Строительные конструкции, здания и сооружения

Научная статья
УДК 69.055, 69.001.5
http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/123-129

Д.Е. Кардаш

КАРДАШ ДМИТРИЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ – старший научный сотрудник, dk600328@mail.ru
Научно-исследовательский институт (военно-системных исследований материально-технического обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева
Санкт-Петербург, Россия

Частная методика оценки эффективности аддитивной технологии строительства объектов военной инфраструктуры

Аннотация. В статье обосновано применение аддитивных строительных технологий для нужд обороны. Представлены результаты исследований процесса их применения при оборудовании полевых позиций воинских подразделений. Введен термин «аддитивный строительный комплекс», рассмотрены его структура, возможности использования для строительства полевых фортификационных сооружений и комплексные показатели работы. Предложена методика оценки эффективности применения строительных 3D-принтеров при решении задач инженерного оборудования полевых позиций.
Ключевые слова: 3D-печать, аддитивное строительство, аддитивный строительный комплекс, моделирование

Для цитирования: Кардаш Д.Е. Частная методика оценки эффективности аддитивной технологии строительства объектов военной инфраструктуры // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 4(53). С. 123–129.

Введение

Составной частью вопросов мобильности воинских формирований является заблаговременное оборудование района предполагаемых боевых действий в инженерном отношении. Анализ результатов исследований и различных официальных источников показывает, что возможности применения аддитивных технологий в области обороны имеют широкую перспективу [3, 4, 6, 8, 11], но в то же время сильно ограничены отсутствием стандартов процесса аддитивного производства, дефицитом специалистов, недостаточным научно-методическим аппаратом оценки эффективности применения аддитивных технологий [1, 2, 5].

Цель работы – обоснование применения аддитивных технологий и оценка их эффективности при инженерном оборудовании полевых позиций воинских подразделений.

Задачи исследования: моделирование и оценка эффективности применения аддитивных технологий при оборудовании полевых позиций.

Обоснование предлагаемой методики

В настоящее время отмечается широкое разнообразие различных строительных технологий, имеющих высокий потенциал их применения при возведении объектов военной инфраструктуры на предполагаемом поле боя. Для выбора оптимального решения в каждом конкретном случае необходимо рассматривать комплекс факторов и оценивать эффективность применения той или иной технологии по заранее установленным критериям. Например, при оборудовании позиции войск в городской черте прежде всего следует учитывать временные

© Кардаш Д.Е., 2022
Статья поступила: 27.09.2022; рецензирование: 15.11.2022.

показатели, а также интегрирование в городскую инфраструктуру существующих и вновь возводимых капитальных строений для нужд организации вооруженной борьбы. При решении той же задачи в полевых условиях важно учитывать интегральный показатель прочностных и функциональных характеристик возводимых сооружений и времени, требуемого для выполнения строительных работ. Таким образом, время становится одним из факторов, определяющих оптимальность выбора.

Решение задачи по сокращению времени, отводимого для инженерного оборудования позиции на предполагаемом театре военных действий, возможно с помощью внедрения аддитивных технологий как для изготовления отдельных строительных конструкций, так и возведения объектов капитального строительства в целом. Использование аддитивных технологий в целях инженерного оборудования позиций имеет ряд преимуществ в сравнении с традиционными технологиями (табл. 1).

Таблица 1

Преимущества применения аддитивных технологий при оборудовании позиций войск

№ п/п	Наименование показателя	Ожидаемый эффект
1	Время полного цикла строительства	меньше, из-за непрерывности процесса
2	Количество ресурсов: - рабочая сила - транспорт - управление	существенно меньше меньше, за счет оптимизации логистических схем больше степеней свободы благодаря созданию «библиотеки образцов объектов»
3	Живучесть комплекса оборудования	выше, по причине рассредоточения элементов комплекса по строительной площадке.
4	Надежность комплекса оборудования	выше, ввиду применения подвижных ремонтных мастерских и технологий возведения объектов «модульным» способом

Вместе с тем широкому внедрению аддитивных технологий для нужд инженерного оборудования позиций препятствует ряд факторов, и в первую очередь высокая стоимость (табл. 2).

