Для получения необходимых количественных оценок энергетического спектра нами использовалось оконное преобразование сигнала $U(t)$ в виде [49]:

$$S_k = \sum_{n=0}^{N-1} u_n w_n e^{-j \frac{2\pi}{N} kn}, \quad (2)$$

где S_k — отсчеты спектральной плотности, N — количество эквидистантных отсчетов сигнала на интервале наблюдения сигнала, w_n — отсчеты оконной функции.

Вследствие формирования структурного шума за счет множественного рассеяния на случайных неоднородностях его энергетическому спектру, полученному в результате обработки одной реализации, свойственен сильно изрезанный характер.

Сказанное иллюстрируется рис. 1, на котором приведена типичная реализация донного сигнала (рис. 2) и обратно рассеянного структурного шума (рис. 3) для одного из исследуемых в данной работе образцов из стали Х12МФ, изготовленных методом ГИП, со степенью пористости 9 %.

На рис. 2а приведен энергетический спектр донного импульса, построенный с использованием прямоугольного окна (окна Дирихле):

$$w_n = \begin{cases} 1, & n = 0, 1, \dots, N-1, \\ 0, & n \geq N. \end{cases} \quad (3)$$

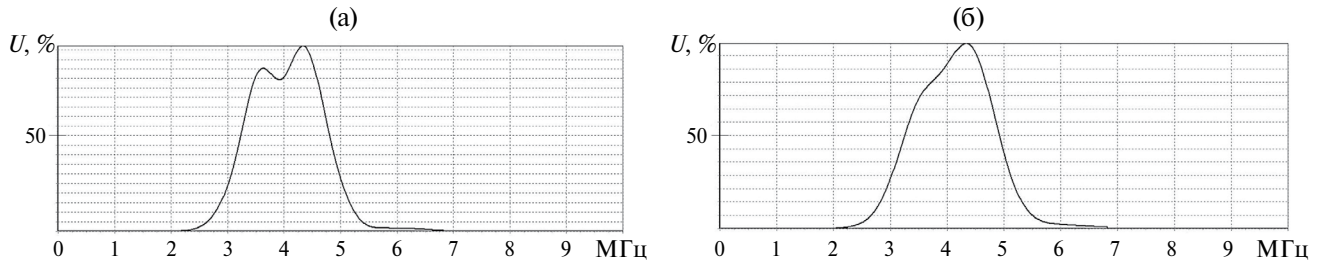


Рис. 2. Энергетические спектры донного импульса: (а) — прямоугольное окно, (б) — окно Хэмминга.

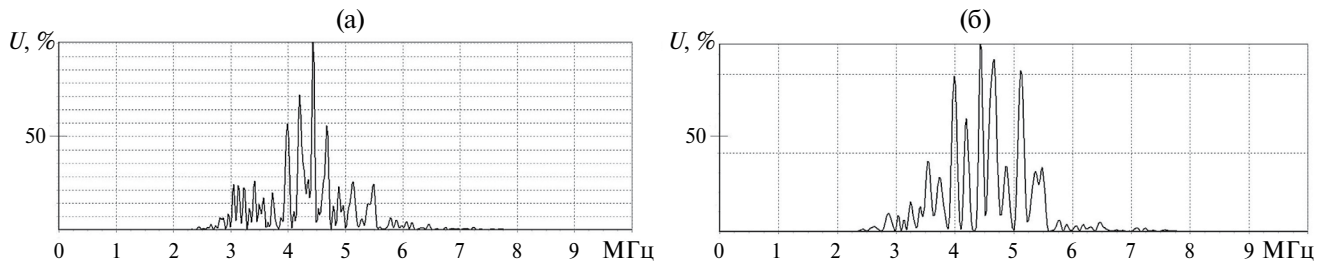


Рис. 3. Энергетический спектр структурного шума: (а) — прямоугольной окно, (б) — окно Хэмминга.

На рис. 2б приведен тот же спектр с использованием окна Хэмминга. На рис. 3 приведены энергетические спектры шума сигнала, представленного на рис. 1.

Из рис. 2, 3 видно, что окно Хэмминга, хотя и сглаживает энергетические спектры, но для спектра СШ этого сглаживания совершенно недостаточно: спектр остается сильно изрезанным, что, естественно, приведет к значительным случайным погрешностям при определении такой часто используемой характеристики СШ, как энергия.

Чтобы получить сглаженный характер энергетического спектра, нужно его вычислить для большого числа реализаций, а затем произвести статистическое усреднение энергетического спектра. Этот метод математически корректен, так как в этом случае энергетический спектр СШ вычисляется в соответствии с правилами теории случайных процессов, однако для его осуществления требуется достаточно много (не менее нескольких десятков) независимых реализаций СШ.

В данной работе нами использованы два приема статистического усреднения результатов измерений с целью сглаживания энергетических спектров.

Первый прием основан на расчете энергетического спектра СШ с помощью модифицированных периодограмм [48] методом Уэлча [49], который, как показано в [50], обеспечивает состоятельную оценку величины P_k .

