

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ РАСЧЕТОВ СТАЛЬНЫХ БАЛОК ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

КРЫЛОВ А.С.

АО "НИЦ "Строительство", ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, г. Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрены вопросы численных расчетов конструкций на изгиб. Дано обоснование выбранной темы исследования. Выполнены численные расчеты стальных двутавровых балок с последующей экспериментальной проверкой полученных результатов. Расчеты выполнены в физически нелинейной постановке с учетом фактической диаграммы деформирования материала. Рассмотрены различные условия опирания моделей, в том числе, с учетом сил трения. Проведены испытания стальных балок на чистый изгиб. Дано описание моделей, характеристика испытательной установки, опорных и нагрузочных приспособлений. Выполнен анализ результатов эксперимента и их сравнение с расчетными данными. Приведены графики деформирования моделей под нагрузкой при различных граничных условиях, полученные по результатам экспериментальных и численных исследований. Дана оценка точности разрушающих нагрузок и вертикальных перемещений, полученных расчетным путем, по отношению к экспериментальным данным.

Ключевые слова: сталь, балка, опоры, численные расчеты.

EXPERIMENTAL ASSESSMENT NUMERICAL SIMULATION OF STEEL BEAMS WITH DIFFERENT BOUNDARY CONDITIONS

KRYLOV A. S.

Research Center of Construction TSNIISK named after V.A. Koucherenko, Moscow, Russia

Abstracts. The problems of numerical calculations of structures for bending are considered. The substantiation of the selected theme of research is given. The numerical calculations of steel I-beams with the subsequent experimental verification of the results are performed. The calculations were carried out in a physically nonlinear formulation, taking into account the actual material deformation diagram. Various conditions for supporting models are considered, including taking into account friction forces. Pure bend models of steel beams were tested. A description of the models, the characteristics of the test equipment, support and load devices performed. The analysis of the results of bending tests of models and comparison with the calculated data is done. The graphs of deformation of models under load with different boundary conditions, obtained from the results of experimental and numerical studies, are given. An estimate of the accuracy of ultimate loads and vertical displacements, obtained by calculation, with respect to experimental data is given.

Keywords: steel, beam, support, numerical simulation.

Введение

В инженерной практике последних лет широкое применение находят численные расчеты с детальным учетом нелинейных физико-механических характеристик материалов. Несмотря на многообразие возможностей программно-вычислительных комплексов [1, 2, 3, 4], полученные расчетные результаты нуждаются в тщательном анализе и, что наиболее предпочтительно, в экспериментальной проверке [5-10]. Поскольку, довольно часто результаты таких расчётов существенно отличаются от соответствующих величин, полученных по нормативным методикам и в ходе натурных испытаний. Остановимся более детально на экспериментальных исследованиях балок на чистый изгиб (рисунок 1) при различных граничных условиях с последующей проверкой и сравнением с результатами численных расчетов.

Достаточно подробно методика испытаний на чистый изгиб описана для железобетонных балок, которые следует выполнять с учетом требований ГОСТ 8829-94 «Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости» [11], где помимо прочих требований к проведению экспериментов обозначены условия опирания: модели «следует опирать при испытаниях на две шарнирные линейные опоры, расположенные по концам изделия, одна из которых должна быть неподвижной, а другая - подвижной, допускающей перемещение изделия вдоль пролета». Для стальных конструкций соответствующий ГОСТ на испытания балок отсутствует.

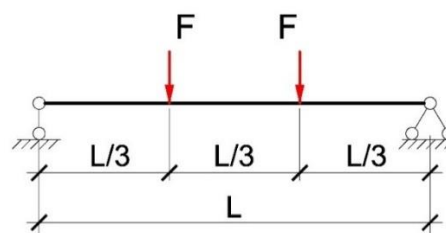


Рисунок 1 – Схема испытаний балки на чистый изгиб

В рамках настоящей работы рассмотрено влияние на результаты эксперимента изменение граничных условий. Выполнено сравнение двух вариантов опирания балок:

- в соответствии с требованиями ГОСТ 8829-94 – опирание на две линейные опоры, одна опора являлась шарнирно-неподвижной, другая – шарнирно-подвижной;
- с отклонением от требований ГОСТ 8829-94 – опирание на две линейные опоры, обе опоры являлись шарнирно-неподвижными.

