

Оценка целесообразности применения аддитивных технологий в изделиях аэрокосмической техники

© Е.С. Шемонаева, А.В. Гончаров, В.Д. Андреев

Московский авиационный институт, Москва, 125993, Россия

Проанализированы вопросы целесообразности применения аддитивных технологий для изготовления деталей сложной формы в изделиях аэрокосмической техники. По результатам конструктивного анализа детали определены направления топологической оптимизации и проведена оптимизация ее конструкции. Для подтверждения адекватности оптимизации конструкции выполнены статический и динамический прочностные расчеты в программном комплексе Siemens NX. Рассмотрены технологии изготовления детали путем 3D-печати металлами и традиционного фрезерования на станке с числовым программным управлением. Процессы изготовления смоделированы в различных программных комплексах в целях получения исходных данных для проведения экономического расчета. Для оценки целесообразности применения технологии печати металлом выполнен технико-экономический анализ, по результатам которого установлено влияние программы выпуска, технологических режимов обработки и стоимости материалов на себестоимость изделия.

Ключевые слова: топологическая оптимизация, аддитивные технологии, фрезерование, лазерное спекание, экономическая эффективность

Введение. При изготовлении изделий ракетно-космической техники часто требуются несущие детали сложной формы, такие как кронштейны, узлы навески и др. Как правило, в целях повышения ресурса и надежности их делают монолитными, для чего используют в качестве заготовок отливки, поковки и штамповки, обрабатываемые фрезерованием. Такой производственный процесс отличается низким коэффициентом использования материала. Области применения аддитивных технологий для печати металлических деталей различных изделий все более расширяются, заменяя процессы литья [1], уменьшая долю фрезерования при обработке, сокращая количество отходов и время обработки [2]. Аддитивные технологии внедряются в различных отраслях промышленности: строительстве [3], автомобилестроении [4], авиации [2], производстве космических аппаратов [5, 6] и многих других.

Однако внедрение аддитивных технологий печати металлом на промышленных предприятиях и их применение наряду с традиционными технологическими процессами влекут за собой ряд сложностей, обусловленных требованиями к производимому продукту, организацией управления процессами, данными, интеллектуальной собственностью, а также контролем качества и планированием производственных ресурсов предприятий [7–9].

Кроме того, использование аддитивных технологий невозможно без топологической оптимизации как уже имеющейся, так и создаваемой конструкции [10]. Топологическая оптимизация позволяет уменьшить массу имеющейся или проектируемой конструкции [11] и даже заменить сложные сборные конструкции монолитными меньшей массы [12]. Однако для выполнения топологической оптимизации требуется исполнитель с высокой квалификацией в области проектно-конструкторских работ, так как получаемая конструкция должна иметь пространственную форму, которую можно было бы изготовить с минимальным числом поддержек для печати без отклонений от требуемой геометрии [13].

Таким образом, применение аддитивных технологий в отечественной аэрокосмической промышленности является перспективным направлением, но требуется проведение всестороннего анализа и обоснования [14].

Постановка цели и определение задач работы. Рассмотрим целесообразность применения аддитивных технологий при изготовлении деталей сложной формы для изделий аэрокосмической техники. Проведем анализ на примере детали типа «кронштейн» габаритными размерами 125×97 мм, которая служит для навески габаритного агрегата летательного аппарата. В полете она испытывает радиальную нагрузку (1600 ± 100) Н в области центрального отверстия диаметром 35 мм и находится при эксплуатации в широком температурном диапазоне — от больших отрицательных до больших положительных температур. Исходная масса кронштейна традиционной конструкции 1300 г.

Применение аддитивных технологий позволяет повысить коэффициент использования материала практически до 0,98. Однако стоимость материала для 3D-печати металлами сегодня крайне высока. В связи с этим необходим переход от традиционных конструкций с простыми геометрическими формами в виде прямых и дуг к сложным пространственным конструкциям, имеющим сетчатую структуру. Кроме того, такой переход позволит снизить массу, что в итоге может компенсировать повышение стоимости материалов.

