

Исследование структуры и свойств Structure and properties research

**Физические методы
исследования и контроля**

**Physical methods
of research and monitoring**

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-1-28-34>

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ, НАНОСИМЫХ ГАЗОПЛАМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ, МЕТОДОМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДИАГНОСТИКИ

© Евгений Кимович Березин¹, Андрей Борисович Корнев¹,
Владимир Митрофанович Родюшкин^{1,2*}

¹ Волжская государственная академия водного транспорта, Россия, 603005, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, д. 5.

² Институт проблем машиностроения РАН, Россия, 603024, г. Нижний Новгород, ул. Белинского, д. 85;

*e-mail: vlkn2005@yandex.ru

*Статья поступила 23 мая 2022 г. Поступила после доработки 25 мая 2022 г.
Принята к публикации 18 июля 2022 г.*

Контроль качества покрытий при выборе порошкового материала для восстановления изнашиваемых поверхностей методом газопламенного напыления затруднен вследствие отсутствия оперативного неразрушающего метода диагностики. В работе представлены результаты исследования покрытий, наносимых газопламенным напылением, с помощью ультразвуковой диагностики. Исследовали покрытия из порошковых материалов, полученные по различным технологиям газопламенного напыления. Особенности структурного состояния покрытий оценивали с использованием модели влияния структурных неоднородностей покрытия на скорость и затухание ультразвуковых волн. Показано, что амплитудно-временные характеристики импульса поверхностных упругих волн при прохождении их вдоль покрытия согласуются с данными, полученными в результате испытаний по трению и твердости. При этом характеристики импульса зависят от качества материала покрытия. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования методов контроля качества покрытий, сформированных газопламенным напылением.

Ключевые слова: поверхностная упругая волна; импульс упругой волны; слой; дефектоскоп; газотермическое напыление.

ULTRASONIC DIAGNOSTICS IN THE STUDY OF COATINGS APPLIED BY GAS-FLAME SPRAYING

© Evgeniy K. Berezin¹, Andrey B. Kornev¹, Vladimir M. Rodyushkin^{1,2*}

¹ Volga State University of Water Transport, 5, ul. Nesterova, Nizhny Novgorod, 603005, Russia.

² Mechanical Engineering Research Institute, RAS, 85, ul. Belinskogo, Nizhny Novgorod, 603024, Russia;

*e-mail: vlkn2005@yandex.ru

Received May 23, 2022. Revised May 25, 2022. Accepted July 18, 2022.

The quality control of coatings when selecting a powder material for the restoration of worn surfaces by gas-flame spraying is hampered by the lack of an operational method of non-destructive diagnostics. We present the results of studying coatings applied by gas-flame spraying using ultrasonic diagnostics. The powder coatings obtained using different technologies of gas-flame spraying were studied. Features of the structural state of coatings were evaluated using a model based on the effect of the structural inhomogeneities of the coating on the velocity and attenuation of ultrasonic waves. It is shown that the amplitude-time characteristics of the pulse of surface elastic waves when they pass along the coating are consistent with the data obtained from friction and hardness tests, the characteristics of the pulse being dependent on the quality of the coating material. The obtained results can be used to improve the quality control of coatings formed by gas-flame spraying.

Keywords: surface elastic wave; elastic wave pulse; layer; flaw detector; gas thermal spraying.

Введение

Методы ультразвуковой диагностики широко применяют в промышленности. Чаще всего используют методы, основанные на объемных волнах. Методы, связанные с использованием нормальных и поверхностных волн, активно развиваются и перспективны для скрининга защитных покрытий [1 – 8].

Поверхностные волны могут эффективно применяться при дефектоскопии поверхности изделий сложного профиля, исследовании физического состояния поверхностного слоя твердых материалов и др. При практическом использовании такого рода ультразвуковой диагностики необходимо знать скорость распространения и поглощения поверхностных волн в различных материалах [9 – 11].

