

УДК (UDS) 621.86

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ГРУЗОВЫХ ТЕЛЕЖЕК КРАНОВ МОСТОВОГО ТИПА С УНИВЕРСАЛЬНОЙ КОМПОНОВОЧНОЙ СХЕМОЙ**EXPERIMENTAL STUDY OF THE DEFORMED STATE OF METAL STRUCTURES OF LOAD TROLLEYS OF OVERHEAD CRANES WITH A MULTIPURPOSE LAYOUT DRAWING**Денисов И.А.
Denisov I.A.Брянский государственный технический университет (Брянск, Россия)
Bryansk State Technical University (Bryansk, Russian Federation)

Аннотация. Деформации несущих металлоконструкций машин различного назначения, возникающие во время эксплуатации, оказывают существенное влияние на работоспособность установленного на них оборудования. Недостаточная жёсткость металлоконструкции может служить причиной заклинивания и выхода из строя элементов привода и рабочих органов подъёмно-транспортной, строительной и дорожной техники, работа которой связана с воздействием высоких статических и динамических нагрузок. Следовательно, при проектировании новых конструктивных схем несущих металлоконструкций особое внимание необходимо уделять вопросу обеспечения необходимой жёсткости. Представленная работа содержит результаты экспериментальной оценки деформированного состояния физических моделей металлоконструкций грузовых тележек кранов мостового типа, выполненных на основе универсальной компоновочной схемы с использованием различных типов соединений несущих элементов. В статье отражена информация о методике экспериментального исследования, описаны особенности физических моделей металлоконструкций, используемых в ходе эксперимента. Приведены данные о вертикальных перемещениях контрольных точек металлоконструкций при использовании различных схем нагружения. Произведена оценка влияния типа применённых соединений несущих элементов на особенности возникающего деформированного состояния металлоконструкций. Выполнен сравнительный анализ экспериментальных данных и расчётных величин вертикальных перемещений точек металлоконструкций, полученных в результате компьютерного моделирования деформированного состояния с использованием различных конечно-элементных моделей.

Ключевые слова: мостовой кран, грузовая тележка, металлоконструкция, универсальная компоновочная схема, экспериментальные исследования, деформации.

Abstract. Deformations of the supporting metal structures of machines for various purposes have a significant impact on the performance of the equipment installed on them. Insufficient rigidity of a metal structure can cause jamming and failure of drive elements and working bodies of material handling, construction and road machines, the operation of which is associated with the impact of high static and dynamic loads. Therefore, when designing new structural schemes of load-bearing metal structures, special attention must be paid to the issue of ensuring the necessary rigidity. The presented work contains the results of an experimental assessment of the deformed state of physical models of the metal structures of load trolleys of overhead cranes, made on the basis of a multipurpose layout drawing using various types of connections of bearing elements. The article reflects information about the methodology of experimental research, describes the features of the physical models of metal structures used in the course of the experiment. The data on the vertical displacements of the control points of metal structures when using various loading schemes are given. An assessment was made of the influence of the type of applied connections of load-bearing elements on the features of the resulting deformed state of the metal structure. A comparative analysis of experimental data and calculated values of vertical displacements of points of metal structures obtained as a result of computer simulation of the formed state using various finite element models is performed.

Keywords: overhead crane, load trolley, metal structures, multipurpose layout drawing, experimental studies, deformations.

Дата принятия к публикации: 03.02.2023 † Date of acceptance for publication: 03.02.2023
Дата публикации: 25.03.2023 † Date of publication: 25.03.2023

Сведения об авторах: †

Денисов Илья Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъемно-транспортные машины и оборудование» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», e-mail: ilia.denisow@yandex.ru †

Author's information: †

Илья А. Denisov – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Handling machinery and equipment" at Bryansk State Technical University, e-mail: ilia.denisow@yandex.ru †

1. Введение

Многие современные сооружения, воспринимающие значительные внешние статические и динамические нагрузки, выполняются с применением решётчатых и каркасно-ячеистых металлоконструкций. Данные металлоконструкции выполняются из унифицированных по своим параметрам и функциям элементов, которые объединяясь в узлах формируют решётку несущего каркаса, состоящую из отдельных ячеек. По описанному принципу выполняются несущие конструкции многих современных зданий со сложной геометрией, опорные металлоконструкции летательных и космических аппаратов.

Решётчатые и ячеисто-каркасные металлоконструкции имеют сравнительно небольшой вес при высоких показателях прочности, долговечности и надёжности. Применение подобных конструкций может быть оправдано в случаях, когда необходимо создать равнопрочную несущую основу, способную воспринимать значительные распределённые нагрузки или системы сосредоточенных сил, действующих на металлоконструкцию со стороны установленного на ней оборудования.