Таблица 2

Недостатки применения аддитивных технологий при оборудовании позиций войск в сравнении с традиционными технологиями

№ п/п	Наименование показателя	Недостаток
1	Требования к качеству материалов	Значительно выше, особенно к компонентам смесей
2	Прочность конструкции	Меньше при прочих равных параметрах
3	Сопротивляемость конструкции ударным нагрузкам	Меньше
4	Требования к уровню профессиональной подготовки обслуживающего персонала	Обязательна специализированная подготовка
5	Живучесть 3D-принтера	Низкая: выход из строя от воздействия осколков боеприпасов малого калибра

Анализ преимуществ и недостатков аддитивных технологий, используемых при оборудовании позиций войск, показывает, что их применение возможно при соблюдении условий:

– отсутствует огневое воздействие противника;

– строительные конструкции (возведенный объект), произведенные при помощи аддитивных технологий, годны для оборудования полевых позиций, исключая специальные защитные сооружения;

– необходимо создание специализированного подразделения инженерных войск, в задачи которого будут входить обслуживание и транспортировка комплекса оборудования.

Однако, несмотря на ощутимые недостатки, отмеченные при решении ряда вопросов заблаговременного оборудования позиций для полевого размещения войск, применение аддитивных технологий целесообразно, например, для оборудования ротного опорного пункта.

Описание методики

Аддитивный строительный комплекс военного назначения должен иметь возможность функционировать автономно и включать следующие элементы (вариант):

– строительный 3D-принтер, транспортируемый в специализированном контейнере;
– электростанцию на базе автомобильного прицепа (полуприцепа);
– бетономешалку (на автомобильном базовом шасси);
– автокран;
– автомобили для перевозки расходных материалов;
– жилые модули на базе прицепов для личного состава.

Таким образом, перечисленные элементы могут быть сведены в отдельное мобильное формирование, способное выполнить весь цикл строительных работ. Ему может быть присвоено наименование «аддитивный строительный комплекс» (АСК), который относится к классу военно-технических систем. Особенностями АСК являются:

– все структурные элементы удовлетворяют требованиям, определяемым способом применения войск (сил), и общим требованиям, предъявляемым к АСК;
– структура АСК имеет системный характер.

Исходя из представления о АСК как о группе элементов мера эффекта его применения определяется качеством составных частей, которые условно можно представить в виде двух модулей – базового и функционального (рис. 1).

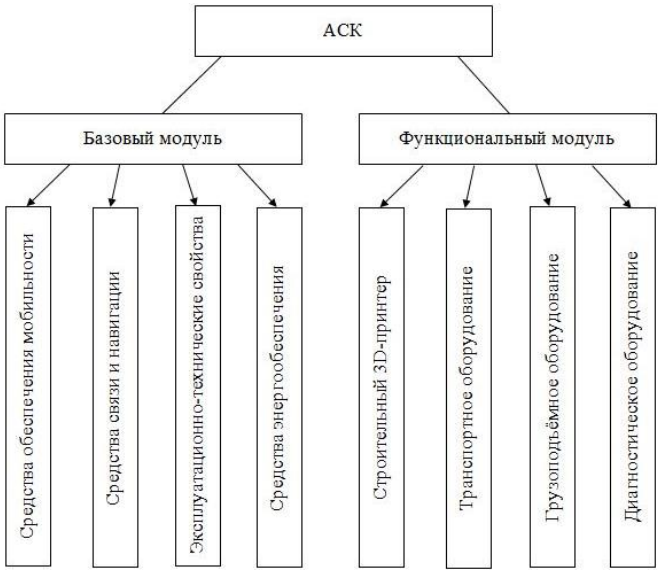

Рис. 1. Блочно-модульная структура аддитивного строительного комплекса

Исходя из системного представления об АСК процесс его применения включает две компоненты – выдвижение к месту производства работ и использование по назначению.

Компоненту выдвижения АСК можно представить в следующем виде:

$$E\left(S_{\text{транс.}}\right) = \cup_{i=1}^{n} E_i(S_i), \quad (1)$$

где $E\left(S_{\text{транс.}}\right)$ – транспортная задача на выдвижение АСК от пункта постоянной дислокации в район его применения; $E_i(S_i)$ – частная транспортная задача; n – количество частных задач, решаемых в процессе решения транспортной задачи.

Аналогично можно представить компоненту применения АСК [7]:

$$E\left(S_{\text{работы}}\right) = \cup_{j=1}^{m} E_j(S_j), \quad (2)$$

где $E\left(S_{\text{работы}}\right)$ – задача применения АСК в определенном районе; $E_j(S_j)$ – частная задача, возникающая в процессе применения АСК по назначению; m – количество частных задач, решаемых в процессе решения задачи применения.

