

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2026, Том 18, № 3 / 2026, Vol. 18, Iss. 3 <https://esj.today/issue-3-2026.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/32SAVN326.pdf>

DOI: 10.15862/32SAVN326 (<https://doi.org/10.15862/32SAVN326>)

2.1.9. Строительная механика (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Ахмадиева, А. С. Анализ напряженно-деформированного состояния и классификация перспективных аддитивных форм стальных строительных конструкций на основе конечно-элементного моделирования / А. С. Ахмадиева, О. Г. Новоселов, К. Ф. Исламов // Вестник евразийской науки. — 2026. — Т. 18. — № 3. — URL: <https://esj.today/PDF/32SAVN326.pdf>. DOI: 10.15862/32SAVN326.

For citation:

Akhmadieva A.S., Novoselov O.G., Islamov K.F. Analysis of the stress-strain state and classification of promising additive forms of steel building structures based on finite element modeling. *The Eurasian Scientific Journal*. 2026;18(3): 32SAVN326. Available at: <https://esj.today/PDF/32SAVN326.pdf>. DOI: 10.15862/32SAVN326. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 624

Ахмадиева Анна Сергеевна

ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»
Набережночелнинский институт, Набережные Челны, Россия
Заведующий лабораторией кафедры «Строительства»
E-mail: ansakhmadieva@kpfu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2018-4890>

Новоселов Олег Геннадьевич

ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»
Набережночелнинский институт, Набережные Челны, Россия
Доцент кафедры «Строительства»
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: shi-set@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8810-0732>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=797664

Исламов Камиль Фаритович

ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»
Набережночелнинский институт, Набережные Челны, Россия
Доцент кафедры «Строительства»
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: kam@kambox.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5168-7629>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=805343

**Анализ напряженно-деформированного
состояния и классификация перспективных аддитивных
форм стальных строительных конструкций на основе
конечно-элементного моделирования**

Аннотация. В работе проведён системный анализ перспективных конструктивных форм стальных двутавровых балок, предназначенных для изготовления методами аддитивного производства. На основе обзора современных публикаций выделены и классифицированы четыре основных подхода к проектированию аддитивных двутавров: бионические и органические

структуры, балки переменного сечения, ячеистые (решётчатые) заполнители стенки и полки, а также гибридные конструкции, сочетающие указанные принципы. С использованием топологической оптимизации и возможностей крупноформатных аддитивных технологий показана возможность существенного снижения материалоемкости (до 30–50 % по сравнению с традиционными прокатными и сварными двутаврами) при сохранении или повышении несущей способности и устойчивости. Проведено конечно-элементное моделирование трёх двутавров равной металлоёмкости: традиционного сварного и двух аддитивных с шахматной и решётчатой внутренней структурой стенки. При одинаковой равномерно распределённой нагрузке и двух схемах опирания (консольная и шарнирно-опёртая) аддитивные балки в большинстве расчётных случаев демонстрируют снижение максимальных напряжений по продольной силе на 28–35 %, по поперечной силе до 84 %, по крутящему моменту на 61–78 %. Выявлены основные ограничения широкого внедрения аддитивных стальных строительных конструкций: анизотропия механических свойств, остаточные напряжения, дефекты печати и высокая стоимость.

Тем не менее, сделан вывод о революционном потенциале аддитивных технологий для перехода от унифицированных сечений к высокооптимизированным, функционально-градиентным конструкциям, приближающим напряжённо-деформированное состояние к теоретически идеальному.

Ключевые слова: аддитивное производство; стальные строительные конструкции; двутавровая балка; топологическая оптимизация; несущая способность; конечно-элементное моделирование; анизотропия свойств; остаточные напряжения

Введение

Интеграция аддитивных технологий в производство стальных строительных конструкций может начать переход от унификации и типизации к индивидуализации и функциональной оптимизации. Возможность создания строительных конструкций практически произвольной геометрии открывает путь к радикальному повышению эффективности использования материала, что особенно актуально для строительной отрасли. Однако, в отличие от традиционных методов изготовления (прокат, литье, сварка), где механические свойства и поведение материала хорошо изучены и регламентированы, аддитивные технологии вносят ряд существенных особенностей, которые необходимо учитывать во избежание негативных последствий.

