





УДК: 624.012

DOI: 10.52409/20731523_2023_1_31

EDN: ECDUWC



Исследование напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных балок нового типа железнодорожных мостов

Мирсаяпов Илшат Талгатович¹, Валиев Азат Тагирович²

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет г. Казань, Российская Федерация ²АО «Казанский Гипронииавиапром» им. Б.И. Тихомирова» г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. Постановка задачи. При проектировании сталежелезобетонных железнодорожных мостов через проезжую часть часто возникает вопрос об ограничении высоты конструкции, вследствие фиксированной отметки низа моста. Для достижения необходимой прочности таких конструкций нужно увеличивать толщины стенок и полок стальной части балки при неизменной рабочей высоте, что приводит к значительному перерасходу металла. Одним из способов решения данного вопроса может быть использование композитных балок нового типа, где стальной двугавр частично заведен в бетон сжатой зоны. Цель исследования - на основании численных экспериментов оценить напряженно-деформированное состояние сталежелезобетонных балок нового типа. Задачи исследования – компьютерное моделирование процесса деформирования и разрушения расчетных моделей и сравнительный анализ результатов.

Результаты. выявления пространственной работы Для сталежелезобетонных конструкций использовано численное моделирование. Расчетная модель откорректирована и верифицирована по результатам натурных испытаний других авторов. По результатам расчета получены эпюры деформаций и напряжений в балке. Сравнительным расчетом установлено, что учет истинного поперечного сечения модели увеличивает несущую способность конструкции на 10% и жесткость на 20%.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в том, что они позволяют более точно оценивать несущую способность предложенного нового типа сечения сталежелезобетонных балок. Результаты исследования могут быть использованы для внедрения новых типов балок в строительство промышленных и гражданских зданий, автомобильных и железнодорожных мостов, а также для разработки новых методик расчета таких конструкций и внедрения их в отечественные нормы проектирования сталежелезобетона.

Ключевые слова: сталежелезобетонные конструкции; численный эксперимент; ANSYS; напряженно-деформированное состояние; железнодорожный мост.

Для цитирования: Мирсаяпов Илшат Т., Валиев А.Т. Исследование напряженнодеформированного состояния сталежелезобетонных балок нового типа железнодорожных мостов// Известия КГАСУ. 2023. № 1 (63), с. 31-42, DOI: 10.52409/20731523_2023_1_31, EDN: ECDUWC

Study of the stress-strain state of steel reinforced concrete beams of the new type railway bridges

Mirsayapov Ilshat Talgatovich¹, Valiev Azat Tagirovich²

¹Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
²JS «Kazanski Giproniiaviaprom named B.I Tilhomirova»

Kazan, Russian Federation

Abstract: Problem statement. When designing steel reinforced concrete railway bridges over the carriageway, there is often a question of limiting the height of the structure due to the fixed elevation of the bottom of the bridge. In order to achieve the required strength of such structures, it is necessary to increase the thickness of walls and flanges of the steel part of the beam while the working height remains unchanged, which leads to considerable overconsumption of metal. One way of solving this issue could be the use of composite beams of a new type, where the steel I-beam is partially brought into the concrete of the compressed zone. The study is aimed at determining the stress-strain state of steel reinforced concrete beams of the new type on the basis of numerical experiments. The tasks of the study are computer modeling of the deformation and fracture process of the calculated models and a comparative analysis of the results.

Results. Numerical modeling has been used to reveal the spatial operation of steel reinforced concrete structures. A numerical experiment was performed using the ANSYS software package in the Workbench shell. The computational model was corrected according to the results of insitu tests by other authors. According to the results of the calculation, the deformations and stresses in the beam were obtained. A comparative calculation found that taking into account the true cross-section of the model increases the load-carrying capacity of the structure by 10%.

Conclusions. The significance of the obtained results for the construction industry lies in the fact that they allow estimating more accurately the bearing capacity of the proposed new type of steel-reinforced concrete beams section. The results of the study can also be used for the introduction of new types of beams in Russian standards of steel reinforced concrete design and development of new methods of calculation of such structures.

Keywords: steel reinforced concrete structures; numerical experiment; ANSYS; stress-strain state; railway bridge.

