

УДК: 624.012
DOI: 10.52409/20731523_2022_3_56
EDN: FDMELF



Исследование напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных балок с частичной заделкой двутавровых сечений в бетоне

Ильшат Т. Мирсаяпов¹, И.М. Гиматдинов¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Существует множество способов расчета железобетонных и стальных конструкций, но в настоящее время отсутствуют полные нормативные документы для проектирования сталежелезобетонных конструкций для случая, когда стальная двутавровая балка заделана в тело бетона. В связи с этим вопрос изучения работы сталежелезобетонных конструкций весьма актуален в настоящее время. Из-за отсутствия полной нормативной базы по расчету сталежелезобетонных балок с частичным обетонированием двутавровых сечений в бетоне появляется необходимость в модели расчета конструкций численными методами. Целью работы является разработка методики и модели определения разрушения бетона через диаграмму деформирования, с помощью программного комплекса ANSYS. Задачи работы: провести анализ исследований и экспериментов сталежелезобетонных балок с частичной заделкой двутавровых сечений в бетоне и на основе эксперимента предложить способ определения разрушения бетона через диаграмму деформирования в программном комплексе ANSYS. *Результаты.* Представлена модель в программном комплексе ANSYS, описывающая работу сталежелезобетонной балки с частичной заделкой двутаврового сечения в бетоне, позволяющая оценить напряженно-деформированное состояние всего сечения. *Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в том, что предложенная модель в программном комплексе ANSYS позволяет оценить напряженно-деформированное состояние конструкции. Это является существенным вкладом в развитие методики и совершенствование нормативной базы расчетов при проектировании сталежелезобетонных конструкций.

Ключевые слова: сталежелезобетон, сталежелезобетонная балка, ANSYS, численные методы.

Для цитирования: Ильшат Т.Мирсаяпов, И.М.Гиматдинов Исследование напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных балок с частичной заделкой двутавровых сечений в бетоне // Известия КГАСУ 2022 №3(61) с.56-66, DOI:10.52409/20731523_2022_3_56, EDN: FDMELF

Study of the stress-strain state of steel-reinforced concrete beams with partial embedding of I-sections in concrete

Ishat T. Mirsayapov¹, I. M. Gimatdinov¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

Abstract. *Statement of the problem.* There are many ways to calculate reinforced concrete and steel structures, but at present there are no complete regulatory documents for the design of steel-reinforced concrete structures, for the case when a steel I-beam is embedded in a concrete body. In this regard, the issue of studying the work of steel-reinforced concrete structures is

very relevant at the present time. Due to the lack of a complete regulatory framework for the calculation of steel-reinforced concrete beams with partial concreting of I-sections in concrete, there is a need for a model for calculating structures by numerical methods. The aim of the work is to develop a methodology and model for determining the destruction of concrete through the deformation diagram, using the ANSYS software package. Objectives of the work: to analyze the research and experiments of steel-reinforced concrete beams with partial sealing of I-sections in concrete and, based on the experiment, to propose a method for determining the destruction of concrete through a deformation diagram in the ANSYS software package.

Results. A model is presented in the ANSYS software that describes the operation of a steel-reinforced concrete beam with a partial embedment of an I-section in concrete, which makes it possible to evaluate the stress-strain state of the entire section.

Conclusions. The significance of the obtained results for the construction industry lies in the fact that the proposed model in the ANSYS software allows us to evaluate the stress-strain state of the structure. This is a significant contribution to the development of the methodology and improvement of the regulatory framework for calculations in the design of steel-reinforced concrete structures.

Keywords: steel-reinforced concrete, steel-reinforced concrete beam, ANSYS, numerical methods.

For citation: Ilshat T. Mirsayapov, I.M. Gimatdinov Study of the stress-strain state of steel-reinforced concrete beams with partial embedding of I-sections in concrete // News KSUAE, 2022 №3(61), p. 56-66, DOI:10.52409/20731523_2022_3_56, EDN: FDMELF

1. Введение

Изучению сталежелезобетонных конструкций уделяют особое внимание во всем мире, поскольку они имеют ряд преимуществ: благодаря объединению двух совершенно разных материалов обладают свойствами и стали, и железобетона, что позволяет им оптимально работать и в растянутой, и в сжатой зонах [1,2]. Также стоит отметить, что одними из преимуществ сталежелезобетонных конструкций является повышение жесткости и прочности конструкций. В связи с этим становится возможным уменьшение размеров сечения несущих элементов, что приводит к экономии строительных материалов, и как следствие, снижению трудоемкости [1-4].

Для конструкций из сталежелезобетона характерны простота сборки, ремонта и усиления конструкции, а также более высокая пожароустойчивость вследствие защиты стали от местного температурного воздействия железобетоном. Увеличение устойчивости конструкции за счет применения сталежелезобетона позволяет использовать этот материал в сейсмически опасных районах [2-3].