Металлоконструкции, схожие по своей структуре и конфигурации с решётчатыми и каркасно-ячеистыми могут применяться при проектировании технологических и транспортных машин. В качестве примера можно привести металлоконструкции грузовых тележек кранов мостового типа, выполненные на основе универсальных компоновочных схем. Конструктивные схемы и принципы проектирования данных металлоконструкций описаны в работах [1-7]. В состав универсальной компоновочной схемы металлоконструкции грузовой тележки входят три

основных типа элементов (рис. 1): диагональные элементы, которые пространственно разделяют металлоконструкцию на 4 сегмента, а также хордовые и радиальные элементы, заполняющие каждый сегмент. Соединяясь между собой данные элементы образуют прочную конструкцию, способную нести на себе узлы механизмов грузоподъемной машины, которая обладает следующими достоинствами [1, 2, 6]:

1. Сравнительно малой массой и высокой несущей способностью.

2. Структурной универсальностью, позволяющей относительно свободно задавать положение несущих элементов металлоконструкции тележки отталкиваясь от компоновки размещаемых на ней механизмов.

3. Высокой надёжностью, так как при возникновении дефекта в одном из элементов металлоконструкции внутренние усилия перераспределяются между остальными элементами, что предотвращает мгновенное разрушение рамы тележки и возникновение аварийной ситуации.

4. Высокой жёсткостью.

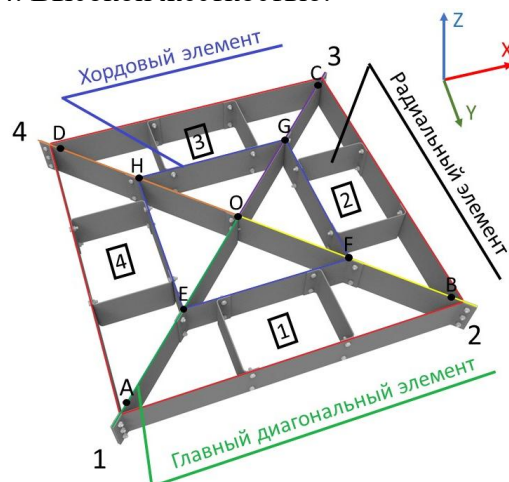


Рис. 1. Металлоконструкция грузовой тележки на основе универсальной компоновочной схемы

Следует отметить, что жёсткость несущей металлоконструкции является важным критерием, который определяет работоспособность и долговечность грузоподъёмных и специальных транспортных машин [8 - 10]. При недостаточной жёсткости возникающие от воздействия внешних нагрузок упругие деформации металлоконструкции способствуют появлению погрешностей расположения элементов рабочих механизмов транспортного-технологических машин, которые в свою очередь приводят к ускоренному износу и заклиниванию элементов привода.

Высокая жёсткость и несущая способность металлоконструкций на основе универсальной компоновочной схемы была подтверждена экспериментально в работах [1, 2]. В частности, было показано, что физическая модель данной металлоконструкции может воспринимать нагрузку в 21 раз превышающую свой собственный вес, находясь при этом в упругом состоянии, которое характеризуется отсутствием заметных пластических деформаций и небольшими вертикальными перемещениями характерных точек.

Однако из практики проектирования известно, что тип соединений несущих элементов металлоконструкции может оказывать значительное влияние на величину возникающих в ней деформаций и общий характер действующего напряжённо-деформированного состояния. Жёсткость металлоконструкций со значительным количеством резьбовых соединений может снижаться за счёт местных податливостей отдельных участков соединений, вызванных ослаблением затяжки, непропорциональной деформацией винтов или болтов, разностью между диаметрами отверстия и цилиндрических поверхностей болтов. В случае использования сварных соединений пластические свойства сварных швов и околошовной зоны могут способствовать увеличению значений перемещений отдельных точек металлоконструкции под воздействием рабочих нагрузок. Указанные факторы наиболее сильно проявляются в пространственных металлоконструкциях с большим количеством соединений несущих элементов, к числу которых относятся металлоконструкции, выполненные на

основе универсальных компоновочных схем. Отсюда вытекает необходимость полноценной оценки степени влияния типа использованных соединений на величину и закономерность распределения деформаций, действующих в металлоконструкциях данного типа. Проведение подобной оценки является главной целью настоящего исследования.

2. Методика экспериментального исследования

Для достижения поставленной цели было проведено экспериментальное исследование с применением физических моделей металлоконструкций, отличающихся использованным типом соединений несущих элементов. В процессе исследования необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать физические модели металлоконструкций на основе универсальной компоновочной схемы со сварными и болтовыми соединениями, позволяющие корректно и с достаточной точностью получить требуемые экспериментальные данные.

2. Количественно оценить деформации, возникающие в характерных точках металлоконструкций при различных способах приложения внешних нагрузок.

3. Исходя из полученных данных выявить основные особенности деформированного состояния металлоконструкций с различными типами соединений несущих элементов.

4. Произвести сравнение значений деформаций, полученных экспериментально, с расчётными значениями для оценки возможности использования различных конечно-элементных моделей при моделировании деформированного состояния металлоконструкций со сварными и болтовыми соединениями.

Для проведения экспериментального исследования были подготовлены две физические модели металлоконструкции, содержащие в себе диагональные, хордовые и радиальные элементы (рис. 2).

