

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-3-386-393

УДК 620.178.5.05

## Исследование динамических свойств стальных деталей, получаемых методом 3D-печати

Даниил Павлович Елисеев<sup>1</sup>✉, Роман Дмитриевич Конаков<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация

<sup>1,2</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>1</sup> [Eliseev.dp@gmail.com](mailto:Eliseev.dp@gmail.com)✉, <http://orcid.org/0000-0001-8203-3401>

<sup>2</sup> [V100dPhant0m@yandex.ru](mailto:V100dPhant0m@yandex.ru), <http://orcid.org/0000-0003-1052-4150>

### Аннотация

**Предмет исследования.** При изготовлении деталей навигационных приборов сложной геометрической формы из металла перспективным направлением формообразования является применение аддитивных технологий. В процессе проектирования таких деталей применяется конечно-элементный анализ. Точность моделирования определяется корректностью задаваемых физических свойств используемых материалов. Свойства материалов, применяемых при 3D-печати, существенно отличаются от используемых при традиционной обработке. Основное внимание уделяется таким характеристикам, как модуль Юнга, коэффициент Пуассона, твердость и прочность. Для некоторых областей применений требуется знание динамических свойств. В работе предложены результаты исследования и сравнение демпфирующих свойств стальных деталей, изготовленных методом 3D-печати с послойным сплавлением в поперечном направлении; сплавлением в продольном направлении и методом классической обработки. Все детали имеют форму стержней постоянного сечения и обладают одинаковыми геометрическими размерами. **Метод.** Измерения проведены с использованием стенда TIRA TV 5220/LS-120. На свободном конце детали устанавливался пьезоэлектрический акселерометр. Испытания проводились в диапазоне частот 15–3500 Гц с ускорением 19,6 м/с<sup>2</sup> (2 g). На основании анализа выходного сигнала акселерометра выполнен расчет коэффициента демпфирования. Верификация полученных результатов проведена на основе сравнения с результатами моделирования конечно-элементным методом. **Основные результаты.** Коэффициенты демпфирования для деталей, полученных методом 3D-печати, с послойным сплавлением в поперечном и продольном направлениях составили величины 0,022 и 0,006 соответственно, для детали, полученной классическим способом, — 0,023. Различия коэффициента демпфирования при 3D-печати разными способами может быть объяснены более плотным сплавлением гранул порошка при печати одного слоя, чем между слоями. В этом случае формируется кристаллическая структура, обладающая большей жесткостью в плоскости печати, что ограничивает рассеивание энергии вибрации за счет внутреннего трения. Моделирование показало наличие расхождений экспериментальных и расчетных значений собственных частот напечатанных образцов. Учитывая, что значения собственных частот во многом определяются модулем Юнга, проведена параметрическая оптимизация его значения в расчетах по критерию совпадения расчетных и экспериментальных собственных частот. Получено, что величина модуля Юнга не соответствует значениям, определяемым в ходе испытаний на разрыв аналогичных образцов. Показано, что образцы, изготовленные методом 3D-печати, обладают разной вибрационной и статической жесткостью. Это не типично для металлов и должно учитываться при моделировании. **Практическая значимость.** Результаты исследования могут быть использованы при разработке имитационной модели деталей из стали, изготавливаемых методом 3D-печати, и при создании цифровых двойников навигационных приборов. Это позволит на ранних стадиях проектирования перспективных изделий оценить их стойкость к воздействиям вибраций и оптимизировать конструкцию по критерию минимизации напряжений.

### Ключевые слова

аддитивные технологии, вибрационное воздействие, конечно-элементное моделирование, коэффициент демпфирования, имитационное моделирование, цифровой двойник, вибрационная жесткость

**Ссылка для цитирования:** Елисеев Д.П., Конаков Р.Д. Исследование динамических свойств стальных деталей, получаемых методом 3D-печати // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 3. С. 386–393. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-3-386-393

© Елисеев Д.П., Конаков Р.Д., 2021

## The investigation of dynamic properties of 3D-printed steel parts

Daniil P. Eliseev<sup>1</sup>, Roman D. Konakov<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation

<sup>1,2</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>1</sup> Eliseev.dp@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-8203-3401>

<sup>2</sup> B100dPhant0m@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1052-4150>

### Abstract

Additive technologies are promising for manufacturing parts of metal navigation devices with complex shapes. Finite element analysis is used during the designing of such items. The modeling accuracy is determined by the correctness of the specified physical properties of materials. The properties of materials used in 3D printing significantly differ from the ones used in the traditional manufacturing. Researchers focus on such characteristics as Young's modulus, Poisson's ratio, hardness and strength. Meanwhile, some applications require dynamic properties. The paper presents the investigation and comparison of damping properties of three steel parts produced by different methods. The first part is manufactured by 3D printing with melting in the transverse direction, and the second part is done by melting in the longitudinal direction, while the third one is traditionally manufactured. The parts are shaft shaped with constant cross-section and have the same geometric dimensions. The TIRA TV 5220 / LS-120 stand is used. A piezoelectric accelerometer is installed at the loose end of the part. The tests are carried out in the frequency range from 15 to 3500 Hz and with an acceleration of 19.6 m/s<sup>2</sup> (2 g). The accelerometer output is used to calculate the damping coefficient. The results are verified by comparison with the finite element modeling results. The damping coefficients of transverse and longitudinal 3D-printed parts are 0.022 and 0.006, respectively. The damping coefficient of the traditional manufactured part is 0.023. The difference of 3D-printed parts damping coefficients can be explained by the denser fusion of powder granules when printing one layer than between layers. In this case, a crystal structure with greater rigidity in the printing plane is formed and it limits the dissipation of vibration energy due to internal friction. Finite element modeling shows mismatch between the experimental and calculated values of the printed parts natural frequencies. Considering that the values of natural frequencies are largely determined by Young's modulus, a parametric optimization of its value is carried out. It was found that the value of Young's modulus does not correspond to the values determined during tensile tests for similar samples. Thus, 3D-printed parts have different vibration and static stiffness. This is not typical for metals and should be taken into account in simulations. The research results can be used in the simulation model development of steel 3D-printed parts and in the design of digital twins for navigation devices. It allows one to estimate vibration resistance of promising products at the early stages of their design and to optimize the construction minimizing stress.