Проблематика заключается в комплексном характере взаимовлияния технологии изготовления, формируемой микроструктуры и итоговых прочностных характеристик конструкции. Такие факторы, как термическая история, скорость охлаждения расплавленного металла и послойное накопление остаточных напряжений, приводят к возникновению значительной анизотропии свойств и могут являться причиной образования дефектов. Следовательно, проектирование конструктивных форм под аддитивные технологии не может сводиться лишь к геометрической свободе; оно требует детального рассмотрения технологических параметров процесса и их влияния на конечное изделие.

Проектирование под аддитивные технологии является междисциплинарной задачей, синтезирующей подходы строительной механики, металловедения и технологического прогнозирования.

Стальной двутавровый профиль является основным несущим элементом каркасов современных зданий и сооружений благодаря его высокому значению момента инерции сечения при относительно малой собственной массе. Традиционные технологии горячей прокатки и сварки стальных двутавров имеют ряд ограничений, таких как невозможность создавать сложные геометрические формы, строго постоянное сечение по длине, наличие зон с

переизбытком материала (зоны с низким уровнем напряжений). Данные ограничения могут приводить к перерасходу материала до 30–50 % от теоретически необходимого объема, что подчёркивается в работах El Khadiri, et al. [1] и Liu J., Gaynor [2].

Развитие методов крупноформатных аддитивных технологий металлов, таких как Wire-and-Arc Additive Manufacturing (WAAM), Laser Powder Bed Fusion (LPBF) и Electron Beam Melting (EBM), позволяет снять практически все современные технологические ограничения в производстве аддитивных двутавров, что открывает возможность реализовать результаты современной топологической оптимизации в стальных строительных конструкциях. Данный подход в своих трудах отмечают Laghi, et al. [3] и Kloft, et al. [4]. На основе анализа широкого ряда источников систематизируем основные направления создания нового поколения двутавровых балок, изготавливаемых методом 3D-печати, с учётом строительных требований к несущей способности и устойчивости.

С 2014 года наблюдается экспоненциальный рост публикаций по топологической оптимизации для аддитивного производства, примером служат работы Leary, et al. [5], Liu J., Gaynor [2], Wu J., et al. [6]. Основное внимание авторами Mass, Amir [7], Jiang, et al. [8], Zhang W., et al. [9], уделено ключевым ограничениям, таким как угол самовыдерживания ($\leq 45^\circ$), минимизация опорных структур, анизотропия механических свойств, остаточные напряжения и деформации.

Целью настоящего исследования является системный анализ и классификация перспективных форм строительных двутавров, изготавливаемых методами аддитивного производства, которые позволяют сохранить или повысить несущую способность при одновременном снижении материалоемкости и добавлении новых функциональных возможностей.

Ключевым подходом к созданию высокоэффективных двутавровых балок является топологическая оптимизация — математический аппарат, направленный на определение оптимального распределения материала в заданной области проектирования при ограничениях на прочность, жесткость и массу. Ключевой принцип: аддитивные технологии позволяют размещать материал только там, где это необходимо для противодействия нагрузкам, а не использовать сплошные формы, продиктованные ограничениями прокатного стана.

На основе анализа литературы и реализованных прототипов в машиностроении можно выделить четыре подхода, каждый из которых может превосходить традиционный прокатный и сварной двутавр в разных аспектах, таких как несущая способность, общая и местная устойчивость, меньшая металлоёмкость при равной прочности.

1. Бионические и органические структуры. Применение принципов бионики, в частности, структуры костной ткани (трабекулярная архитектура) или стеблей растений, приводит к созданию ажурных, но чрезвычайно прочных конструкций. Подобный подход отражён в работах Wegst, et al. [10], Rodriguez Mendez [11], Lin E., Li Y., et al [12].



Рисунок 1. Концепт бионической структуры балок (разработано авторами)

Стенка двутавра в этом случае может представлять собой не сплошной лист, а разветвленную сеть подкрепляющих ребер и распорок, ориентированных вдоль главных траекторий распространения напряжений, что обеспечивает высокую устойчивость к потере местной устойчивости [1].

Результатом является сложная, часто бионическая структура, лишенная зон с минимальным вкладом в несущую способность при минимально возможном весе. Пример концепции данного подхода изображен на рисунке 1.

Такая структура может минимизировать зоны с низким уровнем напряжений для центральной части стенки прокатного двутавра, и значительно повышает значение критической нагрузки местной и общей потери устойчивости.