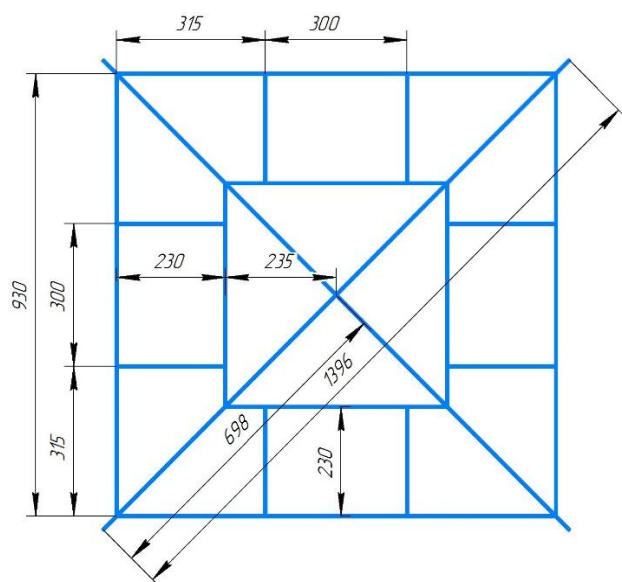
Обе физические модели были изготовлены из листовой горячекатаной малоуглеродистой стали Ст3пс толщиной 3 мм. Модель металлоконструкции с болтовыми сое-



а



б



в

Рис. 2. Физические модели металлоконструкций с универсальной компоновочной схемой: а – модель с болтовыми соединениями; б – модель со сварными соединениями; в – геометрические размеры моделей, мм.

динениями (рис. 2, а) использовалась при проведении исследований, описанных в работах [1, 2]. Для соединения несущих элементов данной модели были применены болты М8-6g×20 ГОСТ 7798-70 с классом прочности 5.8. Физическая модель сварной металлоконструкции (рис. 2, б) выполнена с помощью двухсторонних угловых сварных швов с катетом 3 мм. Обе модели имеют одинаковые геометрические параметры, показанные на рис. 2, в.

Деформации физических моделей в рамках эксперимента оценивались путём измерений вертикальных перемещений характерных контрольных точек, которые выбирались по следующим соображениям:

1. Контрольные точки необходимо выбирать таким образом, чтобы обеспечить простоту и минимальную трудоёмкость проведения замеров их вертикальных перемещений без применения сложного оборудования и с максимальной точностью.

2. Для полноценной и объективной оценки деформированного состояния металлоконструкции контрольные точки, используемые в рамках экспериментального исследования, должны характеризовать вертикальные перемещения нескольких расположенных по соседству несущих элементов [1, 2].

Исходя из описанных соображений в качестве контрольных рационально выбирать точки, соответствующие узлам соединения элементов, в которых ожидается возникновения наибольших по величине деформаций. К таким точкам можно отнести точки Н, Г, Е, Ф, принадлежащие узлам соединения диагональных и хордовых элементов, а также точку О, соответствующую центральному узлу соединения диагональных элементов. В рамках предшествующих экспериментальных исследований [1, 2] было установлено, что вертикальные перемещения точек А, В, С, D пренебрежимо малы, трудноизмеримы и поэтому не представляют исследовательской ценности в рамках проводимого эксперимента. Однако положение данных точек необходимо отслеживать для контроля возникновения нежелательных перемещений опор физической модели относительно вертикальной оси, появление которых может

привести к существенному искажению данных, полученных при измерении перемещений основных контрольных точек [1, 2].

Измерения вертикальных перемещений контрольных точек физических моделей производились при помощи индикаторов часового типа ИЧ-10 ГОСТ 577-68, позволяющих измерять линейные перемещения величиной до 10 мм с погрешностью 20 мкм. Цифровые индикаторы закреплялись на жёстких индикаторных стойках (рис. 3), после чего размещались под исследуемой физической моделью таким образом, чтобы измерительная головка индикатора контактировала с точкой металлоконструкции, перемещение которой необходимо было определить в ходе исследования. После установки в рабочую позицию оси всех индикаторов выставлялись строго вертикально для минимизации погрешностей измерений.

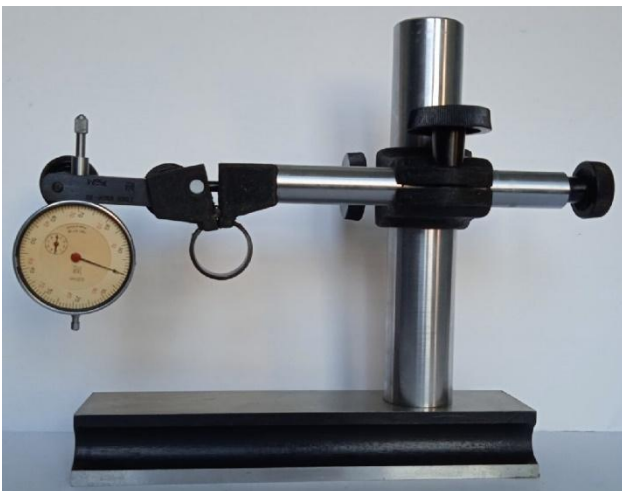


Рис. 3. Стойка с измерительным индикатором часового типа.