Рассматриваемые опоры – каткового типа. Шарнирно-неподвижная опора приведена на рисунке 2, подвижная – на рисунке 3.



Рисунок 2 – Шарнирно-неподвижная опора



Рисунок 3 – Шарнирно-подвижная опора

Описание эксперимента

Всего было испытано 4 модели стальных балок – по 2 шт. для каждого вида граничных условий. Все модели выполнены одинаковыми из прокатного двутавра №20Б1 по ГОСТ 8239-89. В местах опирания и приложения нагрузок выполнено дополнительное усиление моделей стальными пластинами (рисунок 4). Материал моделей – сталь С255 по ГОСТ 27772-2015.

Для определения фактических характеристик материала балок были выполнены дополнительные испытания образцов стали по ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» [12]. Результаты испытаний приведены в таблице 1. Из таблицы 1 видно, что фактические характеристики стали превышают соответствующие нормируемые в ГОСТ 27772-2015 значения на величину 40-50 МПа.

Испытания моделей стальных балок выполнены на прессе MAN500 (рисунок 5) на испытательной базе ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко.

Нагрузка прикладывалась к моделям ступенями – не более 10% от контрольной нагрузки по прочности. Установка и выверка траверсы для передачи нагрузки, а также самих моделей, выполнена относительно заранее нанесенных на поверхность металла рисок.

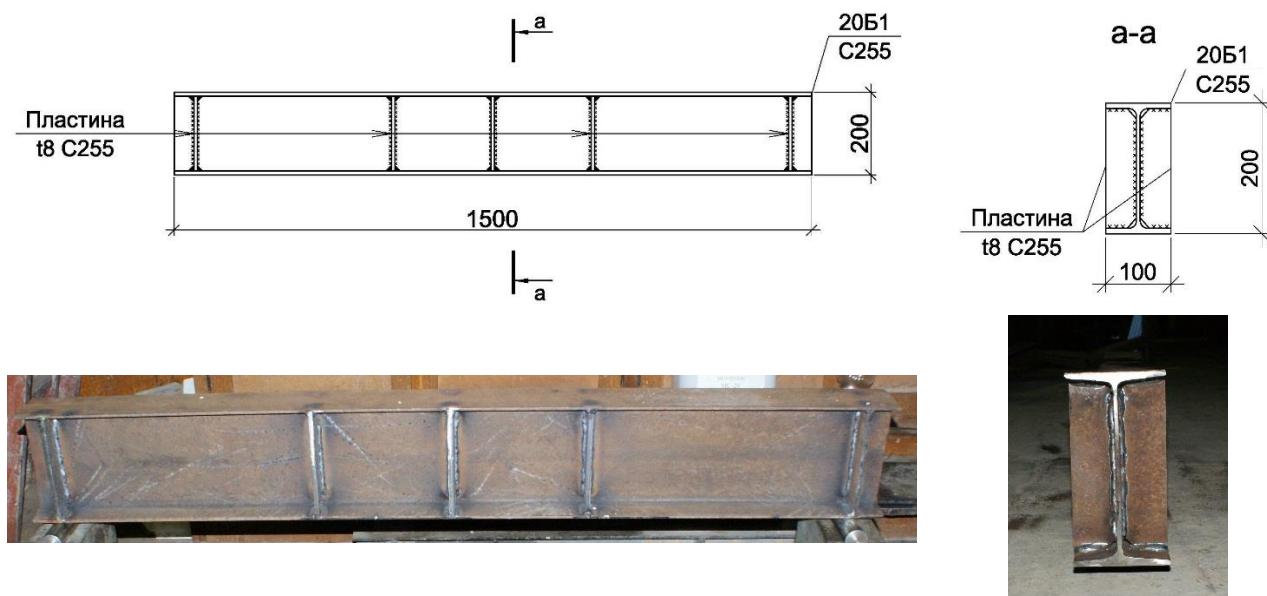


Рисунок 4 – Общий вид моделей

Таблица 1 – Результаты определения фактических характеристик стали

№ образца	Характеристика образца	Толщина, мм	Ширина, мм	Напряжение, МПа	
				Предел текучести	Предел прочности
1	из стенки двутавра	5.65	20.3	318.8	414.0
2		5.75	20.3	282.5	393.4
3	из полки двутавра	7.7	30	318.8	433.6
4		7.75	30.25	297.2	431.6