Цель работы — разработка конструкции кронштейна с минимальной массой и заданными прочностными характеристиками, изготавливаемого с применением аддитивных технологий печати металлами, и оценка экономической целесообразности применения выбранной технологии. Для обеспечения этого необходимо решить следующие задачи:

- 1) спроектировать кронштейн с заданными геометрическими и прочностными характеристиками, подтвержденными расчетом;
- 2) провести топологическую оптимизацию кронштейна, выбрав для этого модуль Topology Optimization программного комплекса Siemens NX;

3) смоделировать технологию аддитивного производства оптимизированного кронштейна из металла и традиционную технологию обработки заготовок фрезерованием;

4) выполнить технико-экономический анализ и обосновать предложенные решения.

Прочностной анализ исходной конструкции. Монолитный кронштейн имеет простую форму и малые размеры, его несложно изготовить с применением традиционных методов обработки. Поскольку этот элемент предназначен для крепежа двигателя, он является высоконагруженным, работает в сложных условиях и должен выдерживать большое число циклов нагружения в процессе эксплуатации. Для изготовления конструкции выбран материал ВНС-5.

Для подтверждения работоспособности спроектированной базовой конструкции кронштейна в заданных условиях проведен прочностной анализ. Рассмотрено четыре расчетных случая:

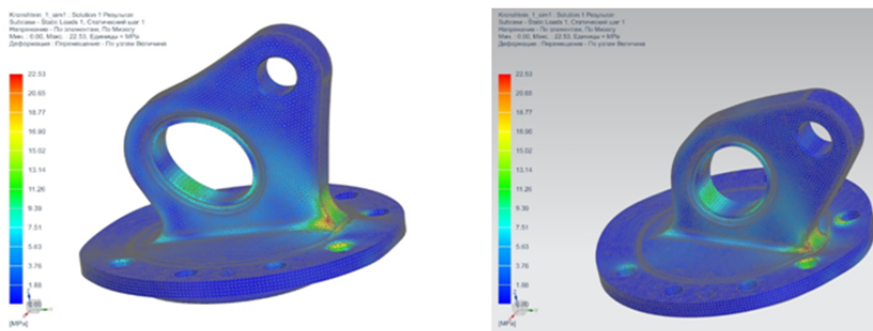
- случаи 1, 2 — статические нагрузки при наличии отверстия диаметром 35 мм для соединения с амортизатором в полете, нагрузка 1700 Н под углом 30° при нагружении вверх–вниз;

- случай 3 — статические нагрузки при наличии отверстия диаметром 16 мм под такелажные устройства на Земле при навеске агрегата, нагрузка 1000 Н под углом 45° , нагружение вверх;

- случай 4 — динамические нагрузки в полете, например при случайных возмущениях ветра, при наличии отверстия диаметром 35 мм для соединения с амортизатором в полете, нагрузка (1600 ± 100) Н под углом 30° , нагружение вверх–вниз.

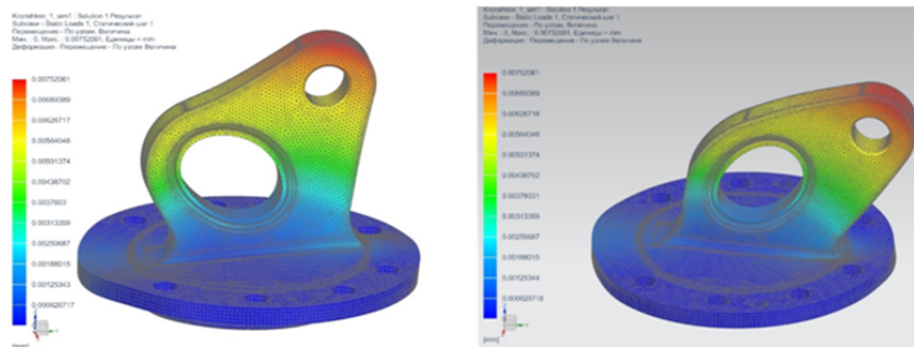
Жесткая заделка выполнялась вокруг отверстий диаметром 10 мм и 8 мм на фланце кронштейна, сетку при расчете задавали с шагом 1,5 мм.

