



МРНТИ 73.41.39

Научная статья

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-7263-2024-146-1-201-221>

## Использование инновационных материалов для разработки башенных кранов

А. Тулеков<sup>1</sup> , Б. Сазамбаева<sup>1</sup> , Б. Тогизбаева<sup>1</sup> , И. Кенесбек\* 

<sup>1</sup>Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

(E-mail: [auezkhan1337@gmail.com](mailto:auezkhan1337@gmail.com), [a.sazambaeva\\_t@mail.ru](mailto:a.sazambaeva_t@mail.ru), [inkara\\_9898@mail.ru](mailto:inkara_9898@mail.ru)\*)

**Аннотация.** В этой статье проводится сравнительный анализ классической стали и композитных материалов, исследуются их соответствующие свойства и области применения в контексте разработки башенных кранов. Сочетание этих материалов учитывает такие факторы, как прочность, вес, стоимость и долговечность, отражая многогранный процесс принятия решений, который формирует выбор материалов в строительной отрасли.

Башенные краны, неотъемлемая часть строительной отрасли, традиционно изготавливались из классической стали из-за ее прочности. Однако появление композитных материалов бросает вызов этой норме, обещая высокую прочность и меньший вес. МКЭ-анализ используется для моделирования и анализа структурного поведения этих материалов в различных условиях, обеспечивая всестороннее понимание распределения напряжений, характера деформации и общей целостности. В статье исследуются такие важные факторы, как соотношение прочности к весу, динамическая нагрузка и экономическая эффективность, что в конечном итоге дает ценную информацию для принятия обоснованных решений в области проектирования и строительства башенных кранов. Такое всестороннее понимание облегчает детальное сравнение этих материалов с точки зрения их конструктивных характеристик, проливая свет на их соответствующие преимущества и ограничения.

По сути, цель этой статьи - дать инженерам, лицам, принимающим решения, и профессионалам отрасли всестороннее представление о конструктивных тонкостях и динамическом поведении классической стали и композитных материалов в контексте разработки башенных кранов. Используя компьютерное моделирование, исследование дает ценную информацию для принятия стратегических решений, прокладывая путь к продвижению эффективных, надежных и устойчивых технологий башенных кранов в строительной отрасли.

**Ключевые слова:** башенный кран, грузоподъемные машины, композитные материалы, углеволокно, стекловолокно, МКЭ-анализ.

Поступила: 29.01.2024 Доработана: 06.02.2024. Одобрена: 22.02.2024. Доступна онлайн: 29.03.2024

<sup>1</sup> автор для корреспонденции

## 1. Введение

В динамичной строительной отрасли разработка и эволюционирование башенных кранов играют ключевую роль в повышении эффективности, безопасности и общих сроках реализации проекта. Башенные краны традиционно изготавливались с использованием классических стальных материалов благодаря их хорошо зарекомендовавшей себя прочности и долговечности [3]. Однако недавние успехи в материаловедении и инженерии вывели композитные материалы на первый план, представив убедительную альтернативу господству стали. Традиционно изготовленные на прочных стальных фундаментах эти краны продемонстрировали надежность за десятилетия эксплуатации. Однако появление композитных материалов, отличающихся своим легким, но прочным составом, побудило к переоценке общепринятых представлений о конструкции башенных кранов.

Башня и стрела крана состоят из стержневой конструкции, где стержни - идеальный элемент для приготовления волокнистых композиционных материалов, которые эффективны при продольном нагружении.

Это исследование – не просто сравнение двух материалов; это исследование будущего строительных технологий. Отправляясь в это сравнительное путешествие, важно осознать проблемы и возможности, которые представляют как классическая сталь, так и композитные материалы.

Известно, что композитные материалы сопоставимы со стальными и имеют хорошие показатели по прочности, массе, долговечности, упругости, экологичности, экономичности и др.

Рассмотрение вопросов, посвященных основам классической прочности и инновационным перспективам композитных материалов, подготавливает почву для детального изучения факторов, влияющих на выбор материалов в постоянно развивающейся области разработки башенных кранов. По сравнению с классическими методами по улучшению башенных кранов, которые основаны на усилении конструкции в критических местах, в методе использования композитных материалов необходимо учитывать различные непредсказуемые явления [4]. Одним из таких явлений является часто распространенная проблема композитных материалов - это внутренняя деформация матрицы, особенно локальная. Фактически, в процессе оптимизации, с целью уменьшения веса, толщина компонента уменьшается, и поэтому явления потери устойчивости становятся более важными [2]. К примеру, одним из наиболее важных критериев в процессе проектирования стрелы башенного крана является нагрузка на изгиб [8]. Композит – это материал, состоящий из нескольких компонентов, т.е. матрицы и волокна, где матрица обеспечивает монолитность материала. Композитные материалы при правильной подборке их состава имеют высокий коэффициент противостояния изгибу [6]. Сложность заключается в непредвиденном поведении композитного материала при различных условиях среды, также расчет его остаточного напряжения [5].

Главной целью данного исследования будет сравнение классических материалов с композитными на предмет их изменчивости и противостоянию критическим нагрузкам,

изгибам в конструкции стрелы и башни крана [9]. В частности, основной целью этого исследования является оценка критической нагрузки на изгиб и деформацию [9].

В связи с тем, что критерий работоспособности – это условие устойчивости, определяемый гибкостью  $\lambda = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_n}}$ , позволяет сравнивать стержни ферм из различных материалов. Обеспечение равной гибкости стержней, выполненных из различных материалов, позволит применять композитные материалы. После проведения экспериментальной части исследования наглядно будет видна разница в смещении и напряжении классических материалов по сравнению с композитными [1].

## 2. Теоретическая часть

### 2.1 Технические характеристики крана

Техническая характеристика башенного крана QTZ 80A (Таблица 1). Башенный кран QTZ80A – это кран с усиленной конструкцией, разработанный в соответствии с GB/T5031 и GB5144, с номинальным моментом подъема 80 т\*м и максимальной грузоподъемностью 8 тонн. Данный башенный кран обладает грузоподъемностью 1,1 тонна на максимальном вылете стрелы 60,2 м (Рисунок 1) [7], что является максимально возможным критическим показателем в конструкции стрелы. Башенный кран является наиболее оптимальным в сегменте цена-качество и обладает всем необходимым функционалом в современных реалиях. Конструкторские и экспериментальные расчеты данной модели позволят создать методическое пособие по оптимизации других моделей башенных кранов по примеру данной исследовательской работы. Ниже показана модель, сделанная в SolidWorks [8].