Скорость и затухание поверхностных волн в значительной степени зависят от состояния материала, его структурных особенностей, обработки поверхности, наличия остаточных напряжений (наклепа), оксидных пленок и др. Для учета влияния структуры материала на распространение в нем упругой волны применяют безразмерный макроскопический параметр ψ , характеризующий на макроуровне степень поврежденности материала [12, 13].

В длинноволновом приближении связь частотно-зависимого коэффициента затухания $\alpha(\omega)$ с параметром структурной поврежденности материала ψ может быть представлена следующим образом [13]: $\alpha(\omega) = (k_1 + k_2\psi)\omega^4$. Соответственно, скорость распространения: $V = V^*(1 - k_3\psi - k_4\psi\omega^2)$, где ω , V^* — частота и начальная скорость упругих волн; k_1 , k_2 , k_3 , k_4 — параметры, зависящие от плотности материала, модуля упругости, коэффициентов разложения текстурной функции (при необходимости они могут определяться экспериментально на образцах из контролируемого материала) [12].

Из приведенных соотношений следует, что появление структурной поврежденности материала вносит поправки в скорость и затухание волны относительно исходной, а также приводит к некой зависимости от частоты. Очевидно, соотношения грубо отражают связь поврежденности и скорости упругих волн, недостаточно полно описывают реальную ситуацию. Но они демон-

стрируют возможность оценки особенностей структурного состояния покрытий, наносимых газопламенным напылением, используя данные по скорости и затуханию ультразвука.

Методом газопламенного напыления можно наносить на поверхность покрытие для получения дополнительных качеств. Используемые как распыляемый материал металлические или полимерные порошки нагревают до пластичного состояния в пламени, формируемом при сгорании смеси кислорода с пропаном или ацетиленом. Перенос покрытия на поверхность металла осуществляют с помощью сжатого воздуха. Отметим, что в отличие от проволоки порошки позволяют менять состав покрытия. Это способствует повышению качества напыляемого слоя [14 – 16].

Цель работы — исследование покрытий путем определения скорости и затухания поверхностных волн импульсным методом.

Материалы, методика, оборудование

Исследовали образцы, изготовленные по различным технологиям газопламенного напыления:

I – III — материал ПР-Бр.АЖНМц 8,5-4-5-1,5 (Россия) (химический состав, %: Cu — основа, Al — 8,5, Fe — 4, Ni — 4,8, Mn — 1,4). Оптимальное покрытие предполагает использование сопла SSN10 (расход газов на входе: C_2N_2 — 0,95, O_2 — 1,0 м³/ч; расход порошкового материала — 1,394, 1,998, 1,006 кг/ч соответственно);

IV — материал Проксон 21031 (Швейцария) (химический состав, %: Ni — основа, Al — 9,1, Cr — 9,3, Fe — 6,3, Mo — 5,2). Оптимальное покрытие предполагает использование сопла SSN10 (расход газов на входе: C_2N_2 — 0,95, O_2 — 1,0 м³/ч; расход порошкового материала — 1,36 кг/ч);

V — материал RotoTec 19985 (Швейцария) (химический состав, %: Ni — основа, Cr — 20,5). Оптимальное покрытие предполагает использование сопла SSN10 (расход газов на входе: C_2N_2 — 0,95, O_2 — 1,0 м³/ч; расход порошкового материала — 1,25 кг/ч);

VI — материал ПХ20Н80 (Россия) (химический состав, %: Ni — основа, Cr — 20). Оптимальное покрытие предполагает использование сопла