2. Переменные формы и размеры сечения. Данный подход предполагает параметризацию геометрии двутавра (высота стенки, ширина и толщина полок, форма стенки) с последующим вариативным изменением параметров по длине балки в соответствии с эпюрой изгибающих моментов и поперечных сил. Это позволяет создавать балки с плавно изменяющимся сечением, где материал концентрируется в зонах максимальных напряжений (рис. 2). Подобный подход предлагается в работах Bol [13], Yarlagadda [14].



Рисунок 2. Концепт двутавров переменного сечения (разработано авторами)

3. Синтез ячеистых (решетчатых) структур. Стенка или части полок двутавра заменяются на регулярные или нерегулярные ячеистые заполнители. Проектирование таких структур заключается в выборе типа ячейки (тетраэдрическая, гексагональная, гироидальная и пр.), ее размера и пространственного градиента плотности для обеспечения требуемых прочностных и жесткостных характеристик. Данное направление является одним из наиболее перспективных в создании аддитивных двутавров, и отражается в работах Cheng, et al. [15], Maskery, et al. [16], Yang, et al., [17], Uddin, et al., [18]. Концепт данного подхода представлен на рисунке 3.

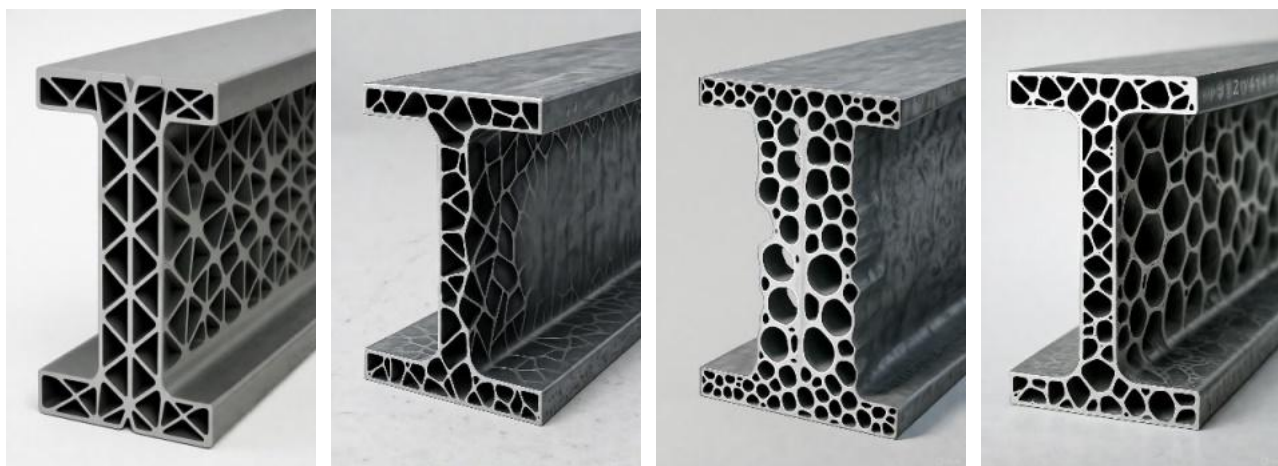


Рисунок 3. Концепт ячеистой (решетчатой) структуры (разработано авторами)

В работах Ashby [19] и Hedayati, et al. [20], аддитивные конструкции показывают наибольшую жёсткость при минимальной массе при гироидальных и ромбо-додекаэдрических ячейках с градиентом плотности вдоль высоты.

4. Гибридные конструкции с комбинацией вышеперечисленных подходов. Наиболее эффективным может являться сочетание бионической стенки с решётчатыми зонами переменной плотности и плавно меняющимся внешним контуром. В данном направлении были проведены исследования De Corte, et al. [21] и Salaimanimagudam, Jayaprakash [22]. Одним из концептов гибридных конструкций может послужить иллюстрация на рисунке 4.



Рисунок 4. Концепты гибридного подхода (разработано авторами)

На основании обобщения литературы можно выделить множество конкретных концепций, например:

- полки переменной толщины 10–40 мм с перфорацией и локальными утолщениями в зонах максимальных нормальных напряжений;
- высота сечения изменяется по параболическому закону от $1,3-1,5h$ в середине пролёта до h у опор;
- стенка представляет собой бионическую триангулированную систему диагональных и вертикальных стержней диаметром 12–25 мм, переходящую в центральной зоне в гироидальную решётку с относительной плотностью 20–30 %;
- стенка двутавра представляет собой решётчатую или шахматную структуру в закрытой тонкой оболочке;
- альтернативная X-образная стенка двутавра с переменным углом, вместо I-ой классической стенки.