За рубежом сталежелезобетонные конструкции применяются при строительстве промышленных и гражданских зданий, небоскребов. Но в России область применения сталежелезобетонных конструкций весьма ограничена. Их используют при строительстве мостов, трубопроводов, гидроэлектростанций. Одной из причин, препятствующих широкому применению данных конструкций, является отсутствие нормативной базы, учитывающей все узловые соединения таких конструкций [1].

С 1 июля 2017 года действует СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования». Но в указанном своде правил железобетонная плита учитывается лишь как пригруз, для включения плиты в совместную работу используют анкера, что увеличивает материалоемкость стали. В СП 266.1325800.2016 представлены следующие варианты сечений комбинированных балок:

- 1) стальная балка и плита объединены с помощью упоров;
- 2) стальная балка частично обетонирована и объединена с плитой с помощью упоров;
- 3) стальная балка и плита с вутами объединены с помощью упоров;
- 4) стальная балка частично обетонирована, сборные железобетонные плиты опираются на нижний пояс балки через лист;
- 5) опирание плиты по профилированному настилу на стальную балку (промежуточная опора настила);

- 6) опирание плиты по профилированному настилу на частично обетонированную стальную балку (крайняя опора настила);
- 7) полное обетонирование стальной балки;
- 8) опирание железобетонной плиты на нижний пояс балки, упоры на полке балки;
- 9) опирание железобетонной плиты на нижний пояс балки, упоры на стенке балки

Стоит отметить, что в представленных вариантах сталежелезобетонных конструкций стальной элемент либо полностью заделан в тело бетона, либо является отдельным элементом конструкции, которая включается в работу с помощью анкеров. Также необходимо обратить внимание, что не рассматривается сечение, где балка была бы частично заделана в тело бетона. В связи с этим вопрос изучения работы сталежелезобетонных конструкций (когда двутавровая балка частично заделана в тело бетона) весьма актуален в настоящее время.

По сечениям комбинированных балок, которые приводятся в своде правил СП 266.1325800.2016, проводилось много исследований как в России, так и за рубежом. На основании этих экспериментов были представлены модели расчета балок в ПК (программного комплекса) ANSYS [5-9].

Цель работы заключается в разработке методики и модели определения разрушения бетона через диаграмму деформирования, с помощью ПК ANSYS. Задачи исследования:

1. провести анализ исследований и экспериментов сталежелезобетонных балок с частичной заделкой двутавровых сечений в бетоне
2. на основе эксперимента предложить способ определения разрушения бетона через диаграмму деформирования в программном комплексе ANSYS.

2. Материалы и методы

M.Rabie, W.Zaki и S.Zaky [10] рассматривали усиление стальной двутавровой балки. В данной статье была рассмотрена несущая способность 15 образцов (разные по вылету балки, высоте балки, высоте заделки двутавра в тело бетона, а также отдельно двутавр). Все геометрические характеристики, а также сечения образцов представлены в таблице 1 [10].

Таблица 1

Геометрические характеристики образцов [10]

Образец №1	Сталь 1 - балка без бетонной плиты			
Группа №1 (5 экспериментов)	№ эксперимента	Ts (sm)	B (sm)	A
	GB1.1	8	30	(1/3) Ts
	GB1.2	8	30	(2/3) Ts
	GB1.3	8	30	(1/2) Ts
	GB1.4	8	50	(1/2) Ts
	GB1.5	8	30	плита оперта
Группа №2 (5 экспериментов)	GB2.1	10	30	(1/3) Ts
	GB2.2	10	30	(2/3) Ts
	GB2.3	10	30	(1/2) Ts
	GB2.4	10	50	(1/2) Ts
	GB2.5	10	30	плита оперта
Группа №3 (4 эксперимента)	GB3.1	12	30	(2/3) Ts
	GB3.2	12	30	(1/2) Ts
	GB3.3	12	50	(1/2) Ts
	GB3.4	12	30	плита оперта

Образцы испытывали под действием сосредоточенной нагрузки. Все балки опирались на две крайние опоры, чтобы представить случай свободно опертых балок, а

нагрузки прикладывались гидравлическим домкратом, нагрузка увеличивалась на шаг, равный 0,5 т. [10].

На основании проведенных испытаний получены следующие величины разрушающих нагрузок (таблица 2) [10].

Таблица 2

Результаты проведенного испытания[10]

Образец	Разрушающая нагрузка (тонн)
GB1.1	6,3
GB1.2	7,4
GB1.3	7
GB1.4	7,7
GB1.5	8
GB2.1	6,7
GB2.2	8
GB2.3	7,3
GB2.4	8,5
GB2.5	8,9
GB3.1	8,3
GB3.2	8
GB3.3	10,5
GB3.4	10,2

В связи с вышеизложенным, смоделируем образец GB2.3 в ПК ANSYS и сравним полученные результаты эксперимента и численного моделирования.

Все исходные данные (материалы, геометрические характеристики) принимаются исходя из применяемых материалов в эксперименте.