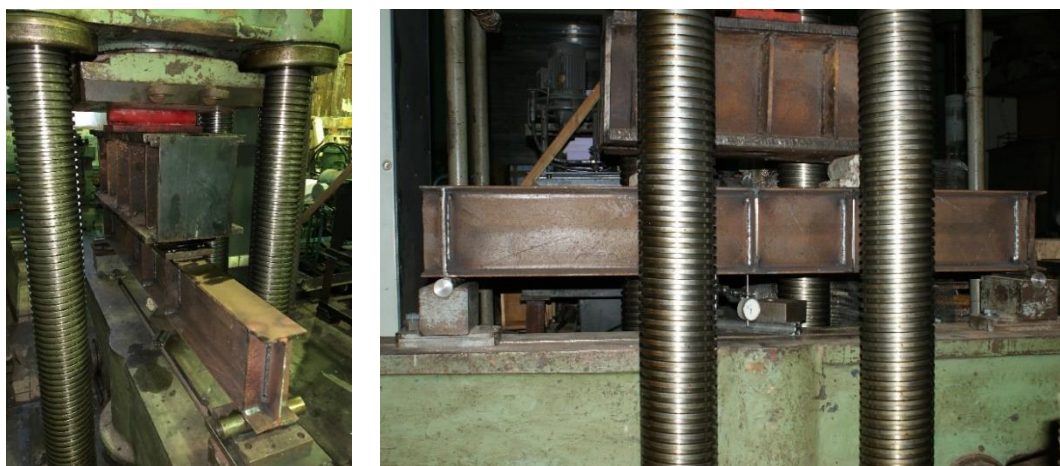


Рисунок 5 – Общий вид испытательной установки

В процессе испытаний на каждом шаге выполнялась фиксация вертикальных перемещений в середине пролета посредством индикатора часового типа с ценой деления 1/100 мм. Кроме того, фиксировались значения вертикальной нагрузки.

Численные расчеты

Перед проведением экспериментов были выполнены численные расчеты балок в программном комплексе Femap with NX Nastran. Общий вид расчетной схемы приведен на рисунке 6.

Схема разработана с применением пластинчатых конечных элементов. Рассмотрены различные граничные условия опирания моделей для отражения действительной работы балок в соответствии со схемами испытаний. Рассмотрены следующие случаи шарнирных линейных опор:

1. обе опоры неподвижные,
2. одна – подвижная, другая – неподвижная,
3. одна – неподвижная, другая – подвижная, с учетом силы трения между опорной поверхностью балки и стальным катком опоры. Трение смоделировано в соответствии с рекомендациями СП 16.13330 «Стальные конструкции» [13] - посредством введения коэффициента трения, равного 0,3. Соответствующая горизонтальная нагрузка (0,3 от вертикальной составляющей реакции опоры) была приложена в месте шарнирно-подвижного опирания модели.

Помимо опор по краям балки были введены раскрепления из плоскости изгиба в местах установки траверсы для передачи нагрузок в средней трети пролета (обоснование дополнительно введенных граничных условий получено в результате экспериментов – в момент потери несущей способности модели оставались в плоскости действия нагрузки, наблюдались лишь незначительные смещения из плоскости). Расчеты выполнены в физически нелинейной постановке с учетом фактической диаграммы деформирования материала. Численная модель и полученные результаты позволяют детально оценить напряженно-деформированное состояние моделей, а также провести сопоставление с данными экспериментов и оценить точность нелинейных расчётов с использованием выбранной программы. Некоторые результаты расчетов приведены на рисунках 7, 8.

