

# МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ АВТОМАТИЗАЦИИ СТРОИТЕЛЬСТВА

**Джумалиев Нурдин Таалайбекович**

генеральный директор, ООО «ДСКА ИНЖИНИРИНГ»,  
г. Бишкек, Кыргызстан  
ndjumaliev@gmail.com

## METHODS OF INCREASING THE SEISMIC RESISTANCE OF METAL STRUCTURES IN THE CONDITIONS OF CONSTRUCTION AUTOMATION

**N. Dzhumaliev**

*Summary.* In modern conditions, automation has become an integral part of any process. In the construction industry, automation processes provide solutions to global challenges (increasing urbanization, environmental requirements, safety), as well as technological breakthroughs (creating digital counterparts of metal structures; 3D metal printing; smart installation using robots and computer vision). At the same time, relatively little attention is paid in science to the relationship between construction and automation. This fully applies to the issues of increasing the seismic resistance of metal structures in the context of automation of the construction industry.

The author proves that the introduction of automation in the complex method proposed in the study transforms traditional construction using metal structures in seismically active regions into a high-tech process, where: using artificial intelligence algorithms, optimal structures are designed; robotic assembly of metal structures is ensured with an accuracy several times higher than the accuracy of assembly using human labor; with the help of dampers and high-precision sensors that transmit information to automatic monitoring systems, it provides a higher level of protection for both the metal structures themselves and the building itself in case of an earthquake.

The proposed method not only increases earthquake resistance, but also sets a new standard for safe and economical construction in seismically active regions in the context of global industry automation due to the synergy of automation and adaptive technologies.

*Keywords:* automation, earthquake resistance, metal structures, topological optimization, seismic modeling.

*Аннотация.* В современных условиях автоматизация стала неотъемлемой частью любого процесса. В строительной отрасли процессы автоматизации обеспечивают решение глобальных вызовов (рост урбанизации, экологические требования, безопасность), а также технологические прорывы (создание цифровых двойников металлоконструкций; 3D-печать металлом; умный монтаж с применением роботов и компьютерного зрения). Вместе с тем, в современной науке сравнительно мало уделяется внимания вопросам взаимосвязи строительства и автоматизации. Это в полной мере относится и к вопросам повышения сейсмостойкости металлоконструкций в условиях автоматизации строительной отрасли.

Автором доказывается, что внедрение автоматизации в предложенном в исследовании комплексном методе трансформирует традиционное строительство с использованием металлоконструкций в сейсмически активных регионах в высокотехнологичный процесс, где с помощью алгоритмов искусственного интеллекта обеспечивается проектирование оптимальных структур; обеспечивается роботизированная сборка металлоконструкций с точностью, в разы превышающую точность сборки с использованием человеческого труда; с помощью демпферов и высокоточных датчиков, передающих информацию в автоматические системы контроля, осуществляется более высокий уровень защиты как самих металлоконструкций, так и самого здания при землетрясении.

Предложенный метод не только повышает сейсмостойкость, но и задает новый стандарт для безопасного и экономичного строительства в сейсмоактивных регионах в условиях глобальной автоматизации отрасли за счет синергии автоматизации и адаптивных технологий.

*Ключевые слова:* автоматизация, сейсмостойкость, металлоконструкции, топологическая оптимизация, сейсмическое моделирование.

### Введение

**В** современных условиях автоматизация в строительной отрасли — это не только основное направление изменений и развития данной сферы, но и адекватный ответ на вызовы XXI века. Во-первых, за счет автоматизации становится возможным создание безопасных, долговечных и экономически эффективных объектов. Во-вторых, внедрение автоматизации в строительной отрасли позволяет сократить риски и обеспе-

чить сохранение ресурсов. В условиях растущих требований к устойчивости и безопасности строительных конструкций отказ от автоматизации ставит под угрозу конкурентоспособность строительных компаний и безопасность людей. Автоматизация позволяет не только ускорить строительство, но и повысить точность расчетов и увеличить эффективность строительства в наиболее критичных для данной отрасли направлениях, в том числе таких, как сейсмоопасные регионы. В ограниченных рамках настоящего исследования наибольший

практический интерес вызывает проблематика повышения сейсмостойкости металлоконструкций.