При разбиении массива значений структурного шума общей длительностью $N_{ш}$ на N_{seg} сегментов

выражение для модифицированной периодограммы СШ примет вид:

$$P_k(i) = \frac{1}{U} \left| \sum_{n=0}^{N_n-1} u_n(i) w_n(i) e^{-j \frac{2\pi}{N_n} kn} \right|^2, \quad (4)$$

где N_n — длительность периодограммы, $i = 1, \dots, N_{seg}$, $\frac{1}{U}$ — весовой коэффициент, введенный Уэлчем:

$$U = \frac{\sum_{n=0}^{N_n-1} |w_n(i)|^2}{N_n}. \quad (5)$$

Общее число сегментов N_{seg} зависит от длительности шума $N_{ш}$, длительности периодограммы N_n и степени перекрытия сегментов t_s , %:

$$N_{seg} = \text{Int} \left[\frac{N_{ш} - N_n}{N_n \left(1 - \frac{t_s}{100} \right)} \right]. \quad (6)$$

Выражение для спектральной плотности мощности в соответствии с [50] имеет вид;

$$P_k = \frac{1}{N_{seg}} \sum_{i=1}^{N_{seg}} P_k(i). \quad (7)$$

Следует отметить следующее. Если длительность сегмента не менее удвоенной длительности донного импульса, автокорреляционная функция

сигнала на протяжении сегмента спадает до достаточно малых значений. Вследствие этого периодограммы отдельных сегментов являются независимыми, и дисперсия общей периодограммы СШ обратно пропорциональна числу сегментов.

Вид автокорреляционной функции показан на рис. 4а в том же масштабе, что и осциллограмма шума на рис. 4б. Длительность сегмента на рисунке приблизительно равна удвоенной длительности донного импульса, представленного на рис. 1. На рис. 5 приведены типичные периодограммы для нескольких сегментов. Рис. 5 показывает, что формы периодограмм для отдельных сегментов имеют неустойчивый характер, в связи с чем следует ожидать значительную нестабильность их дисперсий.

На рис. 6 приведен вид энергетического спектра СШ, при усреднении периодограмм по всем

сегментам, которых в нашем случае в соответствии с формулой (6) при отсутствии перекрытия ($t_s=0$) оказалось 6. На рис. 6б-6е приведены энергетические спектры с различной степенью перекрытия.

Из рис. 6 следует, что, начиная со степени перекрытия сегментов, равной 75%, огибающая энергетического спектра становится плавной, т.е. исчезают точки перегиба. Однако, при дальнейшем увеличении числа перекрывающихся сегментов, возникают искажения в виде локальных экстремумов, что должно сказаться на воспроизводимости вида спектра. Данный результат, по-видимому, объясняется тем, что при слишком большой степени перекрытия сегментов реализации СШ в пределах сегментов перестают быть некоррелированными, и используемый алгоритм обработки становится некорректным. Поэтому в дальнейшем нами использовалось значение $t_s=75\%$, что, как следует из формулы (6), соответствовало количеству усреднений, равному 27.

Нами был использован еще один дополнительный прием уменьшения дисперсии периодограммы, основанный на подходе, аналогичном применяемому при пространственно-временной обработке (ПОВР) сигналов с целью декорреляции реализаций СШ. При обычной ПОВР сигналов с использованием фазированных решеток или сканирования одиночным преобразователем усреднение проводится по достаточно большой пространственной области исследуемого объекта, что не всегда допустимо. В работе сделана попытка декорреляции СШ с использованием преобразователя

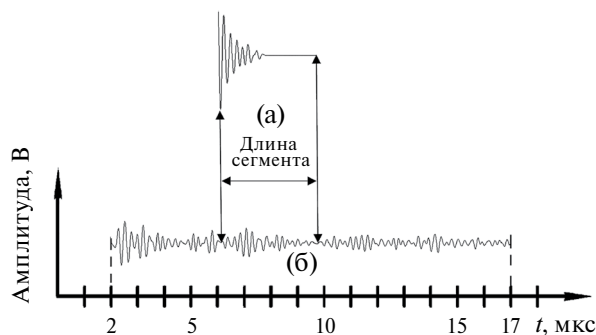


Рис. 4. (а) — Автокорреляционная функция, (б) — структурного шума.