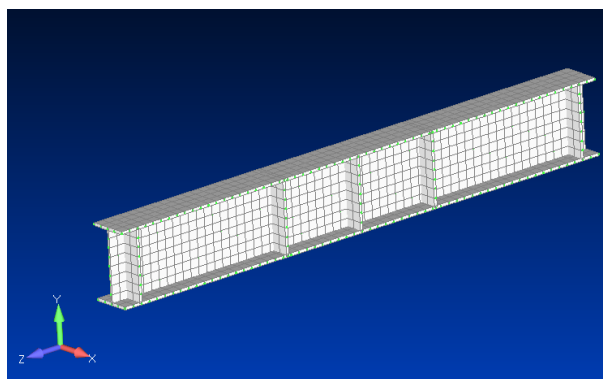


Рисунок 6 – Общий вид расчетной схемы

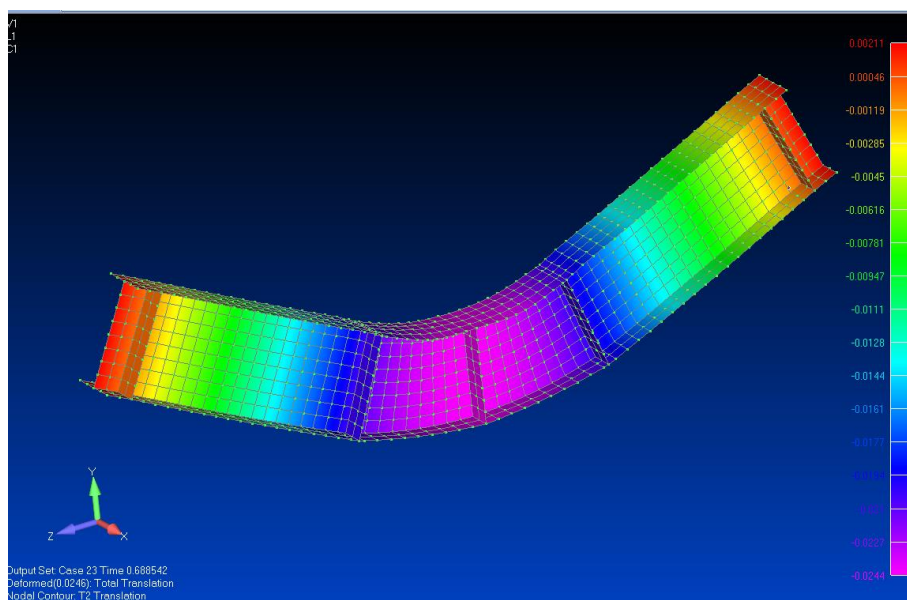


Рисунок 7 – Вертикальные перемещения модели с шарнирными линейными опорами (одна – подвижная, другая – неподвижная) в момент, близкий к разрушению, м

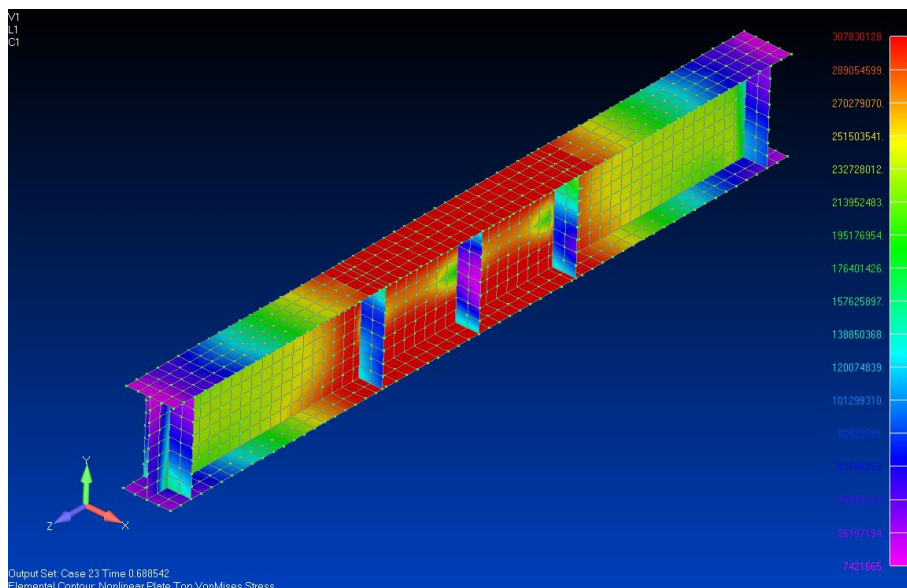


Рисунок 8 – Напряжения в модели с шарнирными линейными опорами (одна – подвижная, другая – неподвижная) в момент, близкий к разрушению, Н/м²

В результате расчетов определены нагрузки, соответствующие потере несущей способности конструкции, а также построены графики вертикальных перемещений. Сравнение полученных данных с экспериментальными результатами приведено на рисунке 9 и в таблице 2.