### Keywords

additive technologies, vibration exposure, finite element modeling, damping coefficient, simulation, digital twin, vibration stiffness

**For citation:** Eliseev D.P., Konakov R.D. The investigation of dynamic properties of 3D-printed steel parts. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 386–393 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-3-386-393

### Введение

Аддитивная технология (АТ) на сегодняшний день является современным и перспективным способом изготовления изделий сложной конфигурации, при котором происходит их послойное формирование (3D-печать) с использованием различных технологических методов и устройств [1]. Широкий спектр используемых в АТ материалов позволяет подобрать необходимый для решения таких задач [2], как увеличение прочности и уменьшение веса. Сфера применения АТ включает в себя медицину, ювелирное дело, аэрокосмическую, судостроительную и автомобильную промышленности<sup>1</sup>.

Внедрение 3D-печати в производство приборов навигации – актуальная задача, так как позволяет улучшать характеристики изделий и уменьшить массогабаритные характеристики [3]. Однако возможность применения АТ в точном приборостроении ограничена как неполным объемом характеристик используемых

материалов (коэффициент демпфирования, модуль Юнга, коэффициент Пуассона и др.), так и необходимостью их подтверждения экспериментальными методами. Знание вышеупомянутых характеристик позволит произвести моделирование в программах конечно-элементного анализа, для достижения оптимального соотношения массы конструкции к ее прочностным свойствам.

Настоящая работа является продолжением исследований авторов [4], в котором на примере изготовленных аддитивным способом деталей цилиндрической формы из стали 07X18H12M2 изучены характеристики ее обрабатываемости, шероховатости и прочности. Целью работы является, наряду с определением механических свойств деталей, уточнение коэффициента демпфирования материала для возможности моделирования вибрационных воздействий.

### Анализ возможности применения аддитивных технологий при проектировании приборов навигации

В настоящее время для изготовления механических деталей существуют различные АТ. Последовательность их изготовления для большинства техно-

<sup>1</sup> Блог компании Top 3D Shop, 3D-печать металлами — технологии и принтеры [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://habr.com/ru/company/top3dshop/blog/400731/> (дата обращения: 23.04.2021).

логий схожая и базируется на «послойном» принципе, который включает несколько этапов [5]:

- разработка трехмерной модели детали в системе автоматизированного проектирования;
- разбиение трехмерной модели на горизонтальные сечения (слои) с помощью специализированного программного обеспечения;
- печать детали слой за слоем снизу-вверх.

Первоначально АТ применялись только для создания презентационных моделей изделий. Однако с «развитием» материалов, используемых в АТ, область применения последних существенно увеличилась, при этом многие виды полимеров (фотополимер, полиамид, АБС-пластик, воск, гипс) и металлов (сталь, алюминий, титан) могут использоваться и в конструкциях приборов навигации [6].

*Фотополимеры* находятся в жидком состоянии, а под воздействием лазера или ультрафиолета застывают и меняют свои свойства. Детали могут иметь различные цвета, быть эластичными или жесткими, матовыми или прозрачными, термостойкими, биосовместимыми и обладать многими другими характеристиками. Благодаря большому разнообразию свойств фотополимеры используются в большом спектре отраслей, начиная от ювелирного производства и заканчивая авиакосмической промышленностью [6].

В навигационном приборостроении фотополимеры подходят для создания высокоточных прототипов моделей, а также для создания заливочных форм компаундов и полиуретановых смесей. Последние широко применяются в конструкциях гидроакустических преобразователей, к которым предъявляются высокие требования к качеству поверхности.

*Полиамид* в АТ используется в порошковой форме, спекаемой лазером. Полиамиды применяются для изготовления конечных изделий, функционального тестирования, обеспечивая стабильную производительность и повторяемость изделий.

В конструкциях приборов навигации широко используется блочный полиамид, из которого изготавливаются детали с относительно высокими прочностными свойствами в узлах, где требуется применение немагнитных материалов. К таким узлам относятся чувствительные элементы электростатического [7] и ядерно-магнитного гироскопов [8], а их изготовление при помощи АТ позволяет упростить конструкцию и сократить время производства.