Рисунок 1. Модель башенного крана SolidWorks

**Технические характеристики башенного крана QTZ80A**

ПОКАЗАТЕЛЬ \ ИСПОЛНЕНИЕ	Changli 5512
Максимальный грузовой момент, кН·м	800
Грузоподъемность максимальная, т	8
Грузоподъемность на максимальном вылете, т	1,1
Вылет максимальный, м	60,2
Высота подъема свободностоящего крана, м	46
Высота подъема максимальная, м	150
Скорость подъема наибольшей массы, м/мин	20
Скорость подъема груза наибольшая, м/мин	40
Скорость изменения вылета с грузом, м/мин	10/30/60
Частота вращения, об/мин	0-0,6
Масса свободностоящего крана (без противовеса и балласта), т	46,4
Масса противовеса, т	15,5

*2.2 Размеры стрелы башенного крана и его прочностной расчет*

Стрела башенного крана является основной силовой конструкцией, которая представляет из себя сложную ферму с противовесом на другом конце. Каждая секция стрелы составляет  $l = 3,5$  метра, высота стрелы  $a = 1,84$  метра и ширина  $b = 2$  метра (Рисунок 2) [7]:



**Рисунок 2. Стрела башенного крана**

Используя формулу прогиба стрелы башенного крана, можно рассчитать минимальное значение момента инерции, которым должен обладать рычаг, чтобы соответствовать ограничению допустимого отклонения [10]. С помощью полученного значения, используя таблицы стандартных профилей стрелы, можно определить тип и размер, который будет использоваться в нашем исследовании. Формула момента инерции выглядит следующим образом:

$$I = \frac{F * L_b^3}{3 \epsilon d_b} \tag{1}$$

где:

F – сила или груз действующий на стрелу;

$L_b$  – длина стрелы;

$\epsilon$  – модуль Юнга;

$d_b$  – допустимое отклонение стрелы.

Исходя из значений, полученных при расчете момента инерции, можно получить следующие значения из нормативных таблиц: площадь поперечного сечения  $S_b$  и сопротивление  $R_b$ .

Далее, имея значения плотности  $\rho$ , длину стрелы  $L_b$  и площади поперечного сечения  $S_b$ , можно найти вес стрелы  $P_b$ :

$$P_b = S_b * \rho * L_b \quad (2)$$

Дальше можем рассчитать вес на 1 метр конструкции стрелы:

$$p_b = S_b * \rho * 1\text{м} \quad (3)$$

Общая деформация стрелы  $d_b$  представляет из себя сумму трех составляющих: деформацию стрелы из-за груза  $d_l$ , деформацию из-за веса самой стрелы  $d_p$  и деформацию, которая появляется при сдвиге  $d_s$  [б]:

$$d_b = d_l + d_p + d_s = \frac{F * L_b^3}{3EI_b} + \frac{F * L_b}{GS_b} + \frac{F p_b * L_b^4}{8EI_b} \quad (4)$$

Исходя из нормативных документов по конструкции и размеров стрелы кранов приведено следующее значение отношения длины к общему допустимому отклонению, которое должно быть больше или равно 800. Чтобы стрела соответствовала ограничению, налагаемому на изгиб, необходимо убедиться, что:

$$\frac{L_b}{d_b} \geq 800$$

Максимальное суммарное напряжение  $\sigma_b$  на конце стрелы определяется суммой напряжения от груза  $\sigma_l$  и от веса  $\sigma_p$  самой стрелы башенного крана, его можно рассчитать по следующей формуле [и]:

$$\sigma_b = \sigma_l + \sigma_p = \frac{F * L_b}{R_b} + \frac{F p_b * L_b}{2 * R_b} \quad (5)$$

Далее необходимо рассчитать критическую нагрузку на стрелу башенного крана, которая имеет треугольную форму в сечении. Для расчета сил, которые изгибают стрелу башенного крана, необходимо найти площадь сечения стрелы  $S_b$ :

$$S_b = \frac{a_1 * b_1 - a_2 * b_2}{2} \quad (6)$$

Далее вычисляем геометрические характеристики сечения стрелы, момент инерции стрелы  $J_b$ :

$$J_{bx} = \frac{b_1 * a_1^3 - b_2 * a_2^3}{24} \quad (7)$$

И момент сопротивления изгибу полого треугольника  $W_b$ :

$$W_{bx} = \frac{b_1 * a_1^3 - b_2 * a_2^3}{2(6 * a_1)} \quad (8)$$

Из условия прочности допускаемый крутящий момент стрелы при треугольном сечении следующий  $M_b$ :

$$[M_{bx}]_{[\tau]} = [\tau] * W_{bx} \quad (9)$$

где:

$[\tau]$  – допустимое касательное напряжение.

Из условия жесткости допускаемый крутящий момент для сечения стрелы башенного крана  $M_b$  будет следующим:

$$(10)$$

где:

$[\theta]$  – допустимые углы закручивания;

$\varphi$  – коэффициент надежности по нагрузке.

Для нахождения допускаемого крутящего момента необходимо знать модуль упругости при кручении, формула выглядит следующим образом  $G$ :

$$G = \frac{\varepsilon}{2(1+\nu)} \quad (11)$$

где:

$\nu$  – коэффициент Пуассона.

Необходимо найти параметр кручения  $\beta$ :

$$\beta = \sqrt{\frac{\varepsilon * \pi^2 * W_{bx}}{G * J_{bx} * L_b^2}} \quad (12)$$

Далее находим параметр нагрузки на стрелу башенного крана  $E$ :

$$E = \frac{2\mu * \beta}{\pi * a}$$

где:

$\mu = \frac{a}{2}$  – это место, откуда начинается нагрузка на сечении стрелы.

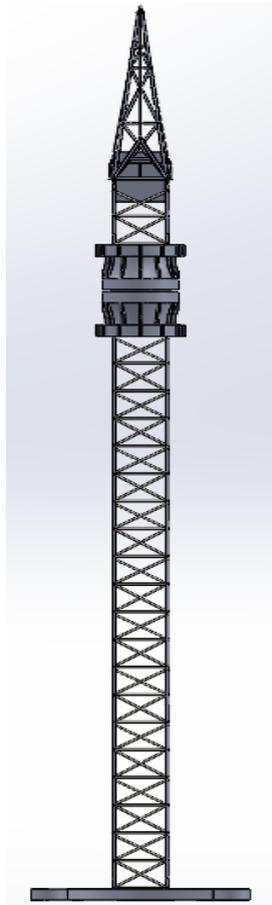
Далее, исходя из параметров, найденных выше, можно найти критическую нагрузку  $F_b$  для консольной балки треугольной формы с сосредоточенной нагрузкой 1,1 тонны:

$$F_b = \left( 11 \left( 1 + \frac{1.2E}{\sqrt{1+1.2^2 E^2}} \right) + 4(\beta - 2) \left( 1 + \frac{1.2(E-0.1)}{\sqrt{1+1.2^2(E-0.1)^2}} \right) \right) \frac{\sqrt{E W_x G J_x}}{L_b^3}$$

Одним из основных преимуществ использования композитных материалов для стрелы башенного крана является возможность существенного снижения веса. Композиты, будучи

по своей природе легкими, способствуют снижению общего веса стрелы. Это снижение веса оказывает каскадное воздействие на всю конструкцию крана, влияя на такие факторы, как транспортные расходы, простота сборки и несущая способность.