Результаты эксперимента

Предельные нагрузки для модели (усредненные для группы), зафиксированные во время экспериментов и соответствующие величины, полученные расчетным путем приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Предельные нагрузки для модели

Вариант граничных условий	Экспериментальная модель	Опоры	Предельные нагрузки, кН		Отклонение, %
			Эксперимент	Femap with NX Nastran	
1	1, 2	подвижная + неподвижная	304,1	276,3	10,0
2		подвижная с трением + неподвижная		282,0	7,8
3	3, 4	неподвижная + неподвижная	304,1	305,8	0,5

Анализ данных, приведенных в таблице 2, показывает, что усредненная величина экспериментальной нагрузки, соответствующей потере несущей способности оказалась чрезвычайно близкой для всех моделей, вне зависимости от условий опирания. Это несколько отличается от результатов численных расчетов, где разница (для случая одной подвижной с трением, другой неподвижной опоры, в соответствии с условиями эксперимента) достигает 7,8%. В целом, даже при наличии отмеченной погрешности результаты таблицы 2 имеют довольно хорошее совпадение. Более высокие значения предельных нагрузок, зафиксированные в ходе экспериментов, получены, вероятно, в результате более сложной работы материала (многоосное напряженное состояние) в конструкции, по сравнению с испытаниями на одноосное растяжение, по результатам которого были приняты характеристики стали для численных расчетов. Совпадение опытных разрушающих нагрузок для балок с разными услови-

ями опирания, связано с точностью задания нагрузки. Для балок, разрушение которых происходит пластично, при ручном управлении усилием пресса, величина разрушающей нагрузки была оценена с точностью до одного этапа нагружения (на последних этапах это составляло 10 кН).

Другой важный фактор (помимо предельных нагрузок), требующий оценки – вертикальные перемещения моделей. Усредненные экспериментальные результаты и расчетные данные по вертикальным перемещениям приведены на рисунке 9.

Из рисунка 9 видно, что графики вертикальных перемещений для различных вариантов граничных условий располагаются довольно кучно, за исключением кривой, отражающей случай абсолютно неподвижных опор, полученной по результатам численных расчетов. Это достигнуто по причине идеальных условий закрепления в расчетной модели, что на практике не было реализовано. Поэтому экспериментальный случай неподвижных опор гораздо лучше описывается кривой, полученной с учетом сил трения в программном комплексе. Отмечено хорошее совпадение с экспериментальными данными с расхождением, не превышающим 8%. Расчеты для варианта граничных условий в виде шарнирно-подвижной и неподвижной опор показали максимальную разницу вертикальных перемещений в 15%.