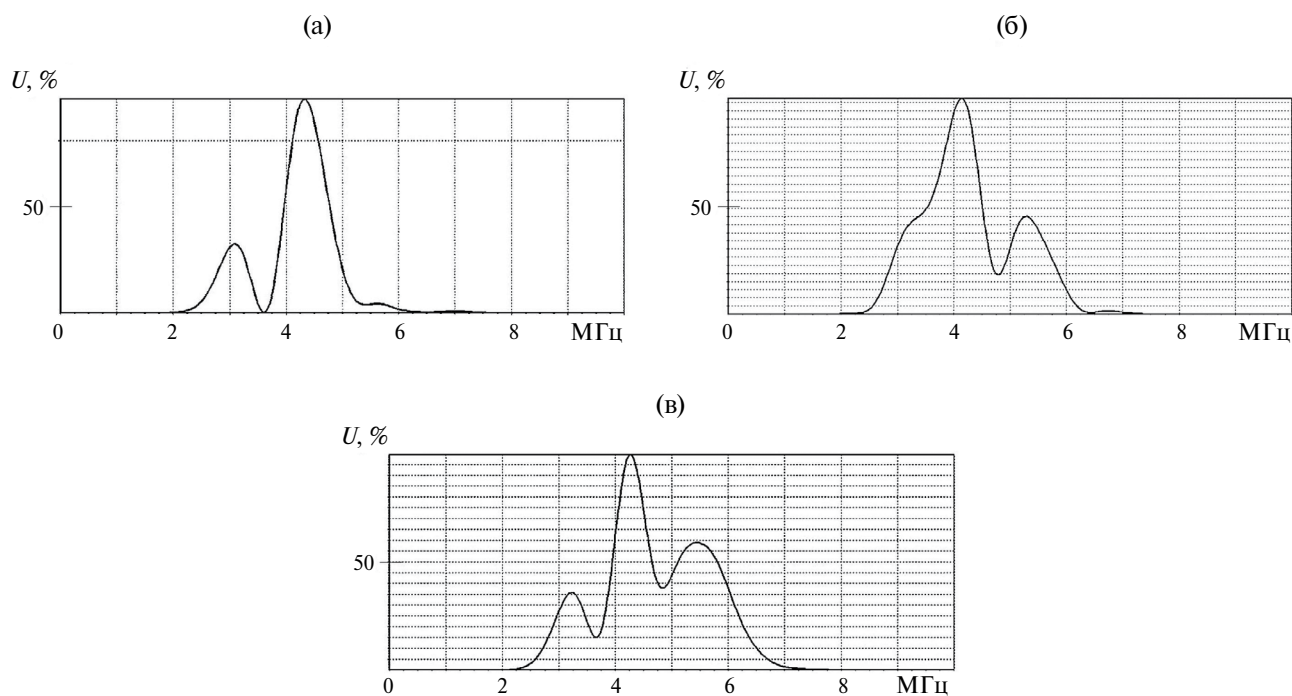


Рис. 5. Типичные периодограммы для сегментов длительностью N_n .