For citation: Mirsayapov Ilshat T., Valiev A.T. Study of the stress-strain state of steel reinforced concrete beams of the new type railway bridges // News KSUAE. 2023. №1 (63), p. 31-42, DOI: 10.52409/20731523 2023 1 31, EDN: ECDUWC

1. Введение

Объектом исследования являются мостовые конструкции, состоящие из железобетонного корыта со свисающими полками (пассажирскими платформами) и опирающегося на две стальные двутавровые балки, частично бетонированные в теле этого корыта. Сталежелезобетонные пролетные строения являются современными и эффективными видами строительных конструкций, получивших широкое распространение в железнодорожных мостах с ездой поверху. Сущность этой системы заключается в том, что железобетонная плита проезжей части вводится в работу совместно с металлическими балками и воспринимает на себя сжимающие напряжения, возникающие в композитной конструкции от изгибающих моментов.

Введение железобетонной плиты в работу на сжатие совместно с металлическими балками дает возможность существенно сократить затраты на них металла за счет оптимальной работы материалов и увеличения общей жесткости объединенного сечения, вызываемого включением в работу железобетонной плиты [1-5].

В настоящее время проектирование сталежелезобетонных пролетных конструкций в Российской Федерации нормируется по СП 266.1325800 "Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования" и СП 35.13330 «Мосты и трубы". Наиболее распространенным видом поперечного сечения изгибаемых

сталежелезобетонных конструкций является расположение железобетонной плиты поверху стальных балок, объединенных с помощью анкерных упоров [6-9]. На рис. 1 а приведены основные типы поперечных сечений комбинированных балок по СП 266.1325800.

При проектировании сталежелезобетонных железнодорожных мостов через проезжую часть часто возникает вопрос об ограничении высоты конструкции вследствие фиксированной отметки низа моста. Одним из способов решения данного вопроса может быть использования композитных балок нового типа, где стальной двутавр частично заведен в бетон сжатой зоны (см. рис. 1 б). Применение сталежелезобетонных балок нового типа позволяет увеличить рабочую высоту стальных балок мостовых строений при ограниченной нижней отметки конструкции, что позволяет снизить расход металла относительно балок, где плита расположена поверху стального двутавра. При частичном заведении стального двутавра в бетон плиты существенно увеличивается площадь контакта стали и бетона, что увеличивает сопротивляемость сдвигу таких конструкций за счет увеличения площади трения материалов.

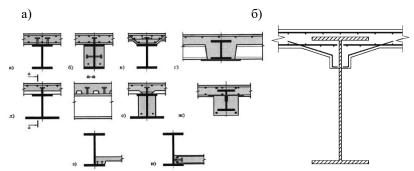


Рис. 1- Поперечные сечения сталежелезобетонных балок:

- а) варианты по СП266.1325800; б) новый тип сечения (иллюстрация авторов)
 - Fig. 1- Cross sections of composite beam:
- a) variants according to SP266.1325800; б) new type of section(authors illustration)

Исследования предложенного типа сечений композитных балок в России, к сожалению, отсутствуют. Данный вопрос, в рамках натурных испытаний усиления стальных балок железобетонной плитой, исследовали Египетские ученые и инженеры Γ101. рамках эксперимента испытывались стальная четырнадцать сталежелезобетонных балок на изгиб. Композитные балки были разделены на три группы, чтобы исследовать возможность влияния толщины, ширины железобетонной плиты и высоту заведения стального двугавра в бетон плиты. Исследования показали, что несущая способность композитных балок, в сравнении со стальной, увеличивается на (от 43% до 230%) процентов по мере увеличения толщины и ширины железобетонной плиты. Анализ зоны контакта сталь-бетон показал, что прочность на сдвиг образцов повышается при увеличении ширины и высоты плиты, а также при увеличении высоты заведения стальной балки в бетон плиты.

Цель исследования – изучение напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных балок нового типа с помощью численного моделирования в программном комплексе ANSYS

Задачи исследования:

- 1. выполнить компьютерное моделирование процесса деформирования и разрушения сталежелезобетонных балок с новыми типами сечения, который может быть использован при проектировании мостовых сооружений;
- 2. провести сравнительный анализ результатов компьютерного моделирования сталежелезобетонных балок с истинным и упрощенным сечениями.

2. Материалы и методы

Для анализа напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных конструкций на сегодняшний день используются различные численные и экспериментальные исследования. Программный комплекс (ПК) ANSYS относится к

числу лидеров в области САЕ-продуктов конечно-элементного анализа и имеет почти сорокалетний опыт в решении прикладных задач численными методами. Средства метода конечных элементов ПК ANSYS могут помочь с решением ряда вышеуказанных задач без проведения дорогостоящих и технически сложных натурных испытаний [11,12].