Аналитически компоненты выдвижения и применения АСК можно представить в виде орграфа (рис. 2), где каждая вершина орграфа характеризует значение элемента в общей совокупности эффекта, полученного от применения АСК (табл. 3).

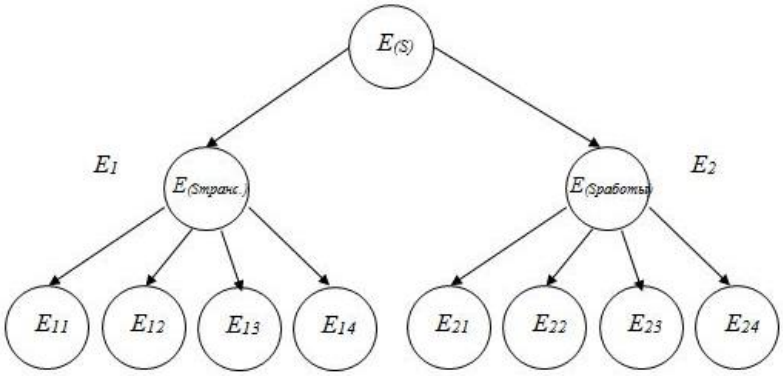

Рис. 2. Орграф применения аддитивного строительного комплекса

С точки зрения потребителя продукции АСК важно оценить комплексные показатели его работы по выполнению практической задачи, которые могут быть положены в основу производства оперативных расчетов, например на занятие позиций войсками [9, 10], для оборудования которых может применяться АСК.

Для этого комплексный показатель G_b каждого b-го свойства АСК (для обоих функциональных модулей) необходимо формировать на подмножестве $\{\text{G}_{b_\varepsilon}\}$ единичных показателей, проявляемых в условиях системного окружения:

$$\text{G}_b = \cap_{b_\varepsilon} (\{\text{G}_{b_\varepsilon}\} | \{\text{У}_{b_\varepsilon}\} = const), \quad (3)$$

где У_{b_ε} – подмножество параметров системного окружения, влияющих на каждый единичный показатель G_{b_ε} b-го свойства.

Принимая выражение (3) за основу, можно сформулировать задачу о поиске обобщенного показателя эффективности АСК:

$$K_{\text{АСК}} = K_{\text{транс}}^{\mu\ \text{транс}} \cdot K_{\text{работы}}^{\mu\ \text{работы}}, \quad (4)$$

где $K_{\text{транс}}$ и $K_{\text{работы}}$ – соответственно комплексные показатели эффективности выполнения задач базового и функционального модулей; $\mu_{\text{транс}}$ и $\mu_{\text{работ}}$ – соответственно коэффициенты, учитывающие частный вклад комплексных показателей в достижение обобщенного показателя.

Очевидно, что

$$\mu_{\text{транс}} + \mu_{\text{работ}} = 1. \quad (5)$$

Принимая во внимание вероятностную природу наступления математического ожидания любого завершенного процесса, каковым являются этапы применения АСК, определим множество благоприятных исходов этого процесса:

$$\text{К}_\text{К} = \prod_{b=1}^{b} (G_b P_b)^{\mu_b}, \quad (6)$$

где P_b – вероятность попадания в поле математического ожидания (с учетом выбранного интервала дисперсии) благоприятного исхода b-го процесса; μ_b – коэффициент влияния b-го процесса на достижение благоприятного исхода (коэффициент весомости).

Таблица 3

Функционально-морфологическая декомпозиция частных задач АСК

№ п/п	Технологическая задача (процесс)	Частная техническая задача (подпроцесс)	Составная часть АСК, задействованного в процессе	Обозначение	
				подпроцесса	составной части
1	Выдвижение АСК к месту применения, развертывание на местности	Обеспечение мобильности	Подсистема транспортного обеспечения	S_{11}	E_{11}
2		Обеспечение связи и навигации	Подсистема	S_{12}	E_{12}
3		Обеспечение эксплуатационно-технических свойств	Подсистема обеспечения развертывания АСК на местности и эксплуатационных свойств АСК	S_{13}	E_{13}
4		Обеспечение энергоресурсами	Подсистема обеспечения энергоресурсами (электроэнергия, сжатый воздух и т.д.)	S_{14}	E_{14}
5	Применение АСК для выполнения задач по оборудованию (возведению) объекта	Оценка работоспособности строительного 3D-принтера	Подсистема планирования строительных работ	S_{21}	E_{21}
6		Оценка работоспособности транспортного оборудования	Подсистема планирования транспортировки оборудования (совершение марша, использование ж/д транспорта и т.д.)	S_{22}	E_{22}
7		Оценка работоспособности грузоподъемного оборудования	Подсистема планирования строительных работ	S_{23}	E_{23}
8		Оценка работоспособности диагностического оборудования	Подсистема комплексного диагностирования	S_{24}	E_{24}

