

УДК 624.078

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-108-121

*О.Г. КУМПЯК, Н.В. МЕЩЕУЛОВ,**Томский государственный архитектурно-строительный университет*

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СЖАТО-ИЗОГНУТЫХ КОНСТРУКЦИЙ БАЛОЧНОГО ТИПА НА ПОДАТЛИВЫХ ОПОРАХ

Аннотация. В связи с активным ростом вероятности возникновения динамических воздействий природного и техногенного характера на здания и сооружения, всё чаще появляется необходимость проектирования железобетонных конструкций, устойчивых к данному типу нагрузок. Целью настоящей работы является экспериментальное изучение влияния активного способа защиты в виде податливых опор и уровня продольного обжатия на прочность и деформативность наклонных сечений сжато-изогнутых железобетонных конструкций.

В работе изложена методика экспериментальных исследований. Установлено, что при уменьшении жёсткости податливых опор значительно увеличивается время сопротивления конструкции. При увеличении уровня продольного обжатия происходит уменьшение деформаций поперечной арматуры конструкций. Показано, что применение упругопластических податливых опор в сравнении с жестким опиранием приводит к снижению деформаций поперечной арматуры.

Ключевые слова: сжато-изгибаемые железобетонные конструкции, податливые опоры, наклонные сечения, прочность, деформативность, динамическая нагрузка

Для цитирования: Кумпяк О.Г., Мещеулов Н.В. Особенности динамического деформирования сжато-изогнутых конструкций балочного типа на податливых опорах // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 5. С. 108–121.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-108-121

*O.G. KUMPYAK, N.V. MESHCHUOLOV,**Tomsk State University of Architecture and Building*

DYNAMIC DEFORMABILITY OF OBLIQUE SECTIONS OF COMPRESSED REINFORCED CONCRETE BEAMS ON YIELDING SUPPORTS

Abstract. Due to the growing possibility of the likelihood of dynamic loads on buildings from natural and man-made emergency situations, it is necessary to design reinforced concrete structures resistant to such impacts. The aim of this work is to study effective methods of the structure protection such as yielding supports and longitudinal compression, deformability of oblique sections of reinforced concrete structures under compression and bending. The paper proposes the experimental methodology. It is shown that time of the structural resistance significantly increases with decreasing stiffness of yielding supports. When the longitudinal compression grows, deformation of transverse reinforcement reduces in the structure. It is demonstrated that the use of elastoplastic yielding supports reduces deformation of transverse reinforcement as compared to rigid supports.

Keywords: reinforced concrete structure, compression, bending, yielding support, oblique section, strength, deformability, dynamic load

For citation: Kumpyak O.G., Meshcheulov N.V. Osobennosti dinamicheskogo deformirovaniya szhato-izognutykh konstrukttsii balochnogo tipa na podatlivykh oporakh [Dynamic deformability of oblique sections of compressed reinforced concrete beams on yielding supports]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 5. Pp. 108–121.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-108-121

Введение

В настоящее время для обеспечения восприятия зданиями и сооружениями кратковременных динамических нагрузок применяется два принципиально разных подхода. Первый реализуется через увеличение несущей способности конструкций использованием материалов с повышенными физико-механическими характеристиками (высокопрочный бетон и арматура), более интенсивное армирование, увеличение поперечного сечения элементов. Однако при этом повышение динамической прочности конструкций не всегда может быть реализовано с технологической точки зрения или быть экономически целесообразным. Другим способом защиты конструкций является снижение интенсивности и локализация динамического воздействия за счет применения податливых опор, которые, деформируясь, воспринимают на себя избыточную часть взрывной энергии, разгружая и оставляя неповрежденными несущие элементы [1–4].

В настоящее время исследования, в которых рассмотрено влияние податливости опорных закреплений на реакцию железобетонных конструкций, ограничиваются несколькими работами.

Экспериментально-теоретическими исследованиями ряда ученых [5–12] установлено, что учет податливости опорных закреплений оказывает существенное влияние на работу железобетонных конструкций при динамическом нагружении, а увеличение податливости опорных закреплений приводит к снижению усилий в них.

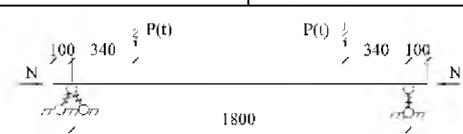
Несмотря на глубокие теоретические и экспериментальные исследования в области поведения изгибаемых и сжато-изгибаемых железобетонных конструкций при кратковременном динамическом нагружении, вопросы влияния продольного обжатия и податливого опирания на прочность и деформативность наклонных сечений остаются малоизученными.