Материалы и методы

В рамках данной работы проведено конечно-элементное моделирование традиционного сварного двутавра — ТДБ № 1 (рис. 5 а) и двух новых аддитивных двутавров с «шахматной» стенкой — АДБ № 2 (рис. 5 б) и «решетчатой» стенкой — АДБ № 3 (рис. 5 в). Каждый вид двутавра имеет равную металлоёмкость. В данной работе рассматривается только разная конструкция стенки двутавра. Высота каждого двутавра равна 24 см, конструкция полок одна (11,8 см на 1,3 см).

Численное моделирование балок производилось в программном продукте Lira 10.12. Каждая балка представляет собой совокупность объемных конечных элементов.

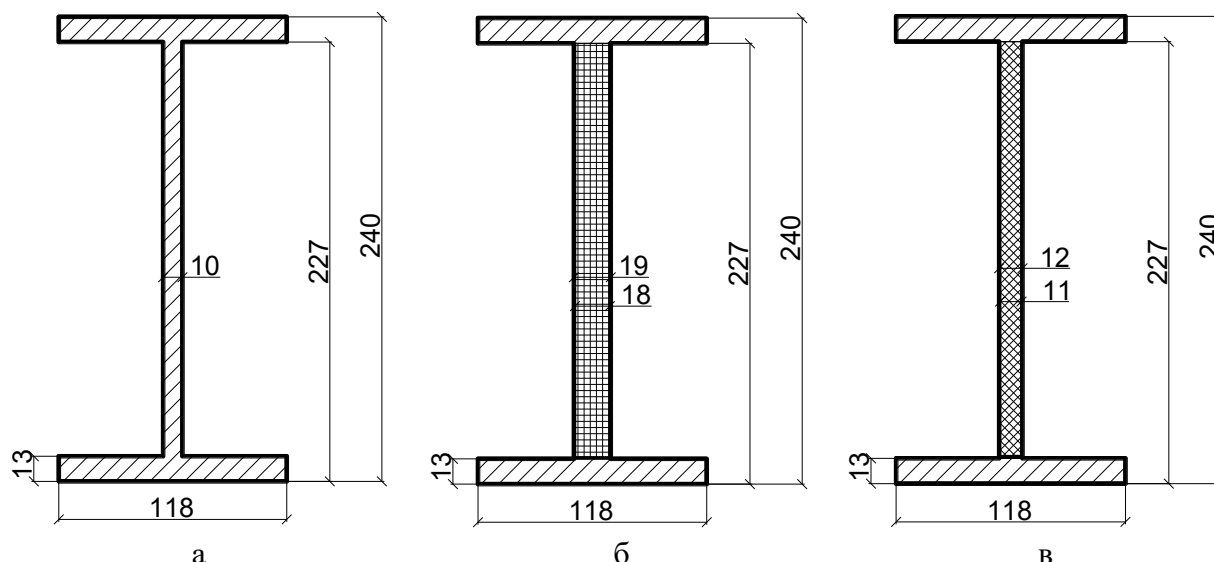


Рисунок 5. Виды рассматриваемых двутавров (разработано авторами)

Внутренняя структура каждой новой аддитивного двутавра разработана с учетом современных возможностей 3D-печати, а именно рассматривается возможная технология SLM/DMLS. Для формирования структуры стенок АДБ № 2 и АДБ № 3 был выбран базовый фрагмент в виде квадрата размерами $0,5 \times 0,5$ мм. При помощи данного базового квадрата сформированы две разные внутренние структуры стенки, а именно у АДБ № 2 в шахматном порядке (рис. 6 а), и у АДБ № 3 в решетчатой структуре с ориентацией в 45 градусов (рис. 6 б).

Вся внутренняя структура стенки двутавра закрыта тонкой стенкой толщиной в 0,5 мм по длине с двух сторон. Тем самым общая толщина стенки для АДБ № 2 составляет 1,9 см, а для АДБ № 3 1,2 см соответственно.

