

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti-6Al-4V, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

А.К. Бритенков^{1,3*}, В.М. Родюшкин², А.В. Иляхинский²

¹Институт прикладной физики РАН, 603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46, Россия

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

³Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603950, Нижний Новгород, проспект Гагарина, 23, Россия

*e-mail: britenkov@ipfran.ru

Аннотация. Для проведения расчётов в процессе разработки низкочастотных гидроакустических преобразователей необходимы данные о физико-механических свойствах конструкционных материалов, таких как плотность, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, предел прочности. Для изготовления излучающей оболочки (корпуса) преобразователя используется специфический материал, получаемый методом послойного лазерного сплавления. Параметры материала, изготовленного таким методом, зачастую существенно отличаются от табличных данных. В работе приведены результаты исследований физико-механических свойств титанового сплава Ti-6Al-4V, полученного методом послойного лазерного сплавления. Исследования проведены методом упругих волн и разрушающего воздействия. Результаты исследований используются для моделирования и расчёта параметров корпусов гидроакустических излучателей, выполняемых с помощью 3D печати из металлических порошков.

Ключевые слова: титан, неразрушающий контроль, гидроакустический излучатель, упругие волны, предел прочности, гидроакустика, преобразователь продольно-изгибного типа, излучающая оболочка, механический трансформатор

1. Введение

Изготовление низкочастотных гидроакустических излучателей с использованием новых технологий, в частности SLM – технологии послойного лазерного сплавления [1], так же как и увеличение мощности излучения накладывает особые требования на конструктивные особенности и предварительный расчёт параметров преобразователя. При выборе типа преобразователя и поиске оптимальной геометрии корпуса требуется учитывать свойства используемых конструктивных материалов [2,3].

Достижение заданных техническими требованиями параметров и подготовка расчётно-конструкторской документации в процессе разработки и изготовления гидроакустических излучателей обеспечивается проведением большого объёма предварительных расчётов. Аналитически рассчитать характеристики низкочастотного гидроакустического излучателя продольно-изгибного типа [4] со сложной геометрией

излучающей оболочки практически невозможно, поэтому в таких задачах применяется метод конечно-элементного моделирования [5]. Для проведения подобных численных расчётов параметров излучателя необходимы данные о физико-механических свойствах конструкционных и пьезокерамических материалов.

Основными свойствами материалов, используемых в расчётах колебательных свойств гидроакустического излучателя, являются плотность, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, предел текучести. Кроме этого, для конструкционных материалов важными показателями выступают так же модуль сдвига, предел прочности, скорость развития процесса разрушения при статической или повторной нагрузке, удельная работа деформации и разрушения, предел пропорциональности, предел упругости, предел выносливости. Однако получение данных о таких характеристиках достаточно затратно и возможно лишь при массовом производстве конструкционных материалов, что в свою очередь останавливает их применение в гидроакустических излучателях.

Как правило, производители пьезоматериалов достаточно подробно приводят требуемые для расчётов данные [5]. Для наиболее часто используемой в гидроакустических преобразователях пьезокерамики ЦТБС-3 и ЦТС-19 [6] известны главные механические показатели, такие как скорость звука, плотность, модуль Юнга, модуль сдвига, коэффициент Пуассона. При изготовлении же деталей методом послойного лазерного сплавления свойства материала могут существенно отличаться от табличных. Поэтому исследование основных характеристик и физико-механических свойств (плотность, модуль Юнга, коэффициент Пуассона) титанового сплава, полученного методом послойного лазерного сплавления, предоставляет важную информацию для более точного моделирования и расчёта параметров гидроакустических излучателей [7].

2. Проблемы изготовления НЧИ продольно-изгибного типа

Компактные низкочастотные гидроакустические преобразователи (размером корпуса менее 60 см) имеют особую сложность для расчётов и изготовления. Малогабаритные [8] и миниатюрные [9] низкочастотные гидроакустические преобразователи ещё более проблематичны для расчётов. Наибольшей эффективностью в сочетании с высокой технологичностью изготовления обладают пьезоэлектрические преобразователи продольно-изгибного типа [4], использующие принцип электромеханического трансформатора. Проблемой таких преобразователей является герметизация продольных щелей в излучающей оболочке, выполняемых для снижения рабочей частоты, которая в значительной мере определяется жёсткостью корпуса. Альтернативным способом снижения поперечной жёсткости корпуса является волнообразное гофрирование излучающего элемента [10].

Малогабаритный гидроакустический излучатель с цельнометаллическим корпусом сложной формы из титанового сплава (Рис. 1) лишён проблемы с герметизацией, имеет большую эффективную площадь излучающей поверхности и чувствительность при одинаковых с аналогами габаритных размерах [8,11].



Рис. 1. Малогабаритный гидроакустический преобразователь с излучающей оболочкой сложной формы

Высокая удельная мощность такого компактного излучателя перед эксплуатацией в составе различных систем, как правило, требует проведения ресурсных испытаний. Дополнением к результатам ресурсных испытаний для оценки выносливости конструкции является теоретический расчёт предельных режимов работы и механических напряжений в корпусе излучателя при длительных циклических нагрузках.

Гидроакустический излучатель представляет собой сложную взаимосвязанную систему электрических и механических цепей, в которых происходит преобразование электрической энергии в механические колебания. Любое отклонение на каждом из этапов создания такого изделия ведет к неконтролируемому отклонению получаемых параметров излучателя от заданных. Информация о физико-механических свойствах титана Ti-6Al-4V, полученного методом послойного лазерного сплавления, значительно повышает точность моделирования параметров корпусов гидроакустического излучателя и достоверность расчётов его надёжности. Исследования характеристик такого специфического материала предпочтительно всего проводить методами неразрушающего контроля [12,13]. Для этих целей значительный интерес представляют акустические методы контроля [14], которые в настоящее время широко используются в промышленности при решении задач традиционной дефектоскопии [15].

3. Контрольные образцы и схема проведения измерений

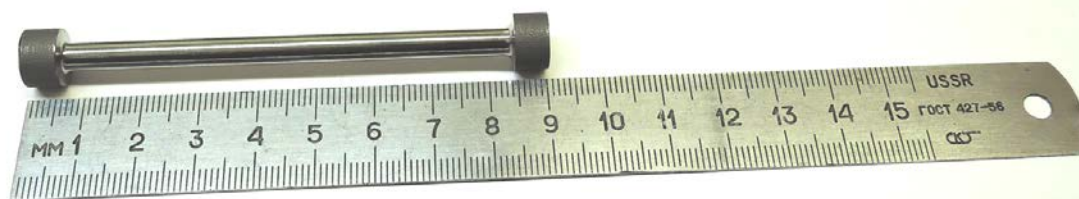
Испытаниям подвергались контрольные образцы цилиндрической формы, изготовленные на SLM-установке при печати корпуса гидроакустического излучателя сложной формы методом послойного лазерного сплавления из порошка сплава титана марки Ti-6Al-4V. Регламентируемый стандартом ASTM F136-02a (ELI Grade 23) установок для 3D-печати состав порошка Ti-6Al-4V, из которого изготовлены контрольные образцы (Рис. 2), приведён в Таблице 1.