В качестве объекта исследования выбран проект железнодорожного путепровода на 787 км участка Юдино-Дербышки города Казани, разработанный инженерами АО «Казанский Гипронииавиапром» им. Б. И. Тихомирова» в 2020 г. Запроектированный путепровод с ездой на балласте предназначался для передвижения железнодорожного транспорта. Строение имеет 4 пролета размерами 18, 26, 26, 18 м. Рамная несущая система проектируемого путепровода образована шарнирно опертой 4-х пролетной разрезной пролетной конструкцией, по верху которой проходят железнодорожные пути на балласте. Для обеспечения перспективного развития и расширения Горьковского шоссе, расположенного под сооружениями и организации движения, у проектируемого путепровода была ограничена отметка низа конструкции. В целях снижения расхода металла, инженерами АО «Казанский Гипронииавиапром» им. Б. И. Тихомирова» было принято решение частично заделать верхний пояс стального двутавра в бетон балластного корыта. Проект путепровода не смог пройти государственную экспертизу, по причине того, что данный вид сечения балок не был представлен в нормах проектирования (рис. 1 а) и отсутствовали нормативные методики его расчета.

В целях уменьшения времени расчета программным комплексом расчетная модель моста в ПК ANSYS смоделирована в уменьшенном масштабе. Истинное поперечное сечение исследуемого моста представлено на рис.2:

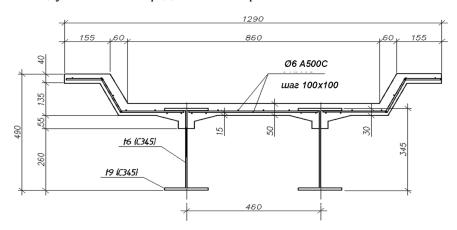


Рис. 2 – Истинное поперечное сечение исследуемого моста (Иллюстрация авторов) Fig. 2 – True cross section of the investigated bridge (authors illustration)

Расчетная схема представляет из себя шарнирно опертую композитную балку из объемных 6-ти и 8-ми узловых конечных элементов (сталь и бетон). Армирование смоделировано с помощью конечных элементов reinf 264.

При моделировании геометрии моста в ПК ANSYS использовались модель, созданная в Space Claim. Так как конструкция симметричная в 2-х плоскостях, то достаточно смоделировать только ее 1/4 часть, а эффект от отсеченных частей задать специальным встроенным инструментом "симметрия". Автоматически смоделированному программой контакту сталь-бетон присвоен характер Bonded («связанный»).

Следующим этапом моделирования в ПК ANSYS является выбор материалов и указание их свойств. Из библиотеки материалов общего пользования использовались три материала:

- -бетон со своими физико-механическими свойствами в табличной форме (с призменной прочность R_b =30 МПа);
 - конструкционная сталь двутавровой балки (С345);
 - конструкционная сталь армирования (А500).

Моделирование физически нелинейной работы бетона как в сжатой, так и в растянутой зоне производится с использованием модели (теории прочности) бетона Ментери-Виллама (Menetrey-Willam Base).

Данная модель максимально точно описывает работу бетона как упругопластического анизотропного материала как до, так и после образования макротрещин в бетоне. С математической точки зрения модель Ментери-Виллама представляет собой критерий прочности для бетона при многоосном напряженно- деформированном состоянии, являющимся функцией от первого инварианта шарового тензора напряжений и второго и третьего инварианта девиатора напряжений [11].

Стоит отметить, что данная теория прочности бетона во многом зависит от сдвиговых объемных эффектов (дилатансии бетона), связанных в свою очередь с процессом образования микротрещин в бетонном образце за счет сдвиговых деформаций (упрощенно, с процессом дилатансии связывают увеличение коэффициента Пуассона с ростом напряжений и деформаций в бетоне).

В совокупности с применением экспоненциальной модели разупрочнения бетона «HSD2 model» (Hardening-Softening and Dilatation), позволяющей численно корректировать поведение материала после образования пластических деформаций в бетоне, модель Ментери-Виллама позволяет полностью учесть распределение напряжений между соседними конечными элементами вплоть до стадии разрушения [13].

Ниже, в таблице, подробно описаны характеристики материалов, вводимых для расчета. Параметрические точки диаграмм бетона вычислены согласно [14].

Верификация компьютерной модели выполнена путём сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными [15].