Рис. 1. Покрытия на стали 40, сформированные газопламенным напылением

Fig. 1. Coatings on steel 40 formed by flame spraying

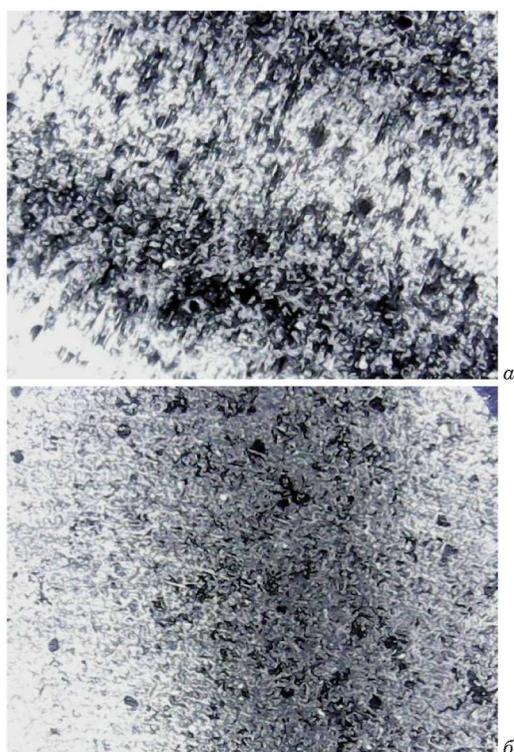


Рис. 2. Поверхность покрытия образца I до (а) и после снятия деформированного слоя (б)

Fig. 2. Surface of the coating of sample I before (a) and after removal of the deformed layer (b)

SSN10 (расход газов на входе: C_2N_2 — 0,95, O_2 — 1,0 м³/ч; расход порошкового материала — 1,26 кг/ч).

В качестве основы, на которой формировались покрытия, использовали сталь 40 (ГОСТ 1050–88) — штатный материал гребных валов. Заметим, что восстановление гребных валов — важнейшая задача безопасной эксплуатации и продления ресурса водного транспорта.

Для формирования покрытий (толщина около 1 мм) методом газопламенного напыления (рис. 1) использовали аппарат Castodin 8000. Обработку поверхности проводили на токарном станке 16K20 твердосплавной пластиной SNMG 12 04 08-23-1105 (Sandvik coromant) с последующей доводкой наждачной бумагой 12А и полировкой абразивной пастой.

На рис. 2. представлено увеличенное изображение поверхности образца I до и после снятия деформированного слоя.

Видно, что поверхность состоит из сглаженных резцом структурных фрагментов («смазанное изображение»). Кроме того, после снятия деформированного слоя в покрытии прослеживаются структурные неоднородности в виде разноразмерных частиц и незаполненных пространств между ними. Это видно по структуре



Рис. 3. Поверхность покрытий образца VI после снятия деформированного слоя

Fig. 3. Surface of the coating of sample VI after removal of the deformed layer

образца VI (рис. 3). Здесь структурные неоднородности, размеры которых составляют 0,2 – 0,3 мм, существенно сильнее выражены.

Учитывая модель распространения волн в микронеоднородных средах [13], можно полагать, что выявленные структурные неоднородности влияют на условия распространения поверхностных ультразвуковых упругих волн. При этом отсутствует необходимость в снятии деформированного при обточке верхнего слоя, поскольку толщина его мала (менее 0,1 мм). Это означает, что взаимодействие волны, в силу глубины ее проникновения в материал, которая много больше толщины деформированного слоя, будет происходить на всей толщине покрытия. Таким образом, степень неоднородности покрытия может быть доступна для контроля методом зондирования упругими волнами напыляемого слоя.

Оперативность неразрушающего контроля качества материала покрытия [17] обеспечивали с помощью использования поверхностных ультразвуковых упругих волн, для чего применяли промышленный дефектоскоп А1214 «Эксперт». Ввод ультразвука осуществляли со стороны покрытия. Волна распространялась вдоль поверхности. В качестве излучающего и приемного пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) использовали стандартные ПЭП П121-2,0-90S. Это позволяло избирательно (на одной частоте) возбуждать поверхностную волну методом «клина» [1, 5]. Соединенные в единый блок ПЭП устанавливали на покрытие.