Автоматизация строительства и повышение сейсмостойкости металлоконструкций — направления взаимосвязанные, которые можно эффективно комбинировать для создания безопасных и надежных зданий в сейсмически активных регионах. Так, автоматизация позволяет не только ускорить строительство с использованием металлоконструкций, но и повысить точность наиболее критических для обеспечения сейсмостойкости операций, начиная проектированием и заканчивая монтажом. Комбинация робототехники, искусственного интеллекта и материалов необходимой прочности позволяет создавать металлоконструкции, способные выдерживать экстремальные нагрузки, минимизируя человеческий фактор.

В настоящее время все современные исследования, в основу которых заложены технологии повышения сейсмостойкости металлоконструкций, в большей степени ориентированы именно на их прочностные характеристики. В свою очередь, вопросам выработки методики повышения сейсмостойкости металлоконструкций с применением автоматизации внимания практически не уделяется.

Так, в частности, работа С. Fang, W. Wang, С. Qiu, S. Hu, G.A. MacRae, M.R. Eatherton [1] ориентирована на важность использования высокопрочных сталей, обеспечивающих улучшенную пластичность и способность конструкций сохранять целостность при сильных сейсмических воздействиях, за счет чего значительно снижается риск разрушения в условиях экстремальных нагрузок. Работа М.М. Kharnoob, A.I. Hammood [2] ориентирована на применение современных сплавов с улучшенными механическими свойствами, которые способствуют увеличению прочности конструкций в условиях сейсмической активности. Q. Xu, H. Chen, W. Li, S. Zheng, X. Zhang [3] акцентировали внимание на усилении сварных соединений, рассматривая их как ключевые элементы для повышения жесткости и устойчивости конструкций. В своих работах они описывали методы усиления соединений, которые позволяли улучшить способность конструкций противостоять динамическим нагрузкам, возникающим при землетрясениях. Q. An, С. Wang, T. Ma, F. Zou, Z. Fan, E. Zhou et. al. [4] фокусировались на болтовых соединениях, подчеркивая их важность для повышения общей прочности металлоконструкций, при этом авторы исследования акцентировали свое внимание на том, что качественная обработка и усиление этих соединений увеличивали жесткость всей конструкции и предотвращали разрушение при сильных сейсмических нагрузках.

A.M. Cerapon, R.I. Cotetiu, V. Nasui [5] доказали эффективность использования демпфирующих элементов,

таких, как резинометаллические подушки, необходимые для снижения вибрационных колебаний в конструкциях за счет уменьшения амплитуды колебаний. Существуют также исследования, ориентированные на анализ роли демпфирующих систем в повышении безопасности конструкций, а также на выработку оптимального подхода к выбору технологий виброгашения [6].

R. Ridwan, Y. Jemaa, E.Yuniarto [7] доказали объективность и эффективность использования арматурных каркасов для укрепления металлоконструкций, улучшая их устойчивость к деформациям при землетрясениях. L. Huang, H. Li, S. Xu, B. Dai [8] исследовали роль свайных конструкций в улучшении сейсмостойкости металлоконструкций, предлагая методы их интеграции в проектирование для укрепления фундамента. Они утверждали, что такие системы могли бы значительно повысить стабильность и предотвращать оседание моста в условиях сильных сейсмических колебаний. I. Iervolino, R. Baraschino, A. Spillatura [9] акцентировали внимание на важности соблюдения сейсмических норм и стандартов при проектировании металлоконструкций для обеспечения их устойчивости. Авторы подчеркивали, что интеграция таких норм в проектирование помогала существенно улучшить сейсмоустойчивость объектов и уменьшить риски разрушений. Такие исследователи, как J.L. Zhang, G. Li, D.H. Yu, Z.Q. Dong [10], разработали подход к проектированию металлоконструкций, включающий применение различных методов усиления и сейсмоустойчивого проектирования.

Вместе с тем, во всех проанализированных исследованиях, направленных на изучение возможностей повышения сейсмостойкости металлоконструкций, не уделяется никакого внимания взаимосвязи повышения сейсмостойкости в условиях автоматизации строительной отрасли, в то время как современные технологии автоматизации дают возможность разработать комбинированный подход, включающий топологическую оптимизацию металлоконструкций с использованием алгоритмов искусственного интеллекта и роботизированную сборку с адаптивными демпферами.

Наиболее оптимальной в данном случае является разработка комплексной методики с использованием автоматизированного проектирования и моделирования (BIM-технологии (Building Information Modeling)), топологической оптимизации и сейсмического моделирования.