Содержание титана как основного компонента может иметь значительный разброс в зависимости от наполнителей сплава Ti-6Al-4V (таб. 1). Элементный анализ титанового сплава контрольных образцов, проведённый с помощью сканирующего электронного микроскопа Jeol JSM 6490 с приставкой для рентгеновского энергодисперсионного микроанализа INCA350 показал следующее распределение основных элементов по весу: Ti – 89.4 %, Al – 6.5 %, V – 4.0 %.

Для исследования предела прочности материала контрольных образцов методом разрушающего воздействия из цилиндрических заготовок были изготовлены тестовые образцы (Рис. 3), подготовленные согласно требованиям ГОСТ [16].

Таблица 1. Состав материала контрольных образцов

Элемент	Содержание, %
Ti	Основной компонент
Al	5.5 – 6.5
V	3.5 – 4.5
Fe	0 – 0.25
C	0 – 0.8
O	0 – 0.13
N	0 – 0.05
H	0 – 0.012

**Рис. 2.** Контрольный образец из титана марки Ti-6Al-4V**Рис. 3.** Контрольный образец из титана марки Ti-6Al-4V, подготовленный для испытаний методом разрушающего воздействия

Спекание (сплавление) частиц порошка титана (размер зёрен которого составлял 30-40 мкм) на SLM-установке при изготовлении корпуса излучателя (Рис. 4) размером $\varnothing 86 \times 90.6$ мм [8] производилось непрерывно в течение 72 часов в камере размером $100 \times 100 \times 100$ мм одновременно с изготовлением контрольных образцов. Ориентация в реакторе SLM-установки главных осей симметрии контрольных образцов как тел вращения выполнена в направлении роста (сплавления) изделий, и основные оси симметрии корпуса излучателя и контрольных образцов параллельны. Таким образом, можно считать физико-механические свойства материала контрольных образцов (Рис. 2 и 3) идентичными материалу корпуса гидроакустического излучателя (Рис. 1).



Рис. 4. Корпус гидроакустического излучателя размером $\varnothing 86 \times 90.6$ мм

Следует заметить, что зависимость физико-механических свойства материала, получаемого по такой технологии, гораздо больше зависит от условий сплавления, чем от размера зёрен исходного порошка [17].

Массо-габаритные характеристики контрольных образцов. Результаты измерений размеров, массы и плотность контрольных образцов сплава титана Ti-6Al-4V приведены в Таблице 2.

Таблица 2. Массо-габаритные параметры контрольных образцов

№ образца	Длина, мм	Диаметр, мм	Вес, г	Плотность, г/см ³
1	89.8	10.0	30.85	4.37
2	89.8	10.0	30.73	4.35

Из результатов измерений видно, что плотность материала, полученного методом SLM-сплавления, соответствует справочным данным для образцов из сплавов титана, полученных традиционными методами металлообработки [18].

Определение упругих констант методом акустического зондирования. Акустическое зондирование выполняется возбуждением в исследуемом материале упругого импульса и приёме его после прохождения через исследуемую среду. Используя размер контрольного образца, зафиксировав время прохождения (пробега) упругой волны в образце, можно вычислить скорость распространения упругой волны в исследуемом материале. В то же время скорость различных типов упругих волн связана с механическими свойствами исследуемой среды: коэффициентом Пуассона μ , модулем упругости E , модулем сдвига G и плотностью ρ следующими соотношениями [13]:

$$\mu = \frac{1 - 2\left(\frac{c_S}{c_L}\right)^2}{2 - 2\left(\frac{c_S}{c_L}\right)^2}, \quad (1)$$

$$E = \rho c_L^2 \frac{1 + \mu(1 - 2\mu)}{1 - \mu}, \quad (2)$$

$$G = \rho C_S^2, \quad (3)$$

где C_S – скорость распространения поперечной волны в материале, C_L – скорость распространения продольной волны в материале [19].

Скорость продольной волны C_L в твёрдом теле (2) приведена для случая, когда размеры тела в поперечном направлении к направлению распространения волны много больше её длины. Как известно, в ограниченных твердых телах, кроме продольной и поперечной (сдвиговой) волн, существуют и другие типы волн (поверхностные, нормальные и т.д.).

Скорость упругих волн вычисляется по формуле

$$c = \frac{L}{T}, \quad (4)$$

где T – время распространения (пробега) упругой волны на базе L , где L – длина контрольного образца.

Интерес для исследований представляет самая низкая мода нормальной продольной волны, так как в низкочастотном пределе при стремлении частоты к нулю скорость волны стремится к значению

$$c_{CT} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (5)$$

называемой скоростью стержневой волны. В случае, когда мало отношение R/λ , где R – радиус стержня λ – длина волны

$$\lambda = \frac{c_{CT}}{f}, \quad (7)$$

где f – частота импульсов излучаемых в контрольный образец, следует учитывать дисперсию этой моды, хотя она незначительна. Для частот порядка 100 кГц длина волны составляет около 60 мм, и тогда при отношении радиуса стержня к длине волны порядка 0.17 скорость рассчитывается по формуле $C_{CT\ 80} = 0.97 C_{CT}$. Соотношение (5) следует рассматривать как оценочное из-за малой протяженности образца: 10×89.8 мм.

4. Схема проведения испытаний

Измерение времени пробега ультразвукового импульса в образце проводилось на установке, схема которой приведена на Рис. 5.

Упругие продольные волны возбуждались пьезоэлектрическим преобразователем (ПЭП) фирмы «Krautkramer» MB4S; упругие поперечные волны возбуждались ПЭП фирмы «Krautkramer» K4K-Y. В обоих случаях волны возбуждались на частоте 4 МГц. Для возбуждения ПЭП использовался дефектоскоп A1214. С приёмного ПЭП сигнал поступал на цифровой осциллограф Tektronix TDS2022 с разрешением по времени 2 нс, на котором определялись как время распространения в контрольном образце, так и задержка зондирующего импульса.

На Рис. 6 приведена типичная осциллограмма импульса при его возбуждении с помощью ПЭП, поясняющая используемый принцип измерений задержек импульса упругих волн.