Для расчета в ПК ANSYS заданы следующие материалы:

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	2300	kg m ⁻³
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson...	
8	Young's Modulus	38000	MPa
9	Poisson's Ratio	0,18	
10	Bulk Modulus	1,9792E+10	Pa
11	Shear Modulus	1,6102E+10	Pa
12	Multilinear Isotropic Hardening	Tabular	
15	Tensile Yield Strength	0	Pa
16	Compressive Yield Strength	0	Pa
17	Tensile Ultimate Strength	1,15	MPa
18	Compressive Ultimate Strength	17	MPa

a)

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	7850	kg m ⁻³
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson...	
8	Young's Modulus	2E+11	Pa
9	Poisson's Ratio	0,3	
10	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa
11	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa
12	Strain-Life Parameters		
20	S-N Curve	Tabular	
24	Tensile Yield Strength	435	MPa
25	Compressive Yield Strength	435	MPa
26	Tensile Ultimate Strength	500	MPa
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa

б)

1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	7850	kg m ⁻³
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...	
6	Young's Modulus	2,06E+05	MPa
7	Poisson's Ratio	0,3	
8	Bulk Modulus	1,7167E+11	Pa
9	Shear Modulus	7,9231E+10	Pa
10	Bilinear Isotropic Hardening		
11	Yield Strength	345	MPa
12	Tangent Modulus	615	MPa

в)

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	7850	kg m ⁻³
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson...	
8	Young's Modulus	2,08E+05	MPa
9	Poisson's Ratio	0,3	
10	Bulk Modulus	1,7333E+11	Pa
11	Shear Modulus	8E+10	Pa
12	Strain-Life Parameters		
20	S-N Curve	Tabular	
24	Tensile Yield Strength	295	MPa
25	Compressive Yield Strength	295	MPa
26	Tensile Ultimate Strength	415	MPa
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa

г)

Рис. 1. а) характеристики бетона В30, б) характеристики арматуры А500, в) характеристики стали С345 (по билинейной диаграмме) для двутавра, г) характеристики стали С345-15XCHD для пластины и опор (принято условно)

Fig. 1. a) characteristics of concrete B30, b) characteristics of reinforcement A500, c) characteristics of steel C345 (according to a bilinear diagram) for an I-beam, d) characteristics of steel C345-15XCHD for a plate and supports (accepted conditionally)

На рисунке 2 представлена собранная геометрия модели. Снизу двутавра на двух концах созданы цилиндрические формы, с помощью которых моделируются опоры (связь между двутавром и опорой задается – Noseparation, данная связь подразумевает недопущение разделения контактных поверхностей, однако допускает небольшое относительное скольжение между ними с нулевым трением). На верхней части моделируется пластина, которая подразумевает опорную часть гидравлического домкрата. С помощью этой пластины передается нагрузка на конструкцию (контакт между пластиной и домкратом задается с помощью коэффициента силы трения 0,01).

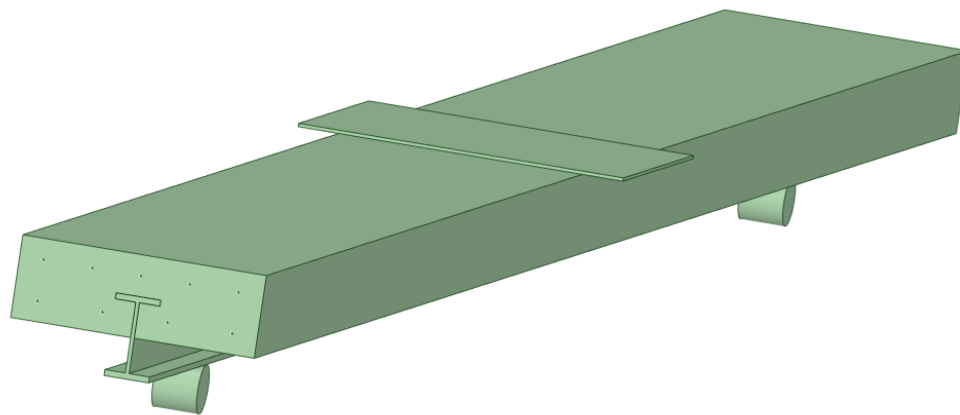


Рис. 2. Модель GB2.3 в ПК ANSYS
Fig. 2. Model GB2.3 in ANSYS PC

Пренебрежем тем, что арматура должна быть полностью защищена защитным слоем, на точности расчета это не сказывается. Контакт между бетоном и двутавром зададим как Bonded, т.е. тела накрепко сцеплены друг с другом.

Цилиндрические опоры закрепим во всех направлениях (Fixedsupport), силу будем прикладывать на пластину (Force), также необходимо учитывать силу гравитации (StandardEarthGravity).

Арматуру будем учитывать с помощью использования элементов reinf264. Бетон при задании диаграммы деформирования в ПК ANSYS будет учитываться только как сжатый элемент.

Методика расчета заключается в том, чтобы на основании диаграммы деформирования бетона определить при какой силе разрушится бетон. На рисунке 3 представлена диаграмма деформирования бетона B30 в сжатой зоне.