*АБС-пластик*, как правило, используется в АТ в виде проволоки, которая нагревается, расплавляется и послойно формирует модель. При нагревании материала до температуры экструзии возможно выделение токсичных испарений, в связи с чем рекомендуется осуществлять печать в изолированных камерах с использованием специальных фильтров. В навигационном приборостроении АБС-пластик можно использовать с той же целью, что и полиамид.

*Воск* используется в АТ для изготовления мастер-моделей, которые покрываются специальными песчаными смесями. При нагреве воск выплавляется и вместо него в пустую песчаную форму заливается расплавленный металл. Восковые мастер-модели отли-

ваются высокими точностью, качеством поверхности и повторяемостью готовых изделий, что невозможно получить традиционным литьем.

Применение литья с использованием напечатанных восковых мастер-моделей позволяет повысить качество деталей приборов навигации, например, карданных колец. Последние являются основными деталями серийно изготавливаемых гироскопических приборов с чувствительными элементами в электростатическом и поплавковом подвесах.

*Гипс*. Материал в виде порошка, который легко окрашивается в любые цвета и используется в АТ для создания сувенирной продукции, моделей для презентаций и прочих макетов. При этом детали из гипса можно склеивать между собой без потери прочностных свойств, тем самым получая изделия гораздо большего размера, чем предусматривает камера построения.

В навигационном приборостроении гипс позволяет создавать модели аппаратуры, которые можно использовать для презентаций, а также в качестве учебных пособий для персонала и студентов [9].

*Металлы* для АТ выпускаются в виде мелкодисперсных сферических гранул с величиной зерна от 4 до 80 мкм, которые спекаются (или сплавляются) между собой при помощи лазера. Из металлических порошков изготавливаются функциональные детали и технические прототипы, штампы, прессы вставки, элементы пресс-форм для литья и другие изделия. Учитывая, что изготовленные по АТ металлические изделия не уступают по своим механическим свойствам образцам, полученным при традиционной обработке [4], рассматриваемый способ изготовления может быть внедрен в процесс изготовления деталей любых узлов навигационных приборов. Кроме того, в случае мелкосерийного и единичного производства АТ экономически эффективнее изготовления на станках с числовым программным управлением или при помощи литья [10]. Указанное преимущество повышает привлекательность рассматриваемой технологии при изготовлении изделий в рамках опытно-конструкторских и научно-исследовательских работ.

Одно из направлений внедрения АТ в процесс изготовления металлических деталей приборов навигации — конструкции вибро-ударозащитных устройств. Устройства характеризуются высоким требованием к сохранению углового положения амортизируемого гироскопического прибора относительно неподвижного основания, на которое устанавливается конструкция, в процессе и после соответствующих динамических воздействий. Указанное требование неизбежно ведет к разработке устройства со сложной кинематической схемой, прецизионными подшипниковыми и пружинными узлами, что значительно увеличивает массогабаритные характеристики. При решении задачи расширения эксплуатационных характеристик перспективных гироскопических датчиков, обладающих сравнительно небольшими размерами [11], увеличение габаритных размеров неприемлемо. В случае проектирования вибро-ударозащитных устройств с применением АТ становится возможным получение нетривиальных кинематических

схем в ограниченном объеме, но относительно простых в изготовлении.

Разработка любых устройств со сложной геометрической формой, как правило, сопровождается конечно-элементным моделированием. Основным показателем точности конечного результата — правильное определение физических свойств используемых материалов. При проектировании устройств, изготовление которых предполагается традиционным способом, такие свойства основываются на большом количестве справочных данных<sup>1</sup>. Однако согласно [12], свойства используемых в АТ материалов не всегда соответствуют свойствам «обычных» материалов. Для моделирования устройств, изготовленных при помощи АТ, необходимо проведение дополнительных исследований, направленных на определение свойств используемых материалов.

### Исследуемые образцы

Для проведения исследований выбрана сталь марки 07X18H12M2 (аналог стали 316) производства АО «ПОЛЕМА»<sup>2</sup>. Из данного материала изготовлены 12 образцов цилиндрической формы для испытаний на растяжение. Размеры образцов соответствуют требованиям ГОСТ<sup>3</sup>. Диаметр рабочей части 5 мм (рис. 1). Образцы изготовлены на установке SLM 260. Для изучения анизотропии свойств полученных образцов, шесть из них получены послойным сплавлением в поперечном направлении (далее по тексту — поперечная печать) и шесть — сплавлением в продольном направлении (далее по тексту — продольная печать) (рис. 2).

### Определение коэффициента демпфирования

Любая конструкция обладает бесконечным количеством собственных частот, при внешнем вибрационном воздействии на которые наблюдается увеличение амплитуды ускорения. Степень увеличения характеризуется коэффициентом демпфирования, обусловленным наличием внутреннего трения в материале [13]. Кроме того, коэффициент демпфирования характеризует добротность колебательной системы: чем он меньше, тем дольше будут длиться вынужденные колебания после ударного воздействия. Очевидно, что без исследования указанного коэффициента невозможно проведение адекватного конечно-элементного анализа конструкции вибро-ударозащитного устройства, изготовленного аддитивным способом из исследуемого материала.

Нормированной методики по определению коэффициента демпфирования не существует. В настоящей работе используется экспериментальный способ, основанный на проведении виброиспытаний и получении амплитудно-частотной характеристики исследуемых образцов. Анализ характеристики позволяет рассчи-

<sup>1</sup> Драгунов Ю.Г. Марочник сталей и сплавов. 4-е изд., переработ. и доп. Под общей ред. Ю.Г. Драгунова и А.С. Зубченко. 2014.

