УДК 620.174:691.771
doi: 10.33622/0869-7019.2023.03.16-23

Изучение работы алюминиевых ортотропных плит при статической нагрузке

Андрей Валентинович КОРГИН, доктор технических наук, профессор, korguine@mgsu.ru

Лейс Зейдович ЗЕЙД КИЛАНИ, старший преподаватель, zeydkilanilz@mgsu.ru

Валентин Алексеевич ЕРМАКОВ, кандидат технических наук, доцент, ermakov@mgsu.ru

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ),
129337 Москва, Ярославское ш., 26

Аннотация. *К числу перспективных направлений в мостостроении относится применение алюминиевых сплавов, обладающих рядом технологических и эксплуатационных преимуществ перед традиционными стальными и железобетонными конструкциями. Возможность формования алюминиевых сплавов используется для создания открытых и замкнутых профилей сложной формы, что в комбинации с технологиями сварки позволяет получать ортотропные плиты, обладающие высокой прочностью и жесткостью. Рассмотрена работа и напряженно-деформированное состояние ортотропных плит из определенного алюминиевого сплава. Плиты состоят из рядовых и торцевых секций, полученных экструдированием и соединенных между собой методом сварки трением с перемешиванием. Основная область применения ортотропных плит – настилы пешеходных и автодорожных мостовых конструкций. В рамках изучения работы ортотропных плит были определены физико-механические свойства данного сплава на образцах, изготовленных методов экструзии, а также свойства образцов сварных соединений при сварке трением с перемешиванием. При нагружении осуществлялся контроль перемещений и относительных деформаций. Для выбранной схемы провели более подробное конечно-элементное моделирование в программном комплексе. Достоверность конечно-элементного моделирования подтверждалась путем сравнения результатов с напряженно-деформированным состоянием, установленным экспериментально. По результатам численного моделирования проведена оценка напряженно-деформированного состояния конструкции ортотропной плиты с построением эпюр деформаций по максимально нагруженному сечению.*

Ключевые слова: *ортотропная плита, алюминиевый сплав, статические испытания, напряженно-деформированное состояние, конечно-элементное моделирование, сварка трением с перемешиванием*

Для цитирования: *Коргин А. В., Зейд Килани Л. З., Ермаков В. А.* Изучение работы алюминиевых ортотропных плит при статической нагрузке // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 3. С. 16–23.
doi: 10.33622/0869-7019.2023.03.16-23

STUDY OF THE WORK OF ALUMINUM ORTHOTROPIC PLATES UNDER STATIC LOAD

Andrey V. KORGIN, korguine@mgsu.ru

Laith Z. ZEYD KILANI, zeydkilanilz@mgsu.ru

Valentin A. ERMAKOV, ermakov@mgsu.ru

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

Abstract. *One of the prospect areas in bridge construction is the use of aluminum alloys, which have a number of technological and operational advantages over traditional steel and reinforced concrete structures. The possibility of forming aluminum alloys is used to create open and closed profiles of complex shape, which in combination with welding technologies makes it possible to obtain orthotropic plates with high strength and rigidity. The work and the stress-strain state of orthotropic plates made of a certain aluminum alloy are considered. The plates consist of ordinary and end sections obtained by extrusion and connected by friction stir welding. The main area of application of orthotropic slabs is the decking of pedestrian and road bridge structures. As part of the study of the work of orthotropic plates, the physical and mechanical properties of this alloy were determined on samples made by extrusion methods, as well as the properties of samples of welded joints of friction stir welding. Under loading, displacements and relative deformations were controlled. For the selected scheme, a more detailed finite element modeling was carried out in the software package. The reliability of finite element modeling was confirmed by comparing their results with the stress-strain state determined experimentally. Based on the results of numerical modeling, the stress-strain state of the orthotropic plate structure was evaluated, with the construction of deformation plots along the maximum loaded cross-section.*

Keywords: *orthotropic deck, aluminum alloy, static tests, stress-strain state, finite element modeling, friction stir welding*

For citation: Korgin A. V., Zeyd Kilani L. Z., Ermakov V. A. Study of the Work of Aluminum Orthotropic Plates Under Static Load. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2023, no. 3, pp. 16–23. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2023.03.16-23

© КОРГИН А. В., ЗЕЙД КИЛАНИ Л. З., ЕРМАКОВ В. А., 2023

Введение

Конструкция проезжей части мостов в виде системы ортотропных плит широко используется в мостостроении. Их применение в мостах с большими пролетами обеспечивает экономию материалов и позволяет сократить сроки строительства [1–7].

В настоящее время все большее распространение получают мосты из алюминиевых сплавов [8–10], обладающие рядом технологических и эксплуатационных преимуществ перед традиционными стальными и железобетонными мостами [1, 7, 8, 11]. Ортотропные плиты из алюминиевых сплавов изготовляют инновационными методами экструзии и с применением сварки трением с перемешиванием (СТП). Эти эффективные конструктивные элементы имеют малый вес при высокой прочности и жесткости, что определяет возможность строительства более легких мостов с необходимой несущей способностью.