Прочностной анализ показал, что напряжения и деформации не превышают допустимых значений, а следовательно, конструкция кронштейна удовлетворяет требованиям эксплуатации. Результаты расчета проиллюстрированы на рис. 1–3.



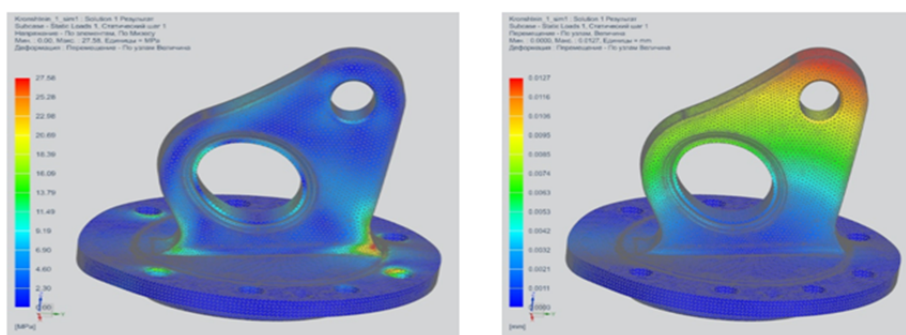
a

Рис. 1 (начало). Результаты статического анализа (расчетные случаи 1, 2):
a — распределение напряжений (максимальное 22,53 МПа)



б

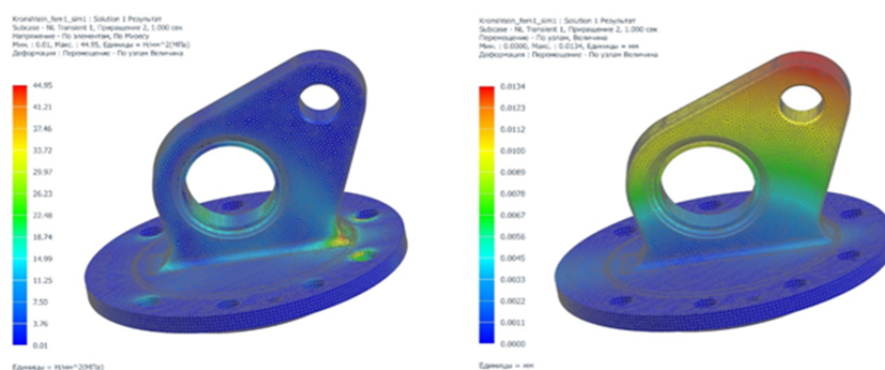
Рис. 1 (окончание). Результаты статического анализа (расчетные случаи 1, 2):
б — распределение деформаций (максимальная 0,008 мм)



а

б

Рис. 2. Результаты статического анализа (расчетный случай 3):
а — распределение напряжений (максимальное 27,58 МПа);
б — распределение деформаций (максимальная 0,0127 мм)



а

б

Рис. 3. Результаты динамического анализа (расчетный случай 4):
а — распределение напряжений (максимальное 45 МПа);
б — распределение деформаций (максимальная 0,0134 мм)

Топологическая оптимизация. На первом этапе для оптимизации необходимо определить материал конструкции, который будет использован для печати и свойства которого будут заданы при моделировании. Для печати металлом выбран материал EOS SS PH1, по заявленным производителем техническим характеристикам удовлетворяющий заданным условиям.

Топологическая оптимизация проводилась в несколько итераций с помощью модуля Topology Optimization программного комплекса Siemens NX. При подборе вариантов желаемую массу конструкции задавали, а в качестве граничных условий были приняты обеспечение требуемой прочности и сохранение посадочных мест для навески агрегата.

Для того чтобы определить оптимальное сочетание по совокупности параметров масса — прочность — сохранение посадочных мест, расчеты выполнялись для конструкций, масса которых была на 10...60 % меньше исходной с шагом 1 %.

В результате установлено, что при снижении массы более чем на 24 % от исходной цилиндрическое посадочное место на нижней поверхности фланца чрезмерно утоняется, а затем часть отверстий под крепеж вообще исключаются из конструкции, что противоречит исходным условиям. При снижении массы более чем на 60 % конструкция перестает удовлетворять условиям прочности.