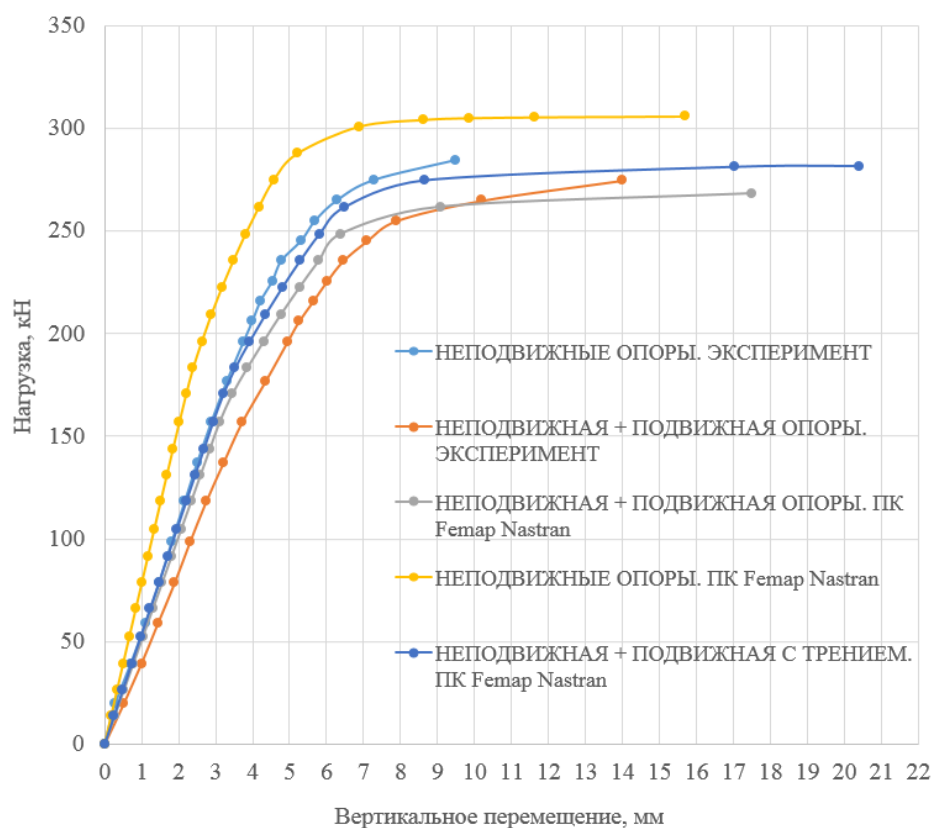


Рисунок 9 – Диаграммы зависимости нагрузки от вертикальных перемещений для различных условий опирания

Вертикальные перемещения балок с одной неподвижной опорой, второй – подвижной больше, чем с двумя неподвижными (или одной опорой – неподвижной, второй – с учетом сил трения), что согласуется с правилами строительной механики.

Выводы

1. Для оценки точности выполнения численных расчетов вплоть до разрушения конструкции, проведены испытания моделей стальных двутавровых балок с различными граничными условиями.

2. Экспериментально полученные нагрузки, соответствующие предельной несущей способности, для всех вариантов опирания балок являются крайне близкими.

Большую роль имеет проскальзывание опорной зоны балок по шарнирно-неподвижным опорам, что приводит к изменению работы конструкции за счет корректировки условий опирания. Таким образом, для рассмотренных случаев подвижность опор на несущей способности балок существенно не сказалась.

3. Оценка экспериментальных данных по вертикальным перемещениям показала некоторые отличия для различных граничных условий:

- экспериментальный случай неподвижных опор хорошо описывается кривой, полученной с учетом сил трения в программном комплексе. Отмечено хорошее совпадение с экспериментальными данными с расхождением, не превышающим 8%.
- экспериментальные данные для варианта граничных условий в виде шарнирно-подвижной и неподвижной опор имеют максимальное расхождение с расчетами в 15%.

Вертикальные перемещения при одной подвижной, другой-неподвижной опорах больше, чем с двумя неподвижными, что согласуется с правилами строительной механики.

4. Численные расчеты имеют довольно хорошее совпадение с результатами эксперимента в величинах предельных нагрузок на модели.

Наиболее точно передает особенности работы балки в случае опирания на две шарнирно-неподвижные опоры расчётная модель, учитывающая возникающие силы трения между опорной поверхностью балки и катком. При этом расхождение с экспериментальными данными не превышает 8%.

Расчеты для варианта граничных условий в виде шарнирно-подвижной и неподвижной опор показали максимальную разницу с экспериментальными величинами вертикальных перемещений в 15%.

5. Приведенные выше данные по сравнению численных расчетов с результатами эксперимента дают возможность оценить точность расчетов и качество настройки параметров модели. Данные о перемещениях и о разрушающих нагрузках, полученные расчётным путём оцениваются как достоверные