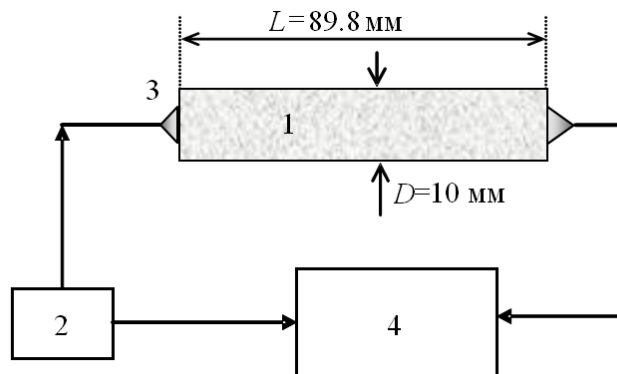


Рис. 5. Схема лабораторной установки для измерения времени скорости распространения ультразвуковых импульсов в контрольном образце. Цифрами обозначены: 1 – исследуемый образец; 2 – генератор импульсов механического напряжения; 3 – излучатель и приёмник ультразвуковых колебаний; 4 – измеритель временных интервалов (осциллограф)

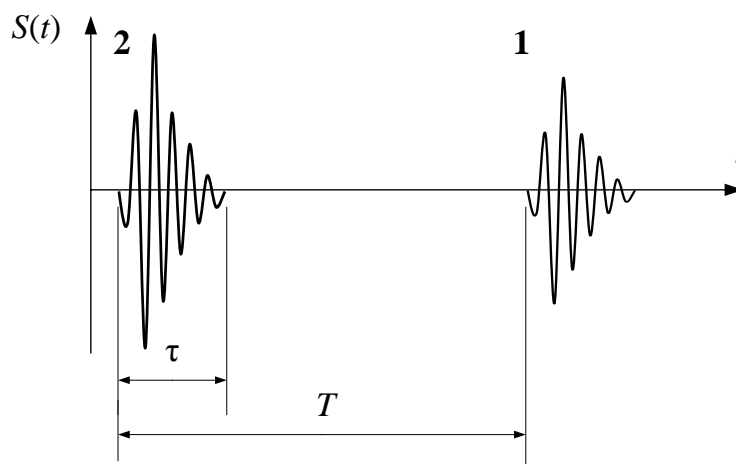


Рис. 6. Характерная форма импульса в исследуемом образце при его возбуждении с помощью ПЭП. T – задержка (время пробега волны по длине образца L , τ – длительность зондирующего импульса); 1 – рабочий импульс волны, 2 – опорный (зондирующий) импульс

Оценочное значение длины упругой волны на частоте 4 МГц составляет 1.5 мм, что существенно меньше диаметра контрольного образца. Поэтому для дальнейших расчётов использовалась формула (2).

Определение задержки импульса относительно опорного проводилось как по моменту времени, когда сигнал принимал максимальное значение, так и по моменту времени, когда сигнал переходил нулевое значение. Для уменьшения погрешности измерения задержки, задержка определена относительно специально сформированного опорного импульса.

5. Результаты измерений упругих констант титана

Упругая стержневая волна в контрольных образцах возбуждалась ПЭП111-0.1 на частоте 80 кГц по схеме, аналогичной представленной на Рис. 4. В качестве генератора возбуждения ПЭП использовался дефектоскоп УК-14П. Форма распространяющихся в

исследуемом образце импульсов, наблюдаемая на экране цифрового осциллографа, приведена на Рис. 7.

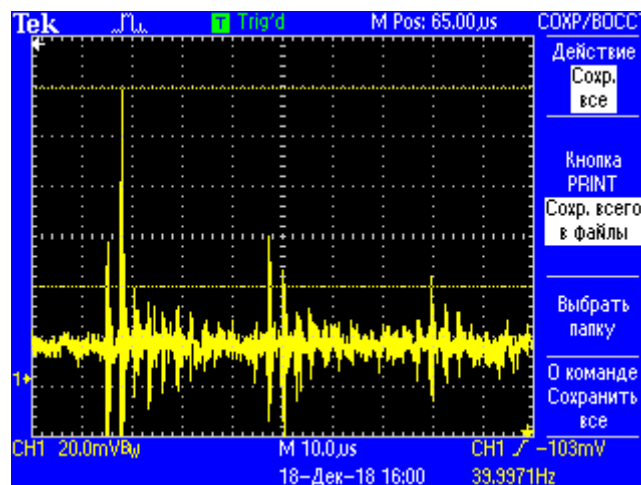


Рис. 7. Осциллограмма импульса в исследуемом образце при его возбуждении с помощью ПЭП

Результаты измерений скорости звука в контрольных образцах сплава титана Ti-6Al-4V приведены в Таблице 3.

Таблица 3. Результаты измерений скорости звука в контрольных образцах

№ образца	Время распространения волны в образце (T), мкс Погрешность 0.2 мкс			Скорость упругой волны (c), м/с Погрешность 60 м/с		
	Стержневая (80 кГц)	Поперечная (4 МГц)	Продольная (4 МГц)	Стержневая (80 кГц)	Поперечная (4 МГц)	Продольная (4 МГц)
1	19.2	29.0	14.7	4677	3096	6108
2	19.0	29.0	14.8	4726	3096	6067

Значения упругих констант для титана Ti-6Al-4V, вычисленные на основе соотношений (1) – (3) для контрольных образцов, приведены в Таблице 4.

Таблица 4. Упругие константы, полученные на основе измерений скорости звука в контрольных образцах

№ образца	Плотность, кг/м ³	Модуль упругости $E_{ст}$, Н/м ²	Модуль сдвига, Н/м ²	Коэффициент Пуассона	Модуль упругости $E_{пп}$, Н/м ²
1	4370	1.02×10^{11}	4.19×10^{10}	0.33	1.19×10^{11}
2	4350	1.03×10^{11}	4.17×10^{10}	0.32	1.20×10^{11}

Значения модуля упругости $E_{ст}$, полученные по результатам измерения стержневой скорости и $E_{пп}$, определённые на основе измерений продольной и поперечной скоростей звука в контрольных образцах, различаются на 15 %. Такое

различие связано с малыми размерами контрольных образцов, поскольку соотношение (5) используется для грубой оценки.

Погрешность измерений и расчётов. При косвенных измерениях величины $f=f(x, y, z, \dots)$, где x, y, z – результаты прямых измерений, измеряемая величина находится из её функциональной зависимости от точности входящих в неё переменных. Абсолютная погрешность косвенных измерений Δf выражается суммой модулей произведений частных производных и погрешностей прямых измерений для усреднённых значений измеренных величин x, y, z, \dots :

$$\Delta f(x, y, z, \dots) = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| \Delta x + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \Delta y + \left| \frac{\partial f}{\partial z} \right| \Delta z + \dots \quad (8)$$

Соотношение (8) рекомендуется для оценки абсолютной погрешности определения $f(x, y, z, \dots)$, обусловленной исключительно приборными погрешностями измеряемых величин x, y, z, \dots . Для оценки погрешности, связанной со случайными ошибками прямых измерений, целесообразно использовать соотношение:

$$\Delta f(x, y, z, \dots) = \sqrt{\left(\left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| \Delta x \right)^2 + \left(\left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \Delta y \right)^2 + \left(\left| \frac{\partial f}{\partial z} \right| \Delta z \right)^2 + \dots} \quad (9)$$

На практике формулы (8) и (9) дают почти одинаковые результаты. Производные как в (8), так и в (9) берутся для средних значений аргументов x, y, z, \dots (экспериментально измеренных величин).