Развертку дефектоскопа и строб настраивали так, чтобы наблюдать на экране прошедший покрытие импульс. Зафиксированное дефектоскопом в стробе время прихода импульса (временная задержка импульса при распространении его от излучателя до приемника) свидетельствовало о скорости распространения упругой волны, значе-

ние амплитуды — об ослаблении волны (на протяжении всего пути следования импульса происходили расхождения, затухания и рассеяния структурными фрагментами).

Поскольку испытания проходили на всех образцах в идентичных условиях (конструкция и параметры ПЭП, путь следования импульса), различия в ослаблении упругой волны на разных покрытиях отражали в основном состояние среды [13]. На рис. 4 приведен снимок с экрана дефектоскопа, демонстрирующий импульс поверхностных волн, прошедших по покрытию образца I.

Количественный показатель ослабления, вызванного распространением упругой волны в материале, [1, 17]

$$\Delta = 8,68\delta L,$$

где δ — коэффициент затухания; L — расстояние пройденное волной.

Погрешность измерений, обусловленную нестабильностью установки преобразователей на объект, учитывали путем проведения на одном покрытии пяти независимых (при каждой установке ПЭП на поверхность покрытия) наблюдений. По данным наблюдений вычисляли средние значения Δ и временного интервала Δt прохождения волной фиксированного расстояния.

Обсуждение результатов

В табл. 1 для каждого покрытия приведены результаты измерения Δ и временного интервала Δt .

Видно, что и время, и амплитуды для разных покрытий имеют различные значения. Это свидетельствует о различии в скорости упругой волны в разных покрытиях и их разных структурных свойствах. Кроме того, амплитудные и временные характеристики меняются от образца к образцу качественно одинаково. Обе характеристики линейно зависят от структурных неоднородностей [13], поэтому комплексный акустический количественный показатель $\Delta \cdot \Delta t$ будет иметь квадратичную связь с параметром структурной поврежденности ψ . Следовательно, чувствительность показателя $\Delta \cdot \Delta t$ возрастет, что весьма важно для уверенного контроля качества материала покрытия.

Комплексный акустический показатель $\Delta \cdot \Delta t$ для разных образцов существенно различны (см. табл. 1). Так, для образцов V и VI он (относительное ухудшение (изменение) комплексного акустического показателя), например, ниже максимального более чем на 20 %, что говорит о неудовлетворительном материале покрытия. Визуальный контроль шлифованных зон данных

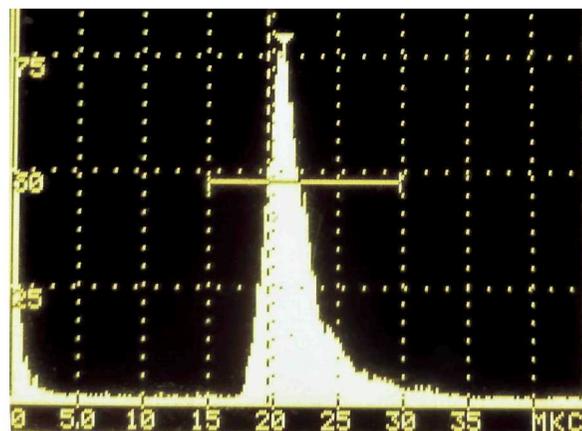


Рис. 4. Оциллограммы ультразвукового импульса

Fig. 4. Oscillograms of an ultrasonic pulse

покрытий подтверждает наличие рассеянных неоднородностей.

Относительные изменения акустического параметра можно использовать в качестве критерия качества (и, соответственно, выбора) материала покрытия. Изменение $\Delta \cdot \Delta t$ на 20 % и выше будет свидетельствовать о неудовлетворительном состоянии материала.

Отметим, что предлагаемая ультразвуковая диагностика чувствительна к составу порошкового материала.

Для объективной оценки и сравнения эксплуатационной пригодности покрытий проводили испытания по определению их коэффициента трения и твердости.

Твердость измеряли с помощью электронного твердомера ТЭМП-3. На каждом покрытии проводили по десять измерений. Определяли среднее значение твердости по Бринеллю и погрешность при доверительной вероятности 0,95. Результаты приведены в табл. 2.