По этим же причинам ортотропные плиты из алюминиевых сплавов все чаще используют при ремонте и реконструкции существующих железобетонных мостов для замены поврежденных железобетонных настилов [1, 2, 7, 12, 13]. В то же время, благодаря меньшему весу алюминиевых ортотропных плит, несущая способность моста фактически может быть увеличена без необходимости усиления остальных несущих железобетонных конструкций, таких как балки, фермы, опоры моста [14–16].

В результате анализа и обобщения зарубежного опыта [1, 7, 13, 17–25] и с учетом технических возможностей экструдирования на отечественных заводах спроектировали и изготовили партию (12 шт.) 7-секционных ортотропных плит из алюминиевого сплава EN AW-6082T6. Их экструдированные секции соединены между собой методом СТП в уровнях верхнего и нижнего поясов.

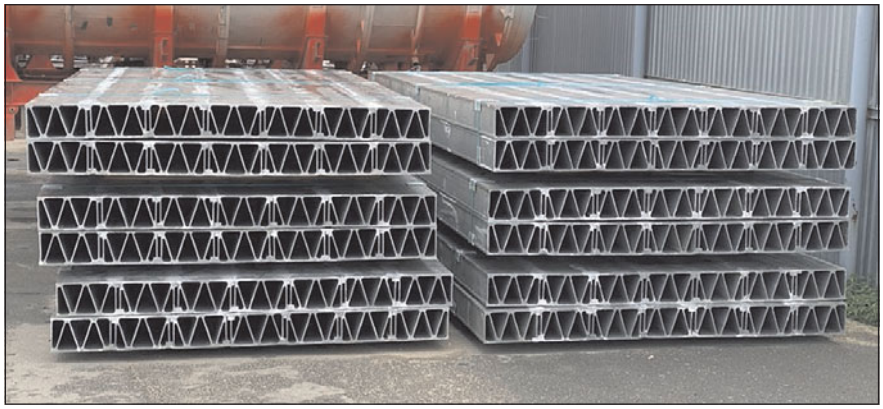


Рис. 1. ***Изготовленные ортотропные плиты***

Ширину секции с шагом 300 мм принимали с учетом характеристик существующих мостовых конструкций. Максимальный размер проектируемой секции ограничен размерами матрицы экструдера 350 мм на заводе-изготовителе. Толщина поясов плиты составляет 8 мм, толщина вертикальных и наклонных ребер – 5 мм.

Каждую секцию отдельно изготовляют методом экструдирования, при котором размягченная масса алюминиевого сплава выдавливается через матрицу необходимой формы. Секции в количестве 7 шт., устанавливаемые в монтажный кондуктор, соединяются между собой СТП в соответствии с ГОСТ ISO 25239-1–2020 «Сварка трением с перемешиванием. Алюминий», формируя готовую ортотропную плиту, шириной 2000 мм. Плиты других размеров могут быть получены при изменении числа панелей. Ортотропные плиты размером 2×4 м показаны на *рис. 1*.

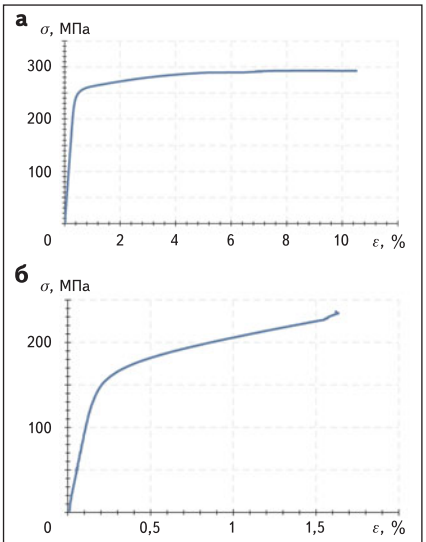
Цель данной работы состоит в экспериментальном определении физико-механических характеристик перспективного для мостостроения алюминиевого сплава EN AW-6082T6 и параметров несущей способности изготовленных из данного сплава ортотропных плит, установлении их фактического напряженно-деформированного состояния (НДС) и сопоставлении с результатами МКЭ-моделирования, а также в выборе наиболее эффективной схемы нагружения.

Экспериментальное исследование

На первоначальном этапе испытаний определяли физико-механические свойства основного металла алюминиевого сплава EN AW-6082T6 и металла зон сварки трением с перемешиванием. С этой целью испытали серию из шести образцов для каждого типа испытания (основной металл, сварка трением с перемешиванием). По результатам испытаний получены диаграммы деформирования *(рис. 2)* и физико-механические свойства материала *(табл. 1)*.

По результатам испытаний образцов было установлено, что сплав EN AW- 6082-T6 при изготовлении секций ортотропной плиты методом экструзии имеет модуль упругости E = 71 293 МПа, предел пропорциональности $\sigma_{п.п}$ = 215,79 МПа, условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ = 244,8 МПа, площадка текучести после небольшого упрочнения плавно переходит к временному сопротивлению $\sigma_в$ = 275,67 МПа.