Композиты известны своим впечатляющим соотношением прочности к весу. Используя анализ методом конечных элементов (МКЭ), команда инженеров может точно смоделировать и проанализировать конструктивные характеристики композитной стрелы. Это позволило бы провести оптимизацию, гарантируя, что стрела сохранит требуемую прочность при минимизации ненужного веса.



### 2.3 Размеры башни крана и его прочностной расчет

Для определения точных размеров башни крана мы будем использовать прямоугольную ферму, ширина  $a_t$  и длина  $b_t$  которой составляет 1,84 метра. Высота башни составляет 46 метров  $h_t$  (Рисунок 3) [7]. Один конец башни будет жестко прикреплен фундаментом в землю и на другой конец будет жестко прикреплена стрела, для более наглядных параметров нагрузки.

Общее сжимающее усилие  $F$  и момент  $M$ , обусловленные поднимаемым весом самой башни, весом груза и весом стрелы, могут быть рассчитаны как:

$$F_{tot} = F_t + F_p + F_b \quad (15)$$

$$M = L_b (F_b + \frac{F_p}{2}) \quad (16)$$

Момент инерции для башни крана будет рассчитываться по следующей формуле:

$$I_t = \frac{M * L_t^3}{2 \epsilon d_t} \quad (17)$$

где:

$M$  – момент кручения, который оказывает на конец башни стрела;

$L_t$  – длина башни;

$\epsilon$  – модуль Юнга;

$d_t$  – допустимое отклонение башни.

Получив значения момента инерции  $I_t$ , модуля сопротивления

Рисунок 3. Башня крана.  $R_t$  и площади поперечного сечения  $S_t$  башни крана, общий вес  $P_t$  и вес на единицу длины  $p_t$  можно рассчитать по следующим формулам [и]:

$$P_t = S_t * \rho * L_t \quad (18)$$

$$p_t = S_t * \rho * 1м \quad (19)$$

Деформация башни, вызванная сжимающей силой  $d_t$ , вдоль вертикальной оси равно:

$$d_t = \frac{F_{tot} * L_t}{\varepsilon * S_t} \quad (20)$$

В то время как смещение башни крана поперечно вертикальной оси:

$$d_M = \frac{M * L^2_t}{2\varepsilon * I_t} \quad (21)$$

Максимальное суммарное напряжение  $\sigma_t$  на конце башни определяется суммой напряжения от груза  $\sigma_F$  и от веса  $\sigma_p$  самой стрелы башенного крана, и момента инерции  $\sigma_m$  можно рассчитать по следующей формуле [и]:

$$\sigma_t = \sigma_m + \sigma_p + \sigma_F = \frac{M}{I_t} + \frac{F_t}{S_t} + \frac{F_p}{S_t} \quad (22)$$

Так как башня крана изготовлена из профилей, изготовленных либо из классических стальных материалов, либо из современных композитных материалов, на них также сильное влияние оказывает изгиб [и] при кручении, башня крана при внезапном отклонении вбок начинает выкручиваться из плоскости нагрузки. Для избежания критических положений башни необходимо рассчитать максимальное сопротивление изгибу аналогично со стрелой.

$$S_t = a_t * b_t - a_{t2} * b_{t2} \quad (23)$$

Далее вычисляем геометрические характеристики сечения башни, момент инерции стрелы  $J_t$ :

$$J_{ty} = \frac{a_1 * b_1^3 - a_2 * b_2^3}{12} \quad (24)$$

и момент сопротивления изгибу полого прямоугольника  $W_t$ :

$$W_{ty} = \frac{a_1 * b_1^3 - a_2 * b_2^3}{6 * b} \quad (25)$$

Из условия прочности допускаемый крутящий момент башни при прямоугольном сечении следующий  $M_t$ :

$$[M_{ty}]_{[\tau]} = [\tau] * W_{ty} \quad (26)$$

где:

$[\tau]$  – допустимое касательное напряжение.

Из условия жесткости допускаемый крутящий момент для сечения башни  $M_t$  будет следующим:

$$[M_{ty}]_{[\theta]} = [\theta] * G * J_{ty} * \varphi \quad (27)$$

где:

$[\theta]$  – допустимые углы закручивания;

$\varphi$  – коэффициент надежности по нагрузке;

Для нахождения допускаемого крутящего момента необходимо знать модуль упругости при кручении, формула выглядит следующим образом  $G$  [10]:

$$G = \frac{\varepsilon}{2(1+\nu)} \quad (28)$$

где:

$\nu$  – коэффициент Пуассона.

Необходимо найти параметр кручения  $\beta_t$ :

$$\beta = \sqrt{\frac{\varepsilon * \pi^2 * W_{ty}}{G * J_{ty} * L_t^2}} \quad (29)$$

Далее находим параметр нагрузки на основании башенного крана  $E_t$ :

$$E_t = \frac{2\mu * \beta}{\pi * a} \quad (30)$$

где:

$\mu = \frac{t}{2}$  – это место, откуда начинается нагрузка на сечении башни.

Далее, исходя из параметров, найденных выше, можно найти критическую нагрузку  $F_t$  для консольной балки прямоугольной формы с сосредоточенной нагрузкой веса стрелы, балласта и груза:

$$F_t = \left( 11 \left( 1 + \frac{1.2E}{\sqrt{1+1.2^2E^2}} \right) + 4(\beta - 2) \left( 1 + \frac{1.2(E-0.1)}{\sqrt{1+1.2^2(E-0.1)^2}} \right) \right) \frac{\sqrt{EW_{ty}GJ_{ty}}}{L_t^3} \quad (31)$$

Показатели, найденные выше, позволят сравнить результаты, полученные в ходе экспериментальной части. Все допустимые значения, полученные теоретическим путем, позволят показать разницу. Программное обеспечение SolidWorks является наиболее оптимальным для решения данной задачи [8].

Необходимо правильно подобрать материалы для качественного расчета и внести их в алгоритмы программы.

### 3. Выбор материалов

В нашем исследовании мы будем рассматривать три вида материала: классическую сталь, стекловолоконный и углеволоконный композитные материалы. В качестве стали Ст 45 [9], в качестве композитных материалов будут взяты углеволокно и стекловолокно (Таблица 2) [3].

Таблица 2

**Материалы и их характеристики**

Вид материала	Модуль Юнга (МПа)	Коэффициент Пуассона $\nu$	Модуль сдвига G (МПа)	Плотность $\rho$ (кг/м <sup>3</sup> )	Предел прочности $\sigma_R$ (МПа)	Текущая $\sigma_{0.1}$ (МПа)	Прочность сжатия $X_c$ (МПа)
Сталь 45	210,000	0.28	79,000	7800	550	241	/
Углеродное волокно	250,000	0.34	76,865	1600	1700	/	670
Стекловолокно	87,000	0.32	32,954	2610	344	/	1240

Свойства углеродных и стекловолокон зависят от окружающей среды, сырья и от процесса создания данных материалов [4]. Композитные материалы в современном мире стали популярны как наиболее эффективный легкий материал для использования их в конструкторской отрасли тяжелых машин [1]. Сейчас инженеры работают над снижением расхода топлива путем облегчения конструкции.