<sup>2</sup> [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.polema.net (дата обращения: 23.04.2021).

<sup>3</sup> ГОСТ 1497-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение. Введен 01.01.86. М.: Стандартинформ, 2008. 28 с.

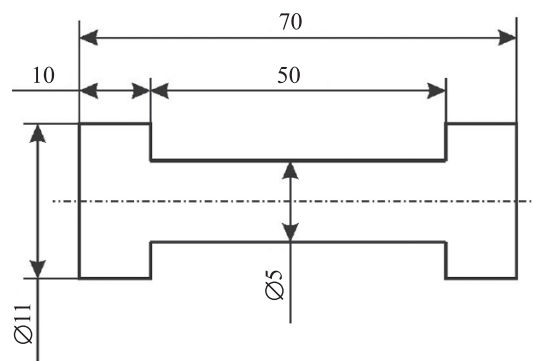


Рис. 1. Номинальные размеры изготовленных образцов  
Fig. 1. Dimensions of the specimens under investigation

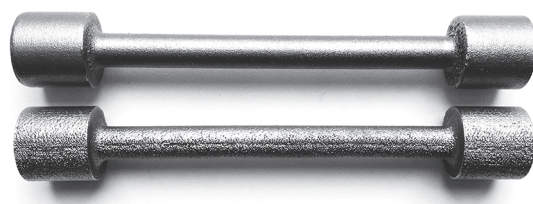


Рис. 2. Вид образцов, напечатанных поперечно (сверху) и продольно (снизу)

Fig. 2. A view of the transversely printed part (top) and the longitudinally printed part (bottom)

тать добротность  $Q$  и коэффициент демпфирования  $\zeta$  из выражений<sup>4</sup>

$$Q = f/\Delta f, \quad (1)$$

$$\zeta = 1/(2Q), \quad (2)$$

где  $f$  — резонансная частота;  $\Delta f$  — ширина резонансной полосы частот, при которых амплитуда колебаний уменьшается до  $2^{-0,5}$  своего значения при резонансе.

Вибрационные испытания проведены на стенде (рис. 3). Образец 1 крепился к рабочему столу 2 вибростенда при помощи оснастки 3. Контрольный акселерометр 4 крепился к столу вибростенда, а измерительный 5 — непосредственно к образцу. В ходе проведения испытаний частота вибрации изменялась от 15 до 3500 Гц. При этом значение амплитуды вибрационного ускорения задавалось равным  $19,6 \text{ м/с}^2$  (2 g). Изменение частоты осуществлялось в прямом и обратном направлениях для обнаружения нелинейных эффектов в исследуемой системе «стенд-образец», а вибрационные воздействия — в плоскости, перпендикулярной основанию. Для получения искомой амплитудно-частотной характеристики оценивался выходной сигнал акселерометра 5.

Испытаниям подвергались два образца, напечатанные поперечно и продольно.

Кроме того, для дальнейшей верификации полученных экспериментальных результатов, испытания также

<sup>4</sup> Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). М.: Машиностроение, 1979. Т. 2. Колебания нелинейных механических систем / Под ред. И.И. Блехмана. 1979. 351 с.

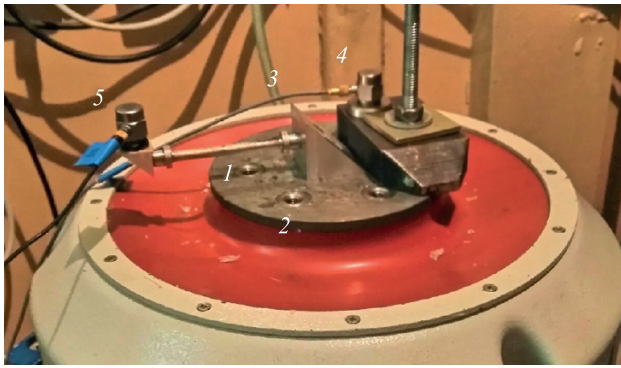


Рис. 3. Схема установки исследуемых образцов на вибростенд

Fig. 3. Setting on vibration test machine

проведены на образцах, изготовленных традиционным способом из стали 12Х18Н9Т, широко применяемой в приборостроении, и характеристики которой хорошо изучены<sup>1</sup>. На рис. 4 показаны зависимости ускорения  $A$ , полученные в ходе испытаний трех образцов с изменением частоты в прямом направлении, а также

относительная разность  $Da$  ускорений, полученных в прямом  $A$  и обратном  $A_{об}$  направлениях, и определенная из выражения:

$$Da = 1 - |A - A_{об}|/A. \quad (3)$$

Учитывая, что в ходе виброиспытаний значения ускорений  $A$  и  $A_{об}$  не могут иметь нулевые значения, разность  $Da$  равна единице, в случае совпадения обоих сигналов, стремится к нулю, в случае их различия на 100 %  $A = 2A_{об}$ , и имеет отрицательное значение, в случае различия более указанного значения  $A_{об} > 2A$ . Используемое представление является информативным для анализа зависимостей в логарифмическом масштабе. Представленные графики разности  $Da$  свидетельствуют о хорошем совпадении полученных зависимостей ускорения  $A$  и  $A_{об}$ , а также об отсутствии нелинейных эффектов в системе «стенд-образец»<sup>2</sup>.