Сварка трением с перемеши-



а – основной металл; б – сварное соединение СТП

Рис. 2. ***Диаграммы деформирования сплава EN AW-6082T6***

Рис. 3. ***Нагружающая силовая рама***

ванием имеет несколько увеличенный модуль упругости E = = 93 216 МПа, но при этом предел пропорциональности значительно ниже $\sigma_{п.п}$ = 140,92 МПа и отсутствует явная площадка текучести. При достижении в среднем σ = 160 МПа диаграмма меняет угол наклона и растет вплоть до временного сопротивления $\sigma_в$ = 263,47 МПа, что лишь незначительно ниже временного сопротивления основного металла 275,67 МПа.

1. Физико-механические свойства сплава EN AW-6082T6

Образец	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел пропорциональности $\sigma_{п.п}$, МПа	Временное сопротивление $\sigma_в$, МПа	Модуль упругости E, МПа
Основной металл, изготовленный методом экструзии				
1	243,74	217,66	277,67	69 528
2	242,1	207,17	267,32	70 305
3	254,46	222,22	292,85	70 302
4	248,44	231,67	293,65	77 803
5	241,95	215,49	266,85	69 920
6	238,1	200,51	265,69	69 901
Среднее значение	244,8	215,79	275,67	71 293
Среднеквадратичное отклонение	5,79	11	11,04	3202
Коэффициент вариации, %	2,37	5,1	4,01	4,49
Металл шва при сварке методом трения с перемешиванием				
1	200,45	133,44	266,83	96 712
2	201,26	152,28	264,89	91 408
3	202,52	148,40	258,69	91 527
Среднее значение	201,41	140,92	263,47	93 216
Среднеквадратичное отклонение	1,04	10,58	4,25	3028
Коэффициент вариации, %	0,52	7,5	1,61	3,25

Испытания ортотропных плит

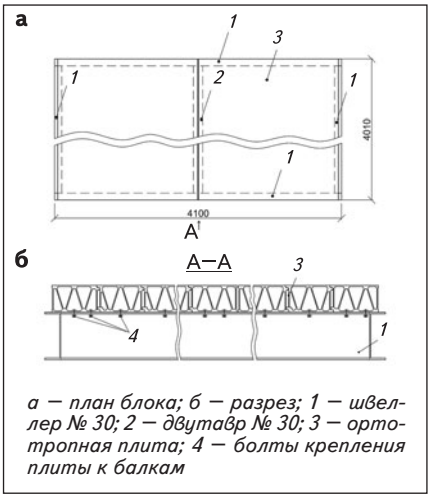
Целью экспериментальных исследований было определение НДС и предельных нагрузок ортотропной плиты, сравнение полученных результатов с данными численного МКЭ-моделирования [12, 19, 25].

Для испытания плит использовали стационарный стенд, представляющий собой спаренные стальные опорные рамы, которые расположены на мощном железобетонном монолитном фундаменте *(рис. 3)*. Используемые нагружающие гидроцилиндры позволяют приложить сосредоточенную статическую нагрузку до 840 кН.

Испытания плит проводились с использованием конструкционного блока «стальная рама–две ортотропные плиты» *(рис. 4)*. Плиты помещали на раму, составленную из швеллеров № 30 по краям и двутавра № 30 в середине рамы. Ортотропные плиты к стальной раме крепили с помощью болтов, устанавливаемых по торцам в их нижних поясах.

В ходе испытаний регистрировались следующие параметры нагружения и НДС:

• усилия, прикладываемые в процессе воздействия к нагружающим траверсам, фиксировали тензометрические силоизмерители;



а – план блока; б – разрез; 1 – швеллер № 30; 2 – двутавр № 30; 3 – ортотропная плита; 4 – болты крепления плиты к балкам