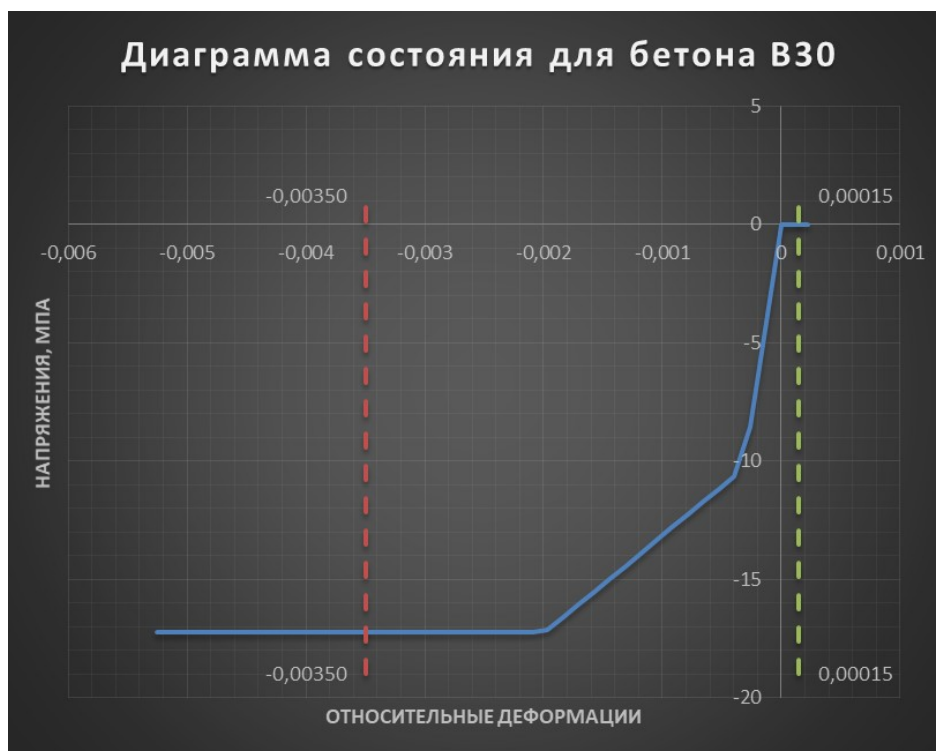


Рис. 3. Диаграмма деформирования бетона В30

Fig. 3. Diagram of deformation of concrete B30

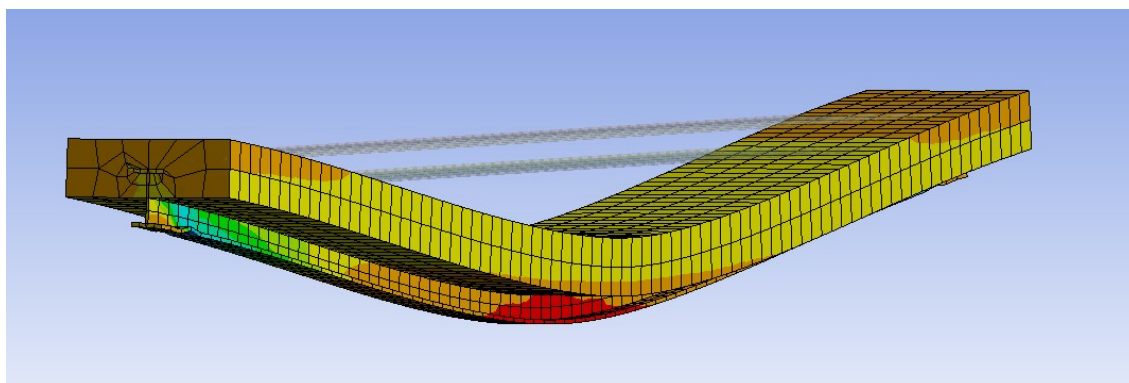
На основании данной диаграммы можно сделать вывод о том, что при достижении относительных деформаций больше 0,0035 бетон разрушается. На основании данной диаграммы необходимо определить, при какой нагрузке бетон разрушится.