Испытания по определению коэффициента трения проводили на машине трения 2070 СМТ-1 по схеме нагружения «диск – колодка» (рис. 5).

Таблица 1. Результаты измерения Δ и Δt

Table 1. Results of Δ and Δt measurements

Покрытие	Δt , мкс	Δ , дБ	$\frac{\Delta \cdot \Delta t}{(\Delta \cdot \Delta t)_{\max}} \cdot 100, \%$
I	13,1	68,8	82,5
II	12,9	74,2	87,6
III	13,4	81,6	100,0
IV	12,4	72,8	82,6
V	12,6	66,2	76,3
VI	12,0	53,6	58,8

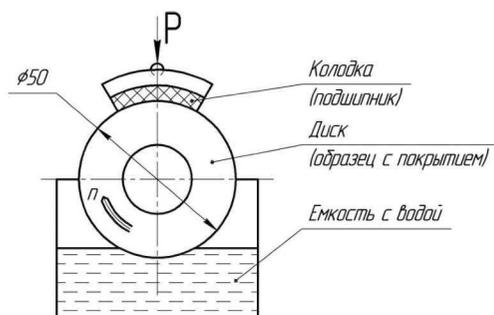


Рис. 5. Схема испытаний на машине трения

Fig. 5. Scheme of testing on a friction machine

Для смазки пары трения использовали воду. Площадь контакта колодки с диском составляла 200 мм². Все пары трения предварительно подвергались приработке при частоте вращения диска $n = 300$ об/мин (окружная скорость — 0,8 м/с) и нагрузке $P = 200$ Н (~1 МПа). Продолжительность приработки составляла не менее 1 ч. При необходимости приработку продолжали до полной стабилизации момента трения.

Коэффициент трения трущейся пары определяли при скоростях скольжения 0,26 и 1,31 м/с и дискретно меняющейся удельной нагрузке от 0,5 до 5,5 МПа (шаг — 0,5 МПа). Нагрузку повышали плавно в течение 1 мин, не допуская резкого увеличения момента трения. На каждой ступени нагружения образцы испытывали не менее 2 мин. В случае изменения момента трения продолжительность испытаний увеличивали еще на 2 мин. По достижении 5,5 МПа нагрузку сбрасывали до 0, и фиксировали «нуль» момента трения на диаграммной бумаге. Затем испытания повторяли не менее трех раз. Коэффициент трения рассчитывали по формуле

$$f = \frac{2M_{\text{тр}}}{DP},$$

где $M_{\text{тр}}$ — момент трения на вращающемся валу; P — нагрузка; D — диаметр диска.

Момент трения фиксировали с помощью индукционного датчика и регистрировали элек-

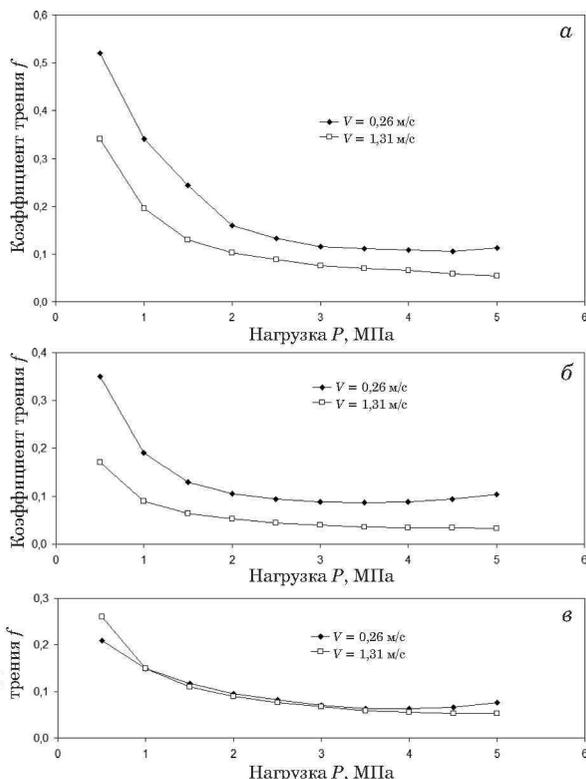


Рис. 6. Зависимости коэффициента трения f от нагрузки P : а — образец без покрытия; б, в — покрытия I и IV