Рис. 4. ***Схема конструкционного блока «стальная рама – ортотропная плита»***

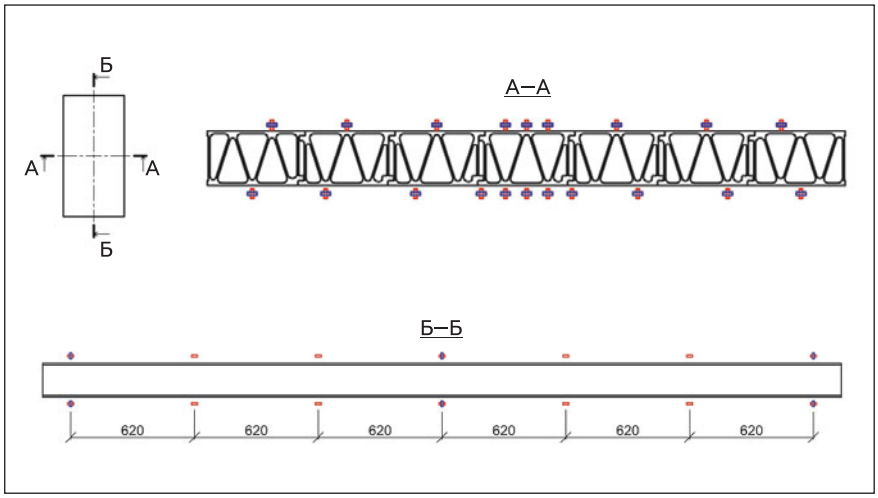
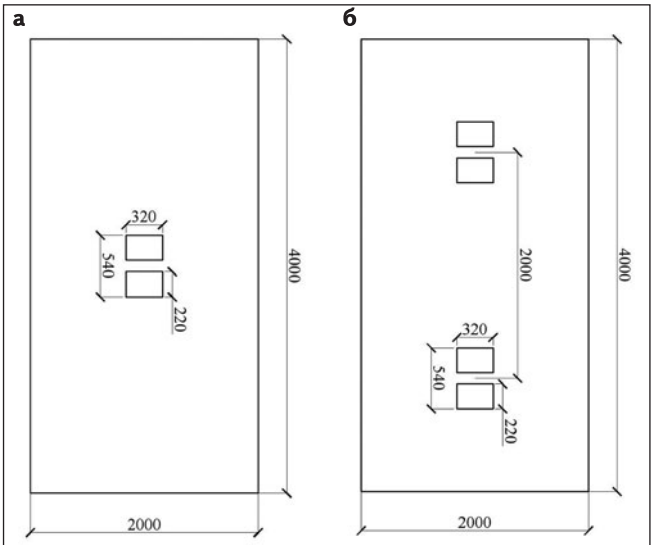
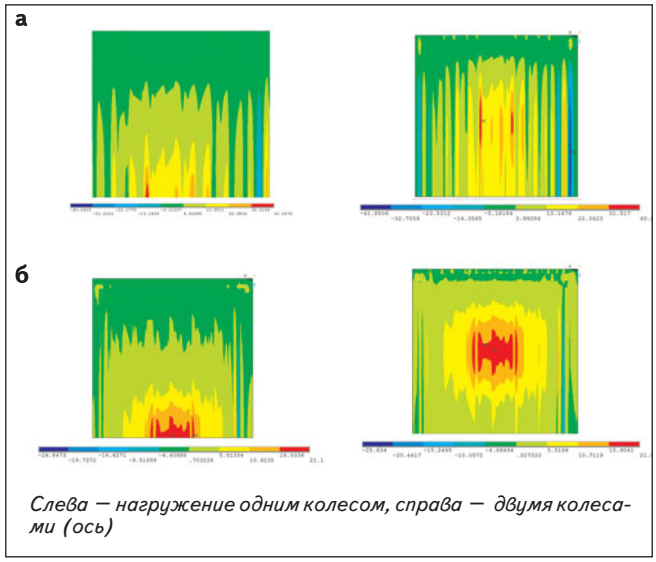


Рис. 5. ***Расположение датчиков перемещения на плите***



а – нагрузка от одного колеса; б – нагрузка от одной оси

Рис. 6. ***Рассматриваемые схемы нагружения***



Слева – нагружение одним колесом, справа – двумя колесами (ось)

Рис. 7. Изополя напряжений σ_X – вдоль короткой стороны плиты (а) и σ_Z – вдоль длинной стороны плиты (б)

2. Сравнение напряжений при различных схемах нагружения

Расчетная схема	σ_X, МПа	σ_Z, МПа
I	–40,2423 / 41,0479	–24,8473 / 21,1437
II	–41,8806 / 40,6917	–25,634 / 21,0964

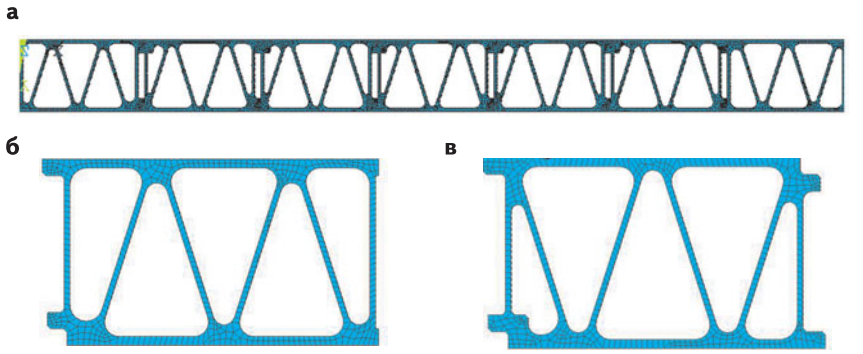
Примечание. Значения напряжений при сжатии даны в числителе, при растяжении – в знаменателе.

• вертикальные перемещения стальной рамы и ортотропных плит измеряли тензометрические датчики линейных перемещений, установленные в середине пролета плиты и под сварной рамой для контроля перемещений рамы;

• относительные деформации в характерных точках *(рис. 5)* нижнего и верхнего поясов плит получали с помощью тензорезисторов и 2-компонентных тензорозеток с базой измерения 5–10 мм. Датчики деформаций были установлены в поперечном сечении согласно схеме.

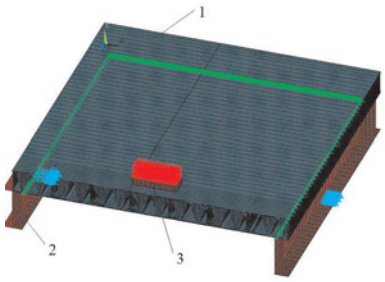
Для определения наиболее эффективной схемы нагружения плит был проведен сравнительный численный анализ результатов расчета двух вариантов нагружения *(рис. 6):* из расчета нагружения одного колеса в центре плиты, а также нагружения плиты всей осью грузовика.