В ходе проведения эксперимента для создания внешней нагрузки на исследуемые физические модели были использованы испытательные грузы в виде семи плит общей массой 707,6 кг. Для локализации мест приложения нагрузок от веса испытательных грузов использовались деревянные передаточные подкладки, которые размещались между плитами и металлоконструкцией. Использование подкладок позволило производить точечное нагружение необходимых несущих элементов [1, 2].

Для формирования наиболее подробной картины деформированного состояния и оценки влияния схемы расположения элементов металлоконструкции на величину возникающих деформаций каждая физическая модель нагружалась согласно четырём различным схемам нагружения, предложенным в работе [2]. Отличие данных схем состоит в расположении испытательных грузов на металлоконструкции.

Схема нагружения №1 (рис. 4, а) предназначена для изучения наибольших возможных деформаций диагональных элементов. Нагрузка от веса испытательного груза при помощи двух подкладок шириной 40 мм равномерно распределяется между четырьмя диагональными элементами. При этом на контактную площадку каждого диагонального элемента длиной 57 мм и шириной 3 мм действует распределённая нагрузка интенсивностью $10,22 \text{ Н/мм}^2$ [1, 2].

Схема нагружения №2 предназначена для изучения деформированного состояния модели в случае, когда основная нагрузка действует на радиальные элементы одного сектора. Нагрузка от веса всего испытательного груза через передаточную подкладку шириной 145 мм равномерно распределяется между параллельными радиальными элементами (рис. 4, б). В частности, на каждый из двух радиальных элементов сектора №2 физической модели металлоконструкции (рис. 1) будет действовать распределённая нагрузка интенсивностью $7,98 \text{ Н/мм}^2$ [1, 2].

Схема нагружения №3 используется для изучения деформированного состояния физической модели металлоконструкции в случае её нагружения в области соединения диагональных и хордовых элементов (рис. 4, в). Центр тяжести испытательного груза размещается над точкой F, при этом нагрузка от его веса через передаточную подкладку длиной 200 мм и шириной 145 мм распределяется между одним диагональным, двумя хордовыми и двумя радиальными элементами металлоконструкции. Интенсивности полученной таким образом распределённой нагрузки составляет $3,09 \text{ Н/мм}^2$ [1, 2].

Схема нагружения №4 используется для изучения деформированного состояния мо-

дели в случае нагружения радиальных элементов противоположно расположенных секторов (рис. 4, в). В частности, одна часть испытательного груза массой 304,3 кг воздействует на радиальные элементы сектора №2, вторая часть испытательного груза массой 403,3 кг нагружает радиальные элементы сектора №4. При этом нагрузка от веса указанных масс распределяется поровну между радиальными элементами одного сектора и передаётся на них через подкладку шириной 145 мм. В этом случае на каждый элемент

сектора №2 будет действовать распределённая нагрузка интенсивностью $3,43 \text{ Н/мм}^2$, а каждый радиальный элемент сектора №4 воспримет распределённую нагрузку интенсивностью $4,55 \text{ Н/мм}^2$ [1, 2].

Экспериментальные исследования каждой физической модели проводились по следующему алгоритму:

1. Фиксируются показания индикаторов, размещённых под контрольными точками металлоконструкции О, Н, Г, Е, F в ненагруженном состоянии.



а



б



в



г

Рис. 4. Схемы нагружения физической модели металлоконструкции, используемые в ходе проведения экспериментального исследования: а – схема нагружения №1; б – схема нагружения №2; в – схема нагружения №3; г – схема нагружения №4

2. Выполняется нагружение несущих элементов согласно с реализуемой схемой нагружения металлоконструкции.

3. Фиксируются показания индикаторов при деформированном состоянии металлоконструкции.

4. Вычисляются разности показаний индикаторов при деформированном и ненагруженном состоянии металлоконструкции, определяются вертикальные перемещения контрольных точек O, H, G, E, F.

5. Выполняется снятие нагрузки с металлоконструкции, по показаниям индикаторов осуществляется контроль наличия остаточных пластических деформаций.

Описанная последовательность операций повторяется для каждой схемы нагружения.

Экспериментальные данные, полученные в ходе проведённых измерений, позволяют оценить обоснованность использования различных типов конечно-элементных моделей для компьютерного моделирования деформированного состояния металлоконструкций на основе универсальных компоновочных схем. Данная оценка может быть произведена путём сравнения экспериментальных данных, с величинами вертикальных перемещений, полученных в ходе численных расчётов с использованием метода конечных элементов.

Для моделирования деформированного состояния металлоконструкции со сварными соединениями была использована твердотельная конечно-элементная модель, включающая в себя 49056 плоских четырёхугольных конечных элементов (рис. 5, а). Соединения отдельных несущих элементов металлоконструкции производится непосредственной сшивкой соответствующих узлов конечных элементов модели. Использование подобных конечно-элементных моделей позволяют значительно снизить трудоёмкость процесса моделирования и ускорить процесс вычислений.