Погрешность определения плотности материала. Погрешность определения плотности связана с инструментальными погрешностями измерений размеров и массы контрольного образца, на основании чего

$$\Delta \rho = \rho \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m} \right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{D} \right)^2}. \quad (10)$$

При инструментальной погрешности измерений длины $\Delta L = 0.1$ мм, диаметра $\Delta D = 0.1$ мм, массы $\Delta m = 0.01$ г, абсолютная погрешность определения плотности материала образцов не превышает 0.044 г/см³. Таким образом, относительная погрешность полученных значений плотности составляет 1 %.

Погрешность определения скорости звука. Погрешность вычисления значения скорости звука определяется как погрешность косвенных измерений по формуле (4):

$$\Delta c = \frac{\Delta L}{T_{cp}} + L \frac{\Delta T}{T^2}. \quad (11)$$

Так как погрешность Δc обусловлена инструментальными погрешностями измерения величин L, T , то для $\Delta L = 0.1$ мм, $\Delta T = 0.2$ мкс, $L = 89.8$ мм и T из Таблицы 2, абсолютная погрешность измерения скорости продольной волны составляет 89 м/с, поперечной – 25 м/с и стержневой – 55 м/с. Относительная погрешность расчёта акустической скорости не превышает 1.5 %.

Погрешности упругих констант, определяемые согласно (6) составили значения: $\Delta E \approx 5.95 \times 10^9$, $\Delta G \approx 1.10 \times 10^9$, $\Delta \mu \approx 0.01$. Относительная погрешность определения модуля упругости составила не более 6 % и около 3 % для модуля сдвига и коэффициента Пуассона.

Случайные ошибки прямых измерений. Погрешности определения упругих констант, связанные со случайными ошибками прямых измерений, можно рассчитать согласно (9) и привести к виду

$$\Delta\mu = \frac{\left(\frac{c_S}{c_L}\right)^2 \sqrt{(1,5\Delta c_S)^2 + \left(1 + 4\left(\frac{c_S}{c_L}\right)^2\right)\Delta c_L}}{\left(1 - \left(\frac{c_S}{c_L}\right)^2\right)^2}, \quad (12)$$

$$\Delta E = \frac{2c_L^2(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)^2} \sqrt{\left(\frac{\Delta\rho}{2\rho}\right)^2 + \left(\frac{\Delta c_L}{c_L}\right)^2 + \left(-\frac{\mu^2\Delta\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}\right)^2} \quad (13)$$

$$\Delta G = \sqrt{\left(\Delta\rho \frac{\partial G}{\partial \rho}\right)^2 + \left(\Delta c_S \frac{\partial G}{\partial c_S}\right)^2} = \sqrt{(c_S\Delta\rho)^2 + (2\rho\Delta c_S)^2}. \quad (14)$$

Расчёт погрешностей согласно соотношениям (8) и (12)-(14) даёт практически одинаковые результаты, вследствие чего достаточно использовать формулы, полученные на основе (8).

6. Испытания методом разрушающего воздействия.

Экспериментальные исследования предела прочности методом разрушающего воздействия проводились путём растяжения тестовых образцов (Рис. 3) на универсальной испытательной машине фирмы Tinius Ollsen Ltd (модель H100KU), с погрешностью измерения нагрузки не более 0.5 % [20]. Испытания проводились в соответствии с требованиями ГОСТ [21].

Пропорциональный цилиндрический образец (Тип III) с начальной расчётной длиной

$$l_0 = 11.3\sqrt{F_0}, \quad (15)$$

где F_0 – площадь поперечного сечения рабочей части (Рис. 8), был изготовлен на токарном станке с глубиной резания 0.05–0.08 мм при последнем проходе рабочей части.

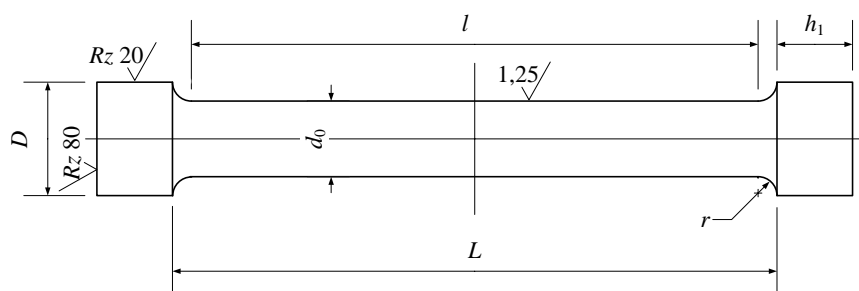


Рис. 8. Пропорциональный цилиндрический образец. Диаметр рабочей части $d_0=5$ мм; длина рабочей части $l=75$ мм; длина и диаметр торцевых бобышек для захватов испытательной машины: $h_1=6$ мм, $D=10$ мм; радиус закругления $r=1.5$ мм

Поверхность рабочей части (Рис. 8) пропорционального цилиндрического образца по всей длине $L=78$ мм имела шероховатость в пределах $Ra=0.3\text{--}0.45$ мкм, что соответствует регламентируемым ГОСТ требованиям испытаний [21]. Деформация образца измерялась экстензометром Epsilon 3542 с базой 50 мм (Рис. 9) и разрешающей способностью системы измерения деформации 0.0001 мм.

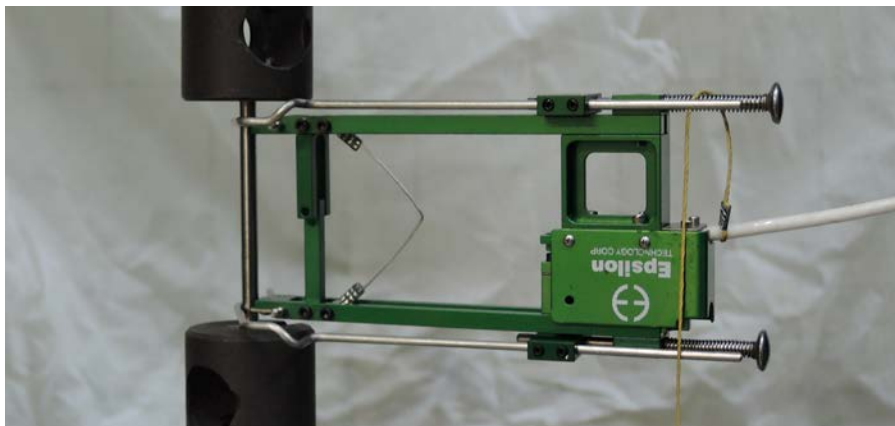


Рис. 9. Контрольный цилиндрический образец (тип III), установленный в испытательной машине Tinius Ollsen Ltd и экстензометром Epsilon 3542 перед началом испытаний методом разрушающего воздействия

Диаграмма растяжения контрольного образца приведена на Рис. 10.