Композитные материалы широко применяются в авиакосмической отрасли, что является показателем для их использования и в других отраслях [5], [6]. Композитные материалы обладают высоким модулем упругости и удельным пределом прочности при растяжении. Благодаря легкому весу и прочностным характеристикам, композитные материалы завоевывают все отрасли машиностроения [5]. Современные композитные материалы обладают высоким модулем упругости за счет увеличения размера кристаллов углерода и стекла. Композитные материалы, в частности, углеродное волокно обладает приемлемой электрической и теплопроводностью [1].

**4. Экспериментальная часть**

*4.1 Создание модели башенного крана*

Анализ методом конечных элементов (МКЭ) обеспечивает сложный численный подход для моделирования и анализа структурного поведения материалов в различных условиях. Подвергая классические стальные и композитные конструкции анализу МКЭ, можно получить ценную информацию о распределении напряжений, характере деформаций и общей целостности конструкции [11], путем наложения сетки на конструкцию башенного крана рассчитать каждую соту как отдельно взятую секцию и впоследствии воссоединить данные. При этом башня крана жестко прикреплена к земле при помощи фундамента. Для простоты расчетов стрела была жестко прикреплена к башне крана. Композитные материалы обеспечивают большую гибкость конструкции по сравнению с традиционными материалами, такими, как сталь. Уникальные свойства композитов могут быть использованы для создания сложных и эффективных конструктивных форм, оптимизируя аэродинамику и конструктивную эффективность стрелы. Такая гибкость конструкции может привести к инновационным решениям,

повышающим общую производительность башенного крана. Платформа вращения и тележка башенного крана не были спроектированы на чертеже, так как являются дополнительными элементами, которые нагружают программу и усложняют расчеты [8] (Рисунок 4).

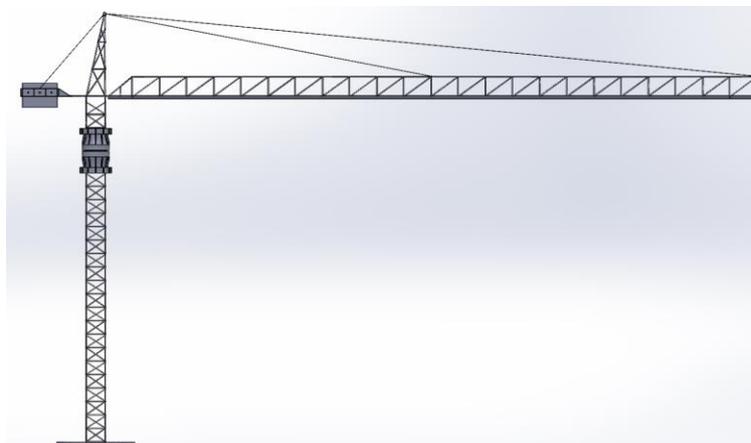


Рисунок 4. 3D-модель башенного крана

#### 4.2 МКЭ-анализ башенного крана из классической стали

Первым материалом будет классическая сталь марки Ст45, ниже будет показано, что кран отклонился от начальных координат при нагрузке в 1,1 тонну и весе балласта 15 тонн на 53 сантиметра, что является хорошим показателем (Рисунок 5):

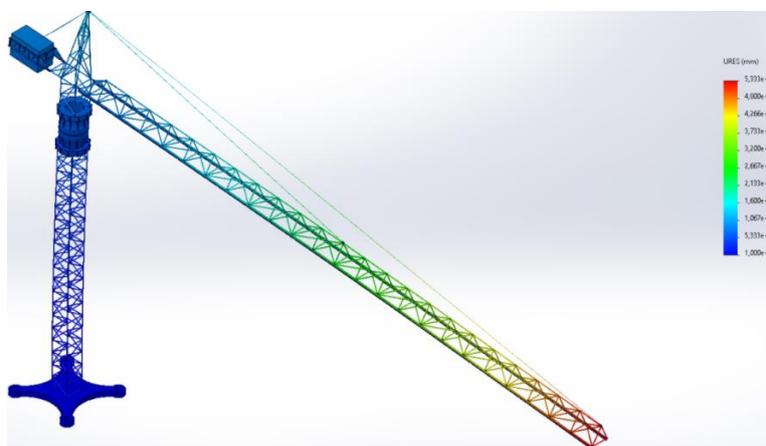


Рисунок 5. Смещение башенного крана из стали

Критерии, которые берутся для расчета напряжения фермы (Рисунок 6) башенного крана, основываются на теории Мизеса-Хенки, также известной как теория энергии формоизменения. В исчислении главных напряжений  $\sigma_1, \sigma_2$ , и  $\sigma_3$  напряжение по Мизесу выражено как [10]:

$$\sigma_{mises} = \left( \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2} \right)^{1/2} \quad (32)$$

Данная теория гласит, что любой пластичный материал разрушается в критических местах, где напряжение достигает предела текучести [10]. Для точного определения предела текучести нами задана стандартная температура в +15 градусов по Цельсию.

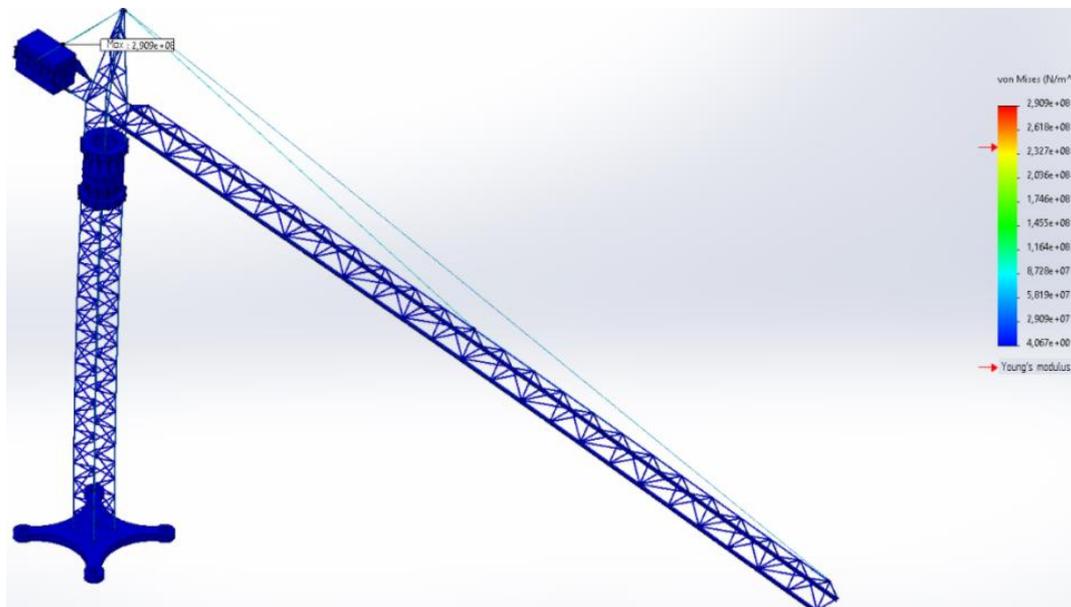


Рисунок 6. Максимальное напряжение крана из стали

На данном чертеже превышенные показатели находятся на концах ттяг, которые удерживают стрелу, для стальных канатов используются другие материалы с другим пределом текучести. Средние показатели для элементов конструкции составляют порядка 45 МПа, что является нормой при 241 МПа допустимого напряжения [9].