В работах [1, 2, 7] на основании проведённых сравнительных расчётов было показано, что при построении конечно-элементных моделей, предназначенных для определения величин упругих деформаций, в равной степени могут быть использованы как плоские, так и объёмные конечные эле-

менты. С учетом данного обстоятельства для оценки влияния болтовых соединений на деформированное состояние металлоконструкции была разработана конечно-элементная модель, состоящая из объёмных четырехузловых конечных элементов. Элементы болтовых соединений моделировались в виде отдельных тел с наложенными на них связями (рис. 5, б). Взаимодействие между сопряжёнными поверхностями несущих элементов металлоконструкции и элементами болтовых соединений моделировались с помощью наложения фрикционных контактных взаимодействий с коэффициентом сухого трения 0,16. Контакты между болтами и гайками в рамках соединений моделировались с помощью абсолютно жёстких контактных взаимодействий не допускающих взаимных перемещений и поворотов тел относительно координатных осей [1, 2].

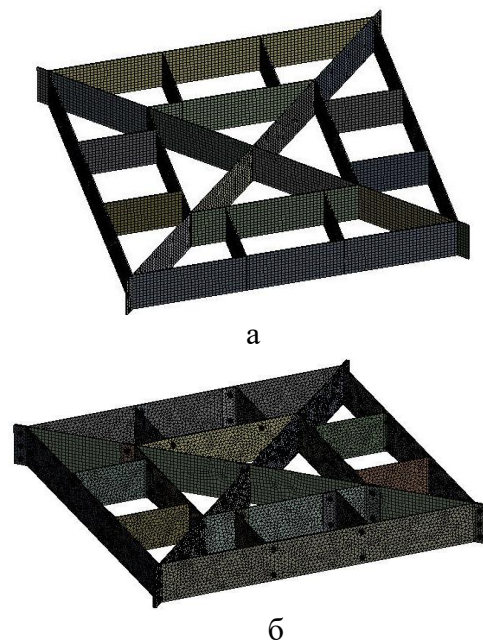


Рис. 5. Конечно-элементные модели металлоконструкций грузовых тележек с универсальной компоновочной схемой: а – модель металлоконструкции со сварными соединениями; б – модель металлоконструкции с болтовыми соединениями

Параметры конечных элементов и ограничения конечно-элементных моделей задавались согласно рекомендациям, описанным в работах [1, 2]. Моделирование производи-

лось с применением программных пакетов Femap и Siemens NX.

3. Результаты экспериментального исследования

Полученные в ходе экспериментального исследования картины деформаций физических моделей металлоконструкций с различным типом соединений несущих элементов представлены на рис. 6. Информация о каждой контрольной точке в рамках данных картин представлена тремя числовыми значениями. Над разделительным штрихом приведена величина вертикального перемещения контрольной точки, полученная в ходе проведения расчётов с использованием соответствующей конечно-элементной модели. Вертикальные перемещения точки, измеренные в ходе проведения экспериментального исследования размещены под разделительным штрихом. Справа от приведённых числовых значений размещена их относительная процентная разница. Для визуализации полученных результатов вертикальные перемещения контрольных точек отложены на приведённых картинах деформаций в увеличенном масштабе. Положения, которые точки принимают в результате деформации металлоконструкции под соответствующей нагрузкой соединены линиями.

В случае нагружения металлоконструкции по схеме № 1 максимальные по величине деформации наблюдаются у точки О, принадлежащей центральному узлу тележки (рис. 6, а, б). По данным, полученным в ходе численного моделирования деформированного состояния металлоконструкции с болтовыми соединениями заметно, точки Н (1,386 мм) и F (1,34 мм) испытывают большие перемещения чем точки G (1,079 мм) и E (1,082 мм). Данный факт объясняется особенностью конструктивного исполнения центрального узла соответствующей физической модели в котором два диагональных элемента, расположенных по оси Е-Г, присоединяются к диагонали F-Н, выполненной в виде единой неразборной плиты. Несколько иная картина деформации складывается по результатам экспериментального ис-

следования физической модели с болтовыми соединениями. В данном случае перемещения контрольных точек G (1,43 мм) и E (1,53 мм) отличаются незначительно, а перемещение точки Н (1,65 мм) заметно превышает перемещение точки F (1,36 мм). Вертикальные перемещения контрольных точек E, F, G, Н конечно-элементной модели сварной металлоконструкции крайне близки по величине и равны приблизительно 0,5 мм. Данные экспериментального исследования показывают, что физическая модель металлоконструкции со сварными соединениями обладает большей жёсткостью, чем аналогичная модель с болтовыми соединениями. При этом перемещения точек Н (0,86 мм) и F (0,83 мм) превышают перемещения точек G (0,71 мм) и E (0,74 мм).