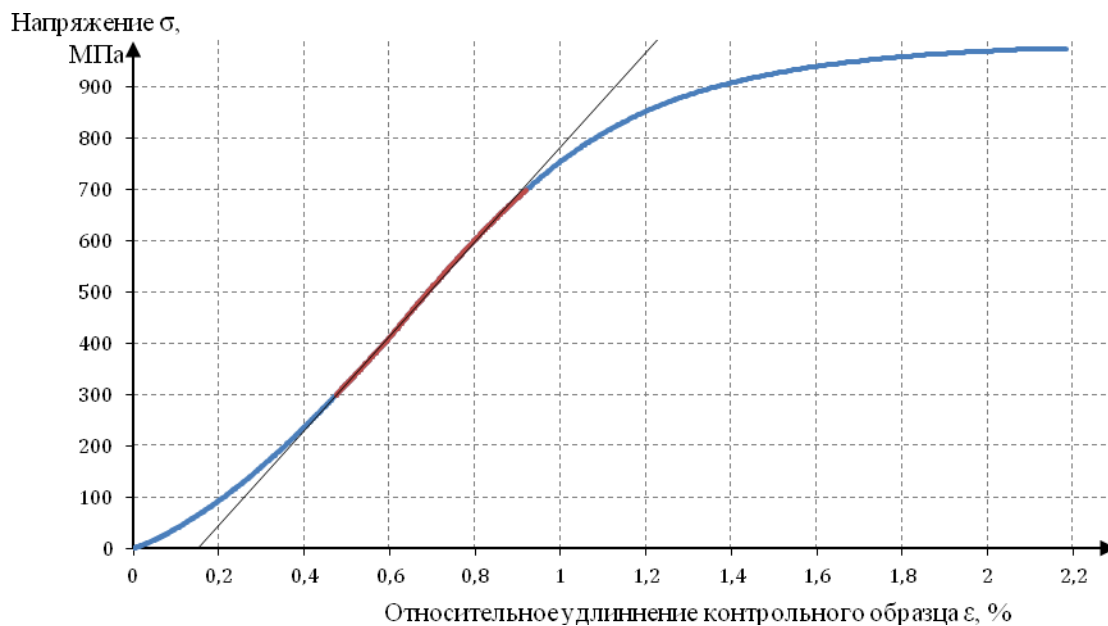


Рис. 10. Диаграмма растяжения контрольного образца титана марки Ti-6Al-4V

Модуль упругости E , рассчитанный по показаниям тензомера как среднее значение отношения ступени нагружения $\Delta\sigma_i$ к соответствующей ей деформации контрольного образца $\Delta\epsilon_i$

$$E = \frac{\sum \frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\epsilon_i}}{n}, \quad (16)$$

на линейном участке диаграммы нагружения 200 – 700 МПа. Полученные при растяжении контрольного образца значения модуля упругости приведены в Таблице 5.

Таблица 5. Значения модуля упругости для ступеней нагружения

Степень нагружения, МПа	200–300	300–400	400–500	500–600	600–700
Модуль упругости, МПа	83424.4	89095.5	98584.6	92705.8	80807.1

В качестве предела пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$ принята величина напряжения, при котором начинается нелинейный участок кривой нагружения. Условный предел текучести $\sigma_{0.2}$ – напряжение, при котором величина пластической деформации равно 0.2 % (Рис. 10), составляет около 890 МПа. Временное сопротивление (предел прочности) $\sigma_{\text{в}}$ – максимальное значение напряжения, достигнутое при разрушении контрольного образца (Рис. 11), зафиксировано на уровне 970 МПа.



Рис. 11. Контрольный образец после испытаний методом разрушающего воздействия

Анализ поверхности разрыва (Рис. 12) после разрушения контрольного образца подтверждает однородность материала, полученного при помощи SLM-технологии.



Рис. 12. Разрушение контрольного образца после испытаний и увеличенное изображение места разрыва

Для выявления микроструктуры сплава после полировки был использован раствор 50 % H_2O + 30 % HNO_3 + 20 % HF . Изображения микроструктур и исследование разрыва контрольного образца получены на оптическом металлографическом микроскопе KEYENCE VHX-1000 (Рис. 12, 13).

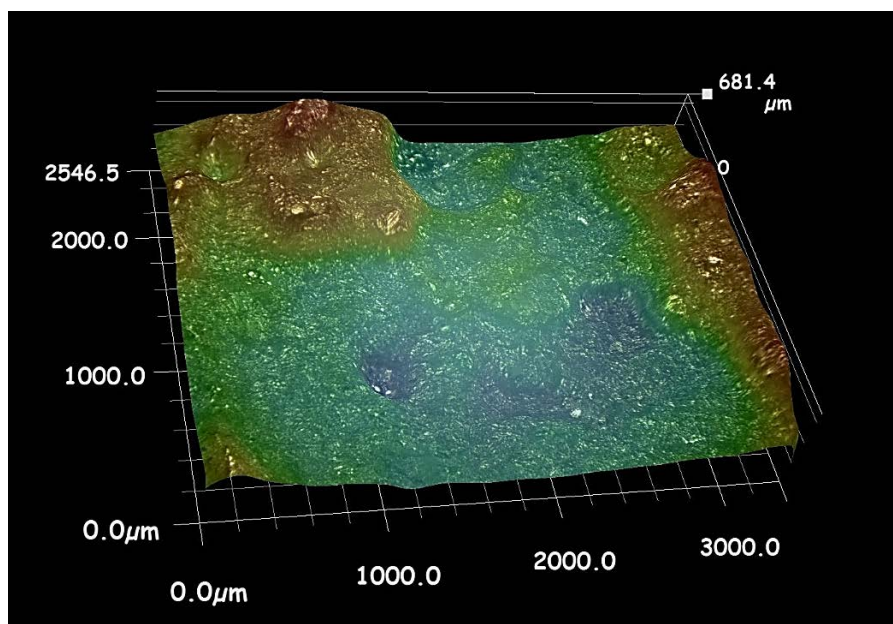


Рис. 13. Исследование места разрыва после разрушения контрольного образца

Известно, что металлы и сплавы с мелкозернистой структурой обладают большей прочностью, более высокой твердостью и лучшей обрабатываемостью, чем металлы с крупным зерном [22]. На Рис. 14 видно, что размеры зерён на поверхности разрушения контрольного образца не превышают размера гранул использованного порошка Ti-6Al-4V, применяемого во время послойного лазерного сплавления контрольных образцов и корпуса гидроакустического излучателей сложной формы.