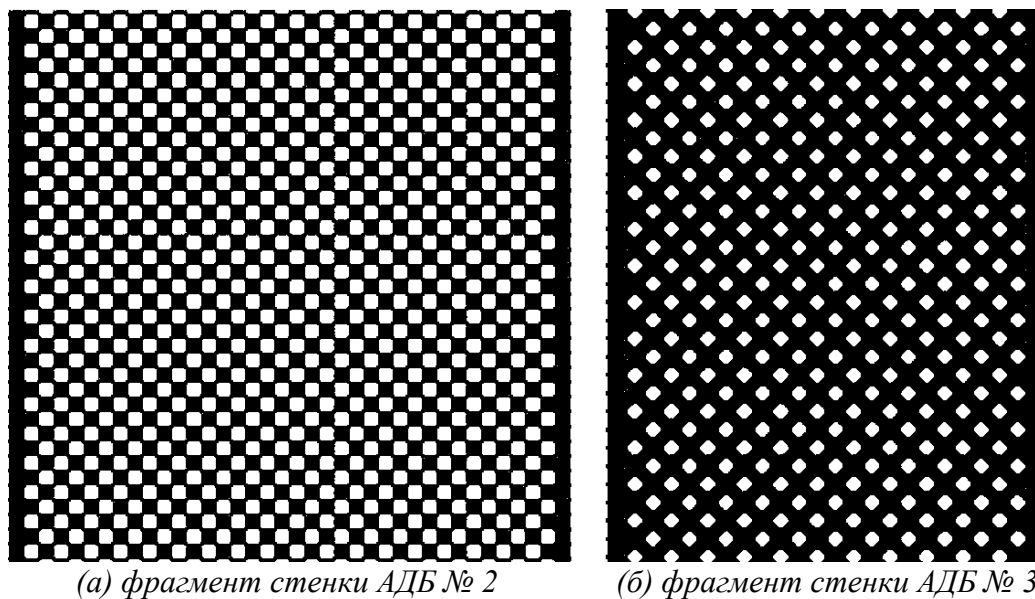


Рисунок 6. Внутренняя структура аддитивных двутавров (разработано авторами)

В статье рассматривается две схемы закрепления балки: схема 1 — консоль, схема 2 — шарнирно опертая балка. Сталь балки С255 по СП 16.13330.2017. На каждый двутавр действует равномерно распределённая нагрузка, равная 1 тс/м^2 .

Результаты

Результаты сравнения традиционной двутавровой балки и новых видов аддитивных двутавровых балок по максимальным и минимальным значениям внутренних усилий (силовых факторов) рассмотрены в таблицах 1–4. Сравнение проводилось по 6 различным внутренним силовым факторам в сечении при двух схемах опирания.

Таблица 1

Результат расчётов ТДБ № 1 и АДБ № 2 при схеме закрепления 1

Тип балок	ТДБ №1		АДБ №2		Процент расхождения	
	min	max	min	max	min	max
N_x — продольная сила	-1,415 10^6	1,374 10^6	-9,276 10^5	9,822 10^5	-34,45	-28,52
N_y — поперечная сила по оси Y	-1,209 10^6	1,232 10^6	-6,127 10^5	5,012 10^5	-49,32	-59,32
N_z — поперечная сила по оси Z	-8,898 10^5	6,69 10^5	-7,484 10^5	2,170 10^5	-15,89	-67,56
T_{xy} — крутящий момент	-5,034 10^5	4,877 10^5	-1,698 10^5	1,711 10^5	-66,27	-64,92
T_{xz} — изгибающий момент по оси Z	-6,847 10^5	4,133 10^5	-4,752 10^5	3,968 10^3	-30,60	-99,04
T_{yz} — изгибающий момент по оси Y	-3,625 10^5	3,822 10^5	-2,731 10^5	4,089 10^5	-24,66	6,99

Разработано авторами

Таблица 2

Результат расчётов ТДБ № 1 и АДБ № 2 при схеме закрепления 2

Тип балок	ТДБ №1		АДБ №2		Процент расхождения	
	min	max	min	max	min	max
N_x — продольная сила	-7,585 10^5	6,617 10^5	-5,072 10^5	1,738 10^5	-33,13	-73,73
N_y — поперечная сила по оси Y	-1,183 10^6	1,239 10^6	-6,484 10^5	5,238 10^5	-45,19	-57,72
N_z — поперечная сила по оси Z	-6,423 10^5	3,312 10^5	-7,902 10^5	1,031 10^5	23,03	-68,87
T_{xy} — крутящий момент	-3,136 10^5	3,275 10^5	-8,062 10^4	8,216 10^4	-74,29	-74,91
T_{xz} — изгибающий момент по оси Z	-4,195 10^5	2,373 10^5	-2,195 10^5	1,696 10^5	-47,68	-28,53
T_{yz} — изгибающий момент по оси Y	-3,255 10^5	3,671 10^5	-2,866 10^5	4,291 10^5	-11,95	16,89