В случае приложения нагрузки к радиальным элементам одного сектора (схема нагружения №2) металлоконструкции перемещения контрольных точек G и F, принадлежащих данному сектору, превышают перемещения центрального узла в точке О и перемещения точек противоположного сектора Н и E (рис. 6, в, г). Указанные соотношения перемещений наблюдаются и в металлоконструкциях со сварными соединениями, и в металлоконструкциях с болтовыми соединениями, что подтверждается расчётными и экспериментальными данными.

При приложении внешней нагрузки по схеме нагружения №3 можно наблюдать отличия в характере деформаций металлоконструкций с различными типами соединений (рис. 6, д, е). В металлоконструкции с болтовыми соединениями несущих элементов наибольшие вертикальные перемещения происходят в точке О, при этом контрольная точка F, над которой располагается центр тяжести испытательных грузов испытывает меньшие перемещения. В металлоконструкции со сварными соединениями вертикальные перемещения точки F превышают вертикальные перемещения точки О. Полученные соотношения перемещений точек подтверждаются расчётными и экспериментальными данными. Отмеченные отличия в картинах деформаций объясняются различной жёсткостью болтовых и сварных соединений.

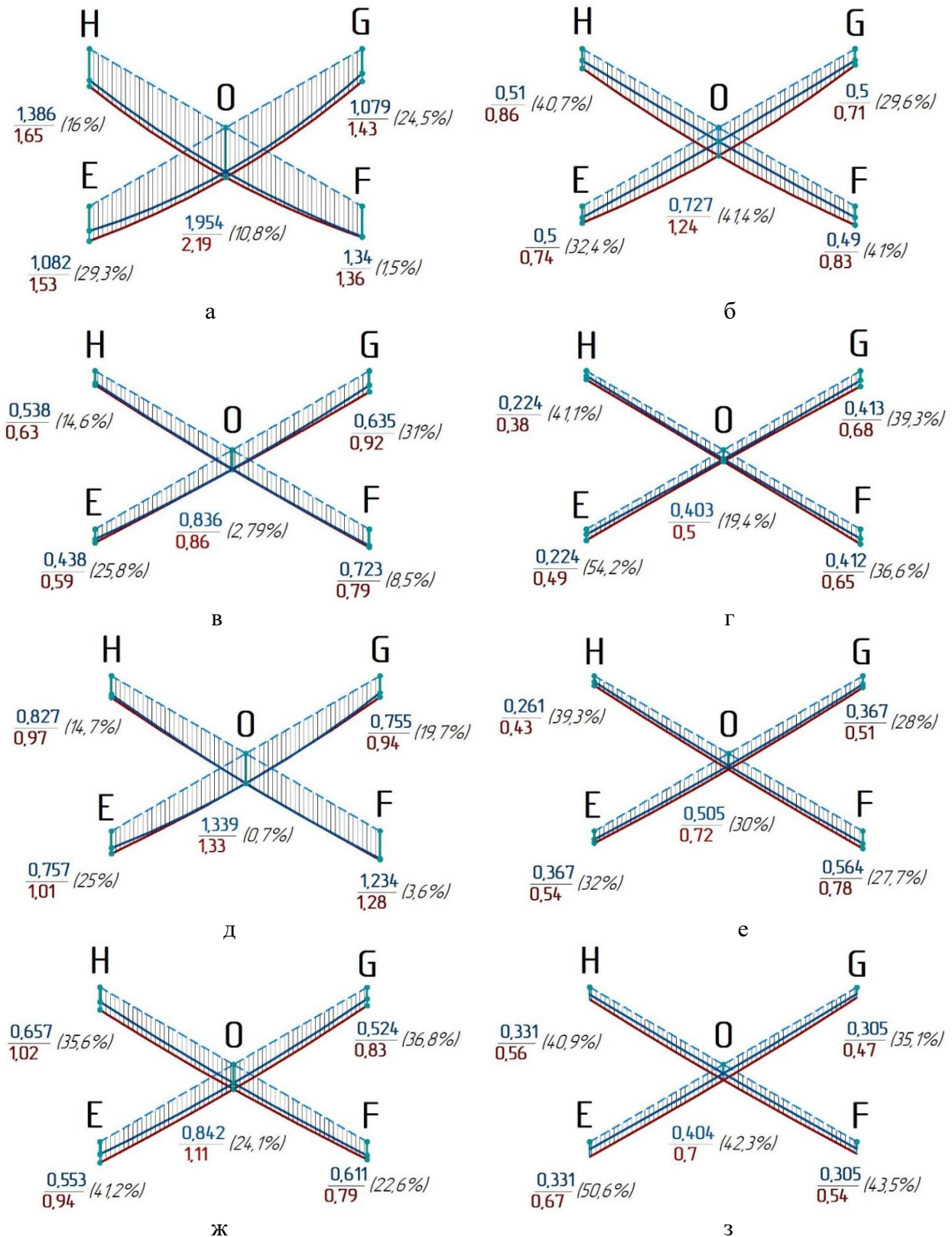


Рис. 6. Картины деформаций физических моделей металлоконструкции грузовой тележки с универсальной компоновочной схемой: а, б – картины деформаций болтовой и сварной модели при нагружении по схеме №1; в, г – картины деформаций болтовой и сварной модели при нагружении по схеме №2; д, е – картины деформаций болтовой и сварной модели при нагружении по схеме №3; ж, з – картины деформаций болтовой и сварной модели при нагружении по схеме №4