 $\label{eq:2.2} Таблица$ Характеристики тяжелого бетона с призменной прочность R_b =30 Мпа применительно к тории прочности Ментери- Виллама и экспоненциальному закону разупрочнения HSD2

Пара-	Наименование параметра модели бетона	Знач-е	Ед.
метр	ттаименование параметра модели остона	пар-ра	изм.
Menetrey-William Base			
R_b	Uniaxial Compressive Strength- (Прочность при одноосном сжатии)	30	Мпа
R_{bt}	Uniaxial Tensile Strength – (Прочность при одноосном растяжении)	2,35	Мпа
$1,2R_b$	Biaxial Compressive Strength – (Прочность при двухосном сжатии 1,2Rb)	36	Мпа
ψ	Dilatancy Angle – (Угол дилатансии)	35	Град.
Softening			
ε_{cm}	Plastic Strain at Uniaxial Compressive Strength – (Пластические относительные деформации бетона в вершине диаграммы " $\sigma - \varepsilon$ ")	0,00107	MM/M M
$oldsymbol{arepsilon}_{cu}$	Plastic Strain at Transition from Power Law to Exponential Softening-(Пластические относительные деформации бетона в начале экспоненциального участка диаграммы " $\sigma - \varepsilon$ ")	0,00271	MM/M M
$oldsymbol{\delta_{ci}}$	Relative Stress at Start of Nonlinear Hardening - (Относительные сжимающие напряжения в бетоне в момент образования пластических деформаций)	0,4	МПа/ МПа
δ_{cu}	Residual Relative Stress at Transition from Power Law to Exponential Softening- (Относительные сжимающие напряжения в бетоне в начале экспоненциального участка диаграммы " $\sigma - \varepsilon$ ")	0,85	МПа/ МПа
δ_{cr}	Residual Compressive Relative Stress – (Остаточные относительные сжимающие напряжения в бетоне в стадии разрушения)	0,2	МПа/ МПа
G_{ft}	Mode 1 Area Specific Fracture Energy – (Энергия разрушения к единице площади при трещинообразовании (принимается на основе экспериментальных данных зарубежных авторов))	100	Дж/м ²
δ_{tr}	Residual Tensile Relative Stress – Остаточные относительные растягивающие напряжения в бетоне в стадии трещинообразования)	0,1	МПа/ МПа

a) δ_b δ_{br} δ_{cr} δ_{cr}

На рис.3 показана диаграмма бетона в соответствии с таблицей 1.

Рис. 3— Экспоненциальное размягчение бетона при: а) сжатии; б) растяжении (Иллюстрация авторов)

Fig. 3 - Exponential softening of concrete under: a) compression; b) tension(authors illustration)

Для описания нелинейных свойств стали арматуры и двутавровой балки использовалась теория Bilinear Isotropic Hardening (билинейное изотропное упрочнение). Эта модель упругопластического поведения материала использует критерий текучести Мизеса, ассоциативный закон течения и кинематическое упрочнение. Билинейная диаграмма задается модулем упругости, пределом текучести, и коэффициентом Пуассона. Для описания роста пластических деформаций за пределом текучести вводится значение модуля касательной.

Следующим этапом моделирования в ПК ANSYS является приложение нагрузок. Поверху балластного корыта прикладываем равномерно распределенную нагрузку до разрушения. Собственный вес модели задается ПК ANSYS автоматически. Как известно, нагрузка от железнодорожных составов является многократно-повторной, от действия которой конструкции моста работают на выносливость. Научные основы теории выносливости железобетонных конструкций изложены в работах [16-20]. При проектировании таких конструкций отдельно выполняется расчет прочности, отдельно выполняется расчет выносливости. В этой статье рассматривается только характер разрушения при статическом нагружении и оценка прочности.

3. Результаты

По результатам расчета разрушение сталежелезобетонной балки в компьютерной модели произошло по нормальному сечению в зоне чистого изгиба из-за местного раздробления бетона сжатой зоны плиты вследствие развития пластических деформаций в средней по длине части стальной балки, при нагрузке 17.5 т/m^2 (M_{ult} =606 кH· M).

Исследованиями в ПК ANSYS получена картина развития деформаций при кратковременном нагружении (рис. 4).