#### 4.3 МКЭ-анализ башенного крана из углеволокна

Хотя первоначальные затраты на композитные материалы могут быть выше, следует учитывать потенциальную долгосрочную экономию затрат на транспортировку, сборку и техническое обслуживание. Анализ МКЭ может помочь в оценке стоимости жизненного цикла композитной стрелы, обеспечивая целостное понимание ее экономической жизнеспособности.

Следующий материал, который мы рассмотрим, - это углеволокно, модель Intermediate Modulus, смещение от начальных координат стрелы башенного крана из данного композитного материала составит 67,79 сантиметров, что допустимо (Рисунок 7) [5]:

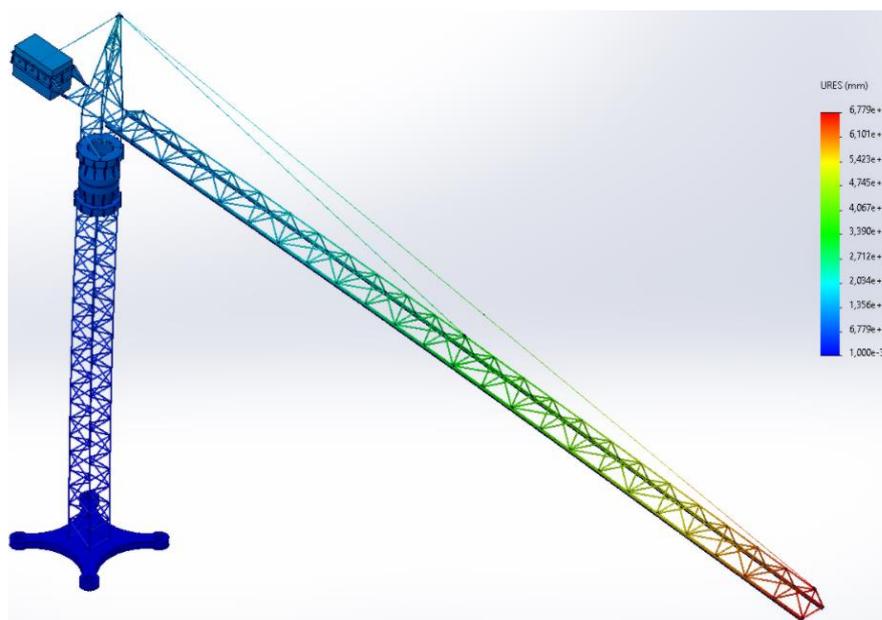


Рисунок 7. Смещение башенного крана из углеволокна

Для расчета напряжения башенного крана из композитного материала необходимы показатели предела прочности на растяжение, так как текучестью они не обладают. Среднее напряжение элементов конструкции составило 58 МПа, что является допуском при пределе прочности в 1700 МПа (Рисунок 8) [1]:

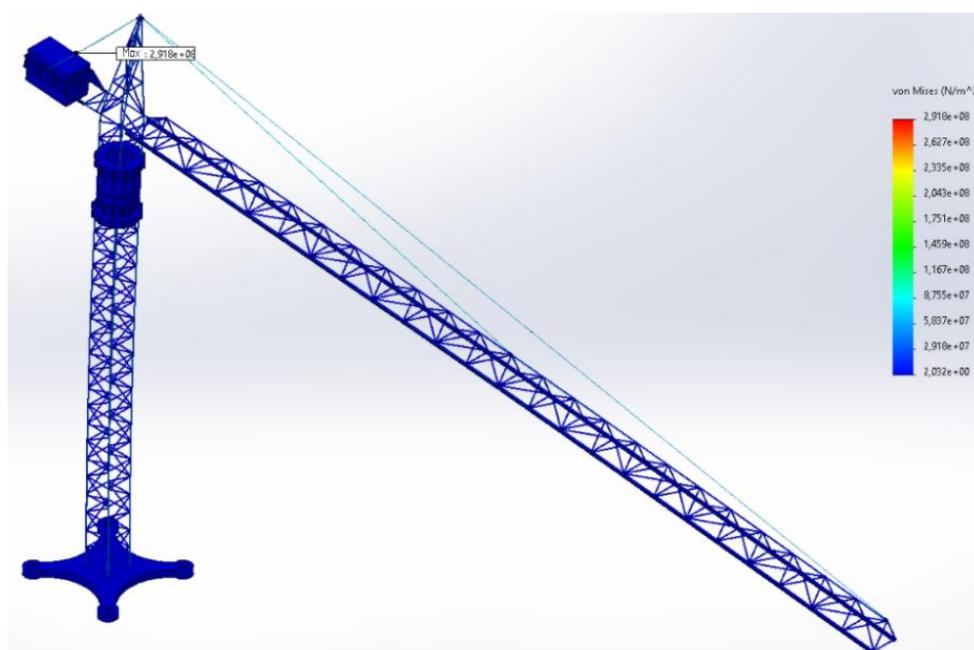


Рисунок 8 - Максимальное напряжение крана из углеволокна

#### 4.4 МКЭ-анализ башенного крана из стекловолокна

Динамический характер работы башенного крана предполагает циклическую загрузку и разгрузку, что со временем может привести к усталости. Композитные материалы могут демонстрировать превосходную усталостную стойкость, поскольку их свойства менее подвержены разрушению при повторных нагрузках. МКЭ-анализ позволяет моделировать эти условия динамического нагружения, помогая инженерам прогнозировать и повышать усталостные характеристики композитной стрелы.