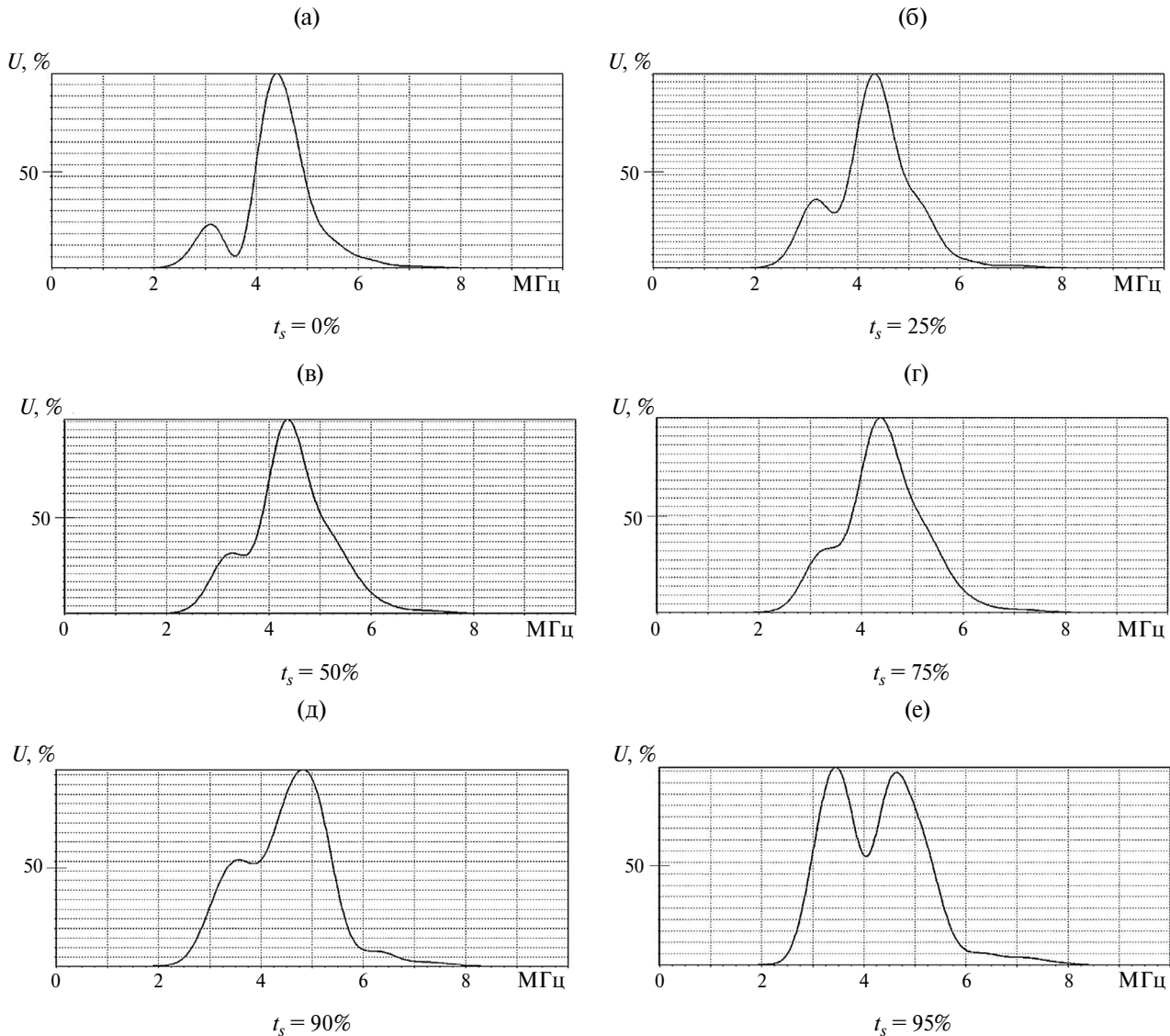


Рис. 6. Энергетические спектры СШ при различной степени перекрытия сегментов.

поперечных горизонтально поляризованных волн без его перемещения по поверхности объекта, но с вращением вокруг оси и измерением с некоторым угловым интервалом α° . В связи с особенностями рассеяния поперечных плоско-поляризованных волн на случайных порах реализации СШ с различным направлением поляризации будут некоррелированными (или слабо коррелированными), что обеспечивает дополнительный объем усреднения энергетического спектра. При совместном применении обоих способов усреднения число используемых периодограмм при повороте преобразователя на 180° вместо формулы (7) будет определяться следующим образом:

$$P_k = \frac{1}{N_\alpha} \sum_{j=1}^{N_\alpha} P_k(j) = \frac{1}{N_\alpha N_{\text{seg}}} \sum_{j=1}^{N_\alpha} \sum_{i=1}^{N_{\text{seg}}} P_k(i, j), \quad (8)$$

где $P_k(j)$ — энергетический спектр, рассчитанный для периодограмм $P_k(i, j)$ по формуле (7) для j -й угловой ориентации поляризации преобразователя, $N_\alpha = \frac{180}{\alpha^\circ} + 1$.

На рис. 7 приведены энергетические спектры СШ, полученные при одной установке преобразователя (рис. 7а) и при вращении преобразователя вокруг вертикальной оси с угловым интервалом $\alpha = 15^\circ$ и расчетом энергетического спектра по формуле (8) (рис. 7б). Рис. 7 показывает, что при дополнительном «угловом» усреднении энергетический спектр стал более симметричным. Однако более важным результатом является ожидаемое уменьшение его дисперсии в N_α . Экспериментальная проверка этого вывода приведена ниже.

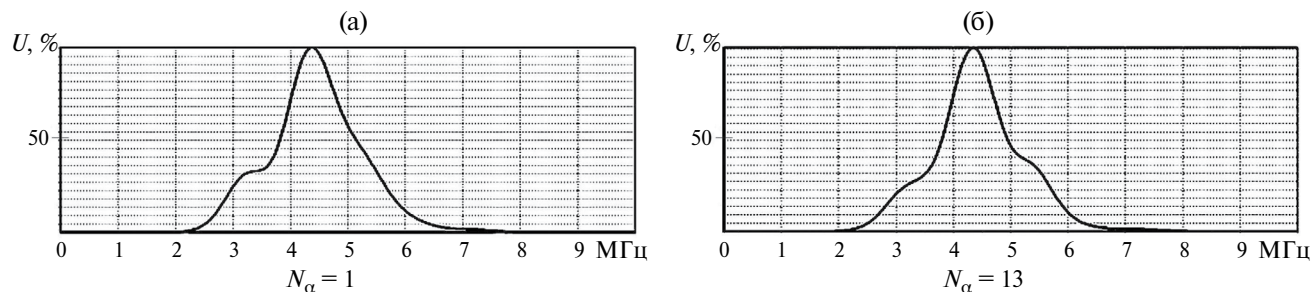


Рис. 7. Энергетические спектры СШ при (а) — одно- ($N_\alpha = 1$) и (б) — многократной ($N_\alpha = 13$) угловой установке преобразователя.

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

Как показывает анализ современных публикаций, в качестве информативной количественной характеристики структурного шума большинство авторов используют интегральные параметры энергетического спектра.

В данной работе в качестве такого параметра мы будем использовать величину относительной энергии:

$$W = \frac{E_{ш}}{E_{\Sigma}}, \quad (9)$$

где $E_{ш}$ — энергия шума, которая определяется по формуле:

$$E_{ш} = \sum_{k=0}^{N_n-1} P_k, \quad (10)$$

P_k рассчитывается по формуле (8), E_{Σ} — полная энергия шума и донного сигнала:

$$E_{\Sigma} = E_{ш} + E_c, \quad (11)$$

E_c — энергия донного сигнала, рассчитываемая по формуле, аналогичной формуле (10):

$$E_c = \sum_{k=0}^{N_c-1} P_k, \quad (12)$$

где N_c — длительность сигнала.