Кривые ускорения  $A$  демонстрируют наличие трех резонансов в исследуемом диапазоне частот, для изучения которых выполнено конечно-элементное моделирование в среде CREO (рис. 5) с подтверждением точности полученных результатов анализом полиномиальной сходимости (рис. 6).

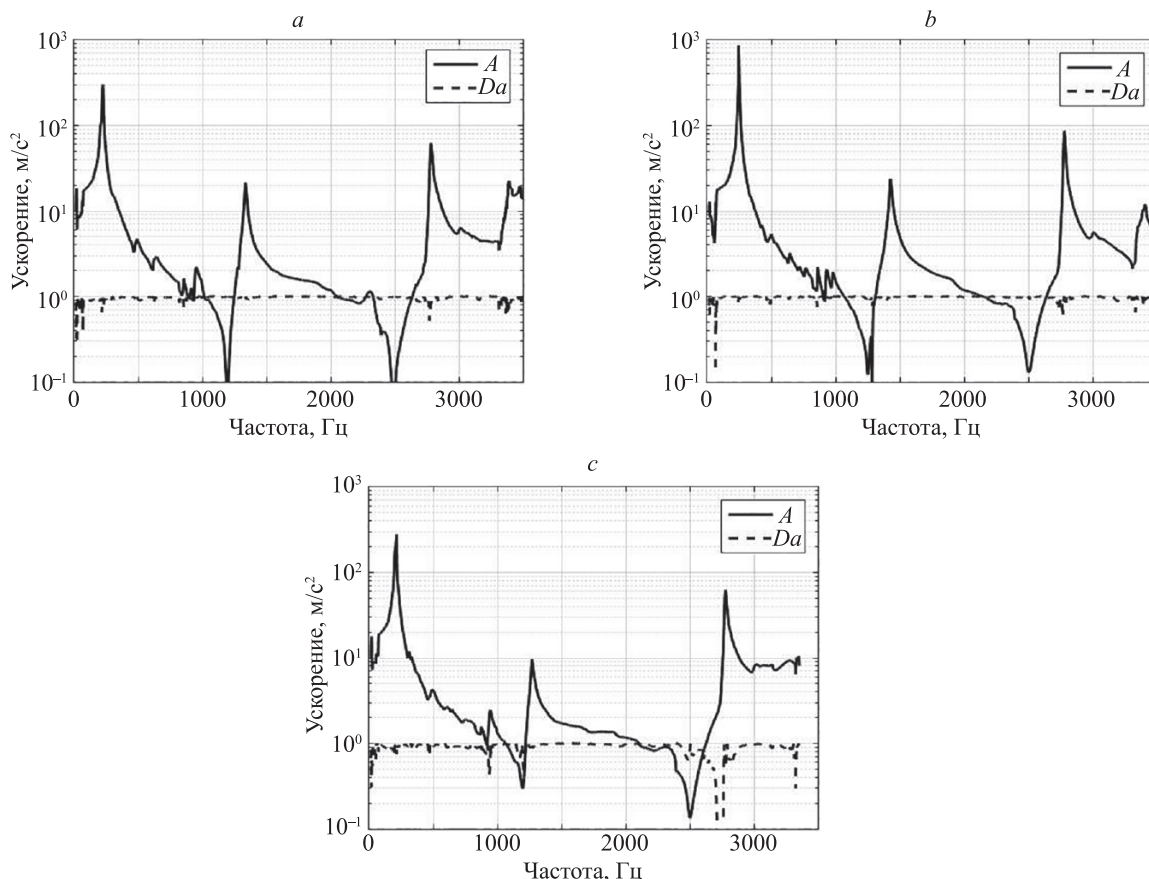


Рис. 4. Результаты виброиспытаний образца, напечатанного: поперечно (а), продольно (b) и из стали 12Х18Н9Т (c)

Fig. 4. Vibration test results for the samples printed transversely (a), longitudinally (b) and made of steel 12Х18Н9Т (c)

<sup>1</sup> Драгунов Ю.Г. Марочник сталей и сплавов. 4-е изд., переработ. и доп. Под общей ред. Ю.Г. Драгунова и А.С. Зубченко. 2014.

<sup>2</sup> Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). М.: Машиностроение, 1979. Т. 2. Колебания нелинейных механических систем / Под ред. И.И. Блехмана. 1979. 351 с.