Так, использование BIM-технологий позволит создавать так называемый «цифровой двойник металлоконструкции» с учетом сейсмических нагрузок, а алгоритмы программы автоматически проверят все узлы на усталостную прочность, оптимизируют геометрию и распределение материала. Топологическая оптимизация при

использовании программ (например, на базе алгоритмов генеративного дизайна) позволяет автоматически генерировать формы металлоконструкций сразу, минимизируя массу конструкции при сохранении ее жесткости и устойчивости к динамическим нагрузкам. Что касается сейсмического моделирования, то в данном случае речь идет об использовании таких программ, как ANSYS, ETABS или SAP2000, позволяющих автоматизировать расчеты сейсмических воздействий, подбирая оптимальные схемы демпфирования и армирования металлоконструкций при строительстве.

### Материалы и методы

В ходе исследования применялись методы динамического и сейсмического анализа, а также сравнительный подход для оценки эффективности материалов и систем при воздействии сейсмических нагрузок. Проанализированы различные методы повышения сейсмостойкости металлоконструкций, включая использование высокопрочных материалов, усиление соединений, внедрение эластичных демпфирующих элементов и оптимизацию проектных решений с учетом процессов автоматизации, основанных на технологиях искусственного интеллекта.

### Результаты и обсуждения

Повышение сейсмостойкости металлоконструкций в условиях автоматизации строительной отрасли требует выработки соответствующей методики и обоснования ее использования. С учетом данных о повышении сейсмостойкости металлоконструкций, отраженных в уже имеющихся исследованиях [5, 7, 8], а в данном исследовании предлагается метод повышения сейсмостойкости металлоконструкций, в основу которого будет заложен комбинированный подход, включающий топологическую оптимизацию конструкций с использованием алгоритмов искусственного интеллекта и роботизированную сборку с адаптивными демпферами. Технологически предлагаемый в рамках настоящего исследования метод состоит из трех этапов: автоматизированное проектирование; роботизированный монтаж; система мониторинга.

На первом этапе — этапе автоматизированного проектирования, используется специальное программное обеспечение, необходимое для топологической оптимизации с учетом сейсмических нагрузок. Алгоритмы искусственного интеллекта, заложенные в программное обеспечение, позволяют осуществлять расчет исходя из минимизации массы конструкции, но с учетом всех необходимых параметров максимизации жесткости металлоконструкции и с учетом правильного распределения напряжений. В промышленных отраслях свою эффективность в расчетах для решения задач прочности и оптимизации показало программное обеспечение Altair OptiStruct. После осуществления всех необходи-

мых расчетов на данном этапе осуществляется интеграция расчетов, полученных с помощью Altair OptiStruct с BIM-платформами, для моделирования поведения здания при землетрясениях (возможно использовать любую платформу, где обеспечена интеграция программного обеспечения с Altair OptiStruct).

На втором этапе — этапе роботизированного монтажа, осуществляется применение промышленных роботов для точной установки узлов и сварки. В промышленности достаточную эффективность показало применение сварочных роботов KUKA и ABB, особенно в сегменте тяжелой робототехники грузоподъемностью 120 кг и более. Погрешность позиционирования при использовании роботизированного монтажа составляет до 0,1 мм [3], что исключает возможность появления слабых мест в соединениях. На этом же этапе должен осуществляться монтаж адаптивных демпферов с памятью формы (SMA-сплавы), активируемых при нагрузках [6, 7].

Третий этап связан с организацией системы мониторинга. На данном этапе осуществляется внедрение датчиков (акселерометры, тензодатчики) для онлайн-отслеживания деформаций. Данные с таких датчиков обрабатываются в реальном времени для коррекции демпфирования [9]. Адаптивные системы демпфирования с автоматизацией позволяют менять жесткость в зависимости от данных датчиков. Например, при землетрясении 7 баллов система за 0,5 сек увеличивает демпфирование с 5 % до 12 %. Машинное обучение программного обеспечения прогнозирует пиковые нагрузки и заранее активирует демпферы.

Для того, чтобы предлагаемый метод мог быть эффективно внедрен в строительство, необходимо сделать расчет его эффективности. Для оценки эффективности предложенного метода проведен динамический анализ методом спектрального реагирования (стандарт Еврокод 8, позволяющий учитывать нелинейную работу конструкций и не противоречащий требованиям российских стандартов в области сейсмостойкости) и конечно-элементным моделированием (с использованием программного обеспечения ANSYS).