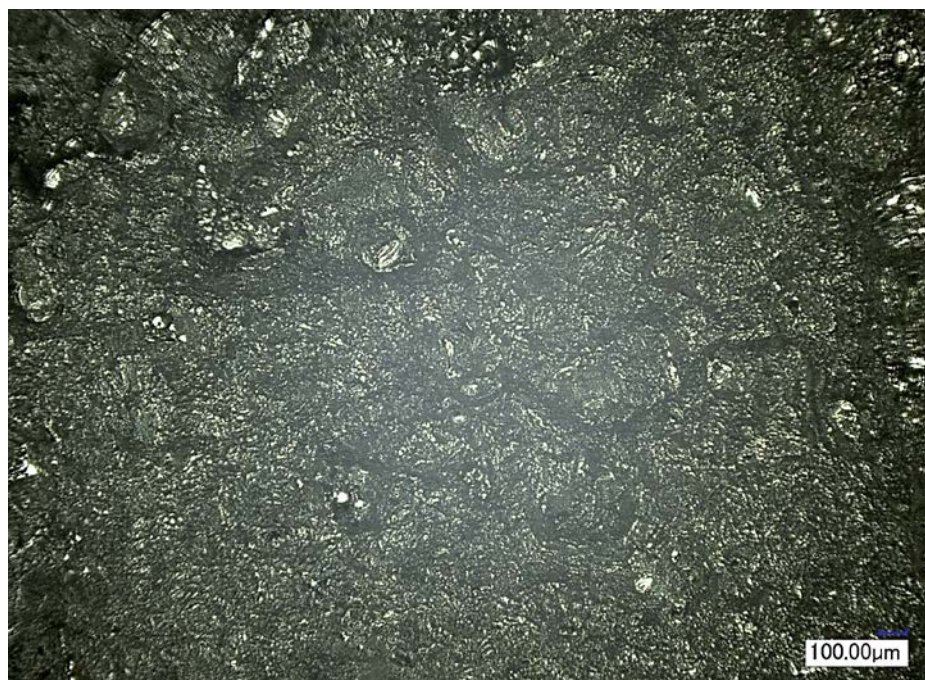


Рис. 14. Фрагмент разрушения (разрыва) контрольного образца

Исследования микроструктуры титана контрольных образцов (Рис. 15 и 16) показали однородность материала, получаемого методом послойного лазерного сплавления.

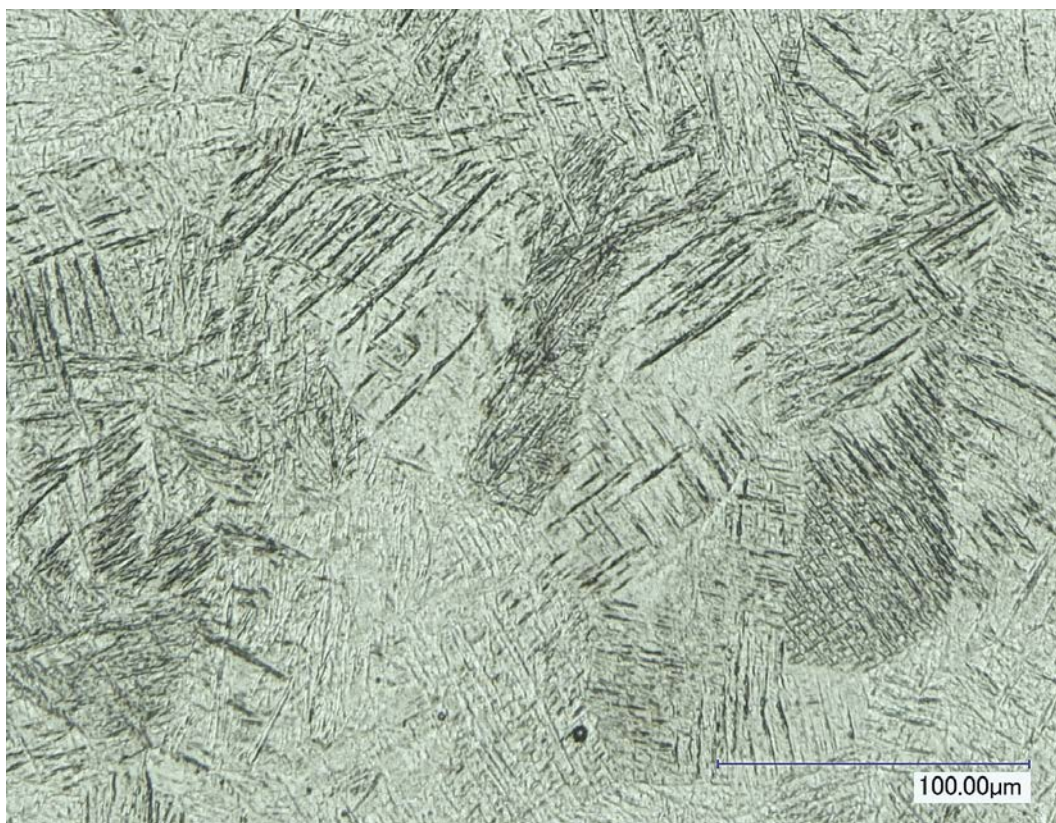


Рис. 15. Микроструктура материала контрольного образца при увеличении 1000 раз



Рис. 16. Микроструктура материала контрольного образца при увеличении 100 раз

На Рис. 15 видно, что исследуемый образец (Рис. 15) имеет пластинчатую микроструктуру $\alpha+\beta$ – титанового сплава мартенситного типа, представляющую собой пересыщенный твердый раствор α' фазы, обладающий повышенной прочностью и низкой пластичностью.

Материал, получаемый методом послойного лазерного сплавления, обладает рядом существенных отличий от материалов, изготовленных по традиционной технологии [23]. В первую очередь различие касается однородности. Материал корпуса гидроакустического излучателя, изготовленный при помощи послойного лазерного сплавления, более однороден и, как показали испытания разрушающим методом, обеспечивает достаточный запас прочности, необходимый для подобных изделий.

7. Выводы

В работе приведены значения некоторых физико-механических свойств титанового сплава Ti-6Al-4V, полученного методом послойного лазерного сплавления. Показано, что значения найденных параметров такого сплава, отличаются от аналогичных сплавов, изготовленных по другим технологиям. Технология послойного лазерного сплавления позволяет обеспечить высокую стабильность физико-механических свойств материала [24] в совокупности с повторяемостью других технологических параметров.

Метрологически обоснованные данные существенно повышают достоверность моделирования и расчёта параметров корпусов гидроакустических излучателей, которые можно изготовить с помощью 3D-печати из металлических порошков. Учитывая сложность конструкции, геометрическую форму, стоимость изготовления корпуса излучателя разработанного излучателя [10], использованные способы диагностики и исследования конструкционных материалов позволяют оптимизировать и процесс разработки и изготовления подобных изделий [1].