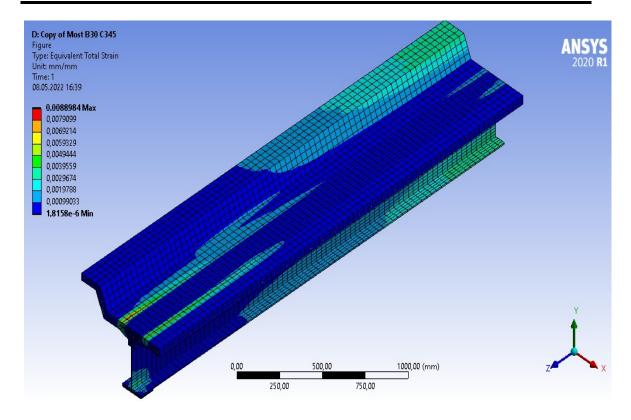
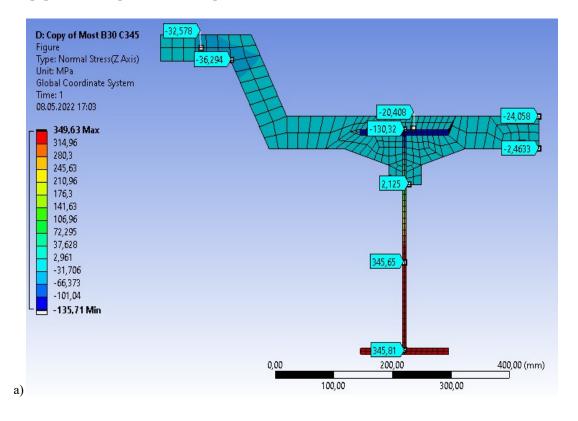


Рис. 4 — Картина развития относительных деформаций в балке с истинным сечением (Иллюстрация авторов)

Fig. 4 - The picture of the development of relative deformations in a beam in a true cross section (authors illustration)

На рис.5 представлены изополя нормальных напряжений и относительных деформаций в середине балки при $M_{\rm ult}$.



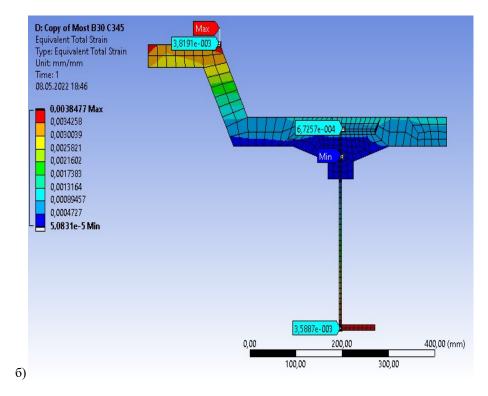


Рис. 5 – Изополя : а) нормальных напряжений; б) относительных деформаций (Иллюстрация авторов)

Fig. 5 - Isofields: a) normal stresses; b) relative deformations (authors illustration)

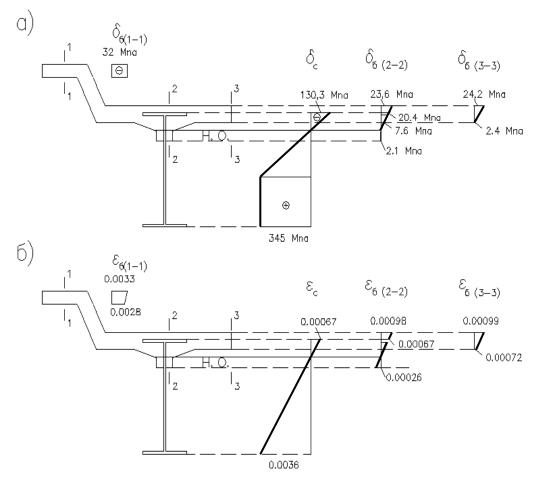


Рис. 6 – Эпюры: a) нормальных напряжений; б) относительных деформаций Fig. 6 - Diagrams: a) normal stresses; b) relative deformations

На рис.6 нормальные напряжения и относительные деформации представлены в виде эпюр.

В дальнейшем на основании исследований [16-19] планируется разработать деформационную модель расчета прочности сталежелезобетонных балок нового типа; а также на основании исследований [20-21] - оценить сцепление между бетоном и стальными балками.

4. Обсуждение

В результате проведенного численного исследования получены интересные зависимости между относительными деформациями и напряжениями в бетоне и стальных балках.

Верификация компьютерной модели выполнена путём сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными [15].