3. Результаты и обсуждение

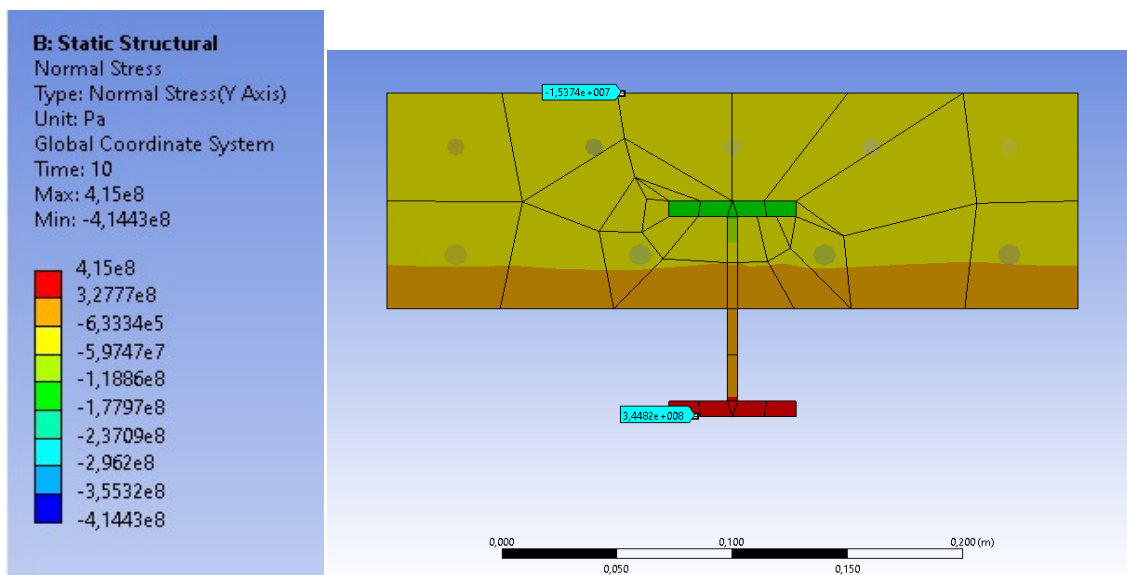
Для анализа полученных результатов необходимо определить относительные деформации (EquivalentTotalStrain), а также нормальные напряжения (NormalStress). Для получения корректных результатов необходимо создать сечение в центре балки (SectionPlane). Помимо основной системы координат (GlobalCoordinateSystem) понадобятся и местные системы координат (CoordinateSystem).

Задаем пошаговую нагрузку до 80000 Н.

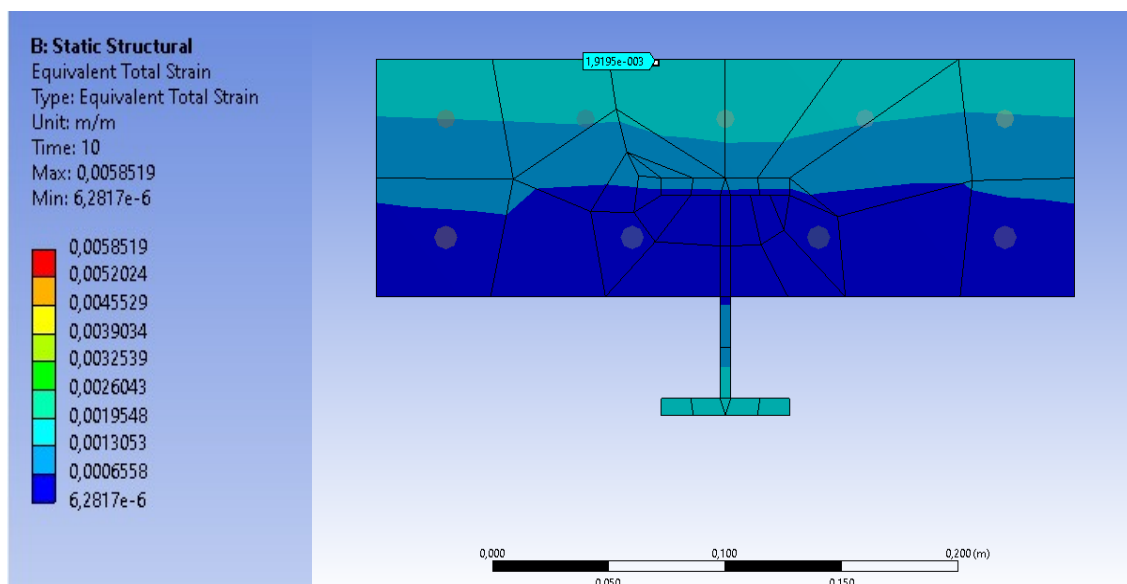
Для более удобного отображения результатов скроем пластину и опоры. На рисунке 4.а. представлена общая картина прогибов (масштаб прогибов выбран пятикратным для лучшей восприимчивости), а также показано распределение нормальных напряжений по всей длине балки.