Результаты расчета для оптимального снижения массы кронштейна на 24 % приведены на рис. 4. Конструкция кронштейна массой, уменьшенной на 60 %, показана на рис. 5.

Следует отметить, что снижение массы на 60 % является крайне желательным, однако для этого потребуется внести конструктивные изменения в ответную часть навески в агрегате, а, возможно, и заново спроектировать его в целом.

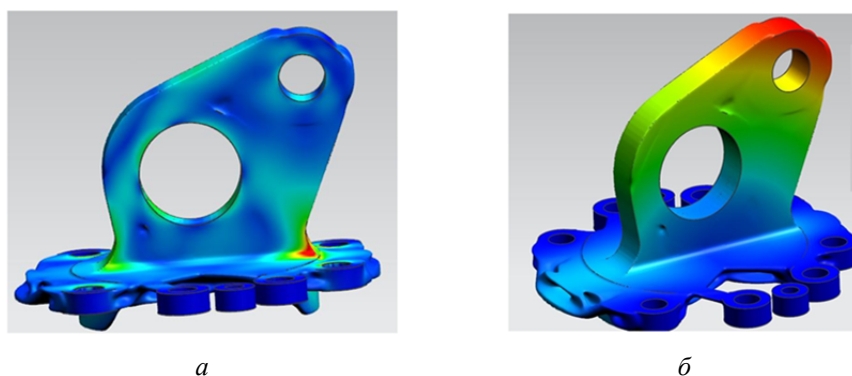


Рис. 4. Результаты топологической оптимизации с прочностным анализом для конструкции с массой, уменьшенной на 24 %:

а — распределение напряжений (максимальное 24,27 МПа); *б* — распределение деформаций (максимальная 0,0121 мм)

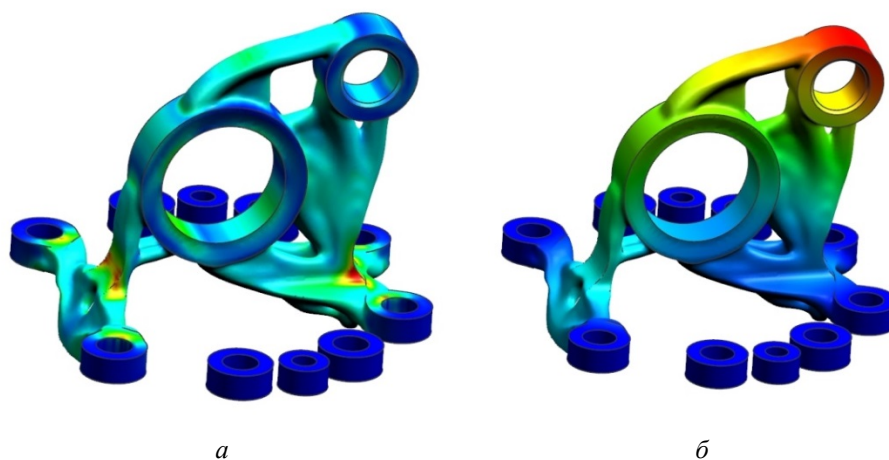


Рис. 5. Результаты топологической оптимизации с прочностным анализом для конструкции с массой, уменьшенной на 60 %:
a — распределение напряжений (максимальное 36,7 МПа); *б* — распределение деформаций (максимальная 0,0216 мм)

С учетом результатов расчетов выбираем оптимизированную конструкцию кронштейна достаточно простой геометрической формы с массой, сниженной на 24 % (составляет 950 г) и сохраненными посадочными местами. Таким образом, имеется возможность его изготовления не только с применением аддитивных технологий, но и традиционным методом обработки заготовок — фрезерованием.

Описание технологий производства кронштейна. Рассмотрим варианты изготовления конструкции оптимизированного кронштейна. Моделирование с помощью модуля CAM в Siemens NX процесса изготовления этого кронштейна по традиционной технологии, включающей фрезерование, показало, что при использовании пятиосевого станка с числовым программным управлением кронштейн со всеми переустановками можно изготовить за 7 ч. Однако коэффициент использования материала при этом составит 0,12.