Нагрузка принята согласно СП



а – общий вид поперечного сечения КЭ-модели; б – боковая секция; в – рядовая секция

Рис. 8. ***Поперечное сечение ортотропной плиты***



1 – алюминиевая ортотропная плита; 2 – стальная рама; 3 – распределительная нагружающая плита

Рис. 9. ***Конечно-элементная модель ортотропной плиты (1/2 модели)***

35.13330.2011 «СНиП 2.05.03-81* Мосты и трубы» (с изм. № 1–3) в виде полосы А14. С учетом всех коэффициентов расчетная нагрузка составляет 294 кН на ось, или 147 кН на одно колесо. Результаты расчета представлены изополями напряжений вдоль осей *X* и *Z (рис. 7).*

Как видно из анализа параметров *табл. 2*, наибольшие растягивающие напряжения имеют место при варианте I схемы нагружения плит, который и был принят для проведения испытаний.

Численное исследование

Компьютерное моделирование работы конструкционного блока производилось в МКЭ-системе ANSYS с целью анализа НДС от действия сосредоточенных нагрузок и дальнейшей оценки соответствия расчетных схем действительной работе конструкции. При численном моделировании использовались конечные элементы типа SOLID185 (моделирование объемных элементов ортотропных плит) и SHELL181 (моделирование пластин опорной рамы).

Для моделирования ортотропных плит был выбран твердотельный объемный тип конечного элемента, поскольку по сравнению с оболочечным типом он дает более достоверные результаты напряжений в условиях локального изгиба.

НДС опорной рамы, которое имеет второстепенное значение, для экономии расчетного ресурса и сокращения времени расчета оценивалось по модели рамы, составленной только из оболочечных элементов.

Физико-механические свойства сплава и сварки установлены согласно результатам испытаний образцов. Для стали опорной рамы данные свойства приняты следующими: модуль упругости равен $2{,}1 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона – 0,3.

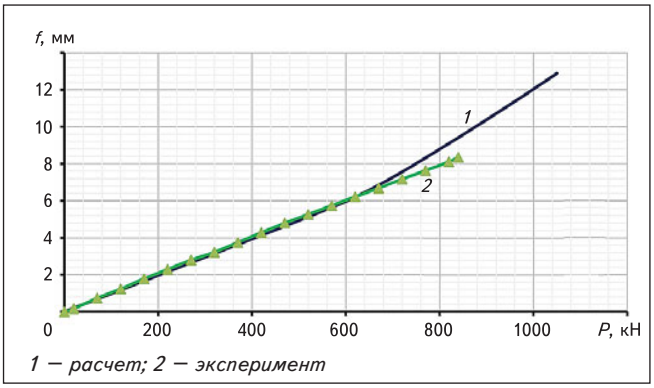
Расчетная модель

Модель ортотропной плиты *(рис. 8)* состоит из элементов SOLID185. Поперечное сечение плиты включает в себя два типа секций. В силу симметрии рассматривается половина плиты относительно срединной поперечной оси.

Численная модель плиты *1* из алюминиевого сплава EN AW-6082 T6 *(рис. 9)* представляет собой семь соединенных между собой секций двух типов. Совместная работа плиты и стальной рамы *2* моделируется с помощью уравнений (constraint equations) объединения вертикальных перемещений смежных узлов плиты и грани стальной рамы. Также предусмотрено закрепление на болтовых соединениях, их моделирование осуществлялось аналогично опиранию плиты на раму, но объединение узлов производилось по перемещениям по всем трем осям. Нагрузка на плиту передавалась через стальные распределительные пластины *3* в виде распределенной нагрузки.

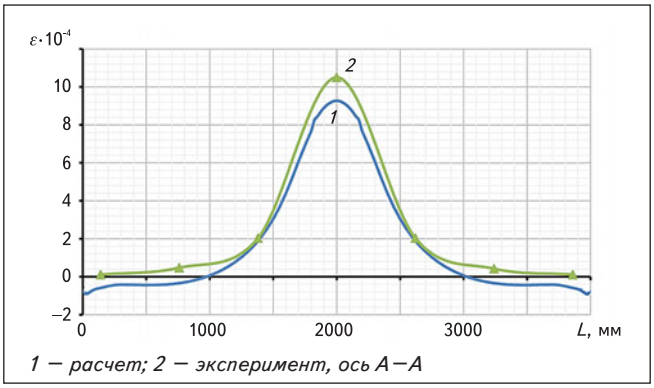
Результаты

По результатам проведенных испытаний и анализа полученных данных было установлено, что при значении испытательной нагрузки 147 кН, которая соответствует расчетному значению нагрузки, приходящейся на одно колесо согласно СП 35.13330, экспериментально зафиксированные деформации равны 0,000333, прогибы – 1,6 мм. Максимальные растягивающие напряжения (главные напряжения) составляют 33,57 МПа (напряжения определены с учетом плоского напряженного состояния), или 14 % значения условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ = 244,8 МПа. При максимальной нагрузке 840 кН, достигнутой при проведении испытаний, перемещения плиты были 9,07 мм. Данные результаты хорошо коррелируются с расчетом *(рис. 10)*, расчетные перемещения при нагрузке 840 кН отличаются от экспериментальных на 7 %, что также свидетельствует о высокой жесткости плиты.