Последний материал, который используется в качестве эксперимента, для строительства башенного крана - это стекловолокно, которое имеет плохие показатели смещения от начальной точки, порядка 3,7 метров (Рисунок 9) [5]:

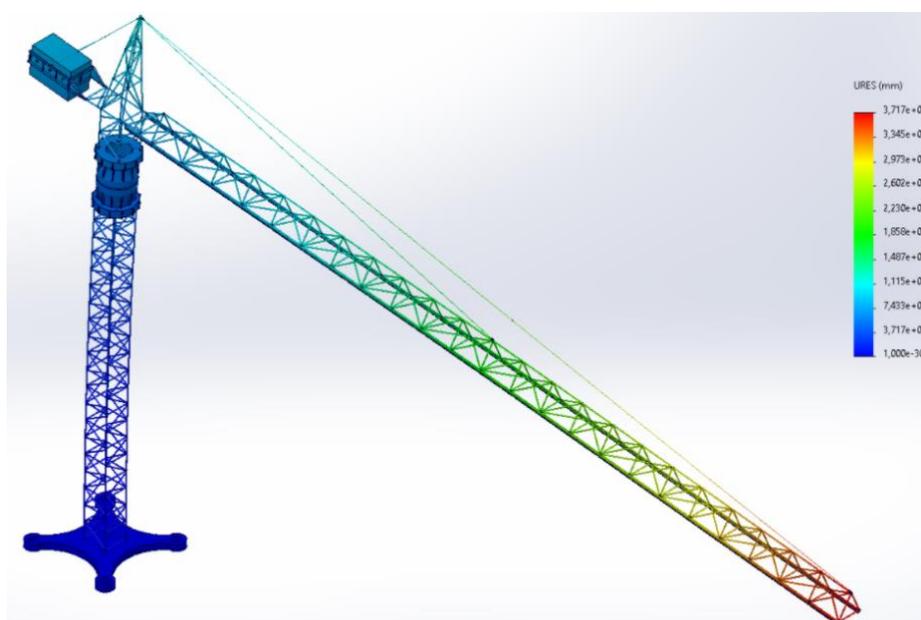


Рисунок 9. Смещение башенного крана из стекловолокна

Для расчета напряжения башенного крана из стекловолокна также необходимы показатели предела прочности при растяжении, так как текучестью они не обладают. Среднее напряжение элементов конструкции составило 60 МПа, что является допуском при пределе прочности в 344 Мпа [3]. Но данный материал показал плохие показатели смещения от начальных координат, что является критичным, так как создает дополнительное качение, что увеличивает нагрузку на конструкцию (Рисунок10):

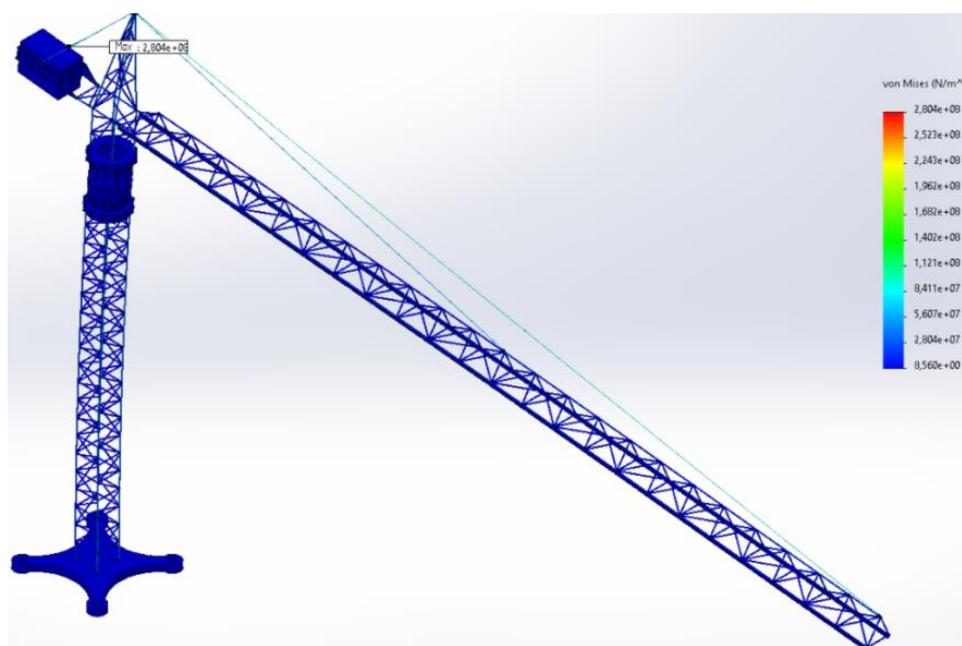


Рисунок 10. Максимальное напряжение крана из стекловолокна

## 5. Экономическая часть

Из полученных результатов можно отметить, что можно значительно снизить вес крана за счет использования композитных материалов. Для примера: если взять вес башенного крана в 1000 кг, то при таком же расходе материалов, исходя из плотности композитов, вес крана из углеродного волокна – 205 кг, а вес крана из стекловолокна – 334 кг. В процентном соотношении, по сравнению с самым тяжелым стальным краном, вес крана из углеволокна снижен на 79,5 процентов, вес крана из стекловолокна снижен на 66,6 процентов.

Используя анализ методом конечных элементов (МКЭ), в статье проводится всесторонний анализ затрат и выгод как для классической стали, так и для композитных материалов. Это включает в себя тщательную оценку материальных и производственных затрат, транспортных расходов и потенциальной экономии на обслуживании в течение срока службы крана. Тщательно изучая эти экономические аспекты, лица, принимающие решения, могут делать осознанный выбор, основанный на целостном понимании финансовых последствий, связанных с каждым материалом.

Классическая сталь долгое время пользовалась популярностью из-за ее доступности и изобилия. МКЭ-анализ помогает количественно оценить материальные и производственные затраты, связанные со сталью, с учетом таких факторов, как цены на сырье, затраты на обработку и технологии изготовления (11). Аналогичным образом, композитные материалы, хотя и потенциально более дорогие изначально, могут обеспечить долгосрочную экономическую выгоду за счет снижения веса и повышения эффективности конструкции. Целью анализа является четкое сравнение первоначальных затрат и затрат на жизненный цикл, связанных с каждым материалом (Таблица 3).

Таблица 3

**Сравнение цены закупки**

Материал	Цена за килограмм швеллера (\$)	Вес (кг)	Общая цена (\$)
Сталь	10	1000	10000
Углеродное волокно	72	205	14760
Стекловолокно	15	334	5010

Из данной таблицы можно наблюдать, что цена углеродного волокна за один килограмм больше в 7 раз, а цена стекловолокна в 1,5 раза больше, чем сталь. Но если брать с объемами, необходимыми для строительства башенного крана, углеродное волокно будет стоить дороже в 1,5 раза, а стекловолокно дешевле вдвое. Из этого можно сделать выводы, что при закупке материалов для строительства затраты будут незначительны.

Также стоит отметить, что компоненты башенных кранов часто приходится транспортировать на строительные площадки, и вес материалов существенно влияет на транспортные расходы. Уменьшенный вес композитных материалов, как показал анализ методом конечных элементов, потенциально может привести к снижению транспортных расходов. Понимание того, как каждый тип материала влияет на логистические соображения, жизненно важно для эффективного планирования проекта и управления затратами.