На наш взгляд, использовать в формуле (9) для нормировки величину суммарной энергии шума и донного сигнала корректнее, чем энергию донного сигнала, поскольку при значительном затухании ультразвука в материале контролируемого объекта вследствие его пористости или структурных особенностей донный сигнал не всегда присутствует, величину же E_{Σ} легко вычислить даже при отсутствии донного импульса, поскольку его

расположение на осциллограмме легко определить, зная скорость звука и толщину объекта.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе исследовались образцы в форме цилиндров высотой 25 мм и диаметром 15 мм, полученные методом ГИП из стали X12МФ.

Образцы изготавливали по методике, представленной в статье [51]:

- засыпка порошка в металлическую капсулу с последующим вибрационным уплотнением;
- дегазация в вакууме;
- нагрев в газостате с всесторонним сжатием.

Химический состав исследуемых сплавов показан в табл. 1.

В результате прессования при различных температурах и давлениях получали образцы с различной плотностью. 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 теоретической. Величина пористости P рассчитывалась по формуле:

$$P = 1 - \frac{\rho_{\text{тек}}}{\rho_{\text{теор}}}, \quad (13)$$

где $\rho_{\text{тек}}$ — текущая плотность, $\rho_{\text{теор}}$ — теоретическая плотность.

При температуре ГИП, равной 1150°C, и давлении 160 МПа плотность спеченного сплава совпадает с теоретической плотностью, соответственно, имеем наибольшую плотность. Поэтому плотность

Таблица 2. Значения относительной энергии шума.

Алгоритм оценки	Окно Дирихле	Окно Хэмминга	Метод Уэлча	Угловое усреднение
$\langle W \rangle \times 10^3$	185.2	123.1	81.3	79.6
$\Delta W \times 10^3$	92.6	52.2	9.7	5.1

при температуре 1150°C использовалась для расчета пористости образца. При 1150°C наблюдается зеренная структура материала с размером зерна, определяемым исходными размерами частиц. Пористость такого образца равна 0. Наименьшее значение пористости (для данных исследований) соответствовало температуре в газостате 700°C (давление 110 МПа).

Акустические измерения проводились с использованием измерительно-вычислительного комплекса «АСТРОН», обеспечивающего прецизионное измерение амплитудно-временных параметров акустических импульсов и программную обработку результатов в реальном масштабе времени.

Использовались прямые совмещенные пьезопреобразователи поперечных волн с активным элементом в виде механически задемпфированной пластинки из пьезокерамики ЦТС-19 в форме квадрата со стороной 4 мм с номинальной частотой 5 МГц.

Выше приведенные результаты дают основание ожидать наиболее устойчивых количественных оценок спектрально-энергетических характеристик СШ с использованием обработки по методу Уэлча и дополнительным «угловым» усреднением.

Для проверки этого предположения на образце, аналогичном описанному выше, проводились акустические измерения относительной энергии СШ W с нарушением акустического контакта. Измерения повторялись 10 раз с переустановкой преобразователя с нарушением акустического контакта и с последующим усреднением результатов. Оценка средних значений относительной энергии $\langle W \rangle$ проводилась с использованием алгоритмов, указанных в первой строке таблицы. В третьей строке табл. 2 записаны соответствующие абсолютные погрешности (доверительные интервалы при доверительной вероятности 95%).

Из табл. 2 следует, что интервалы оценок относительных значений энергии шума при расчете различными методами перекрываются, однако, как и ожидалось, наименьший разброс при переустановке преобразователя дает метод Уэлча, дополненный «угловым» усреднением.

Следует отметить, что при угловом усреднении ожидалось уменьшение абсолютной погрешности в $\sqrt{N_\alpha} = \sqrt{13} \approx 3.6$ раза, фактически же она уменьшилась приблизительно в два раза. Это