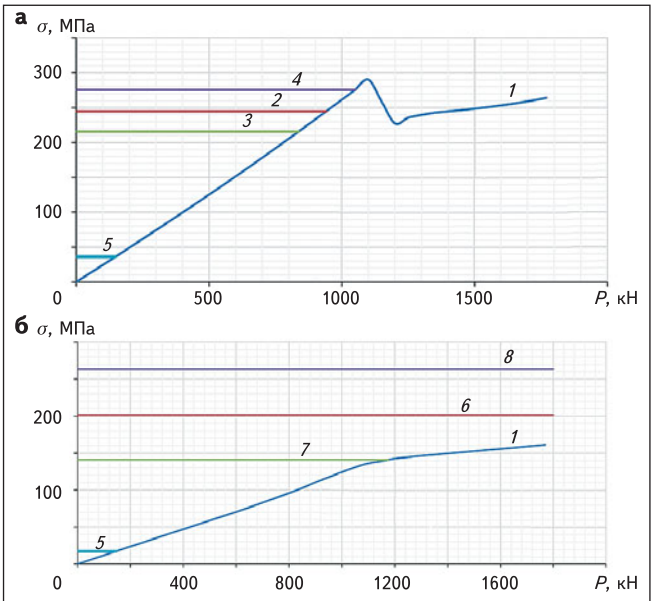
1 – расчет; 2 – эксперимент

Рис. 10. ***График зависимости перемещений от нагрузки***



1 – расчет; 2 – эксперимент, ось А–А

Рис. 12. ***Эпюра продольных деформаций в середине пролета (разрез А-А, см. рис. 5)***



1 – график изменения напряжений от нагрузки; 2 – предел текучести 244,8 МПа; 3 – предел пропорциональности 215,79 МПа; 4 – временное сопротивление 275,67 МПа; 5 – расчетная нагрузка 147 кН; 6 – предел текучести 201,41 МПа; 7 – предел пропорциональности 140,92 МПа; 8 – временное сопротивление 263,47 МПа

Рис. 11. ***Графики изменения наибольших напряжений по фон Мизесу от нагрузки в основном металле (а) и металле шва (б)***

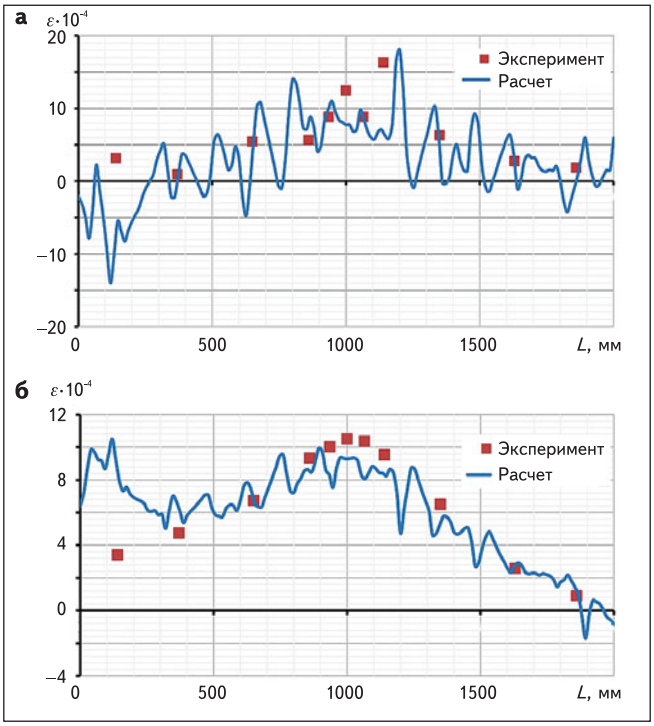


Рис. 13. ***Эпюры поперечных (а) и продольных (б) деформаций по направлению поперек плиты (разрез Б-Б, см. рис. 5)***

При дальнейшем увеличении испытательной нагрузки была достигнута максимальная для данного испытательного стенда сосредоточенная нагрузка на плиту, равная 840 кН. При такой нагрузке в ортотропных плитах не было зарегистрировано признаков нелинейной работы и образования пластических деформаций.

В связи с тем что экспериментально не удалось разрушить образец, несущая способность ортотропной плиты была определена по результатам численного моделирования. Оценка производилась по точкам с наибольшими значениями напряжения и деформаций по фон Мизесу основного металла и металла шва. Таким образом, предельно возможная для плиты нагрузка P_{max} = 1049 кН была установлена по достижении напряжениями конструкции временного сопротивления сварной зоны $\sigma_в$ = 263,47 МПа сплава EN AW-6082 T6. При этом также были получены нагрузки *(рис. 11)*, при которых в данных точках напряжения достигают предела пропорциональности и текучести.