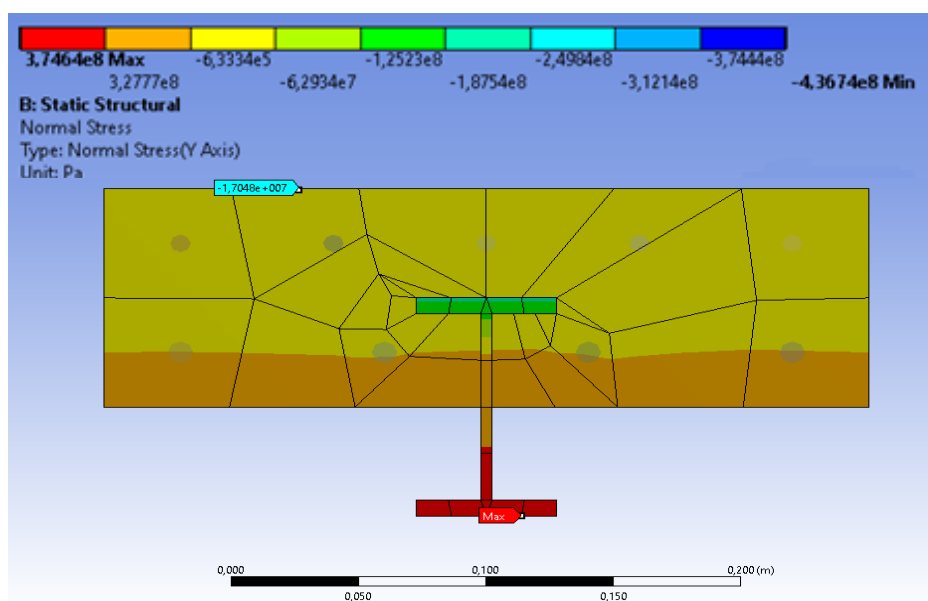
а)



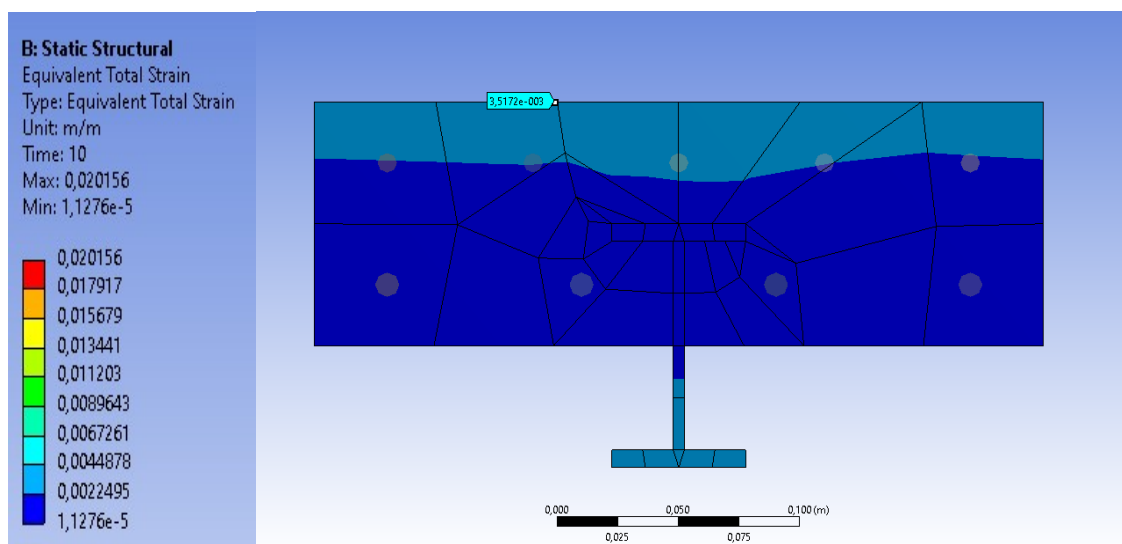
б)



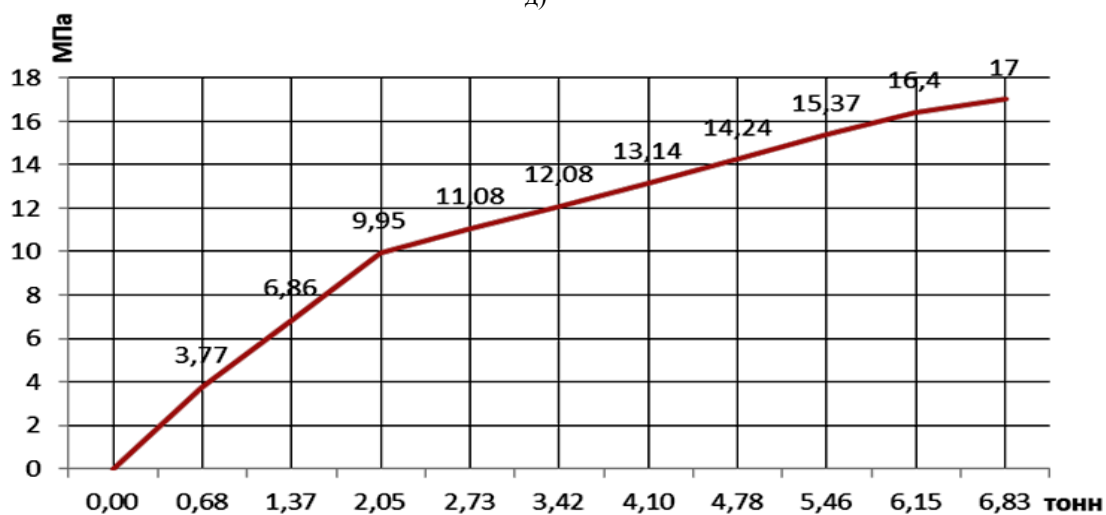
в)