При расчете режимов 3D-печати с учетом такой характеристики материала SS PH1, как скорость печати одного слоя, установлено, что время изготовления кронштейна составит 19 ч для слоя толщиной 20 мкм и 10 ч для слоя толщиной 40 мкм. После печати необходимо доработать деталь фрезерованием, чтобы устранить поддержки.

Параметры, полученные в результате моделирования процессов фрезерования и 3D-печати, приведены в табл. 1.

На основании анализа этих данных сделаны следующие выводы:

- при изготовлении кронштейна методом 3D-печати металлом расход материала снижается в 10 раз по сравнению с этим показателем при фрезеровании, т. е. коэффициент использования материала близок к единице;

- продолжительность изготовления методом 3D-печати металлом выше в 2,5 раза, чем при фрезеровании, без учета времени спекания и механической обработки для удаления поддержек;
- количество потребляемого электричества в 20 раз меньше, чем для процесса фрезерования, т. е. энергопотребление 3D-печати металлом является ресурсосберегающей технологией.

Таблица 1

Результаты моделирования процессов изготовления детали

Характеристика	Фрезерование	3D-печать металлом
Вид оборудования	Фрезерный центр Hermler C250	SLS-принтер EOS M290
Марка материала	BHC-5	EOS SS PH1
Расход материала на деталь, кг	10	0,961
Время обработки, ч	7	19
Энергопотребление, кВт/ч	20	0,4
Число деталей в партии	10	10
Недостатки процесса	Износ инструмента	Спекание по окончании процесса; механическая обработка для удаления поддержек; необходимость проведения механических испытаний

Оценка экономической эффективности. Для того чтобы оценить целесообразность применения технологии 3D-печати металлом, было выполнено краткое технико-экономическое обоснование двух технологий: фрезерования и 3D-печати металлом. В условиях ограниченных исходных данных расчет проводился по технологической себестоимости детали, которая складывалась из стоимости затраченного материала, энергопотребления, амортизации оборудования и затрат на оплату труда оператора. Принятые для расчета исходные данные и результаты расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные для экономического расчета

Экономический параметр	Фрезерование	3D-печать металлом
Стоимость материала, руб./кг	450	32 000
Стоимость оборудования, млн руб.	28,4	37,44
Заработная плата оператора, руб./мес.	80 000	80 000
Принятый срок окупаемости, год	5	5
Технологическая себестоимость, руб.	12 227	55 073

При сроке окупаемости оборудования 5 лет в результате расчетов установлено, что стоимость детали из партии в 10 шт., изготовленной фрезерованием, составит примерно 12 тыс. руб., а стоимость напечатанной детали — 55 тыс. руб. Это обусловлено тем, что в настоящее время стоимость материала для печати крайне высока — около 32 тыс. руб. за 1 кг. Кроме того, высокую стоимость имеет и принтер для 3D-печати металлом.

Проведен также расчет стоимости изготовления кронштейна массой 60 % от исходной, при которой невозможно применять фрезерование. Расход материала при печати такой детали уменьшится, себестоимость изготовления станет в 1,5 раза ниже и составит 27 тыс. руб.

Если предположить, что существует материал, скорость печати которого можно увеличить в 20 раз, то себестоимость печати металлом снизится до 16,5 тыс. руб. для партии в 10 шт. Однако характеристики существующего оборудования для печати металлом не позволяют выполнять обработку с такой скоростью.

Заключение. На данном этапе развития технологий аддитивной печати металлом себестоимость получаемых с ее помощью деталей в 4 раза выше по сравнению с технологией фрезерования, даже при условии загрузки 3D-принтера различными изделиями в две смены ежедневно.