При анализе наиболее напряженных точек численной модели сделаны следующее выводы: в основном металле сплава напряжения предела пропорциональности $\sigma_{п.п}$ = 215,79 МПа достига-

ются при нагрузке 836 кН, напряжения предела текучести $\sigma_{0,2}$ = 244,8 МПа – при нагрузке 940,43 кН, напряжения временного сопротивления $\sigma_в$ = 275,67 МПа – при нагрузке 1049,02 кН *(рис. 11а).* В металле сварного шва напряжения предела пропорциональности $\sigma_{п.п}$ = 140,92 МПа достигаются при нагрузке 1001,39 кН *(рис. 11б).* С учетом результатов расчета можно констатировать, что при испытаниях напряжения в плите достигли лишь напряжений предела пропорциональности.

Для подтверждения достоверности результатов МКЭ-расчетов они были сопоставлены с экспериментальными данными, сравнение производилось по значениям перемещений *(см. рис. 10)*, деформациям в середине пролета *(рис. 12)*, а также по эпюрам деформаций в поперечном и продольном разрезе плиты *(рис. 13).*

Пилообразный характер распределения расчетных продольных и поперечных деформаций по сечению является следствием переменной жесткости поперечного сечения плиты. Наложение экспериментально зарегистрированных тензодатчиками значений поперечных деформаций на соответствующий график *(рис. 13а)* дает удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных результатов. Сравнение экспериментального и расчетного распределения продольных деформаций *(рис. 13б)* в средней и правой частях поперечного сечения плиты также показывает их удовлетворительное соответствие. Существенные различия экспериментальных и теоретических результатов на левом крае поперечного сечения объясняются разными прогибами срединой и крайних балок опорной рамы испытательного блока, зарегистрированных в ходе испытаний.

По результатам проведенных испытаний и результатов МКЭ-моделирования можно констатировать, что фактическая несущая способность спроектированных ортотропных плит из алюминиевого сплава EN AW-6082 T6 при принятых размерах плит в случае их использования в качестве несущих конструкций мостового автодорожного полотна составляет 640 % требуемых значений для нагрузки А14 по СП 35.13330.

Выводы

1. Для проведения испытаний на основании результатов предварительных расчетов был выбран вариант I схемы нагружения (одиночные сосредоточенные силы, т. е. колеса грузовика в центре плиты), при котором представляющие наибольший интерес растягивающие напряжения достигают наибольших значений *(см. табл. 1).*

2. При испытании на расчетные статические нагрузки, а также на нагрузки, превышающие их в ≅ 5,7 раза, признаков нелинейной работы и образования пластических деформаций не зафиксировано.

3. Результаты эксперимента с учетом расчета позволяют сделать вывод, что при испытаниях напряжения в плите достигли лишь напряжений предела пропорциональности, что обусловлено высокой жесткостью плиты.

4. Сопоставление расчетных и экспериментальных результатов показало, что принятая расчетная схема адекватно отражает реальную работу плиты. Сравнение продольных деформаций вдоль оси плиты дает расхождения наибольших значений деформации, не превышающие 8,5 %, что свидетельствует об удовлетворительной сходимости расчетных и экспериментальных результатов.

5. Спроектированные ортотропные плиты из алюминиевого сплава EN AW-6082 T6 при принятых размерах плит подходят для выполнения функций настила автодорожных мостов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Siwowski T. W. Aluminium. Bridges – past, present and future [Алюминий. Мосты – прошлое, настоящее и будущее]. *Structural Engineering International*, 2018, no. 16(4), pp. 286–293. doi: 10.2749/101686606778995137
2. Bettigole N., Robinson R. Bridge decks: design construction, rehabilitation, Replacement [Настилы мостов: проектирование]. *ASCE press*, 1997. 118 p. doi: 10.1061/9780784402238
3. *Коргин А. В., Романец В. А., Зейд Килани Л. З., Ермаков В. А.* Особенности проектирования ортотропных алюминиевых плит дорожного настила // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования. 2020. С. 88–94.
3. Korgin A. V., Romanets V. A., Zeyd Kilani L. Z., Ermakov V. A. Design features of orthotropic aluminum road flooring slabs. *Aktual'nye problemy stroitel'noj otrasli i obrazovaniya*, 2020, pp. 88–94. (In Russ.).
4. De Miranda M. *Innovative bridge design handbook* [Руководство по инновационному проектированию мостов]. Butterworth-Heinemann, 2016, pp. 383–425. doi: 10.1016/B978-0-12-800058-8.00015-3
5. Mangus A. R., Sun S. *Orthotropic deck bridges* [Ортотропные настилы мостов]. Bridge Engineering Handbook, chap. 14. Boca Raton, CRC Press, 2000. 47 p.
6. De Becker H. Innovative bridge design handbook construction [Руководство по инновационному про-

ектированию мостов]. *Rehabilitation and Maintenance*, 2016, pp. 597–613.
doi: 10.1016/B978-0-12-800058-8.00022-0