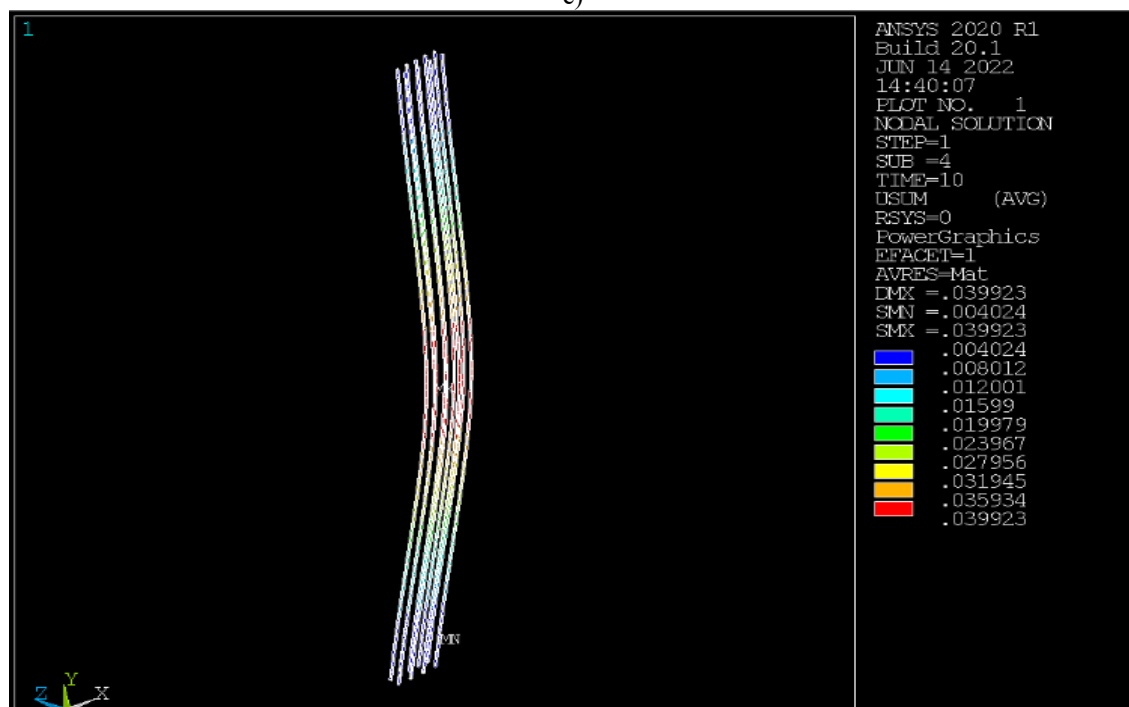
г)



д)



е)



ж)

Рис. 4. а) нормальные напряжения в исследуемой балке, б) нормальные напряжения в сечении балки при $P=5,47$ т., в) относительные деформации в сечении балки при $P=5,47$ т., г) нормальные напряжения в сечении балки при $P=6,83$ т., д) относительные деформации в сечении балки при $P=6,83$ т., е) график изменения нормальных напряжений, ж) перемещения арматуры в теле балки при $P=6,83$ т.

Fig. 4. a) normal stresses in the beam under study, b) normal stresses in the beam section at $P=5.47$ t., c) relative deformations in the beam section at $P=5.47$ t., d) normal stresses in the beam section at $P=6.83$ t., e) relative deformations in the beam section at $P=6.83$ t., f) graph of normal stresses, g) reinforcement displacements in the beam body at $P=6.83$ t..

Из полученных результатов видно, что при нагрузке 6,83 т происходит разрушение бетона, поскольку при этой нагрузке бетон достигает максимально допустимые напряжения. Стоит отметить, что максимальные напряжения смещены из-за сцепления пластины домкрата и бетона с помощью коэффициента трения. Резкий скачок нормальных напряжений при стыке материалов бетона на двутавр обусловлен тем, что они имеют разный модуль упругости, а также отсутствием (незначительным) сцепления между бетоном и верхним поясом стальной балки.

Стоит отметить, что при разрушающей нагрузке у стального двутавра нижняя часть сечения полностью нагружена. Но разрушение происходит по бетону, т.к. сталь является более пластичным материалом, из-за своей площадки текучести.

Если рассматривать напряжения при нагрузке 80% от разрушающей нагрузки, можно отметить, что нижняя часть двутавра используется полностью, а относительные деформации в бетоне при той же самой нагрузке уже близки к пределу пропорциональности диаграммы работы бетона.

Разница в полученных результатах составляет 6,4% (между экспериментом (7,3т) и численным моделированием (6,83т.), что является приемлемым результатом.

4. Заключение

1. На основе проведенного эксперимента представлена модель расчета в ПК Ansys, которая позволяет моделировать и прогнозировать разрушение сталежелезобетонных балок с частичной заделкой двутавровых сечений в бетоне.
2. Представлен способ определения разрушения бетона через диаграмму деформирования.