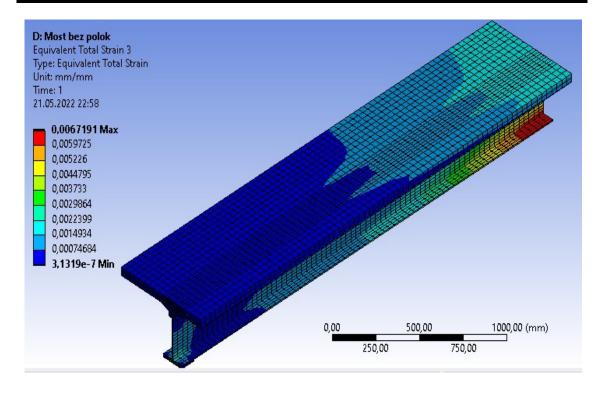
Как видно из эпюр напряжений (рис. 6), железобетонная плита активно участвует в работе на изгиб совместно с металлической балкой. Это следует из соотношения напряжений, замеренных в нижнем и верхних поясах металлической балки, испытанной компьютерной модели моста. Нейтральная ось металлической балки находится значительно выше середины балки, ближе к верхнему ее поясу.

Анализ продольных деформаций и напряжений (рис. 6) стальной части сталежелезобетонных балок показывает, что на начальных этапах нагружения сталежелезобетонных балок распределение продольных деформаций в стальной части подчиняется линейному закону. Такое распределение деформации продолжается практически до достижения в нижнем поясе стальной балки предельно допускаемых нормами деформаций $\varepsilon_{s.lim} = \frac{R_s}{E} = \frac{345 \text{ M}_{\Pi}a}{206000 \text{ M}_{\Pi}a} = 0,00167, \text{ что соответствует } 0,85 M_{ult} = 515,1 к H·м.$ По эпюрам (рис.6) видно, что наибольшие сжимающие напряжения и относительные деформации в бетоне плиты возникают в верхних полках, что объясняется гипотезой плоских сечений. В зоне контакта стали и бетона происходит скачок напряжений, равный $\frac{\varepsilon_c}{\sigma_c} = \frac{206000}{23700} = 6,33$. Пластические деформации в бетоне с увеличением нагрузки ε_b возрастают постепенно, поэтому качественные изменения в работе образца возникают только с развитием пластических деформаций в стали нижнего пояса балки, когда остаточные прогибы и другие общие и местные деформации начинают расти особенно интенсивно. После достижения значительных пластических деформаций в стали и бетоне, в железобетонной плите возникают продольные трещины. Наконец, при новом увеличении испытательной нагрузки и достижении моментом величины $M_{ult} = 606 \text{ kH} \cdot M$ $M_{\text{olt}} = 606 \text{ kH} \cdot \text{м}$ происходит раздробление бетона и исчерпание несущей способности.

В численных исследованиях также изучались закономерности развития прогибов модели моста. Расчетами установлено, что увеличение прогибов происходит при возрастании уровня нагружения, причем интенсивность развития прогибов различна на разных этапах нагружения. На начальный период нагружения наблюдалась прямая пропорциональность между изгибающим моментом и прогибами, затем, с изменением деформаций по высоте сталежелезобетонного сечения, вследствие появления пластических деформаций в стальной балке, при 0,85 M_{ult} , происходит излом графика прогибов, что свидетельствует о снижении жесткости несущих балок плиты при увеличении уровня нагрузок. При исчерпании несущей способности полные прогибы компьютерной модели составили 38 мм, что составляет 1/157 длины пролета.

На сегодняшний день многие инженеры при проектировании железнодорожных сталежелезобетонных мостов сложного сечения в расчетных схемах не учитывают выступающие вверх полки балластного корыта для прохода пешеходов и рассматривают их упрощенное сечение. Для оценки влияния на несущую способность и деформации данного допущения, был произведен сравнительный расчет.

На рис.7 представлена картина развития деформаций в упрощенной модели моста.



Puc. 7 – Картина развития относительных деформаций в балке с упрощенным сечением Fig. 7 - Picture of the development of relative deformations in a beam with a simplified section

Характер развития продольных деформаций и напряжений балки аналогичен с ранее рассмотренной моделью для истинного сечения. Величина максимальных относительных деформаций в нижнем поясе стальной части балки с упрощенным сечением достигает значения $\varepsilon_s = 0.0067$, что значительно больше деформаций балки с истинным сечением, $\varepsilon_s = 0.0036$, где учтены свесы для прохода пешеходов.

Физическое разрушение модели с упрощенным поперечным сечением происходит так же при раздроблении бетона сжатой зоны в зоне чистого изгиба при M_{ult} =545 к $H\cdot m$. При исчерпании несущей способности полные прогибы в компьютерной модели составили 57 мм, что составляет 1/105 длины пролета.