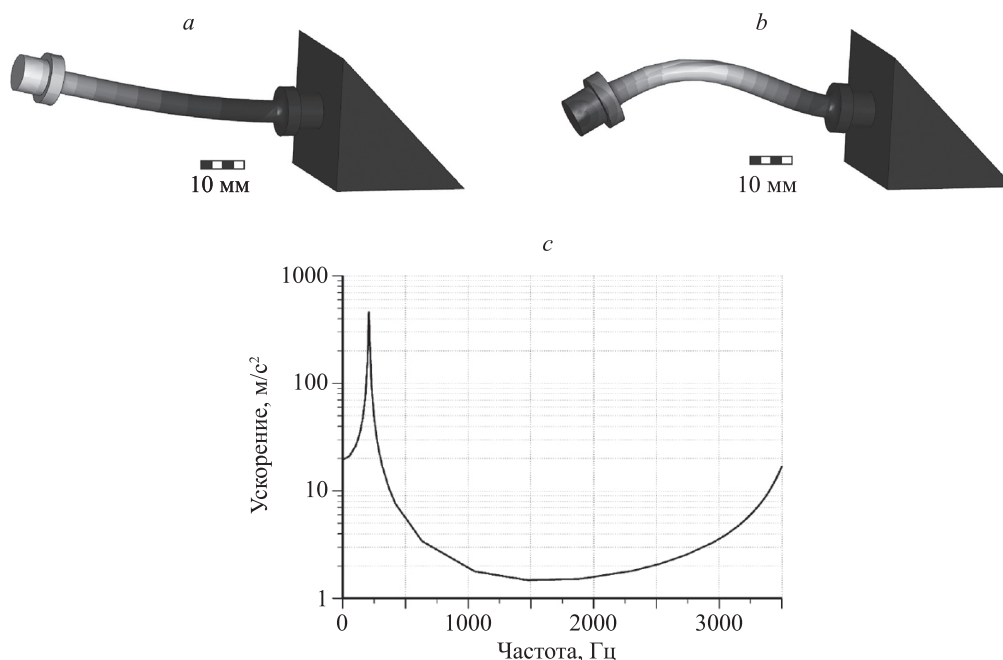


Рис. 5. Результаты конечно-элементного моделирования: форма собственных колебаний на частотах 210 Гц (а) и 3600 Гц (б); максимальные ускорения образца при воздействии вибрации с амплитудой 19,6 м/с<sup>2</sup> (2 г) (с)

Fig. 5. Results of finite element modeling: natural vibrations mode at a frequency of 210 Hz (a); natural vibrations mode at a frequency of 3600 Hz (b); maximum acceleration of the sample under vibration influence with an amplitude of 19.6 m/s<sup>2</sup> (2 g) (c)

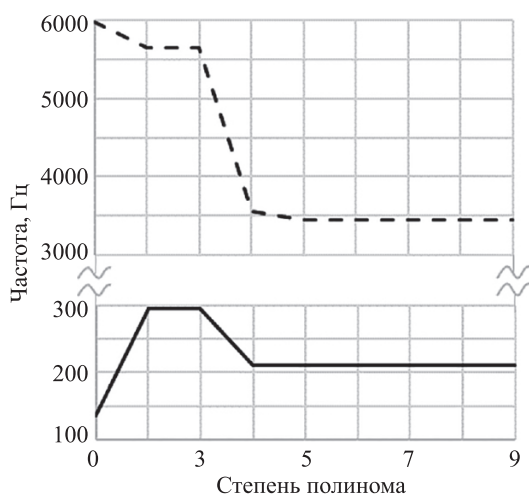


Рис. 6. Анализ полиномиальной сходимости частот первой (снизу) и второй (сверху) форм собственных колебаний

Fig. 6. Analysis of polynomial frequency convergence of the first (bottom) and the second (top) modes of natural vibrations

Согласно результатам моделирования, исследуемые образцы не имеют собственных частот в диапазоне от 210,3 до 3444,4 Гц. Таким образом, полученные резонансные явления на частотах  $1349,5 \pm 77,5$  Гц и  $2780,5 \pm 2,5$  Гц вызваны собственными резонансами стенда, и их дальнейший анализ в рамках настоящей работы не представляет интерес.

Используя выражения (1)–(3) для резонансных пиков на частоте  $230,3 \pm 16,6$  Гц по графикам ускорения  $A$  на рис. 4, определен коэффициент демпфирования (табл. 1).

Коэффициент демпфирования для образца, изготовленного классическим способом, отличается от известного значения, использованного при моделировании не более чем на 15 %, что верифицирует проведенное исследование и позволяет утверждать о корректности полученных значений.

По приведенным данным видно, что при изготовлении аддитивным способом наблюдается существенная анизотропия коэффициента демпфирования (различие по направлениям более чем 74 %), которая, по всей видимости, объясняется более плотным сплавлением гранул порошка при печати одного слоя, чем между слоями. Таким образом, формируется кристаллическая решетка, обладающая большей жесткостью в плоскости печати, что ограничивает перемещение атомов друг относительно друга и рассеивание энергии вибрации за счет внутреннего трения. Представленное объяснение согласуется с результатом определения прочностных свойств аналогичных образцов [4], согласно которому образцы, напечатанные поперечно, обладают большим пределом прочности, чем продольно напечатанные.

#### Уточнение модуля Юнга

Значение первой собственной частоты образцов, напечатанных продольно и поперечно, отличается от значения, полученного конечно-элементным моделированием (рис. 5) на 18 % и 8 % соответственно. Аналогичное значение для изготовленного классическими технологиями образца составляет менее 2 %, что свидетельствует о необходимости корректировки заданных граничных условий при моделировании образцов, полученных аддитивным способом.