Аддитивную технологию печати металлом экономически целесообразно применять для изделий сложной формы, трудоемкость изготовления которых значительна, а также в случае отсутствия альтернативы фрезерованию или при необходимости изготовить единичное изделие.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Srivastava A.K., Dubey A., Kumar M., Dwivedi S.P., Sing R.K., Kumar S. Measurement of form errors and comparative cost analysis for the component developed by metal printing (DMLS) and stir casting. *Instrumentation Measure Metrologie*, 2020, vol. 19 (5), pp. 363–369. DOI: 10.18280/i2m.190506
- [2] Dehoff R., Tallman C., Duty C., Peter W., Yamamoto Y., Chen W., Blue C. Case Study: Additive manufacturing of aerospace brackets. *Advanced Materials and Processes*, 2013, vol. 171, pp. 19–23.
- [3] Labonnote N., Ronnquist A., Manum B., R  ther P. Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in Construction*, 2016, vol. 72, pp. 347–366. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.08.026
- [4] Merulla A., Gatto A., Bassoli E., Munteanu S., Gheorghiu B., Pop M.A., Bedo T., Munteanu D. Weight reduction by topology optimization of an engine subframe mount, designed for additive manufacturing production. *Materials Today: Proceeding*, 2019, vol. 19, pp. 1014–1018. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.08.015
- [5] Леоненков А.Д., Двирный В.В. Перспективы применения аддитивных технологий в аэрокосмической отрасли. *Решетневские чтения*, 2017, № 21-2, с. 632–633.
- [6] Боровиков А.А., Тушев О.Н. Разработка силовой конструкции космического аппарата с использованием топологической оптимизации для двух вари-

- антов технологии изготовления. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 9. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-9-1807>
- [7] Ahuja B., Karg M., Schmidt M. Additive manufacturing in production: Challenges and opportunities. *Proceedings of SPIE — the International Society for Optical Engineering*, 2015, vol. 9353. DOI: 10.1117/12.2082521
- [8] Bonnard R., Mognol P., Hascoët J. A new digital chain for additive manufacturing processes. *Virtual and Physical Prototyping*, 2010, vol. 5 (2), pp. 75–88. DOI: 10.1080/17452751003696916
- [9] Singamneni S., Lv Y., Hewitt A., Chalk R., Thomas W., Jordison D. Additive manufacturing for the aircraft industry: A Review. *Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering*, 2019, vol. 8 (1). DOI: 10.4172/2329-6542.1000214
- [10] Liou F. *Rapid Prototyping and Engineering Applications: A Toolbox for Prototype Development*, 2007. <https://doi.org/10.1201/9781420014105>
- [11] Saracyakupoglu T. Usage of additive manufacturing and topology optimization process for weight reduction studies in the aviation industry. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 2021, vol. 6, pp. 815–820. DOI: 10.25046/aj060294
- [12] Fetisov K., Maksimov P. Topology optimization and laser additive manufacturing in design process of efficiency lightweight aerospace parts. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1015, art. ID 052006. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/5/052006
- [13] Mirzendehtel A., Suresh K. Support structure constrained topology optimization for additive manufacturing. *Computer-Aided Design*, 2016, vol. 81, pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.cad.2016.08.006
- [14] Тилинин М.В., Прибытков Б.М. Аддитивные технологии в отечественном авиастроении: текущие позиции и направления развития. *Молодой ученый*, 2019, № 47 (285), с. 133–138. URL: <https://moluch.ru/archive/285/64365/> (дата обращения 29.04.2021).

Статья поступила в редакцию 28.09.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Шемонаева Е.С., Гончаров А.В., Андреев В.Д. Оценка целесообразности применения аддитивных технологий в изделиях аэрокосмической техники. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 12. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-12-2136>

Шемонаева Елена Сергеевна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология производства летательных аппаратов» Московского авиационного института.
e-mail: shemonaevaes@mati.ru

Гончаров Алексей Викторович — старший преподаватель кафедры «Технология производства летательных аппаратов» Московского авиационного института.
e-mail: goncharov_alexei@mail.ru

Андреев Василий Дмитриевич — студент кафедры «Технология производства летательных аппаратов» Московского авиационного института.
e-mail: mr.a.v.d@mail.ru

Feasibility evaluation of using additive technologies in aerospace products

© E.S. Shemonaeva, A.V. Goncharov, V.D. Andreev

Moscow Aviation Institute, Moscow, 125993, Russia

The paper studies the feasibility of using additive technologies in the manufacture of parts of complex shapes for aerospace products. The results of the structural analysis of a part helped find the directions of topological optimization and optimize the part's design. To confirm the relevance of the design optimization, we carried out static and dynamic strength calculations in the Siemens NX software package. The paper considers technologies for manufacturing the part by 3D metal printing and traditional milling on a numerically controlled machine. In order to obtain initial data for economic calculations, we simulated manufacturing processes in various software systems. To study the feasibility of metal printing technology, we carried out its technical and economic analysis, and found that the production program, technological processing modes and the cost of materials affect the cost of the product.