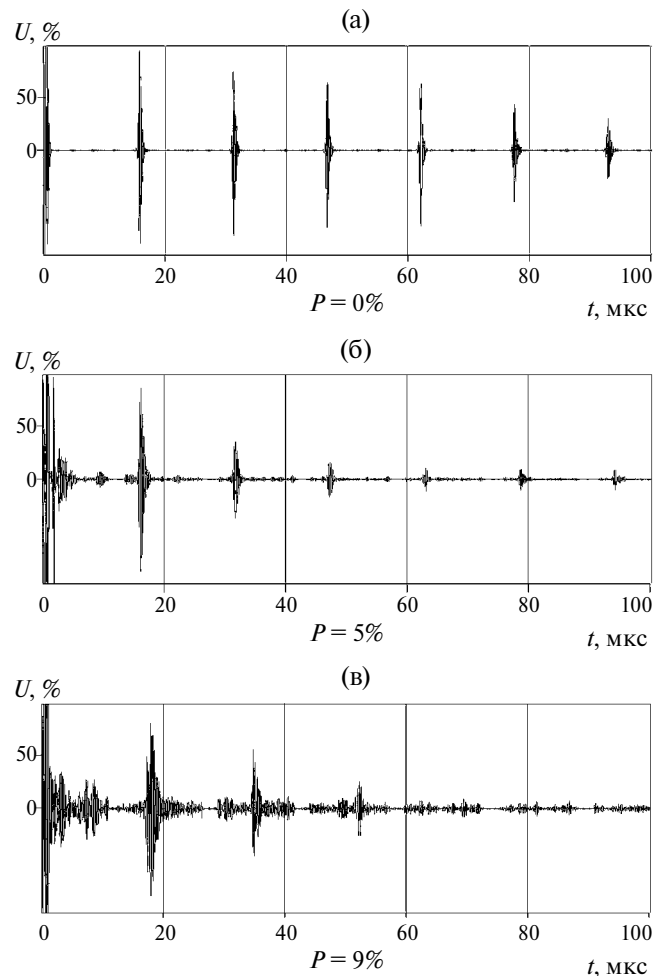


Рис. 8. Полные осциллограммы для образцов с различной степенью пористости.

объясняется, по-видимому, неполной декорреляцией шумового сигнала при повороте преобразователя. Тем не менее, полученное увеличение точности является вполне заметным.

Экспериментальная возможность использования величины относительной энергии СШ для неразрушающей оценки степени пористости проводилась на образцах со степенью пористости от 0 до 9%. На рис. 8 приведены полные осциллограммы сигналов для указанного диапазона пористости. Рис. 8 наглядно показывает существенное влияние пористости на величину структурного шума.

Таблица 3. Результаты контрольных измерений.

$P_{ист}, \%$	0	3	5	9
$W \times 10^3$	0.04	28.8	41.2	82.3
$P_{изм}, \%$	0	3.3	4.8	9.5
$\Delta P, \%$	—	0.3	-0.2	0.5

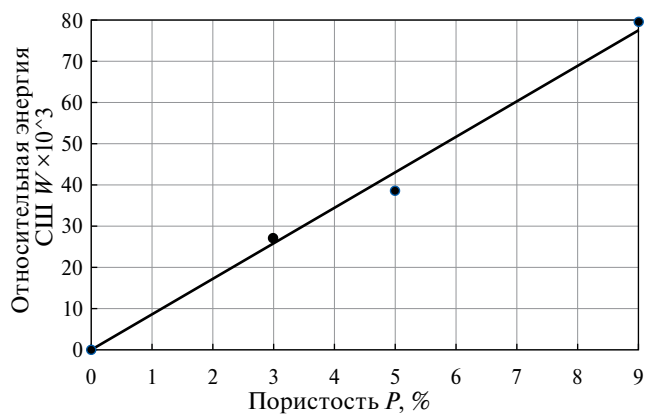


Рис. 9. Влияние степени пористости на относительную энергию структурного шума.

При увеличении пористости материала уровень шума, рассеиваемого от пор, увеличивается.

Расчет относительной энергии СШ проводился методом Уэлча с «угловым» усреднением, обеспечивающим, как показано выше, минимальную погрешность. Результат измерений в виде графика зависимости $W(P)$ приведен на рис. 9.

Полученная зависимость $W(P)$ с высокой степенью достоверности (более 0.99) аппроксимируется прямо пропорциональной зависимостью

$$W = kP, \tag{14}$$

где постоянный коэффициент $k \approx 8.62$. Таким образом, формула для определения степени пористости по результатам измерения параметра W имеет простой вид

$$P = \frac{1}{k} W. \tag{15}$$

Экспериментальная проверка работоспособности предложенной методики проводилась на образцах, аналогичных описанным выше, изготовленных из других частей массивных полуфабрикатов, имеющих степень пористости в исследованном диапазоне.

Результаты контрольных измерений значений W и расчета степени пористости приведены в табл. 3, в которой $P_{изм}$ — значение степени пористости, рассчитанное по формуле (15), ΔP — величина фактической абсолютной погрешности.

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности предложенной методики и возможности ее использования в практике неразрушающего экспресс-контроля степени пористости деталей из металлов, полученных методом горячего изостатического прессования.

ВЫВОДЫ

- 1. Сопоставлены методы расчета энергетических спектров СШ с использованием различных вариантов дискретного оконного преобразования Фурье с точки зрения устойчивости расчетных алгоритмов. Экспериментально показано, что для деталей, полученных из металлов, изготовленных с использованием технологии горячего изостатического прессования, оптимальным является метод Уэлча, обеспечивающий состоятельную оценку энергетических спектров СШ.
- 2. Для неразрушающей оценки степени пористости металла, изготовленного по технологии ГИП, предложено использовать информативный параметр, представляющий собой энергию структурного шума, нормированную на полную энергию реализации, включающей СШ и донный сигнал.
- 3. Для дополнительного сглаживания энергетических спектров с целью уменьшения погрешности определения относительной энергии СШ предложено использовать «угловое» усреднение за счет получения дополнительного числа декоррелированных (или слабо коррелированных) реализаций, полученных при вращении преобразователя поперечных горизонтальных волн вокруг вертикальной оси.
- 4. Экспериментально показана чувствительность используемых спектрально-энергетических характеристик СШ к пористости металлов, полученных методом горячего изостатического прессования, что при наличии соответствующих тарировочных зависимостей может послужить основой для построения инженерной методики количественного определения степени пористости готовых деталей в условиях их эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kaplanskii Y.Y., Korotitskiy A.V., Levashov E.A., Sentyurina Z.A., Loginov P.A., Logachev I.A., Samokhin A.V.*