Таблица 1. Результаты виброиспытаний

Table 1. Vibration test results

Способ изготовления образца	Параметр		
	Частота, Гц	Максимальное значение ускорения, м/с <sup>2</sup> (g)	Коэффициент демпфирования
Классические технологии	213	279,3 (28,5)	0,023
Продольная печать	246	864,4 (88,2)	0,006
Поперечная печать	225	302,8 (30,9)	0,022
Моделирование	210	289,1 (29,5)	0,021

Проведение конечно-элементного анализа собственных частот в любом программном продукте описывается тремя операциями: создание трехмерной модели исследуемой конструкции, ограничение степеней свободы, определение свойств материала (плотность, модуль Юнга, коэффициент Пуассона). Совпадение с точностью менее 1,7 % значения собственной частоты образца, изготовленного традиционным способом, с расчетным демонстрирует адекватность трехмерной модели и правильность ограничения степеней свободы. Значение коэффициента Пуассона металлов изменяется менее чем на 0,03 (10 %) и практически не влияет на значение собственных частот конструкции. Плотность материалов, определенная взвешиванием образцов, составила 7700 кг/м<sup>3</sup> и учтена при моделировании. Единственным параметром, влияющим на значения собственных частот, является модуль Юнга.

Проведена параметрическая оптимизация значения модуля Юнга материала исследуемых образцов по критерию совпадения расчетной собственной частоты с экспериментальной (табл. 2).

В результате оптимизации получено существенное различие значений модуля Юнга при вибрационных испытаниях со значениями, определенными в ходе испытаний на разрыв [4] (статический метод) для аналогичных образцов. Видно, что исследуемый матери-

ал обладает различием вибрационной и статической жесткостей, что нетипично для металлов, и должно учитываться при проведении соответствующего конечно-элементного моделирования.

### Заключение

В работе исследованы механические свойства стали, используемой при аддитивном способе изготовления. Получены значения коэффициента демпфирования, и обнаружено существенное различие (более чем на 74 %) для образцов, напечатанных продольно и поперечно. Это может быть объяснено более плотным сплавлением гранул порошка при печати одного слоя, чем между слоями.

Моделирование испытаний конечно-элементным способом и верификация полученных результатов показали рассогласование экспериментальных и расчетных значений собственных частот напечатанных образцов. Учитывая, что ключевым параметром, влияющим на значения собственных частот, является модуль Юнга, выполнена параметрическая оптимизация его значения по критерию совпадения расчетной собственной частоты с экспериментальной. В результате оптимизации выявлено существенное различие значений модуля Юнга с величинами, определенными в ходе испытаний на разрыв аналогичных образцов. Данный результат показывает, что исследуемый материал обладает различием вибрационной и статической жесткостей, что нетипично для металлов, и должно учитываться при конечно-элементном моделировании.

Развитие настоящего исследования направлено на разработку имитационной модели стали, используемой для 3D-печати, и построение цифрового двойника навигационных приборов. Это позволит еще на ранних стадиях проектирования перспективных изделий оценить их стойкость к воздействиям вибраций и оптимизировать конструкцию по критерию минимизации напряжений.

Таблица 2. Значения модуля Юнга при различных методах измерения, ГПа

Table 2. Young's modulus values for different measurement methods, GPa

Способ изготовления образца	Метод определения	
	статический [4]	вибрационный
Продольная печать	176,1	215,87
Поперечная печать	181,3	289,92

<sup>1</sup> Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). М.: Машиностроение, 1979. Т. 2. Колебания нелинейных механических систем / Под ред. И.И. Блехмана. 1979. 351 с.

## Литература

1. Юльметова О.С., Щербак А.Г., Челпанов И.Б. Специальные технологии изготовления прецизионных узлов и элементов гироскопических приборов: учебное пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2017. 131 с.
2. Чехович А. 5 особенностей металлических порошков для 3D-печати [Электронный ресурс]. URL: <https://blog.iqb.ru/metals-for-3d-printing> (дата обращения: 23.04.2021).
3. Тит М.А., Епифанов Д.О., Беляев Я.В. Опыт применения аддитивных технологий в проектировании и производстве изделий АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор» // Навигация и управление движением: материалы XXII конференции молодых ученых с международным участием. СПб.: ГИЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2020. С. 69–71.
4. Eliseev D.P., Malashenkov K.S. Quality and mechanical properties of austenitic steel samples fabricated by an additive technology // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020. V. 2020. N 11. P. 1308–1313. doi: 10.1134/S0036029520110063
5. Валетов В.А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы): учебное пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2015. 58 с.
6. Зленко М.А., Попович А.А., Мутьлина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении: учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2013. 222 с.
7. Пешехонов В.Г. Создатель прецизионного гироскопа // *Гироскопия и навигация*. 2020. Т. 28. № 1. С. 121–128. doi: 10.17285/0869-7035.0021
8. Безмен Г.В., Шевченко А.Н., Костин П.Н., Берзейтис А.Н., Безмен В.С., Петров В.И. Система двухчастотной генерации в схеме датчика угловой скорости // *Гироскопия и навигация*. 2020. Т. 28. № 1. С. 19–30. doi: 10.17285/0869-7035.0020
9. Евстифеев М.И., Елисеев Д.П. Методика обучения основам конструирования гироскопических приборов // *Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации: сборник трудов XXVI международной научно-технической конференции*. М., 2017. С. 120–121.
10. Глухов В.В., Туричин Г.А. Экономическая эффективность технологии прямого лазерного выращивания в промышленности // *Теоретические основы формирования промышленной политики*. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2015. С. 176–190.
11. Пешехонов В.Г. Перспективы развития гироскопии // *Гироскопия и навигация*. 2020. Т. 28. № 2. С. 3–10. doi: 10.17285/0869-7035.0028
12. Lewandowski J.J., Seif M. Metal additive manufacturing: A review of mechanical properties // *Annual Review of Materials Research*. 2016. V. 46. P. 151–186. doi: 10.1146/annurev-matsci-070115-032024
13. Берштам Я.Н., Евстифеев М.И., Елисеев Д.П. Исследование сплавов с высоким внутренним демпфированием в конструкции микромеханического гироскопа // *Материалы XXIX конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова*. 2014. С. 65–72.