Разработано авторами

Таблица 3

Результат расчётов ТДБ № 1 и АДБ № 3 при схеме закрепления 1

Тип балок	ТДБ №1		АДБ №3		Процент расхождения	
	min	max	min	max	min	max
N_x — продольная сила	-1,415 10^6	1,374 10^6	-8,855 10^5	8,868 10^5	-37,42	-35,46
N_y — поперечная сила по оси Y	-1,209 10^6	1,232 10^6	-3,732 10^5	1,945 10^5	-69,13	-84,21
N_z — поперечная сила по оси Z	-8,898 10^5	6,69 10^5	-6,433 10^5	1,839 10^5	-27,70	-72,51
T_{xy} — крутящий момент	-5,034 10^5	4,877 10^5	-1,889 10^5	1,896 10^5	-62,48	-61,12
T_{xz} — изгибающий момент по оси Z	-6,847 10^5	4,133 10^5	-4,394 10^5	1,497 10^3	-35,83	-99,64
T_{yz} — изгибающий момент по оси Y	-3,625 10^5	3,822 10^5	-2,733 10^5	3,060 10^5	-24,61	-19,94

Разработано авторами

Таблица 4

Результат расчётов ТДБ № 1 и АДБ № 3 при схеме закрепления 2

Тип балок	ТДБ №1		АДБ №3		Процент расхождения	
	min	max	min	max	min	max
N_x — продольная сила	-7,585 10^5	6,617 10^5	-4,309 10^5	1,526 10^5	-43,19	-76,94
N_y — поперечная сила по оси Y	-1,183 10^6	1,239 10^6	-3,939 10^5	4,607 10^5	-66,70	-62,82
N_z — поперечная сила по оси Z	-6,423 10^5	3,312 10^5	-6,851 10^5	3,473 10^4	6,66	-89,51
T_{xy} — крутящий момент	-3,136 10^5	3,275 10^5	-7,078 10^4	7,098 10^4	-77,43	-78,33
T_{xz} — изгибающий момент по оси Z	-4,195 10^5	2,373 10^5	-2,082 10^5	1,584 10^5	-50,37	-33,25
T_{yz} — изгибающий момент по оси Y	-3,255 10^5	3,671 10^5	-2,893 10^5	3,238 10^5	-11,12	-11,80

Разработано авторами

Как видно из таблиц 1–4 в большинстве случаев АДБ № 2 и АДБ № 3 демонстрируют значительное снижение максимальных и минимальных внутренних усилий по сравнению с ТДБ № 1. Для N_x в консольной схеме снижение составляет 28–35 %, а для N_y и N_z снижение достигает 49–84 %. Крутящий момент T_{xy} уменьшается на 61–78 %. Однако, в некоторых случаях наблюдаются неоднозначные результаты, а именно изгибающий момент T_{yz} в таблице 1 для АДБ № 2 показывает рост на 6,99 %, и поперечная сила N_z в таблице 2 для АДБ № 2 увеличивается на 23,03 % по минимальному значению. В таблице 4 также наблюдается рост на 6,66 % у поперечной силы N_z . Таким образом, несмотря на отдельные случаи роста внутренних усилий, предложенные конструкции аддитивных балок в целом демонстрируют значительное улучшение силовых характеристик.

Выводы

Из приведенного сравнения физического моделирования аддитивных двутавровых балок видна возможность снижения массогабаритных характеристик при сохранении или улучшении механических свойств, возможность перераспределения материала в наиболее нагруженные зоны, что может привести к повышению долговечности и надежности конструкции. У инженеров-проектировщиков появится гибкость проектирования, а именно возможность создания сложных внутренних структур, недоступных при традиционном производстве.

Несмотря на огромный потенциал, широкое внедрение аддитивных двутавров сдерживается рядом факторов:

1. **Анизотропия механических свойств.** Слоистая природа аддитивно произведенных металлов приводит к тому, что их прочностные характеристики могут существенно различаться в зависимости от направления нагружения относительно оси построения.
2. **Внутренние остаточные напряжения и дефекты.** Высокие термические градиенты в процессе печати приводят к возникновению значительных остаточных напряжений, которые могут приводить к образованию микротрещин. Кроме того, возможны дефекты, такие как поры, снижающие усталостную прочность конструкций.
3. **Экономическая целесообразность.** Высокая стоимость металлических порошков, значительные временные затраты на печать крупногабаритных объектов и необходимость последующей механической обработки делают технологию экономически нецелесообразной.