Keywords: topological optimization, additive technologies, milling, laser sintering, economic efficiency

REFERENCES

- [1] Srivastava A.K., Dubey A., Kumar M., Dwivedi S.P., Sing, R.K., Kumar S. Measurement of form errors and comparative cost analysis for the component developed by metal printing (DMLS) and stir casting. *Instrumentation Measure Metrologie*, 2020, vol. 19 (5), pp. 363–369. DOI: 10.18280/i2m.190506
- [2] Dehoff R., Tallman C., Duty C., Peter W., Yamamoto Y., Chen W., Blue C. Case Study: Additive Manufacturing of Aerospace Brackets. *Advanced Materials and Processes*, 2013, vol. 171, pp. 19–23.
- [3] Labonnote N., Ronnquist A., Manum B., R  ther P. Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in Construction*, 2016, vol. 72, pp. 347–366. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.08.026
- [4] Merulla A., Gatto A., Bassoli E., Munteanu S., Gheorghiu B., Pop M.A., Bedo T., Munteanu D. Weight reduction by topology optimization of an engine subframe mount, designed for additive manufacturing production. *Materials Today: Proceeding*, 2019, vol. 19, pp. 1014–1018. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.08.015
- [5] Leonenkov A.D., Dvirny V.V. *Reshetnevskie chteniya — Reshetnev Readings*, 2017, vol. 21-2, pp. 632–633.
- [6] Borovikov A.A., Tushev O.N. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, iss. 9. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-9-1807>
- [7] Ahuja B., Karg M., Schmidt M. Additive manufacturing in production: Challenges and opportunities. *Proceedings of SPIE — the International Society for Optical Engineering*, 2015, vol. 9353. DOI: 10.1117/12.2082521
- [8] Bonnard R., Mognol P., Hasco  t J. A new digital chain for additive manufacturing processes. *Virtual and Physical Prototyping*, 2010. vol. 5 (2), pp. 75–88. DOI: 10.1080/17452751003696916
- [9] Singamneni S., Lv Y., Hewitt A., Chalk R., Thomas W., Jordison D. Additive Manufacturing for the Aircraft Industry: A Review. *Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering*, 2019, vol. 8 (1). DOI: 10.4172/2329-6542.1000214

- [10] Liou Frank. *Rapid Prototyping and Engineering Applications: A Toolbox for Prototype Development*, 2007. <https://doi.org/10.1201/9781420014105>
- [11] Saracyakupoglu T. Usage of Additive Manufacturing and Topology Optimization Process for Weight Reduction Studies in the Aviation Industry. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 2021, vol. 6, pp. 815–820. DOI: 10.25046/aj060294
- [12] Fetisov K., Maksimov P. Topology optimization and laser additive manufacturing in design process of efficiency lightweight aerospace parts. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1015, art. ID 052006. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/5/052006
- [13] Mirzendehtel A., Suresh K. Support structure constrained topology optimization for additive manufacturing. *Computer-Aided Design*, 2016, vol. 81, pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.cad.2016.08.006
- [14] Tilinin M.V., Pribytkov B.M. *Molodoy ucheny (Young scientist)*, 2019, no. 47 (285), pp. 133–138. Available at: <https://moluch.ru/archive/285/64365/> (accessed April 29, 2021).

Shemonaeva E.S., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Aircraft Manufacturing Technology, Moscow Aviation Institute. e-mail: shemonaevaes@mati.ru

Goncharov A.V., Assist. Professor, Department of Aircraft Manufacturing Technology, Moscow Aviation Institute. e-mail: goncharov_alexei@mail.ru

Andreev V.D., student, Department of Aircraft Manufacturing Technology, Moscow Aviation Institute. e-mail: mr.a.v.d@mail.ru