## Авторы

**Елисеев Даниил Павлович** — кандидат технических наук, начальник сектора, АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация; доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 54794137900](https://orcid.org/0000-0001-8203-3401), <http://orcid.org/0000-0001-8203-3401>, [Eliseev.dp@gmail.com](mailto:Eliseev.dp@gmail.com)  
**Коначков Роман Дмитриевич** — инженер, АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация; студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [http://orcid.org/0000-0003-1052-4150](https://orcid.org/0000-0003-1052-4150), [Bl00dPhant0m@yandex.ru](mailto:Bl00dPhant0m@yandex.ru)

Статья поступила в редакцию 02.02.2021  
 Одобрена после рецензирования 29.03.2021  
 Принята к печати 18.05.2021

## References

1. Iulmetova O.S., Shcherbak A.G., Chelpanov I.B. *Special Manufacturing Techniques for Precision Units and Elements of gyroscopic Devices*. Tutorial. St. Petersburg, ITMO University, 2017, 131 p. (in Russian)
2. Chekhovich A. *5 characteristics of metal powders for 3D printing*. Available at: <https://blog.iqb.ru/metals-for-3d-printing> (accessed: 23.04.2021). (in Russian)
3. Tit M.A., Epifanov D.O., Belyaev Ya.V. The experience of additive technology application in design and manufacturing devices of CSRI «Electropribor». *Proc. 22<sup>st</sup> Conference of Young Scientists “Navigation and Motion Control” (with international participants)*, St. Petersburg, Concern CSRI Elektropribor, 2020, pp. 69–71. (in Russian)
4. Eliseev D.P., Malashenkov K.S. Quality and mechanical properties of austenitic steel samples fabricated by an additive technology. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2020, vol. 2020, no. 11, pp. 1308–1313. doi: 10.1134/S0036029520110063
5. Valetov V.A. *Additive Technologies (State and Prospects)*. Tutorial. St. Petersburg, ITMO University, 2015, 58 p. (in Russian)
6. Zlenko M.A., Popovich A.A., Mutylina I.N. *Additive Technologies in Mechanical Engineering*. St. Petersburg, SPbPU Publ., 2013, 222 p. (in Russian).
7. Peshekhonov V.G. The author of precision gyroscope. *Gyroscopy and Navigation*, 2020, vol. 11, no. 2, pp. 188–192. doi: 10.1134/S2075108720020042
8. Bezmen G.V., Shevchenko A.N., Kostin P.N., Berzeitis A.N., Bezmen V.S., Petrov V.I. A two-frequency spin oscillation system for a quantum angular rate sensor. *Gyroscopy and Navigation*, 2020, vol. 11, no. 2, pp. 115–123. doi: 10.1134/S2075108720020030
9. Evstifeev M.I., Eliseev D.P. Teaching method of gyroscopic devices design basics. *Modern technologies in control, automation and information processing: Proc. of the 26<sup>th</sup> International Scientific and Technical Conference*, Moscow, 2017, pp. 120–121. (in Russian)
10. Glukhov V.V., Turichin G.A. Economic efficiency of technology of direct laser growing in the industry. *Theoretical Foundations of Industrial Policy Formation*. St. Petersburg, SPbPU Publ., 2015, pp. 176–190. (in Russian)
11. Peshekhonov V.G. The outlook for gyroscopy. *Gyroscopy and Navigation*, 2020, vol. 11, no. 3, pp. 193–197. doi: 10.1134/S2075108720030062
12. Lewandowski J.J., Seif M. Metal additive manufacturing: A review of mechanical properties. *Annual Review of Materials Research*, 2016, vol. 46, pp. 151–186. doi: 10.1146/annurev-matsci-070115-032024
13. Bershtam I.A., Evstifeev M.I., Eliseev D.P. Studying the alloys with high internal damping in the structure of MEMS gyro. *Proc. of the 29<sup>th</sup> Conference in Memory of N.N. Ostryakov*, 2014, pp. 65–72. (in Russian)

## Authors

**Daniil P. Eliseev** — PhD, Head of Section, Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation; Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 54794137900](https://orcid.org/0000-0001-8203-3401), <http://orcid.org/0000-0001-8203-3401>, [Eliseev.dp@gmail.com](mailto:Eliseev.dp@gmail.com)

**Roman D. Konakov** — Engineer, Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation; Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [http://orcid.org/0000-0003-1052-4150](https://orcid.org/0000-0003-1052-4150), [Bl00dPhant0m@yandex.ru](mailto:Bl00dPhant0m@yandex.ru)

Received 02.02.2021  
 Approved after reviewing 29.03.2021  
 Accepted 18.05.2021



Работа доступна по лицензии  
 Creative Commons  
 «Attribution-NonCommercial»