На рис.8 представлен графики развития прогибов в координатах "M-f" исследуемых двух расчетных сечений сталежелезобетонных балок.

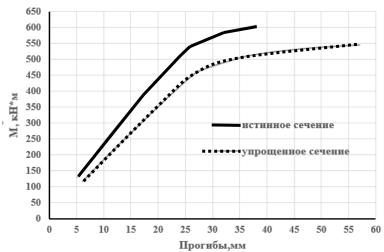


Рис. 8 – Графики развития прогибов в координатах "M-f" исследуемых сталежелезобетонных балок

Fig. 8 - Plots of deflections development in "M-f" coordinates of the investigated steel reinforced concrete beams

На рис. 8 четко видны точки излома пропорциональности между изгибающими моментами и прогибами графиков вследствие появления пластических деформаций в стальной балке модели при $0.85~{\rm M}_{\rm ult}$ = $463.25 {\rm kH}\cdot{\rm m}$.

5. Заключение

- 1. Исследованы напряженно-деформированное состояние и характер разрушения сталежелезобетонных балок нового типа с помощью численного моделирования в ПК ANSYS, которые могут быть использованы при проектировании мостовых сооружений.
- 2. По результатам моделирования моста в ПК ANSYS установлен характер физического разрушения, распределения напряжений и деформаций в сталежелезобетонных балках с истинным и упрощенным сечениями. Полученные результаты по несущей способности и характеру разрушения хорошо согласуются с данными натурных испытаний сталежелезобетонных конструкций на крупномасштабных моделях.
- 3. Выполнен сравнительный анализ результатов компьютерного моделирования сталежелезобетонных балок с истинным и упрощенным сечениями.
- 4. Сравнительным расчетом установлено, что учет истинного поперечного сечения модели моста увеличивает несущую способность конструкции на 11%. При одинаковых уровнях нагружения, в пределах упругой работы моделей, в модели с истинным сечением прогибы меньше на 20% чем в модели с упрощенным расчетным сечением.

Список литературы / References

- 1. Бабалич В.С., Андросов Е.Н. Сталежелезобетонные конструкции и перспектива их применения в строительной практике России / Успехи современной науки. 2017. № 4. С. 205–208. [Babalich V.S., Androsov E.N. Steel-reinforced concrete structures and the prospect of their application in the construction practice of Russia / Uspekhi sovremennoy nauki. 2017. № 4. Р. 205-208.].
- 2. Кибириева Ю.А., Астафьева Н.С. Применение конструкций из сталежелезобетона. Ekologiya and Stroitelstvo . 2018. № 2, С. 27-34. DOI: 10.24411/2413-8452-2018-10004. [Kibirieva U.A., Astafieva N.C. The use of reinforced concrete structures/2018, № 2. Р. 27-34].
- 3. Замалиев Ф.С., Тамразян А.Г. К расчету сталежелезобетонных ребристых плит для восстанавливаемых перекрытий / Строительство и реконструкция. 2021. №5. С.3-15. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-97-5-3-15 [F.S. Zamaliev, A.G. Tamrazyan. To calculation of steel-reinforced concrete ribbed plates for refurbished floors / Construction and reconstruction, 2021. №5. P.3-15].
- 4. Hao Du, Xiamin Hu. Flexural Performance of Composite Beams Using High-Strength Steel and High-Strength Concrete / International Journal of Steel Structures. 2021. №. 22 P. 27-41.
- 5. Du, H., Hu, X., Meng, Y., Han, G., Guo, K. Study on composite beams with prefabricated steel bar truss concrete slabs and demountable shear connectors / Engineering Structures. 2020. №. 210 P. 27-41.
- 6. Jun, S. C., Lee, C. H., Han, K. H., & Kim, J. W.. Flexural behavior of high-strength steel hybrid composite beams / Journal of Constructional Steel Research. 2018. № 149. P. 269–281.
- 7. Wang, J., Guo, J., Jia, L., Chen, S., & Dong, Y. Push-out tests of demountable headed stud shear connectors in steel-UHPC composite structures / Composite Structures. 2017. № 170, P. 69–79.
- 8. Yuanlong Yang, Wentao Liang. Qingjie Yang, Yu Cheng. Flexural behavior of web embedded steel-concrete composite beam. Engineering Structures. 2021. Volume 240.
- 9. Yinghui Li, Huanjun Jiang, T.Y.Yang. Damage Deformation of Flexure-Yielding Steel-Reinforced Concrete Coupling Beams: Experimental and Numerical Investigation, Advances in Civil Engineering, 2019.
- 10.M.Rabie, W.Zaki, S.Zaky / Strengthening steel beam with concrete flange / Proc. of Fifth Conference On Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering / ACSM 2018.
- 11.G. Vasdravellis, B.Uy, E.L.Tan, B. Kirkland. Behaviour and design of composite beams subjected to negative bending and compression / Journal of Constructional Steel Research. 2017. Volume 79.