**6. Вывод**

В постоянно меняющейся тенденции разработки башенных кранов всесторонний сравнительный анализ классической стали и композитных материалов, дополненный анализом методом конечных элементов (МКЭ), раскрывает тонкое понимание их конструктивных характеристик и экономической эффективности. Это исследование выходит за рамки традиционной дихотомии, предлагая ценные идеи, которые находят отклик как с инженерной точностью, так и с экономической целесообразностью.

МКЭ-анализ позволил получить глубокое представление о структурном поведении классической стали и композитных материалов в различных условиях. Изучение соотношения прочности к весу, реакции на динамические нагрузки и анализ усталости выявили уникальные свойства каждого материала. Инженеры и лица, принимающие решения, могут использовать эти знания для адаптации конструкций башенных кранов к конкретным требованиям проекта, обеспечивая оптимальную производительность и надежность. Экспериментальная часть показала, что углеродное волокно обладает схожими параметрами по уровню надежности, что и стальной башенный кран, но весит в 5 раз меньше классического. Стекловолокно, хоть и обладает малым весом, но имеет низкую прочность при растяжении, что является минусом.

Помимо непосредственных затрат, анализ МКЭ может быть интегрирован в подход к оценке жизненного цикла. Это включает оценку воздействия материалов на окружающую

среду от добычи и производства до утилизации по истечении срока службы. Оценка жизненного цикла предоставляет всестороннее представление об экологическом воздействии, помогая заинтересованным сторонам принимать решения, согласованные с практикой устойчивого строительства.

Подводя итог, можно сказать, что цель статьи - дать лицам, принимающим решения, глубокое понимание экономических последствий и соображений устойчивости, связанных с использованием классической стали и композитных материалов при разработке башенных кранов. МКЭ-анализ служит важнейшим инструментом для выяснения тонкостей этих факторов, позволяя проводить сбалансированную оценку, учитывающую как краткосрочные финансовые соображения. Экономическая часть показала, что композитные материалы являются дорогими, но так как данные материалы обладают большим объемом, их потребуется значительно меньше при создании башенного крана.

Поскольку строительная отрасль продолжает осваивать технологические достижения, знания, почерпнутые из этого сравнительного анализа, служат катализатором будущих инноваций. Синергия между классической сталью и композитными материалами, закладывает основу для прогрессивной траектории развития башенных кранов. Этот вывод является не конечной точкой, а ступенькой к будущему, в котором методы строительства органично сочетают долговечность, эффективность и экологичность.

По сути, кульминация этого исследования означает установление моста между традициями и инновациями, предоставляя заинтересованным сторонам дорожную карту, позволяющую ориентироваться в сложностях разработки башенных кранов. С помощью анализа МКЭ статья продвигает строительную индустрию к будущему.

Установлено, что использование программных продуктов, как SolidWorks, МКЭ и др. позволяет провести сравнительный анализ различных материалов, используемых при проектировании конструктивных элементов башенного крана, определить параметры надежности и эффективности.

В экспериментальной части выявлено, что углеволокно обладает схожими параметрами по уровню надежности, что и стальной башенный кран, но весит в 5 раз меньше классического. Стекловолокно, хоть и обладает малым весом, но имеет низкую прочность при растяжении, что является минусом.

Предлагаемая методика расчета позволяет получить глубокое представление о структурном поведении классической стали и композитных материалов в различных условиях, закладывает основу для прогрессивной траектории развития башенных кранов

#### **Вклад авторов:**

**Тулеков А.Б.** – концепция, методология, сбор данных, экспериментальная часть.

**Сазамбаева Б.Б.** – моделирование, анализ, визуализация, заключение.

**Кенесбек А.Б.** – анализ литературы, помощь с экспериментом, моделирование.

**Кенесбек И.Б.** – визуализация, интерпретация, написание, редактирование.

### Список литературы

1. Бондалетова Л.И., Бондалетов В.Г. Полимерные композиционные материалы. – Томский политехнический университет. – 2013. – 117с.
2. Michael F.Ashby. Material and Sustainable Development. – Butterworth-Heinemann. – 2016. – 312.
3. Michael F.Ashby. Engineering Materials 1: an introduction to properties, applications and design. – Elsevier. – 2012. – 474.
4. Michael F.Ashby. Engineering Materials 2: an introduction to microstructures and processing. – Elsevier. – 2013. – 553.
5. F.C Campbell. Structural Composite Materials. – ASM International. – 2010. – 629.
6. Богданов А.П., Гайнуллин А.А., Ефимов А.А., Левкович Р.В., Наумов Д.С., Окулов К. Ю. Обзор методов укрупненной оценки остаточного ресурса оборудования, эксплуатируемого на опасных производственных объектах. – Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2015. – № 1(11). – С. 98-105.
7. bakran.ru. Китайские башенные краны QTZ80A. – <http://bakran.ru/bashennyj-kran-qtz-80.html>. – 2024.
8. Алямовский А.А. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике. – М. – БХВ-Петербург. – 2016. – 800 с.
9. «Марочник стали и его сплавов». Характеристика материала Ст45. – [splav-kharkov.com](http://splav-kharkov.com). – 2024.
10. Наварский Ю.В. Грузоподъемные машины: учебно-методическое пособие. – Екатеринбург. – 2006. – 100 с.
11. M.I. Raenko, N.D. Cainov. The Application of a Finite element Model of Nonlinear Continuous Medium in the Analysis of the Stress-Strain State of Structure Members. - Proceedings of Higher Educational Institutions. - Machine Building. – 2018.

А. Тулеков<sup>1</sup>, Б. Сазамбаева<sup>1</sup>, Б. Тогизбаева<sup>1</sup>, И. Кенесбек<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан  
E-mail: [auzekhan1337@gmail.com](mailto:auzekhan1337@gmail.com), [a.sazambaeva\\_t@mail.ru](mailto:a.sazambaeva_t@mail.ru), [inkara\\_9898@mail.ru](mailto:inkara_9898@mail.ru)

### Мұнара крандарын жасау үшін инновациялық материалдарды пайдалану

**Аңдатпа.** Мақалада классикалық болат пен композициялық материалдарға салыстырмалы талдау жасалып, олардың сәйкес қасиеттері мен қолдану салалары мұнара крандарының дамуы аясында зерттеледі. Зерттеу ақпараттарының үйлесімі құрылыс индустриясында материалдарды таңдау негізінде қалыптасатын көп қырлы шешім қабылдау процесін көрсететін беріктік, салмақ және құн сияқты факторларды ескереді.