Полученные разрушающим и неразрушающим методами [25] результаты удовлетворительно совпадают, что, учитывая трудоёмкость получения сплава, делают акустические измерения более предпочтительными. Следует отметить перспективность акустических методов в задачах, связанных с изучением процессов, протекающих на микроуровне [15], с одной стороны, а с другой – возможности применения новых конструкционных материалов (в том числе пьезокомпозитов [26]) для изготовления гидроакустических преобразователей с использованием SLM-технологии [10].

Благодарности. Авторы выражают благодарность заведующему лабораторией В.А. Перфилову, заведующему лабораторией Б.Н. Боголюбову, заведующему отделом Д.А. Касьянову и заместителю директора ИПФ РАН по науке П.И. Коротину за внимание к работе, помощь в подготовке и организации испытаний, а также обсуждении результатов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН (проекты № 0035-2019-0019 и № 0035-2014-0402) при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 18-08-00715А и № 19-08-0965А).

Литература

- [1] Бритенков АК, Боголюбов БН, Смирнов СА, Перфилов ВА. Перспективы использования 3D-печати для изготовления компактных гидроакустических преобразователей продольно-изгибного типа со сложной геометрией излучающей оболочки. *Учёные записки физического факультета московского университета*. 2017;5: 1750104.
- [2] Боголюбов БН, Кирсанов АВ, Леонов ИИ, Смирнов СА, Фарфель ВА. Расчёт и экспериментальные исследования компактного продольно-изгибного

- гидроакустического преобразователя с центральной частотой излучения 520 Гц. *Гидроакустика*. 2015;23(3): 20-26.
- [3] Шарапов ВМ, Сотула ЖВ. Пьезоэлектрические преобразователи. Новые технологии проектирования. *Электроника: наука, технологии, бизнес*. 2012;5(0019): 96-102.
- [4] Андреев МЯ, Боголюбов БН, Ключин ВВ, Рубанов ИЛ. Низкочастотный малогабаритный продольно-изгибный электроакустический преобразователь. *Датчики и системы*. 2010;12: 51-55.
- [5] Эдуард ВЕ, Мохов ВИ. Анализ работы и расчёт пьезокерамического стержня с накладкой при использовании конечно-элементного моделирования. *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2019;S2: 263-268.
- [6] Ганопольский ВВ, Касаткин БА, Легуша ФФ, Прудько НИ, Пугачёв СИ. *Пьезокерамические преобразователи*. Ленинград: Судостроение; 1984.
- [7] Woollet R. *Sonar Transducer Fundamentals*. Newport - New London: Naval Underwater Systems Center; 1986.
- [8] Бритенков АК, Боголюбов БН, Дерябин МС, Фарфель ВА. Измерение электромеханических характеристик компактного низкочастотного гидроакустического излучателя сложной формы. *Труды МАИ*. 2019;105: 1-24.
- [9] Дикарёв АВ, Дмитриев СМ. *Гидроакустическое устройство*. RU 2655702 (Патент) 2018.
- [10] Бритенков АК, Боголюбов БН, Смирнов СА. *Продольно-изгибный гидроакустический преобразователь*. RU 2681268 (Патент) 2019.
- [11] Бритенков АК, Боголюбов БН, Фарфель ВА. Электроакустические характеристики экспериментального преобразователя продольно-изгибного типа со сложной формой излучающей оболочки. *Учёные записки физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова*. 2020;1: 2010106.
- [12] Никитина НЕ, Камышев АВ, Казачёк СВ. Применение метода акустоупругости для определения напряжений в анизотропных трубных сталях. *Дефектоскопия*. 2015;3: 51-60.
- [13] Ключев ВВ. *Неразрушающий контроль. Т. 3. Ультразвуковой контроль*. Москва: Машиностроение; 2004.
- [14] Иляхинский АВ, Родюшкин ВМ. О некоторых технологиях ультразвукового контроля технического состояния оборудования. *Актуальные проблемы в машиностроении*. 2019;6(1-4): 60-65.
- [15] Ерофеев ВИ, Иляхинский АВ, Никитина ЕА, Пахомов ПА, Родюшкин ВМ. *Метод ультразвукового зондирования при оценке предельного состояния металлоконструкций, связанного с появлением пластических деформаций*. Мезомеханика. 2019;22(3): 65-70.
- [16] Межгосударственный стандарт. ГОСТ 1497-84. *Металлы. Методы испытания на растяжение*. Москва: Стандартинформ; 2008.
- [17] Vrancken B, Thijs L, Kruth JP, and Humbeeck JV. Microstructure and mechanical properties of a novel β titanium metallic composite by selective laser melting. *Acta Materialia*. 2014;68: 150-158.
- [18] Межгосударственный стандарт. ГОСТ 26492-85. *Прутки катаные из титана и титановых сплавов. Технические условия (с изменениями № 1, 2)*. Москва: Издательство стандартов; 1985.
- [19] Коробов АИ, Буров ВА, Дмитриев КВ, Румянцева ОД. *Резонансная акустическая спектроскопия твердых тел*. Москва: Физический факультет МГУ; 2012.
- [20] Межгосударственный стандарт. ГОСТ 28840-90. *Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования*. Москва: ИПК Издательство стандартов; 2004.

- [21] Межгосударственный стандарт. ГОСТ 22706-77. *Металлы. Метод испытания на растяжение при температурах от минус 100 до минус 269°C*. Москва: ИПК Издательство стандартов; 2000.
- [22] Курашкин К, Мишакин ВВ. Исследование влияния характеристик структуры материала на акустические параметры. *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*. 2011;2(87): 190-198.
- [23] Межгосударственный стандарт. ГОСТ 19807-91. *Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки (с изменением № 1)*. Москва: ИПК Издательство стандартов; 2001.
- [24] Zhang S, Rauniyar S, Shrestha S, Ward A, Chou K. An experimental study of tensile property variability in selective laser melting. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019;43: 26-35.
- [25] Биргер ИА, Мавлютов РР. *Сопротивление материалов*. Москва: Наука; 1986.
- [26] Панич АА, Скрылёв АВ, Доля ВК, Свирская СН, Дыкина ЛА, Карюков ЕВ, Нагаенко АВ. Обзор перспективных пьезокомпозитов для применения в акустике и гидроакустике. *Труды XIV Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» ГА-2018*. Санкт-Петербург: 2018. с.470-473.

ACOUSTIC SENSING STUDY OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF TITANIUM ALLOY Ti-6Al-4V, MADE BY SELECTIVE LASER MELTING

A.K. Britenkov^{1,3*}, V.M. Rodyushkin², A.V. Ilyakhinsky²

¹Institute of applied physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS), 46 Ul'yanov Street, 603950
Nizhny Novgorod, Russia

²Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences (IPM RAS), 85 Belinsky
St., 603024 Nizhny Novgorod, Russia

³Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod (UNN), 23 Gagarin Ave., 603950 Nizhny Novgorod, Russia

*e-mail: britenkov@ipfran.ru

Abstract. To carry out calculations in the development of low-frequency hydroacoustic transducers, data on the physical and mechanical properties of structural materials, such as density, Young's modulus, Poisson's ratio, and ultimate strength, are required. For the manufacture of the emitting shell (body) of the transducer, specific material is used, obtained by the method of Selective Laser Melting (SLM). The material made by this technology often has parameters that differ significantly from the tabular data. The paper presents the results of studies of the physical and mechanical properties of the titanium alloy Ti-6Al-4V, obtained by the SLM-method. The studies were carried out by the method of elastic waves and destructive action. The research results are used for modeling and calculating the parameters of hydroacoustic emitter housings, manufactured using 3D printing from metal powders.