Список литературы/References

1. Кибириева Ю.А., Астафьева Н.С. Применение конструкций из сталежелезобетона. *Ekologiya and Stroitelstvo*. 2018. Номер 2, С. 27-34. DOI: 10.24411/2413-8452-2018-10004. [Kibirieva Yu.A., Astafieva N.S. The use of steel-reinforced concrete structures. *Ecology and construction*. 2018. Number 2, pp. 27-34. DOI: 10.24411/2413-8452-2018-10004.]
2. Теплова Ж.С., Виноградова Н.А. Прочность сталежелезобетонных образцов при центральном сжатии. *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2015. Номер 5 (32), С. 29-38. [Teplova Zh.S., Vinogradova N.A. Strength of steel-reinforced concrete specimens under central compression. *Construction of buildings and structures*. 2015. Number 5 (32), pp. 29-38.]
3. Бабалич В.С., Андросов Е.Н. Сталежелезобетонные конструкции и перспектива их применения в строительной практике России. *Успехи современной науки*. 2017. Номер 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. *Successes of modern science*. 2017. Number 4, pp. 205-208.]
4. Настоящий В.А., Дариенко В.В. История возникновения и практика применения сталежелезобетонных конструкций для объектов дорожного и гражданского строительства. *Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе*. 2014. Номер 1, С. 467-470. [Real V.A., Darienko V.V. The history of the emergence and use of steel-reinforced concrete structures for the construction of road and nearby construction. *Modernization and scientific research in the transport complex*. 2014. Number 1, pp. 467-470.]

5. YuanlongYang, WentaoLiang, QingjieYang, Yu Cheng. Flexural behavior of web embedded steel-concrete composite beam. *Engineering Structures*. 2021. Volume 240.
6. 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.
7. Du, Y.; Zhang, X.; Liu, L.; Zhou, F.; Zhu, D.; Pan, W. Flexural Behaviour of Carbon Textile-Reinforced Concrete with Prestress and Steel Fibres. *Polymers* 2018, 10, 98. <https://doi.org/10.3390/polym10010098>
8. Замалиев Ф.С. Численные и натурные эксперименты преднапряженных сталежелезобетонных балок. *ВестникМГСУ*. 2018. Вып. 3(11). С.309-321. [Zamaliyev F.S. Numerical and natural experiments of prestressed steel-reinforced concrete beams. *Bulletin of MGSU*. 2018. Issue. 3(11). pp.309-321.]
9. Isaac Montava, Ramon Irlas, Jorge Segura, Jose Maria Gadea and Ernesto Juliá. Numerical Simulation of Steel Reinforced Concrete (SRC) Joints, 2019.
10. M.Rabie, W.Zaki and S.Zaky. STRENGTHENING STEEL I-BEAM WITH CONCRETE FLANGE. Strengthening steel I-beam with concrete flange. *Proc. of Fifth International Conference On Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering -ACSM 2016*, 4-8 DOI: 10.15224/978-1-63248-105-4-21.
11. C. J. Motter, D. C. Fields, J. D. Hooper et al., "Steel-reinforced concrete coupling beams. I: testing," *Journal of Structural Engineering*, vol. 143, no. 3, article 04016191, 2016. DOI:10.1155/2019/7071243
12. Замалиев Ф.С., Тамразян А.Г. К расчету сталежелезобетонных ребристых плит для восстанавливаемых перекрытий. *Строительство и реконструкция*. 2021;(5):3-15. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-97-5-3-15
13. Dmitriev, A., Novozhilov, Yu., Mikhalyuk, D., Lalin, V., Calibration and Validation of the Menetrey-Willam Constitutive Model for Concrete; 2020; *Construction of Unique Buildings and Structures*; Volume 88 Article No 8804. DOI:10.18720/CUBS.88.4
14. Pisano, A.A., Fuschi, P., De Domenico, D. Limit state evaluation of steel-reinforced concrete elements by von mises and Meñetrey-Willam-type yield criteria. *International Journal of Applied Mechanics*. 2014. 6(5). Pp. 1450058. DOI:10.1142/S1758825114500586
15. Pisano, A.A., Fuschi, P., De Domenico, D. Peak loads and failure modes of steel-reinforced concrete beams: Predictions by limit analysis. *Engineering Structures*. 2013. 56. Pp. 477–488. DOI:10.1016/j.engstruct.2013.05.030.

Информация об авторах

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

E-mail: mirsayapovit@mail.ru

Ильнур Мансурович Гиматдинов, магистр КГАСУ по направлению Проектирование железобетонных и каменных конструкций, реконструкция и техническая эксплуатация зданий и сооружений, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: akkfok@mail.ru

Information about the authors

Ilshat Talgatovich Mirsayapov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: mirsayapovit@mail.ru

Ilnur Mansurovich Gimatdinov, master of KSUAE in the direction of Design of reinforced concrete and stone structures, reconstruction and technical operation of buildings and structures, Kazan, Russian Federation

E-mail: akkfok@mail.ru