Fig. 6. Dependence of the friction coefficient f on the load P : а — uncoated sample; б, с — coatings I and IV

тронным потенциометром КСП-4. После завершения испытаний образцы протирали, высушивали и взвешивали на аналитических весах (точность — до 0,01 г).

Результаты испытаний по определению коэффициента трения приведены на рис. 6.

Видно, что при нагрузках до 1 МПа исследуемые покрытия имеют примерно одинаковый коэффициент трения. С увеличением нагрузки коэффициент трения сначала снижается, а затем наблюдается его незначительный рост (при повышении скорости вращения падение коэффициента продолжается). В отличие от других образцов покрытие IV (материал «Проксон 21031») показывает практически одинаковые результаты независимо от скорости скольжения.

Заклучение

Проведенные исследования показали, что амплитудно-временные характеристики импульса поверхностных упругих волн при прохождении их вдоль покрытия не противоречат полученным данным испытаний по трению и твердости. Комплексный акустический показатель, измеряемый стандартным дефектоскопом, свидетельствует о хороших эксплуатационных показа-

Таблица 2. Результаты измерений твердости

Table 2. Results of hardness measurements

Покрывтие	НВ, кгс/мм ²	±ΔНВ, кгс/мм ²
I	218	3
II	206	2
III	165	1
IV	229	1
V	172	2
VI	338	3

телях покрытий I, II, IV. Покрытия V и VI в силу неоднородной микроструктуры и покрытия III и V в силу малой твердости оказались не пригодны. Испытания по определению коэффициента трения выявили, что материалы «Проксон 21031» и ПР-Бр.АЖНМц 8,5-4-5-1,5 (образцы IV и I, II соответственно) соответствуют требованиям, предъявляемым к рабочему покрытию, в частности для шеек гребных валов, работающих в паре с резинометаллическими дейдвудными подшипниками. При этом триботехнические характеристики у материала «Проксон 21031» наилучшие.