Keywords: titanium, non-destructive testing, hydroacoustic radiator, elastic waves, ultimate strength, hydroacoustics, transducer of longitudinal-bending type, emitting shell, mechanical transformer

Acknowledgements. *The authors are grateful to the head of the laboratory V.A. Perfilov, head of the laboratory B.N. Bogolyubov, head of department D.A. Kasyanov and Deputy Director of the IAP RAS for Science P.I. Korotin for their attention to work, assistance in the preparation and organization of trials, as well as discussion of the results.*

The work was carried out within the framework of the state assignment of the IAP RAS (projects No. 0035-2019-0019 and No. 0035-2014-0402) and with the support of the Russian Foundation for Basic Research (projects No. 18-08-00715A and No. 19-08-0965A).

References

- [1] Britenkov AK, Bogolyubov BN, Smirnov SA, Perfilov VA. 3D-printing possibilities for the manufacturing technology development of hydroacoustic longitudinal-bending type emitters with the complex radiator's body geometry. *Memoirs of the Faculty of Physics*. 2017;5: 1750104. (In Russian)
- [2] Bogolyubov BN, Kirsanov AV, Leonov II, Smirnov SA, Farfel VA. Design and experimental testing of compact flextensional hydroacoustic transducer with central radiation frequency 520 hz. *Hydroacoustics*. 2015;23(3): 20-26. (In Russian)

- [3] Sharapov VM, Sotula JV. Piezoelectric Transducers. New Design Technologies. *Electronics: Science, Technology, Business*. 2012;5(0019): 96-102. (In Russian)
- [4] Andreev MY, Bogolyubov BN, Klyushin VV, Rubanov IL. Low-frequency small-sized longitudinal-bending electroacoustic transducer. *Datchiki i sistemy*. 2010;12: 51-55. (In Russian)
- [5] Eduard VE, Mokhov VI. Analysis of operation and design of a piezoceramic rod with a patch using finite element modeling. *Proceedings of the Krylov State Scientific Center*. 2019;S2: 263-268. (In Russian)
- [6] Ganopolsky VV, Kasatkin BA, Legusha FF, Prudko NI, Pugachev SI. *Piezoceramic transducers*. Leningrad: Sudostroenie; 1984. (In Russian)
- [7] Woollet R. *Sonar Transducer Fundamentals*. Newport - New London: Naval Underwater Systems Center; 1986.
- [8] Britenkov AK, Bogolyubov BN, Deryabin MS, Farfel VA. Measuring electromechanical characteristics of a complex shape compact low-frequency hydro-acoustic irradiator. *Trudy MAI*. 2019;105: 1-24. (In Russian)
- [9] Dikarjov AV, Dmitriev SM. *Hydroacoustic device*. RU 2655702 (Patent) 2018. (In Russian)
- [10] Britenkov AK, Bogolyubov BN, Smirnov SA. *Longitudinal-bending hydroacoustics transducer*. RU 2681268 (Patent) 2019. (In Russian)
- [11] Britenkov AK, Bogolyubov BN, Farfel VA. Electro-acoustic characteristics of the experimental transducer of longitudinally flexural type with complex shape of the radiating cover. *Memoirs of the Faculty of Physics*. 2020;1: 2010106. (In Russian)
- [12] Nikitina NE, Kamyshev AV, Kazachek SV. Application of the acoustoelasticity method for determining stresses in anisotropic pipe steels. *Defektoskopiya*. 2015;3: 51-60. (In Russian)
- [13] Klyuev VV. *Unbrakable control. V. 3. Ultrasonic testing*. Moscow: Mashinostroenie; 2004. (In Russian)
- [14] Ilyakhinsky AV, Rodyushkin VM. On some technologies for ultrasonic monitoring of the technical condition of equipment. *Actual Problems in Mashine Building*. 2019;6(1-4): 60-65. (In Russian)
- [15] Erofeev VI, Ilyakhinsky AV, Nikitina EA, Pakhomov PA, Rodyushkin VM. Ultrasonic sensing method for evaluating the limit state of metal structures associated with the onset of plastic deformation. *Mesomechanics*; 2019;22(3): 65-70.
- [16] State standard. *GOST 1497-84 Metals. Tensile test methods*. Moscow: Standardinform; 2008. (In Russian)
- [17] Vrancken B, Thijs L, Kruth JP, an Humbeeck JV. Microstructure and mechanical properties of a novel β titanium metallic composite by selective laser melting. *Acta Materialia*. 2014;68: 150-158.
- [18] State standard. *GOST 26492-85. Rolled rods from titanium and titanium alloys. Specifications (with amendments No. 1, 2)*. Moscow: Standard Publ.; 1985. (In Russian)
- [19] Korobov AI, Burov VA, Dmitriev KV, Rumyantseva OD. *Resonant acoustic spectroscopy of solids*. Moscow: Moscow State University; 2012. (In Russian)
- [20] State standard. *GOST 28840-90. Machines for testing materials in tension, compression and bending. General technical requirements*. Moscow: IPK Standard Publ.; 2004. (In Russian)
- [21] State standard. *GOST 22706-77. Metals. Method of tensile testing at temperatures from minus 100 to minus 269⁰C*. Moscow: IPK Standard Publ.; 2004. (In Russian)
- [22] Kurashkin KV, Mishakin VV. Investigation of the influence of material's structure on acoustic parameters. *Transactions of NSTU n.a. R.Y. Alexeev*. 2011;2(87): 190-198. (In Russian)

- [23] State standard. GOST 19807-91. *Titanium and wrought titanium alloys. Stamps (with change No. 1)*. Moscow: IPK Standard Publ.; 2001. (In Russian)
- [24] Zhang S, Rauniyar S, Shrestha S, Ward A, Chou K. An experimental study of tensile property variability in selective laser melting. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019;43: 26-35.
- [25] Birger IA, Mavlyutov RR. *Strength of materials*. Moscow: Nauka; 1986. (In Russian)
- [26] Panich AA, Skrylev AV, Dolya VK, Svirskaya SN, Dykina LA, Karyukov EV, Nagaenko AV. *Overview of perspective piezocomposites for application in acoustic and hydroacoustics*. In: Proceedings of XIV All-Russian Conference «Advanced Technologies of Hydroacoustics and Hydrophysics» GA-2018 Saint-Petersburg; 2018. p.470-473. (In Russian)