7. Siwowski T. W. The whole life costing of bridge deck replacement a case study [Примерное исследование стоимости замены настила моста на весь срок службы]. *Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability*, Italy, 2012, pp. 3835–3842. doi: 10.1201/b12352-573
8. Mazzolani F. M. Competing issues for aluminium alloys in structural engineering [Конкурирующие проблемы для алюминиевых сплавов в конструкционном проектировании]. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2004, no. 6(4), pp. 185–196. doi: 10.1002/pse.178
9. Korgin A. V., Odesskii P. D., Ermakov V. A., Zeyd Kelani L. Z. et al. Strength of aluminum alloys for bridge building [Прочность алюминиевых сплавов для мостов]. *Russian Metallurgy*, 2020, no. 4, pp. 373–382. doi: 10.1134/S003602952004014X
10. *Коргин А. В., Одесский П. Д., Ермаков В. А., Зейд Килани Л. З.* [и др.] Прочность алюминиевых сплавов для мостостроения // Деформация и разрушение материалов. 2019. № 8. С. 10–19.
10. Korgin A. V., Odesskiy P. D., Ermakov V. A., Zeyd Kilani L. Z. et al. Strength of aluminum alloys for bridge building. *Deformacija i razrushenie materialov*, 2019, no. 8, pp. 10–19. (In Russ.). doi: 10.31044/1814-4632-2019-8-10-19
11. *Коргин А. В., Романец В. А., Ермаков В. А., Зейд Килани Л. З.* Перспективы и проблемы применения алюминиевых сплавов при строительстве мостов в Российской Федерации // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2018. № 9. С. 42–48. doi: 10.12737/article_5bab4a1a42eee3.23235487
11. Korgin A. V., Romanets V. A., Ermakov V. A., Zeyd Kilani L. Z. Prospects and problems of using aluminum alloys in the construction of bridges in the Russian Federation. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova*, 2018, no. 9, pp. 42–48. (In Russ.). doi: 10.12737/article_5bab4a1a42eee3.23235487
12. *Development and deployment of aluminum bridge decks research report* [Разработка и внедрение алюминиевых настилов мостов. Отчет НИОКР]. Kentucky Transportation Center, 2012. 54 p.
13. Das S. K., Kaufman J. G. *Aluminum alloys for bridges and bridge decks* [Алюминиевые сплавы для мостов и настилов мостов]. TMS, 2007, pp. 61–72.
14. Qing-jie Wen, Zi-jian Ren. Structural analysis of a large aluminum alloy truss double-arch bridge [Структурный анализ двухарочного моста с большой фермой из алюминиевого сплава]. *Structures*, 2021, no. 29, pp. 924–936. doi: 10.1016/j.istruc.2020.11.066
15. Qing-jie Wen, Zi-xiang Yue. Elastic buckling property of the upper chords in aluminum half-through truss bridges [Свойства упругой потери устойчивости верхнего пояса алюминиевой фермы]. *Structures*, 2020, no. 27, pp. 1919–1929. doi: 10.1016/j.istruc.2020.07.057
16. Korgin A., Romanets V., Ermakov V., Zeyd Kilani L. Experimental and analytical study of an aluminium alloy bridge made of 1915T [Экспериментальное и аналитическое исследование моста из алюминиевого сплава 1915T]. *MATEC Web of Conferences*, 2018, no. 251, pp. 04005. doi: 10.1051/matecconf/201825104005
17. Vigh L. G., Okura I. Fatigue behaviour of friction stir welded aluminium bridge deck segment [Усталостные характеристики сегмента настила алюминиевого моста при сварке трением с перемешиванием]. *Materials & Design*, 2013, no. 44, pp. 119–127. doi: 10.1016/j.matdes.2012.08.007
18. Höglund T., Nilsson L. Aluminium in bridge decks and in a new military bridge in Sweden [Алюминий для настилов моста и нового военного моста в Швеции]. *Structural Engineering International*, 2006, vol. 16. pp. 348–351. doi: 10.2749/101686606778995100
19. Siwowski T. W. FEM modelling and analysis of a certain aluminium bridge deck panel [МКЭ-моделирование и анализ алюминиевой панели настила моста]. *Archives of Civil Engineering*, 2009, no. 3, pp. 347–365.
20. Siwowski T. W. Structural behaviour of aluminium bridge deck panels [Конструктивные характеристики алюминиевых панелей настила моста]. *Engineering Structures*, 2009, no. 31, pp. 1349–1353. doi: 10.1016/j.engstruct.2009.02.002
21. Saleem M. A., Mirmiran A., Jun Xia F., Mackie K. Experimental evaluation of aluminum bridge deck system [Экспериментальная оценка системы настила алюминиевого моста]. *Journal of Bridge Engineering*, 2012, no. 17, pp. 97–106. doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000204
22. Maljaars J., Soetens F., van Straalen I. Fatigue of aluminium bridge decks [Усталость алюминиевых настилов моста]. *Structural Engineering International*, 2006, pp. 305–311. doi: 10.2749/101686606778995119
23. Dobmeier J. M., Barton F. W., Gomez J. P. et al. Failure study of an aluminum bridge deck panel [Исследование разрушения алюминиевой панели настила моста]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2001, no. 75, pp. 68–75.
24. Freeman C. *Aluminum lightweight orthotropic deck evaluation project* [Проект оценки легкой алюминиевой ортотропной плиты]. Florida Department of Transportation, 2017. 274 p.
25. Dobmeier J. M., Barton F. W., Gomez J. P. et al. *Analytical and experimental evaluation of an aluminum bridge deck panel. Final report* [Аналитическая и экспериментальная оценка алюминиевой панели настила моста. Окончательный отчет], 1999. 38 p.