- 12. R. Shamass, K. Cashell. Analysis of stainless steel-concrete composite beams / Journal os Constructional Steel Research. 2018. DOI 10.1016.
- 13.Dmitriev A., Novozhilov Yu., Mikhalyuk D., Lalin V. Calibration and Validation of the Menetrey-Willam Constitutive Model for Concrete / Construction of Unique Buildings and Structures. 2020. Volume 88 Article No 8804.
- 14. Karpenko, N.I., Kolchunov, V.I., Kolchunov, V.I., Travush, V.I. Calculation model of a complex-stressed reinforced concrete element under torsion with bending//International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2021, 17(1). P. 34–47
- 15.Замалиев Ф.С. Численные и натурные эксперименты преднапряженных сталежелезобетонных балок. Вестник МГСУ. 2018. Вып. 3(11). С.309-321. [Zamaliev F.S. Numerical and natural experiments of prestressed steel reinforced concrete beams. Vestnik MGSU. 2018. Iss. 3(11). P. 309-321].
- 16.Mirsayapov Ilshat. Endurance of reinforced concrete beams with small shear spans// © Springer Nature Switzerland AG 2020 B. Anatolijs et al. (eds.), Proceedings of EECE 2019, Lecture Notes in Civil Engineering. P. 763-775.
- 17. Мирсаяпов Ил.Т. Обеспечение безопасности железобетонных балок по наклонному сечению при многократно повторяющихся нагрузках/ Ил.Т. Мирсаяпов// Жилищное строительство. Москва. 2016, №1. С. 23-27. [Mirsayapov II.T. Ensuring the safety of reinforced concrete beams along an inclined section under repeated loads / II.T. Mirsayapov / Housing construction. Moscow. 2016, No. 1. P. 23-27].
- 18.Мирсаяпов Ил.Т. Физические модели усталостного сопротивления железобетонных изгибаемых элементов действию поперечных сил/ Ил.Т.Мирсаяпов// Известия ВУЗов: «Строительство». Новосибирск. 2006, №8. С. 4-13. [Mirsayapov II.T. Physical models of fatigue resistance of reinforced concrete bending elements to the action of transverse forces / II.T. Mirsayapov / / Proceedings of universities: "Construction". Novosibirsk. 2006, No. 8. P. 4-13.].
- 19.Ilshat Mirsayapov and George Apkhadze /Modified trilinear stress-strain diagram of concrete designed for calculation of beams with fiberglass rebar// STCCE-2020 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Kazan, Russia, 2020, 517, Vol. 890, 012079
- 20. Мирсаяпов Ил.Т. Напряженно-деформированное состояние в заделке арматуры при многократно повторяющихся нагрузках/ Ил.Т. Мирсаяпов// Вестник МГСУ. Москва. 2016, №5. С. 28-36. [Mirsayapov II.T. Stress-strain state in the embedment of reinforcement under repeated loads/Vestnik MGSU.2016, №5. P.28-36.
- 21.Мирсаяпов Ил.Т. Предел выносливости анкеровки арматуры/ Ил.Т.Мирсаяпов// Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. Москва. 2016, №1. С. 37. [Mirsayapov II.T. Endurance limit of reinforcement anchoring/ Seysmostoykoe stroitelstvo.Besopasnost soorugeniy/M., 2016,№1. Р.37-42.]

Информация об авторах.

Мирсаяпов Илшат Талгатович, доктор технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: mirsayapovit@mail.ru

Валиев Азат Тагирович, инженер, АО «Казанский Гипронииавиапром» им. Б.И.Тихомирова», г. Казань, Российская Федерация

E-mail: azat.valiev.98@mail.ru

Information about the authors

Mirsayapov Ilshat Talgatovich, doctor of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: mirsayapovit@mail.ru

Valiev Azat Tagirovich, engineer, JS «Kazanski Giproniiaviaprom named B.I Tilhomirova», Kazan, Russian Federation

E-mail: azat.valiev.98@mail.ru