- 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. Макалкин Д.И., Карабутов А.А., Саватеева Е.В. Прецизионное измерение групповой скорости ультразвука твердых сред в образцах миллиметровой толщины // *Акуст. журн.* 2023. Т. 69. № 6. С. 685–694.
<https://doi.org/10.31857/S0320791923600622>
 5. Алешин Н.П., Григорьев М., Щипаков Н.А., Неруш С.В. Исследование ультразвукового метода оценки пористости изделий аддитивного производства // *Цветные металлы*. 2019. № 5. С. 45–52.
<https://doi.org/10.17580/tsm.2019.05.05>
 6. Slotwinski J.A., Garboczi E.J., Hebenstreit K.M. Porosity Measurements and Analysis for Metal Additive Manufacturing Process Control // *J. of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 2014. V. 119. P. 494–528.
<https://doi.org/10.6028/jres.119.019>
 7. Wong B.S., Ong M.Y. Non-Destructive testing of metallic 3D printed specimens. Saarbrücken, Germany. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. 75 p.
 8. Ren F., Case E.D., Morrison A. et al. 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.
 9. Соколовская Ю.Г., Подымова Н.Б., Карабутов А.А. Лазерный оптико-акустический метод для обнаружения нарушений периодичности структуры углепластиков // *Акуст. журн.* 2022. Т. 68. № 4. С. 454–461.
 10. Хлыбов А.А., Углов А.Л., Демченко А.А. О спектрально-акустическом способе оценки пористости металлов, полученных методом горячего изостатического прессования // *Дефектоскопия*. 2022. № 12. С. 3–6.
 11. 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.
 12. Thompson D.O., Wormley S.J., Rose J.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.
 13. Khlybov A.A., Uglov A.L., Bakiev T.A., Ryabov D.A. Assessment of the degree of damage in structural materials using the parameters of structural acoustic noise // *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2022.
<https://doi.org/10.1080/10589759.2022.2126470>
 14. Хлыбов А.А., Углов А.Л. Об использовании параметров структурного шума при контроле поверхностными акустическими волнами Рэлея стали 20ГЛ в процессе упругопластического деформирования // *Дефектоскопия*. 2021. № 7. С. 3–10.
 15. Мурашов В.В. Определение пористости углепластиков в авиаконструкциях лазерно-акустическим способом ультразвукового контроля // *Авиационная промышленность*. 2011. № 3. С. 33–36.
 16. Мурашов В.В., Мишуров К.С. Определение пористости углепластиков в авиационных конструкциях ультразвуковым методом // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 2 (35). С. 88–92.
 17. 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.
 18. 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.
<https://doi.org/10.1134/S01303082190100019>
 19. Муякшин С.И., Диденкулов И.Н., Вьюгин П.Н., Чернов В.В., Денисов Д.М. Исследование метода обнаружения и локализации неоднородностей в пластинах с использованием волн Лэмба // *Акуст. журн.* 2021. Т. 67. № 3. С. 270–274.
<https://doi.org/10.31857/S0320791921030114>
 20. 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.
<https://doi.org/10.31857/S0320791920030065>
 21. Potapov A.I., Makhov V.E. Methods for Nondestructive Testing and Diagnostics of Durability of Articles Made of Polymer Composite Materials // *Russian J. Nondestructive Testing*. 2018. V. 54. N. 3. P. 151–163.
 22. 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.
 23. Подымова Н.Б., Карабутов А.А. Влияние пористости на статистическое распределение амплитуд обратно рассеянных ультразвуковых импульсов в металломатричных композитах, изготовленных методом реакционного литья // *Акуст. журн.* 2021. Т. 67. № 1. С. 55–64.