В случае одновременного нагружения радиальных элементов противоположно расположенных секторов металлоконструкции (схема нагружения №4) наибольшие перемещения наблюдаются в точке О (рис. 6, ж, з). В ходе моделирования деформированного состояния конечно-элементной модели металлоконструкции с болтовыми соединениями была получена следующая картина вертикальных перемещений контрольных точек: точки Н и F, лежащие на одной диагонали испытывают перемещения соответственно равные 0,657 мм и 0,611 мм; точки G и E, расположенные на перпендикулярной диагонали обладают меньшими перемещениями, достигающими 0,524 мм и 0,553 мм. В ходе проведения замеров на физической модели металлоконструкции с болтовыми соединениями были получены следующие значения перемещений: 1,02 мм и 0,94 мм у точек Н и E, принадлежавших более нагруженному сектору; 0,83 мм и 0,79 у точек G и F, расположенных в части тележки, испытывающей меньшую нагрузку. В случае металлоконструкции со сварными соединениями несущих элементов перемещения точек Н и E превышают перемещения точек G и F, что подтверждается и расчётными, и экспериментальными данными.

4. Заключение

Анализ данных, полученных в ходе проведённого исследования позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Основываясь на расчётных и экспериментальных данных можно утверждать, что жёсткость металлоконструкций, сформированных на основе универсальных компоновочных схем, заметно увеличивается в случае использования сварных соединений. В среднем, вертикальные перемещения контрольных точек физической модели с болтовыми соединениями на 41% превышают перемещения, зарегистрированные в аналогичных точках сварной модели. В численном моделировании деформированного состояния металлоконструкций.

5. Сравнительный анализ результатов экспериментальных данных и компьютерно-

2. Тип соединений несущих элементов металлоконструкции влияет не только на её общую жёсткость, но и на взаимные перемещения точек отдельных элементов. Установлено, что в металлоконструкциях с разным типом использованных соединений и одинаковыми геометрическими параметрами при схожих схемах нагружения максимальные вертикальные перемещения могут наблюдаться в различных точках.

3. На жёсткость металлоконструкции непосредственное влияние оказывает конструктивное исполнение узлов соединений диагональных и хордовых элементов, что сказывается на величинах вертикальных перемещений точек, расположенных вблизи различных диагоналей. Следовательно, поиск конструктивных исполнений соединений несущих элементов, способствующих повышению жёсткости металлоконструкции, является важно задачей, решение которой необходимо найти в рамках дальнейших исследований.

4. Использование в ходе компьютерного моделирования конечно-элементной модели с болтовыми соединениями позволяет получать расчётные данные близкие по величине к реально наблюдаемым деформациям: минимальная разница расчётных и экспериментальных значений вертикальных перемещений составила 0,7%, средняя разница расчётных и экспериментальных значений вертикальных перемещений равна 19,4%. Однако в некоторых случаях разница данных, полученных в ходе экспериментальных исследований и компьютерного моделирования может достигать 41%. Это объясняется тем, что жёсткость болтовых соединений зависит от большого количества случайных факторов, таких как изменение усилия затяжки резьбовых соединительных элементов в течении срока службы металлоконструкции, допуски размеров отверстий, неравномерная коррозия деталей болтового соединения. Описанные факторы носят вероятностную природу, что осложняет их учёт при проектировании и го моделирования показывает, что физическая модель сварной металлоконструкции обладает заметно меньшей жёсткостью, чем конечно-элементная модель, использованная

для расчёта вертикальных перемещений контрольных точек. Так минимальная разница расчётных и экспериментальных значений вертикальных перемещений составила 27,7%, средняя разница расчётных и экспериментальных значений вертикальных перемещений равна 37,2%. Данное несоответствие объясняется тем, что применённая конечно-элементная модель недостаточно точно отражает пластические характеристики металлоконструкции в сварных швах и околошовной зоне. Отсюда вытекает необходимость разра-

ботки более совершенных конечно-элементных моделей сварных металлоконструкций с универсальной компоновочной схемой, позволяющих моделировать деформированного состояние с высокой точностью.

Представление данные и описанные закономерности необходимо учитывать при совершенствовании методик проектирования металлоконструкций грузовых тележек кранов мостового типа на основе универсальных компоновочных схем и определении основных задач дальнейших исследований.