Таким образом, качество материалов можно контролировать с помощью поверхностных упругих волн. Их применение также может быть использовано как дополнительный неразрушающий метод ультразвуковой диагностики покрытий, сформированных газопламенным напылением.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2021 – 2023 гг. (тема № 0030-2021-0025).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кретов Е. Ф.** Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении. — СПб.: СВЕН, 2014. — 312 с.
2. **Пасманик Л. А., Камышев А. В., Радостин А. В., Зайцев В. У.** Параметры акустической неоднородности для неразрушающей оценки влияния технологии изготовления и эксплуатационной поврежденности на структуру металла / Дефектоскопия. 2020. № 12. С. 24 – 36. DOI: 10.31857/S0130308220120039
3. **Воробьев Р. А., Литовченко В. Н.** Применение метода ультразвукового контроля для оценки трещиностойкости низкоуглеродистой мартенситной стали 07ХЗГНМЮА / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87. № 1. С. 45 – 51. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-1-45-51
4. **Gonchar A. V., Kurashkin K. V., Andreeva O. V., Anosov M. S., Klyushnikov V. A.** Fatigue life prediction of structural steel using acoustic birefringence and characteristics of persistent slip bands / Fatigue Fract Eng Mater Struct. 2021. P 1 – 12. DOI: 10.1111/ffe.13586
5. **Викторов И. А.** Звуковые поверхностные волны в твердых телах. — М.: Наука, 1981. — 287 с.
6. **Антонов А. М., Ерофеев В. И., Леонтьева А. В.** Влияние поврежденности на распространение волны Рэлея вдоль границы полупространства / Вычислительная механика сплошных сред. 2019. Т. 12. № 3. С. 293 – 300. DOI: 10.7242/1999-6691/2019.12.3.25
7. **Алешин Н. П., Крысько Н. В., Кусый А. Г. и др.** Исследование выявляемости поверхностных объемных дефектов при ультразвуковом контроле с применением волн Рэлея, генерируемых электромагнитно-акустическим преобразователем / Дефектоскопия. 2021. № 5. С. 22 – 23. DOI: 10.31857/S0130308221050031
8. **Баев А. Р., Майоров А. Л., Левкович Н. В. и др.** Особенности распространения поверхностных и подповерхностных волн в объектах со слоистой структурой / Приборы и методы измерений. 2019. Т. 10. № 1. С. 69 – 79. DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-69-79
9. **Волкова Л. В., Муравьева О. В., Муравьев В. В., Булдакова И. В.** Прибор и методики измерения акустической анизотропии и остаточных напряжений металла магистральных газопроводов / Приборы и методы измерений. 2019. Т. 10. № 1. С. 42 – 52. DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-42-52
10. **Пеньков Г. М., Карманский Д. А., Петраков Д. Г.** Исследование зависимостей между физико-механическими свойствами песчаника и скоростью прохождения упругих волн / Вестник ПНИПУ. 2020. Т. 20. № 1. С. 27 – 36. DOI: 10.15593/2224-9923/2020.1.3
11. **Ерофеев В. И., Иляхинский А. В., Никитина Е. А. и др.** Метод ультразвукового зондирования при оценке предельного состояния металлоконструкций, связанного с появлением пластических деформаций / Мезомеханика. 2019. № 22(3). С. 65 – 70. DOI: 10.24411/1683-805X-2019-13007
12. **Шермергор Т. Д.** Теория упругости микронеднородных сред. — М.: Наука, 1977. — 399 с.
13. **Углов А. Л., Ерофеев В. И., Смирнов А. Н.** Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации. — М.: Наука, 2009. — 279 с.
14. **Ковалев А. А., Краско А. С.** Влияние параметров газотермического напыления на прочность сцепления функциональных стойких покрытий / Проблемы машиностроения и надежности машин. 2021. № 3. С. 31 – 39. DOI: 10.31857/S0235711921030081
15. **Савич Е. К., Антипов Д. В.** Повышение качества покрытий, нанесенных методом газотермического плазменного напыления на детали газотурбинных двигателей / Известия ТГУ. 2021. № 5. С. 554 – 560. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-5-554-561
16. **Березин Е. К., Родюшкин В. М.** Оценка качества восстановления наплавкой порошковой проволокой быстроизнашивающихся деталей черпаковой цепи с помощью ультразвука / Научные проблемы водного транспорта. 2020. Вып. 65. С. 11 – 15. DOI: 10.37890/jwt.vi65.123
17. **Березин Е. К., Родюшкин В. М.** Предремонтная диагностика металла пальцев черпаковой цепи с помощью ультразвука / Контроль. Диагностика. 2019. № 12. С. 48 – 52. DOI: 10.14489/td.2019.12.pp.048-052