24. *Cheng W., Ba J., Fu L.-Y., Lebedev M.* Wave-velocity dispersion and rock microstructure // *J. Petroleum Sci. and Eng.* 2019. 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 – MISIS, Moscow. 2020. V. 56. No 5. P. 695–705.
26. *Подымова Н.Б., Карабутов А.А.* Влияние трещиноватости полевых шпатов на спектральную мощность обратно рассеянных широкополосных импульсов продольных ультразвуковых волн // *Акуст. журн.* 2022. Т. 68. № 6. С. 679–688.
27. *Качанов В.К., Карташёв В.Г.* Структурный шум в ультразвуковой дефектоскопии. М.: Изд. дом МЭИ, 2016. 186 с.
28. *Муравьев В.В. и др.* Методика определения акустических структурных шумов металла // *Интеллектуальные системы в производстве.* 2013. № 1. С. 143–148.
29. *Артамонов В.В., Артамонов В.П.* Неразрушающий контроль микроструктуры металла теплоэнергетического оборудования // *Дефектоскопия.* 2002. № 2. С. 34–43.
30. *Неразрушающий контроль. Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. Ключева В.В. Т. 3: Ультразвуковой контроль // Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. М.: Машиностроение. 2008. 864 с.*
31. *Муравьев В.В. и др.* Определение размера зерна металла по акустическим структурным шумам // *Известия ВУЗов. Черная металлургия.* 2014. Т. 57. № 11. С. 65–69.
32. *Пермикин В.С., Перов Д.В., Ринкевич А.Б.* Акустические шумы в стали 12Х1МФ, содержащей микроразрывы // *Дефектоскопия.* 2004. № 2. С. 14–28.
33. *Муравьев В.В. и др.* Влияние одноосного растяжения образцов стали 09Г2С после различной термической обработки на акустические структурные шумы // *Известия ВУЗов. Черная металлургия.* 2016. Т. 59. № 2. С. 118–122.
34. *Карташев В.Г.* Ультразвуковая структуроскопия изделий из сложноструктурных материалов на основе анализа статистических характеристик структурного шума // *Дефектоскопия.* 2015. № 6. С. 41–56.
35. *Карташев В.Г. и др.* Структурный шум при ультразвуковом контроле изделий из материалов со сложной структурой // *Дефектоскопия.* 2018. № 1. С. 19–32.
36. *Романишин Р.И., Романишин И.М.* Обработка обратно рассеянного сигнала в ультразвуковом контроле // *Дефектоскопия.* 2018. № 6. С. 11–16.
37. *Романишин Р.И. и др.* Ультразвуковой метод оцінювання розсіяної пошкодженості матеріалу на ос-
нові зворотнього розсіяного сигналу // *ТДНК.* 2017. № 2. С. 42–49.
38. *Муравьев В.В., Байтеряков А.В.* Влияние эксплуатационной грузонапряженности рельсов на акустические структурные шумы // *Дефектоскопия.* 2016. № 11. С. 50–58.
39. *Муравьев В.В. и др.* Способ определения среднего диаметра зерна металлических изделий и устройство для его осуществления. Патент на изобретение RU2589 751, С2. Опубл. 10.07.2016, Бюл. № 19.
40. *Кошевой В.В. и др.* Оценка деградации материала на основе ультразвуковой томографии при регистрации рассеянного сигнала // *Дефектоскопия.* 2010. № 9. С. 33–49.
41. *Da Costa Teixeira J., Appolaire B., Aeby-Gautier E., Denis S., Bruneseaux F.* Modeling of the effect of the β phase deformation on the α phase precipitation in near β -titanium alloys // *Acta Mater.* 2006. V. 54. P. 4261–4271.
42. *Dorval V., Jenson F., Corneloup G.* Accounting for structural noise and attenuation in the modeling of the ultrasonic testing of polycrystalline materials // *Review of Progress in QNDE.* 2010. V. 29. P. 1309–1316.
43. *Han Y.K., Thompson R.B.* Ultrasonic backscattering in duplex microstructures: Theory and application to titanium alloys // *Metall. Mater. Trans.* 1997. A28. P. 91–104.
44. *Panetta P.D., Margetan F.J., Yalda I.* Ultrasonic attenuation measurements in jet-engine titanium alloys // *Review of Progress in QNDE.* 1996. V. 15B. P. 1525–1532.
45. *Карташев В.Г., Качанов В.К., Соколов И.В.* Радиотехнические методы в ультразвуковой дефектоскопии // *Вестник МЭИ.* № 1. 2014. С. 64–72.
46. *Овчарук В.Н.* Спектральный анализ сигналов акустической эмиссии // *Электронное научное издание «Ученые заметки ТОГУ».* 2013. Т. 4. № 4. С. 974–986.
47. *Сергиенко Б.А.* Цифровая обработка сигналов. СПб: Питер, 2006. 751 с.
48. *Хэмминг Р.В.* Цифровые фильтры. М.: Недра, 1987. 221 с.
49. *Hayes M.H.* Statistical digital signal processing and modeling. John Wiley & Sons, 2009. 624 p.
50. *Welch P.* The use of the fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms // *IEEE Trans. Audio Electroacoust.* 1967. V. 15. P. 70–73.
51. *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.

On The Assessment Of Porosity Of Metals Obtained By Hot Isostatic Pressing Based On The Analysis Of Structural Acoustic Noise

A. A. Khlybov^{a,*}, A. L. Uglov^a

^a R. E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, 24 Minina St., Nizhny Novgorod, 603155 Russia

* e-mail: hlybov_52@mail.ru

The article considers the possibility of using a non-destructive spectral-acoustic method for quantitative control of the porosity of Kh12MF steel samples obtained by hot isostatic pressing. The results of studies of samples obtained at different stages of hot isostatic pressing in the range of residual porosity from 0% to 9% are presented. The control technique is based on the analysis of acoustic structural noise parameters. Various methods of measuring parameters of structural noise are analyzed from the point of view of sensitivity and measurement error of the used informative parameters of structural noise. Clarified calculation algorithms for determining the parameters of structural noise are proposed, and the results of their experimental verification are presented. The obtained results can serve as a basis for developing an engineering method for assessing the degree of porosity of the material of parts and structural elements obtained by hot isostatic pressing, under operating conditions.

Keywords: ultrasound, structural noise, porosity, noise energy, hot isostatic pressing