При проведении исследования брались следующие исходные данные: сейсмическая нагрузка 7 баллов по шкале сейсмической интенсивности MSK-64 (горизонтальное пиковое ускорение грунта 0,3 g, спектр реакции типа I, грунт категории C). Типы сравниваемых металлоконструкций: традиционная металлоконструкция — стальной каркас с жесткими узлами (двутавры, швеллеры) и оптимизированная металлоконструкция: топологически оптимизированная структура с адаптивными демпферами SMA (никель титановые сплавы). Сравнение параметров представим в таблице 1.

Таблица 1.  
Таблица сравнения параметров металлоконструкции для оценки эффективности

Параметр	Традиционная металлоконструкция	Оптимизированная металлоконструкция	Изменение
Масса конструкции (тонн)	100	85	-15 %
Максимальное напряжение (МПа)	320 ( $\sigma_{all} = 250$ МПа)	220 ( $\sigma_{all} = 250$ МПа)	-31 %
Смещение (мм)	150 ( $\Delta_{all} = 200$ мм)	90	-40 %
Коэффициент демпфирования ( $\zeta$ )	5 %	12 %	+140 %
Собственная частота (Гц)	2,5	3,2	+28 %

Расчёт коэффициента демпфирования осуществлен из следующего выражения:

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{m * k}}$$

В представленной формуле  $c$  — эффективность демпфера SMA (никель титановые сплавы),  $m$  — масса металлоконструкции;  $k$  — жесткость металлоконструкции. Результаты расчетов, проведенных в программе, показали, что чем выше коэффициент демпфирования, тем ниже резонансные колебания, что соответствует выводам из исследований [6, 7].

Напряжения в элементах рассчитывались исходя из следующего выражения:

$$\sigma = \frac{F}{A} \leq \sigma_{all}$$

В представленной формуле  $F$  — сила, а  $A$  площадь сечения.  $F$  критический параметр для оценки прочности. Оптимизация и демпферы снижают эффективную силу, действующую на элементы, что повышает сейсмостойкость. В традиционной конструкции сила ( $F$ ) распределяется неравномерно, поэтому пиковые напряжения в слабых узлах достигают 320 МПа. В оптимизированной конструкции за счет топологии и демпферов посредством использования автоматизированных технологий показана необходимость увеличения площади сечения в ключевых зонах, что позволяет снизить напряжение конструкции до 220 Мпа. Важно отметить и тот факт, что демпферы SMA (никель титановые сплавы) поглощают часть силы ( $F$ ), уменьшая её передачу на каркас металлоконструкции. За счет топологической оптимизации и программных автоматизированных расчетов доказано, что наиболее эффективной конструкцией будет конструкция с увеличенной площадью сечения ( $A$ ) в ключевых узлах на 20 %.

Для расчета смещения (прогиба) конструкции использовалась следующая формула:

$$\Delta = \frac{FL^3}{3EI}$$

В представленной формуле  $L$  — это длина элемента металлоконструкции, на которую действует сила ( $F$ ). Это критический параметр, так как смещение растет пропорционально кубу длины. Чем длиннее элемент, тем больше он деформируется под нагрузкой.  $EI$  — повышение жесткости. В традиционной конструкции длинные элементы приводят к значительным смещениям при землетрясении. В оптимизированной конструкции уменьшение длины за счет топологической оптимизации (например, добавление раскосов или изменение формы узлов в программе) при одновременном увеличении жесткости конструкции снижает прогиб.

Для того, чтобы оценить применимость предложенного метода повышения сейсмостойкости металлоконструкций с применением автоматизации, необходимо оценить его экономическую эффективность. Экономическая эффективность оценивается по снижению прямых затрат (материалы, труд) и косвенным выгодам (долговечность, безопасность). Рассмотрим ключевые параметры: снижение расхода стали на 15 % (таблица 1); сокращение сроков монтажа (если традиционный монтаж металлоконструкций будет занимать 100 дней, то роботизированный около 80 дней, что обеспечит экономию времени на 20 %). Основные затраты на внедрение технологий придутся на приобретение специализированного программного обеспечения и роботизированной техники, обучение персонала с работой в условиях автоматизации, а также потребуются осуществить дополнительные расходы на адаптивные демпферы SMA.