Құрылыс индустриясының ажырамас бөлігі болып табылатын мұнара крандарының беріктігі дәстүрлі классикалық болаттан жасалуына байланысты. Дегенмен, композициялық материалдардың пайда болуы жоғары беріктік пен аз салмаққа тәуелді бола отырып, бұл нормаға қайшы келеді. ШЭӘ талдауы кернеудің таралуын, деформация сипатын және жалпы тұтастықты жан-жақты түсінуді қамтамасыз ететін әртүрлі жағдайларда осы материалдардың құрылымдық сипатын модельдеу үшін қолданылады. Мақалада беріктік пен салмақтың

арақатынасы, динамикалық жүктеме және экономикалық тиімділік сияқты маңызды факторлар қарастырылады. Бұл сайып келгенде мұнара крандарын жобалау және құрастыру бойынша нақты шешімдер қабылдауда құнды ақпарат береді. Мұндай жан-жақты талдау жүйесі материалдарды құрылымдық сипаттамалары бойынша егжей-тегжейлі салыстыруды жеңілдетіп, олардың тиісті артықшылықтары мен шектеулерін айқындайды.

Мақаланың мақсаты - инженерлерге, шешім қабылдаушыларға және сала мамандарына мұнара крандарын дамыту контекстінде классикалық болат пен композициялық материалдардың конструктивті сипаты мен динамикалық қасиеті туралы жан-жақты түсінік беру. Компьютерлік модельдеуді қолдана отырып, зерттеу құрылыс индустриясында мұнара крандарының тиімді, сенімді және тұрақты технологияларын ілгерілетуге жол ашып, стратегиялық шешімдер қабылдау үшін маңызды мағлұмат береді.

**Түйін сөздер:** мұнара краны, жүк көтергіш машиналар, композиттік материалдар, көмірсулар, шыны талшық, ШЭӘ талдауы.

**A. Tulekov<sup>1</sup>, B. Sazambayeva<sup>1</sup>, B. Togizbayeva<sup>1</sup>, I. Kenesbek<sup>1</sup>**

*1L.N.Gumilyov Eurasian National University, Astana, Republic of Kazakhstan*

*E-mail: auezkhan1337@gmail.com, a.sazambaeva\_t@mail.ru, inkara\_9898@mail.ru*

### **The use of innovative materials for the development of tower cranes**

**Abstract.** This article provides a comparative analysis of classical steel and composite materials, explores their respective properties and applications in the context of the development of tower cranes. The combination of these materials takes into account factors such as strength, weight, cost and durability, reflecting the multifaceted decision-making process that shapes the choice of materials in the construction industry.

Tower cranes, an integral part of the construction industry, have traditionally been made of classic steel because of its strength. However, the advent of composite materials challenges this norm, promising high strength and lower weight. FEM analysis is used to model and analyze the structural behavior of these materials under various conditions, providing a comprehensive understanding of stress distribution, strain patterns, and overall integrity. The article examines such important factors as the strength-to-weight ratio, dynamic load and economic efficiency, which ultimately provides valuable information for making informed decisions in the field of design and construction of tower cranes. This comprehensive understanding facilitates a detailed comparison of these materials in terms of their design characteristics, shedding light on their respective advantages and limitations.

In fact, the purpose of this article is to give engineers, decision makers, and industry professionals a comprehensive understanding of the structural intricacies and dynamic behavior of classical steel and composite materials in the context of tower crane development. Using computer modeling, the study provides valuable information for strategic decision-making, paving the way for the advancement of efficient, reliable and sustainable tower crane technologies in the construction industry.

**Keywords:** tower crane, lifting machines, composite materials, carbon fiber, glass fiber, FEM analysis.

## References

1. L.I. Bondaletova, V.G. Bondaletov. Polimernye kompozicionnye materialy [Polymer composite materials]. – Tomskij politekhnicheskij universitet. – 2013. – 117s.
2. Michael F.Ashby. Material and Sustainable Development. – Butterworth-Heinemann. – 2016. – 312.
3. Michael F.Ashby. Engineering Materials 1: an introduction to properties, applications and design. – Elsevier. – 2012. – 474.
4. Michael F.Ashby. Engineering Materials 2: an introduction to microstructures and processing. – Elsevier. – 2013. – 553.
5. F.C Campbell. Structural Composite Materials. – ASM International. – 2010. – 629.
6. Bogdanov A. P., Gajnullin A. A., Efimov A. A., Levkovich R. V., Naumov D. S., Okulov K. YU. Obzor metodov ukрупnennoj ocenki ostatochnogo resursa oborudovaniya, ekspluatiruemogo na opasnyh proizvodstvennyh ob'ektah [Review of methods for the integrated assessment of the residual life of equipment operated at hazardous production facilities]. – Aktual'nye problemy gumanitarnyh i estestvennyh nauk. – 2015. – № 1(11). – S. 98–105.
7. bakran.ru. Kitajskie bashennye kраны [Chinese tower cranes QTZ80A] QTZ80A. – <http://bakran.ru/bashennyj-kran-qtz-80.html>. – 2024.
8. Alyamovskij A.A. SolidWorks. Komp'yuternoe modelirovanie v inzhenernoj praktike [Computer modeling in engineering practice]. – М. – BHV-Peterburg. – 2016. – 800 с.
9. «Марочник стали i ego splavov». Harakteristika materiala St45 [Characteristics of the St45 material]. – splav-kharkov.com. – 2024
10. Navarskij YU.V. Gruzopod"emnye mashiny. Uchebno-metodicheskoe posobie [Lifting machines. Educational and methodical manual]. – Ekaterinburg. – 2006. – 100s.
11. M.I. Raenko, N.D. Cainov. The Application of a Finite element Model of Nonlinear Continuous Medium in the Analysis of the Stress-Strain State of Structure Members. - Proceedings of Higher Educational Institutions. - Machine Building. – 2018.

## Сведения об авторах:

**А.Б. Тулеков** – докторант, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева, 2, Астана, Казахстан.

**Б.Б. Сазамбаева** – доктор технических наук, профессор, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева, 2, Астана, Казахстан.

**С.Б. Тогизбаева** – доктор технических наук, профессор, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева, 2, Астана, Казахстан.

**И.Б. Кенесбек** – докторант, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева, 2, Астана, Казахстан.

**А.Б. Төлеков** – Көлік, көлік техникасы және технологиялардың үшінші курс докторанты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтпаев көшесі 2, Астана, Қазақстан;

**Б.Б. Сазамбаева** – техника ғылымдарының докторы, профессор, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтпаев көшесі 2, Астана, Қазақстан;

**С.Б. Тогизбаева** – техника ғылымдарының докторы, профессор, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтпаев көшесі 2, Астана, Қазақстан;

**И.Б. Кеңесбек** – Көлік, көлік техникасы және технологиялардың бірінші курс докторанты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтпаев көшесі 2, Астана, Қазақстан.

**A.B. Tulekov** – third-year doctoral student in Transport, Transport Engineering and Technology, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev str., Astana, Kazakhstan;

**B.B. Sazambayeva** – Doctor of Technical Sciences, Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev str., Astana, Kazakhstan;

**S.B. Togizbayeva** – Doctor of Technical Sciences, Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev str., Astana, Kazakhstan;

**I.B. Kenesbek** – first-year doctoral student in transport, Transport Engineering and Technology, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev str., Astana, Kazakhstan.



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).