REFERENCES

1. **Kretov E. F.** Ultrasonic flaw detection in power engineering. — St. Petersburg: SVEN, 2014. — 312 p. [in Russian].
2. **Pasmanik L. A., Kamyshev A. V., Radostin A. V., Zaitsev V. U.** Acoustic heterogeneity parameters for non-destructive assessment of the impact of manufacturing technology and operational damage on the metal structure / Defektoskopiya. 2020. N 12. P 24 – 36 [in Russian]. DOI: 10.31857/S0130308220120039
3. **Vorob'ev R. A., Litovchenko V. N.** Application of Ultrasonic Testing Method for Fracture Resistance Assessment of Low-Carbon Martensitic Steel 07KhZGNMYuA / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2021. Vol. 87. N 1. P 45 – 51 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-1-45-51
4. **Gonchar A. V., Kurashkin K. V., Andreeva O. V., Anosov M. S., Klyushnikov V. A.** Fatigue life prediction of structural steel using acoustic birefringence and characteristics of persistent slip bands / Fatigue Fract Eng Mater Struct. 2021. P 1 – 12. DOI: 10.1111/ffe.13586
5. **Viktorov I. A.** Sound surface waves in solids. — Moscow: Nauka, 1981. — 287 p. [in Russian].
6. **Antonov A. M., Erofeev V. I., Leont'eva A. V.** Effect of damage on Rayleigh wave propagation along the half-space boundary / Vychisl. Mekh. Sploshn. Sred. 2019. Vol. 12. N 3. P 293 – 300 [in Russian]. DOI: 10.7242/1999-6691/2019.12.3.25
7. **Aleshin N. P., Krysko N. V., Kusyi A. G., et al.** Study of detection of surface volume defects during ultrasonic inspection using Rayleigh waves generated by electromagnetic-acoustic transducer / Defektoskopiya. 2021. N 5. P 22 – 23 [in Russian]. DOI: 10.31857/S0130308221050031
8. **Baev A. R., Maiorov A. L., Levkovich N. V., et al.** Features of propagation of surface and subsurface waves in objects with

- layered structure / Prib. Met. Izmer. 2019. Vol. 10. N 1. P. 69 – 79 [in Russian]. DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-69-79
9. **Volkova L. V., Murav'eva O. V., Murav'ev V. V., Buldakova I. V.** Instrument for measuring the acoustic anisotropy and residual stresses of the metal of main gas pipelines / Prib. Met. Izmer. 2019. Vol. 10. N 1. P. 42 – 52 [in Russian]. DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-42-52
 10. **Pen'kov G. M., Karmanskii D. A., Petrakov D. G.** Study of dependencies between physical and mechanical properties of sandstone and elastic wave velocity / Vestn. PNIPU. 2020. Vol. 20. N 1. P. 27 – 36 [in Russian]. DOI: 10.15593/2224-9923/2020.1.3
 11. **Erofeev V. I., Plyakhinskii A. V., Nikitina E. A., et al.** Method of ultrasonic sounding when assessing the limit state of metal structures associated with the appearance of plastic deformations / Mezomekhanika. 2019. N 22(3). P. 65 – 70 [in Russian]. DOI: 10.24411/1683-805X-2019-13007
 12. **Shermergor T. D.** Theory of elasticity of microneedular media. — Moscow: Nauka, 1977. — 399 p. [in Russian].
 13. **Uglov A. L., Erofeev V. I., Smirnov A. N.** Acoustic monitoring of equipment during manufacture and operation. — Moscow: Nauka, 2009. — 279 p. [in Russian].
 14. **Kovalev A. A., Krasko A. S.** Influence of gas thermal sputtering parameters on adhesion strength of functional resistant coatings / Probl. Mashinostr. Nadezhn. Mashin. 2021. N 3. P. 31 – 39 [in Russian]. DOI: 10.31857/S0235711921030081
 15. **Savich E. K., Antipov D. V.** Improving the quality of coatings applied by the method of gas thermal plasma spraying on parts of gas turbine engines / Izv. TGU. 2021. N 5. P. 554 – 560 [in Russian]. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-5-554-561
 16. **Berezin E. K., Rodyushkin V. M.** Improving the Quality of Coatings Applied by Gas Thermal Plasma Spraying on Gas Turbine Engine Parts / Nauch. Probl. Vod. Transp. 2020. Issue 65. P. 11 – 15 [in Russian]. DOI: 10.37890/jwt.vi65.123
 17. **Berezin E. K., Rodyushkin V. M.** Pre-repair diagnostics of the metal of the fingers of the ladle chain using ultrasound / Kontrol. Diagnostika. 2019. N 12. P. 48 – 52 [in Russian]. DOI: 10.14489/td.2019.12.pp.048-052