Даже с учетом таких первоначальных вводных очевидна экономическая эффективность от предлагаемого метода. Конкретный расчет срока окупаемости проекта должен быть осуществлен под каждый конкретный проект с учетом его специфики и особенностей. Косвенными выгодами от внедрения метода, ориентированного на автоматизацию, будут: снижение риска разрушения, а соответственно и уменьшение расходов на страхование объекта и репутационные преимущества за счет повышения лояльности клиентов в сейсмоопасных регионах. Предложенный метод интегрирует автоматизацию на всех этапах жизненного цикла металлоконструкций при их использовании в сейсмически опасных регионах — от проектирования до монтажа и эксплуатации. Это не только повышает сейсмостойкость, но и обеспечивает экономическую эффективность за счет оптимизации ресурсов и снижения человеческих ошибок.

## ВЫВОД

Подводя итог, необходимо отметить, что внедрение автоматизации в предложенном в исследовании методе трансформирует традиционное строительство с использованием металлоконструкций в сейсмически активных регионах в высокотехнологичный процесс, где с помощью алгоритмов искусственного интеллекта обеспечивается проектирование оптимальных структур; обеспечивается роботизированная сборка металлоконструкций с точностью, в разы превышающую точность сборки с использованием человеческого труда; с помо-

щью демпферов и высокоточных датчиков, передающих информацию в автоматические системы контроля, осуществляется более высокий уровень защиты как самих металлоконструкций, так и самого здания при землетрясении.

Предложенный метод не только повышает сейсмостойкость, но и задает новый стандарт для безопасного и экономичного строительства в сейсмоактивных регионах в условиях глобальной автоматизации отрасли за счет синергии автоматизации и адаптивных технологий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Fang, C., Wang, W., Qiu, C., Hu, S., MacRae, G. A., & Eatherton, M. R. (2022). Seismic resilient steel structures: A review of research, practice, challenges and opportunities. *Journal of Constructional Steel Research*, 191, 107172. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143974X2200044X>
2. Kharnoob, M.M., & Hammood, A.I. (2021). A review: The structures of vibration control devices of Zn and Fe based on memory system alloy. *Materials Today: Proceedings*, 42, 3035–3040. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785320405437>
3. Xu, Q., Chen, H., Li, W., Zheng, S., & Zhang, X. (2022). Experimental investigation on seismic behavior of steel welded connections considering the influence of structural forms. *Engineering Failure Analysis*, 139, 106499. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630722004733>
4. An, Q., Wang, C., Ma, T., Zou, F., Fan, Z., Zhou, E., ... & Chen, M. (2024). Aeronautical composite/metal bolted joint and its mechanical properties: a review. *Journal of Intelligent Manufacturing and Special Equipment*, 5(1), 70–91. <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/jimse-12-2023-0012/full/html>
5. Cerapon, A.M., Cotetiu, R.I., & Nasui, V. (2023). Considerations on the Current State of Research on Vibration Testing of Rubber-Metal Products. *Scientific Bulletin Series C: Fascicle Mechanics, Tribology, Machine Manufacturing Technology*, 2022(37). [https://nordtech.ubm.ro/issues/2023/4.BSSC\\_v2023\\_issXXXVII\\_10to13.pdf](https://nordtech.ubm.ro/issues/2023/4.BSSC_v2023_issXXXVII_10to13.pdf)
6. Li, H., Askari, M., Li, J., Li, Y., & Yu, Y. (2021). A novel structural seismic protection system with negative stiffness and controllable damping. *Structural Control and Health Monitoring*, 28(10), e2810. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/stc.2810>
7. Ridwan, R., Jemaa, Y., & Yuniarto, E. (2023). Various Methods of Strengthening Reinforced Concrete Beam-Column Joint Subjected Earthquake-Type Loading Using Fibre-Reinforced Polymers: A Critical Review. *Journal of Applied Materials and Technology*, 4(2), 42–55. <https://www.jamt.icaancee.org/index.php/jamt/article/view/74>
8. Huang, L., Li, H., Xu, S., & Dai, B. (2023). Structural system design and earthquake response analysis of prefabricated pile-plate bridge. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 22(4), 2263–2274. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13467581.2022.2145217>
9. Iervolino, I., Baraschino, R., & Spillatura, A. (2023). Evolution of seismic reliability of code-conforming Italian buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 27(7), 1740–1768. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13632469.2022.2087801>
10. Zhang, J.L., Li, G., Yu, D.H., & Dong, Z.Q. (2024). Framework for seismic risk analysis of engineering structures considering the coupling damage from multi-environmental factors. *Journal of Structural Engineering*, 150(10), 04024147. <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/JSENDH.STENG-13340>

© Джумалиев Нурдин Таалайбекович (ndjmaliev@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»