Заключение

Проведенный анализ демонстрирует, что аддитивные технологии обладают потенциалом для революционной трансформации подхода к проектированию двутавровых балок, позволяя перейти от стандартизированных сечений к высокооптимизированным, легким и многофункциональным конструкциям. Реализация принципов топологической оптимизации и использование ячеистых структур может открыть путь к созданию элементов, работающих в условиях, близких к идеальному напряжённому-деформированному состоянию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Khadiri I.E., et al. Topology Optimization of Structures Obtained by Additive Manufacturing: Case of 3D beam // 2021 7th International Conference on Optimization and Applications (ICOA). — IEEE, 2021. — P. 1–4. — DOI: <https://doi.org/10.1109/ICOA51614.2021.9442628>.
2. Liu J., Gaynor A.T. Current and future trends in topology optimization for additive manufacturing // Structural and Multidisciplinary Optimization. — 2018. — Vol. 57, No. 6. — P. 2457–2483. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-018-1994-3>.
3. Laghi V., Babovic N., Benvenuti E., Kloft H. Blended structural optimization of steel joints for Wire-and-Arc Additive Manufacturing // Engineering Structures. — 2024. — Vol. 300. — P. 1–14. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117141>.
4. Kloft H., Schmitz L.P., Müller C., Laghi V., Babovic N., Baghdadi A. Experimental Application of Robotic Wire-and-Arc Additive Manufacturing Technique for Strengthening the I-Beam Profiles // Buildings. — 2023. — Vol. 13, No. 2. — P. 366. — DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13020366>.
5. Leary M., Merli L., Torti F., Mazur M., Brandt M. Optimal topology for additive manufacture: A method for enabling additive manufacture of support-free optimal structures // Materials and Design. — 2014. — Vol. 63. — P. 678–690. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.015>.
6. Wu J., Sigmund O., Groen J.P. Topology optimization of multi-scale structures: a review // Structural and Multidisciplinary Optimization. — 2021. — Vol. 63. — P. 1455–1480. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-021-02881-8>.
7. Mass Y., Amir O. Topology optimization for additive manufacturing: Accounting for overhang limitations using a virtual skeleton // Additive Manufacturing. — 2017. — Vol. 18. — P. 58–73. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.08.001>.
8. Jiang H., He Z., Tan H., Li E. Robust topology optimization of structures considering additive manufacturing-induced material anisotropy and uncertainty // Applied Mathematical Modelling. — 2024. — Vol. 136. — P. 115635. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2024.115635>.
9. Zhang W., Abbott W.M., Sasnauskas A., Lupoi R. Process Parameters Optimisation for Mitigating Residual Stress in Dual-Laser Beam Powder Bed Fusion Additive Manufacturing // Metals. — 2022. — Vol. 12, No. 3. — P. 420. — DOI: <https://doi.org/10.3390/met12030420>.
10. Wegst U.G.K., Bai H., Saiz E., Tomsia A.P., Ritchie R.O. Bioinspired structural materials // Nature Materials. — 2015. — Vol. 14. — P. 23–36. — DOI: <https://doi.org/10.1038/nmat4089>.
11. Estrada Q., Reynoso E., Szwedowicz D., Rodriguez-Mendez A., Coutino E., De la Mora T., Wiebe L., Silva J., Torres C. Bending crashworthiness of bionic thin-walled structures inspired by sugar cane stalks // Journal of Physics: Conference Series. — 2022. — Vol. 2412. — P. 012003. — DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2412/1/012003>.
12. Lin E., Li Y., Ortiz C., Boyce M.C. 3D printed, bio-inspired prototypes and analytical models for structured suture interfaces with geometrically-tuned deformation and failure behavior // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. — 2014. — Vol. 73. — P. 166–182. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2014.08.011>.