Следующим шагом является поиск средневзвешенного значения обобщенного показателя применения технологий АСК:

$$K_z = \bigcup_{u=1}^{u} K_{K_u} \cdot \mu_{K_u}, \quad (7)$$

где K_{K_u} – значение показателя u-го частного свойства при оценке k-го свойства базового модуля; μ_{K_u} – коэффициент влияния u-го частного свойства при оценке k-го свойства базового модуля.

Таким образом, общая эффективность предлагаемой к внедрению технологии оценивается сравнением с нормативным (базовым) показателем средневзвешенного значения обобщенного показателя:

$$\varphi = \frac{|K_z^{\text{баз}} - K_z|}{K_z} \cdot 100\%. \quad (8)$$

Заключение

В статье приведена частная методика оценки эффективности применения аддитивного строительного комплекса для нужд инженерного оборудования позиций войск в полевых условиях (на примере ротного опорного пункта). За рамками исследования остались временные

показатели работы того или иного оборудования при возведении полевых сооружений (канониров и ангаров для укрытия техники, перекрытых щелей и блиндажей для личного состава и т.д.) ввиду сложности моделирования воздействия на предполагаемые к использованию строительные смеси средств поражения противника, в особенности артиллерийских боеприпасов.

Приведенная частная методика является предлагаемым вариантом оценки целесообразности применения АСК для нужд оборудования позиций в полевых условиях. При этом в качестве базового может быть рассмотрено любое свойство системы строительства с применением традиционных технологий. Достоинством методики является возможность численного решения частных задач.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Аддитивные технологии. Базовый курс / Центр компетенций Национальной технологической инициативы по направлению «Новые производственные технологии» на базе Института передовых производственных технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 2022. URL: https://nticenter.spbstu.ru/courses/24/program (дата обращения: 15.09.2022).
2. Бирюков Ю.А., Демьянов А.А., Сопот В.Н. Барьеры, препятствующие развитию аддитивных технологий // Развитие систем жизнеобеспечения, энергосбережение и материально-техническое обеспечение специальных объектов Министерства обороны Российской Федерации. Санкт-Петербург: ВАМТО, 2022. Ч. 1. С. 259–267.
3. Демьянов А.А., Бъядовский Д.А., Ершов М.И., Попов И.В. Анализ современного развития технологии строительной 3D-печати // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: материалы IV межвуз. конф., Санкт-Петербург, 06 февраля 2019 / науч. ред. С.С. Семенов; Военная академия связи имени маршала Советского Союза С.М. Буденного. Санкт-Петербург: ВАС, 2019. С. 136–140. EDN: BMGCRY
4. Литунов С.Н. Обзор и анализ аддитивных технологий. Ч. 1 // Омский научный вестник. 2016. № 1(145). С. 12–17.
5. О дополнительном профессиональном образовании: письмо Министерства образования и науки Российской Федерации от 9 окт. 2013 г. № 06-735. Режим доступа: «КонсультантПлюс» (дата обращения: 15.09.2022).
6. Руденко А.Е., Кардаш Д.Е. Опыт строительства аддитивным методом войсковых объектов армии США // Научные проблемы материально-технического обеспечения Вооруженных сил Российской Федерации. 2020. № 3(17). С. 140–146.
7. Соболев Е.Г., Ильин А.В., Майер Д.Н. Методология оценки эффективности подвижного состава ремонта вооружения, военной и специальной техники. Теория и практика. Москва: 38 НИИИ БТВТ, 2021. С. 122.
8. Строительство зданий с помощью 3D-принтеров: мечта или реальность // Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы. 2021.URL: https://stroi.mos.ru/mobile/articles/stroitielstvo-zdanii-s-pomoshch-iu-3d-printierov-miechta-ili-rieal-nost (дата обращения: 15.09.2022).
9. Топоров А.В., Бабенков А.В., Бирюков Ю.А. Методологические подходы к оценке военно-экономической эффективности восстановления объектов военной инфраструктуры // Научные проблемы материально-технического обеспечения ВС РФ. 2019. Вып. 3(13). С. 9–20.
10. Топоров А.В., Бабенков В.И., Квашнин Б.С. Методика прогнозирования операционных затрат на производство материальных средств для обеспечения группировок войск (сил) // Научные проблемы материально-технического обеспечения ВС РФ. 2020. № 1(15). С. 9–17.
11. Attaran M. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horizons*. 2017;60(5). DOI: 10.1016/j.bushor.2017.05.011