Список литературы

1. Денисов И.А., Гончаров К.А. Проектирование металлоконструкций грузовых тележек мостовых кранов на основе универсальных компоновочных схем. Курск: ЗАО "Университетская книга", 2022. 185 с.
2. Денисов И.А. Обоснование параметров металлоконструкций грузовых тележек кранов мостового типа на основании универсальной компоновочной схемы: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / Денисов Илья Александрович. М., 2020. 198 с.
3. Гончаров К.А., Денисов И.А. Математические модели структурно-параметрического синтеза металлоконструкций грузовых тележек кранов мостового типа на основе универсальных компоновочных схем // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. № 1. С. 26-34. DOI 10.22281/2413-9920-2019-05-01-26-34.
4. Гончаров К.А., Денисов И.А. Обоснование выбора расчётных схем элементов металлоконструкций грузовых тележек кранов мостового типа на основе универсальной компоновочной схемы // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. № 2. С. 155-163. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-02-155-163
5. Гончаров К.А., Денисов И.А. Подход к проектированию опорных тележек кранов общего назначения мостового типа с учётом универсальной компоновочной схемы их металлоконструкции // Вестник Брянского государственного технического уни-

References

1. Denisov I.A., Goncharov K.A. *Proektirovanie metallokonstruktsiy gruzovykh telezhek mostovykh kranov na osnove universalnykh komponovochnykh skhem* [Design of metal structures for load trolleys of overhead cranes based on multipurpose layout drawing]. Kursk, University book, 2022. 185 p. (In Russian).
2. Denisov I.A. Substantiation of the parameters of metal structures of load trolleys of overhead cranes based on the multipurpose layout drawing. Diss. Cand. Sci. (Engineering). Moscow. 2020. 198 p. (In Russian).
3. Goncharov K.A., Denisov I.A. Mathematical models of structural and parametric synthesis of load trolleys metalware of bridge cranes on basis of multipurpose layout drawings. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No. 1, pp. 26-34. doi: 10.22281/2413-9920-2019-05-01-26-34. (In Russian)
4. Goncharov K.A., Denisov I.A. Justification of calculation schemes choice for metalware segments of bridge crane trolleys based on multipurpose layout drawing configurations. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No. 2, pp. 155-163. doi: 10.22281/2413-9920-2019-05-02-155-163. (In Russian)
5. Goncharov K.A., Denisov I.A. Approach to support truck design for general purpose cranes of bridge type taking into account universal layout diagram of their metal structure. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*,

- верситета. 2017. № 3(56). С. 43-49. DOI 10.12737/article_59b11cbd491971.92745634.
6. Гончаров К.А., Денисов И.А. Универсальная компоновочная схема металлоконструкции грузовой тележки крана мостового типа // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2017. № 1. С. 60-66. DOI 10.22281/2413-9920-2017-03-01-60-66.
7. Денисов И.А., Кулешов Д.Ю. Особенности применения конечно-элементных моделей при исследовании напряжённо-деформированного состояния металлоконструкции грузовой тележки на основе универсальной компоновочной схемы // Инновационное развитие подъемно-транспортной техники: Материалы Всеросс. научно-практич. конф., Брянск, 01–02 октября 2020 года. Брянск: БГТУ, 2020. С. 21-25.
8. Лагереv И.А., Химич А.В., Шкурманова С.С. Подходы к имитационному моделированию рабочих процессов канатной лесозаготовительной машины для работы на склонах // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. № 2. С. 125-130. DOI 10.22281/2413-9920-2022-08-02-125-130.
9. Лагереv И.А., Остроухов И.О., Химич А.В. Компьютерное моделирование процесса потери общей устойчивости мобильной машины, оснащенной стреловой манипуляционной системой // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. № 1. С. 83-94. DOI 10.22281/2413-9920-2019-05-01-83-94.
10. Лагереv И.А., Химич А.В. Математическое моделирование динамики кабельной грузоподъемной машины // Ученые записки Брянского государственного университета. 2022. № 1(25). С. 7-10.
- 2017, No.3, pp. 43-49. doi: 10.12737/article_59b11cbd491971.92745634. (In Russian).
6. Goncharov K.A., Denisov I.A. Multipurpose layout drawing of metalware of bridge crane load trolley. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, No.1, pp. 60-66. doi: 10.22281/2413-9920-2017-03-01-60-66. (In Russian).
7. Denisov I.A., Kuleshov D. Yu. Features of the application of finite element models in the study of the stress-strain state of the metal structure of a load trolley based on a multipurpose layout drawing. In: *Innovative development of lifting and transport equipment*, Bryansk, October 2020.
8. Lagerev I.A., Khimich A.V., Shkurmanova S.S. Approaches to simulation modeling of working processes of a rope logging machine for working on slopes. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.2, pp. 125-130. doi: 10.22281/2413-9920-2022-08-02-125-130. (In Russian).
9. Lagerev I.A., Ostroukhov I.O., Khimich A.V. Computer simulation of the general stability loss of the mobile transport and technological machines equipped with boom lift manipulator. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.1, pp. 83-94. doi: 10.22281/2413-9920-2019-05-01-83-94. (In Russian).
10. Lagerev I.A., Khimich A.V. Mathematical modeling of dynamics cable lifting machine. *Uchenye zapiski Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2022, No.1, pp. 7-10.