13. Bol E., Ramulu M. Repeatability of a Topology Optimized Tapered Box Beam Additively Manufactured With Electron Beam Melted Ti-6Al-4V // Proceedings of the ASME 2020 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 2A: Advanced Manufacturing. — Virtual, Online, November 16–19, 2020. — New York: ASME, 2020. — V02AT02A049. — DOI: <https://doi.org/10.1115/IMECE2020-24352>.
14. Yarlagadda T., Zhang Z., Jiang L., Bhargava P., Usmani A. Solid isotropic material with thickness penalization — A 2.5D method for structural topology optimization // Computers & Structures. — 2022. — Vol. 270. — P. 106857. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compestuc.2022.106857>.
15. Cheng L., Zhang P., Biyikli E., Bai J., Robbins J., To A. Efficient design optimization of variable-density cellular structures for additive manufacturing: theory and experimental validation // Rapid Prototyping Journal. — 2017. — Vol. 23, No. 4. — P. 660–677. — DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2016-0069>.
16. Maskery I., Aremu A.O., Parry L., Wildman R.D., Tuck C.J., Ashcroft I.A. Effective design and simulation of surface-based lattice structures featuring volume fraction and cell type grading // Materials & Design. — 2018. — Vol. 155. — P. 220–232. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.05.058>.
17. Wang P., Yang F., Ru D., Zheng B., Fan H. Additive-manufactured hierarchical multi-circular lattice structures for energy absorption application // Materials & Design. — 2021. — Vol. 210. — P. 110116. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110116>.
18. Uddin M.A., Barsoum I., Kumar S., Schiffer A. Enhancing compressive performance in 3D printed pyramidal lattice structures with geometrically tailored I-shaped struts // Materials & Design. — 2024. — Vol. 237. — P. 112524. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112524>.
19. Ashby M.F. The properties of foams and lattices // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. — 2005. — Vol. 364, No. 1838. — P. 15–30. — DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2005.1678>.
20. Hedayati R., Sadighi M., Mohammadi-Aghdam M., Zadpoor A.A. Mechanical properties of regular porous biomaterials made from truncated cube repeating unit cells: Analytical solutions and computational models // Materials Science and Engineering: C. — 2016. — Vol. 60. — P. 163–183. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.11.00>.
21. Vantighem G., De Corte W., Steeman M., Boel V. Density-based topology optimization for 3D-printable building structures // Structural and Multidisciplinary Optimization. — 2019. — Vol. 60. — P. 2391–2403. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-019-02330-7>.
22. Salaimanimagudam M.P., Jayaprakash J. Synergistic potential of topology optimization and lattice structures in concrete 3D printed beams // Structures. — 2025. — Vol. 76. — P. 108892. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108892>.

Akhmadieva Anna Sergeevna

Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia
Naberezhnye Chelny Institute
E-mail: ansakhmadieva@kpfu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2018-4890>

Novoselov Oleg Gennadievich

Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia
Naberezhnye Chelny Institute
E-mail: shi-set@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8810-0732>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=797664

Islamov Kamil Faritovich

Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia
Naberezhnye Chelny Institute
E-mail: kam@kambox.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5168-7629>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=805343

Analysis of the stress-strain state and classification of promising additive forms of steel building structures based on finite element modeling

Abstract. The paper presents a systematic analysis of prospective structural forms of steel I-beams intended for fabrication using additive manufacturing methods. Based on a review of recent publications, four main approaches to the design of additive I-beams are identified and classified: bionic and organic structures, beams with variable cross-section, cellular (lattice) fillers for the web and flanges, and hybrid constructions combining the aforementioned principles. Utilizing topological optimization and the capabilities of large-format additive technologies, the possibility of a significant reduction in material consumption (up to 30–50 % compared to traditional rolled and welded I-beams) while maintaining or improving load-bearing capacity and stability is demonstrated. Finite element modeling was performed for three I-beams of equal metal volume: a traditional welded beam and two additive beams with a checkerboard and lattice internal web structure. Under identical uniformly distributed load and two support conditions (cantilever and simply supported), the additive beams in most design cases demonstrate a reduction in maximum stresses: longitudinal force by 28–35 %, transverse force by up to 84 %, and torsional moment by 61–78 %. The main limitations for the widespread adoption of additive steel building structures are identified: anisotropy of mechanical properties, residual stresses, printing defects, and high cost. Nevertheless, a conclusion is made about the revolutionary potential of additive technologies for transitioning from standardized sections to highly optimized, functionally graded structures that bring the stress-strain state closer to theoretically ideal.

Keywords: additive manufacturing; steel building structures; I-beam; topological optimization; load-bearing capacity; finite element modeling; property anisotropy; residual stresses