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2022. N 4/53
Buildings and structures www.dvfu.ru/en/vestnikis

Original article
http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/123-129

Kardash D.

DMITRY E. KARDASH – Senior Researcher, dk600328@mail.ru
Research Institute (Military System Research of the Logistics Support of the Armed Forces of the Russian Federation) of the Military Academy of Logistics named after General of the Army A.V. Khrulev
Saint-Petersburg, Russia

A private methodology for evaluating the effectiveness of additive technology for the construction of military infrastructure objects

Abstract. The article substantiates the use of additive construction technologies for defense needs. The results of studies of the process of their application in equipping field positions of military units are presented. The term "additive building complex" is introduced, its structure, the possibilities of using for the construction of field fortifications and complex performance indicators are considered. A technique for evaluating the effectiveness of the use of construction 3D printers in solving problems of engineering equipment of field positions is proposed.
Keywords: 3D printing, additive construction, additive building complex, modeling

For citation: Kardash D. A private methodology for evaluating the effectiveness of additive technology for the construction of military infrastructure objects. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022;(4):123–129. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Additive technologies. Basic course. Competence Center of the National Technological Initiative in the direction of "New Production Technologies" on the basis of the Institute of Advanced Production Technologies of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2022. URL: https://nticenter.spbstu.ru/courses/24/program – 09.15.2022. (In Russ.).
2. Biryukov Yu., Demyanov A., Sopot V. Barriers preventing the development of additive technologies. Development of life support systems, energy saving and logistics of special facilities of the Ministry of Defense of the Russian Federation. St. Petersburg, VAMTO, 2022. Part 1. P. 259–267. (In Russ.).
3. Demyanov A., Byadovsky D., Ershov M., Popov I. Analysis of the modern development of construction 3D printing technology. *Problems of technical support of troops in modern conditions: Proc. of the IV Interuniversity Conf., St. Petersburg, February 06, 2019*. Sci. ed. S. Semenov; Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny. St. Petersburg, VAS, 2019. P. 136–140. (In Russ.).EDN: BMGCRY
4. Litunov S. Review and analysis of additive technologies. Part 1. *Omsk Scientific Bulletin*. 2016;(1):12–17. (In Russ.).
5. On additional professional education: a letter from the Ministry of Education and Science Russian Federation of 9 Oct. 2013 No. 06-735. Access mode: LPS «ConsultantPlus» – 09.15.2022. (In Russ.).
6. Rudenko A., Kardash D. Experience in the construction of military facilities of the US Army by the additive method. *Scientific challenges of logistical support of the armed forces of the Russian Federation*. 2020;(3):140–146. (In Russ.).
7. Sobolev E., Ilyin A., Mayer D. Methodology for assessing the effectiveness of the rolling stock repair of weapons, military and special equipment. Theory and practice. Moscow, 38 Research and Testing Institute of Armored Weapons and Equipment Press, 2021. 122 p. (In Russ.).
8. Construction of buildings using 3D printers: dream or reality. Complex of urban policy and construction of the city of Moscow, 2021. URL: https://stroi.mos.ru/mobile/articles/stroitiel-stvo-zdanii-s-pomoshch-iu-3d-printierov-miechta-ili-rieal-nost – 15.09.2022. (In Russ.).
9. Toporov A., Babenkov A., Biryukov Yu. Methodological approaches to assessing the military-economic efficiency of restoring military infrastructure facilities. *Scientific challenges of logistical support of the armed forces of the Russian Federation*. 2019;(3):9–20. (In Russ.).
10. Toporov A., Babenkov V., Kvashnin B. Methodology for forecasting operating costs for the production of material assets to ensure groupings of troops (forces). *Scientific challenges of logistical support of the armed forces of the Russian Federation*. 2020;(1):9–17. (In Russ.).
11. Attaran M. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horizons*. 2017;60(5). DOI: 10.1016/j.bushor.2017.05.011