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Femap Users Guide (Examples): <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/products/simcenter/femap.html>
2. Шимкович Д.Г. Femap & Nastran. Инженерный анализ методом конечных. М.: ДМК Пресс, 2012. 700 с.
3. Рычков С.П. Моделирование конструкций в среде MSC.visual NASTRAN для Windows. М.: НТ Пресс, 2004. 552 с.
4. Данилов Ю.В., Артамонов И.А. Практическое использование NX. М.: ДМК Пресс, 2011. 332 с.
5. Травуш В.И., Конин Д.В., Рожкова Л.С., Крылов А.С., Каприелов С.С., Чилин И.А., Мартиросян А.С., Фимкин А.И. Экспериментальные исследования сталежелезобетонных конструкций, работающих на внецентренное сжатие // Academia. Архитектура и строительство. 2016. №3. С. 127-135.
6. Травуш В.И., Конин Д.В., Крылов А.С., Каприелов С.С., Чилин И.А. Экспериментальные исследования сталежелезобетонных конструкций, работающих на изгиб // Строительство и реконструкция. 2017. №4 (72). С. 63-71.
7. Travush V. I., Konin D. V., Krylov A. S. Strength of composite steel and concrete beams of high-performance concrete // Magazine of Civil Engineering. 2018. №3 (79). Pp. 36-44.
8. Travush V. I., Konin D. V., Krylov A. S. Strength of reinforced concrete beams of high-performance concrete and fiber reinforced concrete // Magazine of Civil Engineering. 2018. № 1 (77). Pp. 90-100.
9. Травуш В.И., Каприелов С.С., Конин Д.В., Крылов А.С., Кашеварова Г.Г., Чилин И.А. Определение несущей способности на сдвиг контактной поверхности «сталь-бетон» в сталежелезобетонных конструкциях для бетонов различной прочности на сжатие и фибробетона // Строительство и реконструкция. 2016. №4 (66). С. 45-55.

10. Конин Д.В., Олуромби А.Р. Анализ устойчивости прямошовных и спиральношовных труб из высокопрочных сталей при центральном и внецентренном сжатии на примере натуральных экспериментов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2018. №6 (714). С. 106-116.
11. ГОСТ 8829-94 Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости. М., 1994.
12. ГОСТ 1497-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение. М., 1984.
13. СП 16.13330.2011 Стальные конструкции. М., 2011.

REFERENCES

1. Femap Users Guide (Examples):
<https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/products/simcenter/femap.html>
2. Shimkovich D.G. Femap & Nastran. Engineering Finite Element Analysis. Moscow: DMK Press, 2012. 700 p.
3. Rychkov S.P. Modeling of structures in the environment MSC.visual NASTRAN for Windows. Moscow: NT Press, 2004. 552 p.
4. Danilov Yu.V., Artamonov I.A. Practical use NX. Moscow: DMK Press, 2011. 332 p.
5. Travush V. I., Konin D. V., Rozhkova L. S., Krylov A. S., Kaprielov S. S., Chilin I. A., Martirosyan A.S., Fimkin A. I. Experimental study of composite structures, working for eccentric compression. *Academia. Architecture and Construction*. 2016. No 3. Pp. 127-135.
6. Travush V. I., Konin D.V., Krylov A.S., Kaprielov S.S., Chilin I.A. Experimental study of composite structures for bending elements. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2017. No 4 (72). Pp. 63-71.
7. Travush V. I., Konin D. V., Krylov A. S. Strength of composite steel and concrete beams of high-performance concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No 3 (79). Pp. 36-44.
8. Travush V. I., Konin D. V., Krylov A. S. Strength of reinforced concrete beams of high-performance concrete and fiber reinforced concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No 1 (77). Pp. 90-100.
9. Travush V. I., Kaprielov S. S., Konin, D. V., Krylov A. S., Kashevarova G.G., Chilin I.A. Determination of bearing capacity for shear of the contact surface "steel-concrete" in composite steel and concrete structures for concrete of different compressive strength and fiber-reinforced concrete. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2016. No 4 (66). Pp. 45-55.
10. Konin D.V., Olurombi A. R. The buckling analysis of direct-welding and spiral-welding tubes made of high-strength steels at central and eccentric compression based on experiment. *News of higher educational institutions. Construction*. 2018. No 6 (714). Pp. 106-116.
11. Standard of Russian Federation GOST 8829-94 Reinforced concrete and prefabricated concrete building products. Loading test methods. Assessment of strength, rigidity and crack resistance.
12. Standard of Russian Federation GOST 1497-84 Metals. Methods of tension test.
13. Building Code of Russian Federation SP 16.13330.2011 Steel structures.

Информация об авторах:

Крылов Алексей Сергеевич

АО "НИЦ "Строительство", ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, г. Москва, Россия,
Научный сотрудник
E-mail: kryl07@mail.ru

Information about authors:

Krylov Alexey S.

Research Center of Construction TSNIISK named after V.A. Koucherenko, Moscow, Russia,
Researcher
E-mail: kryl07@mail.ru