Методика проведения экспериментальных исследований

Для изучения влияния продольного обжатия на прочность и деформативность наклонных сечений были изготовлены и испытаны шестнадцать конструкций с относительным пролетом среза $a = 2h_0$, в которых помимо продольного обжатия, равного $N = 0$ и $0,4N_{\max}$, где $N_{\max} = R_{bn}bh$, изменялись стадии деформирования податливых опор (жесткая – условно недеформируемая, упругопластическая). При этом рассматривали динамическое деформирование сжато-изгибаемых конструкций для двух предельных состояний. Первое – состояние 1^а, работа поперечной арматуры рассматривается в области упругих

деформаций (напряжения менее $\sigma_{0,2}$). Второе – состояние 1^б, деформации поперечной арматуры превышают значения, соответствующие условному пределу текучести стали, и наблюдается разрушение сжатой зоны бетона над критической наклонной трещиной. Программа исследований представлена в таблице.

Программа экспериментальных исследований

Условия испытания	Динамическое нагружение			
Уровень обжатия	$N = 0$		$N = 0,4N_{\max}$	
Схема испытаний				
Шифр образца	БДЖ-0 ^(y; п)	БДУП-0 ^(y; п)	БДЖ-04 ^(y; п)	БДУП-04 ^(y; п)
Количество	2/2*	2/2*	2/2*	2/2*
Стадия работы образца	Упругая	Упругая	Упругая	Упругая
	Упруго-пластическая	Упруго-пластическая	Упруго-пластическая	Упруго-пластическая
Стадия работы опоры	Жёсткая	Упруго-пластическая	Жёсткая	Упруго-пластическая

* – указывает на количество образцов, испытанных в упругой^(y) / упругопластической стадии^(п).

Шифр образца указывает на условия испытания конструкции. Индекс (Д) в обозначении говорит о том, что балка испытана динамической нагрузкой. Следующие за ним буквы обозначают стадию динамического деформирования опоры: (Ж) – жесткая (условно недеформируемая), (УП) – упругопластическая. Цифра указывает относительный уровень продольного обжатия. Верхний индекс в шифре свидетельствует о предельном состоянии, в котором сработала конструкция: ^(y) – состояние 1^а, ^(п) – состояние 1^б.

Так, опытный образец БДУП-04^(п) расшифровывается следующим образом: образец испытан динамической нагрузкой (состояние 1^б), на податливых опорах, сработавших в упругопластической стадии, уровень продольного обжатия составлял $N = 0,4N_{\max}$.

Железобетонные образцы балочного типа изготовлены из бетона марки М400 размерами: длина 2000 мм, ширина 100 мм, высота 200 мм. Армированы балки пространственным каркасом (рис. 1).

Поперечное армирование выполнено из двух стержней холоднодеформированной арматуры класса Вр500 диаметром 3 мм (условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 565$ МПа) с шагом 50 мм в приопорной зоне и 100 мм в середине пролета.

Продольное армирование выполнено из горячекатаной стержневой арматуры класса А240, 2Ø6 мм ($\mu_s = 0,28$ %) в сжатой зоне элемента и горячекатаной стержневой арматуры класса А500, 2Ø18 мм ($\mu_s = 2,55$ %) в растянутой зоне.

Опытные образцы изготовлены из тяжелого бетона идентичного состава компонентов по массе 1:1,5:3 (цемент : песок : щебень) плотностью

$\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$ при водоцементном отношении $W/C = 0,5$. Изготовление бетонной смеси производилось на основе портландцемента по ГОСТ 30515–2013 марки ЦЕМ I 42,5Б Топкинского завода с пределом прочности на сжатие $R = 46,8 \text{ МПа}$, щебня с фракцией 5–20 мм и предварительно промытого и высушенного карьерного песка.

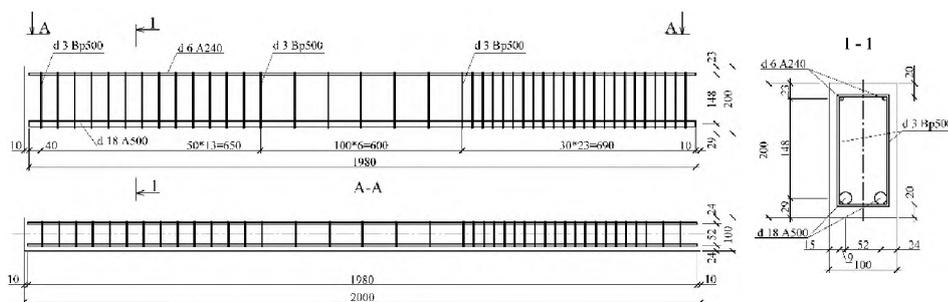


Рис. 1. Армирование экспериментальных образцов

Перед испытаниями на балках был установлен комплекс измерительных приборов (рис. 2): деформации арматуры и бетона регистрировались датчиками деформаций (тензорезисторы) 5П1-10-200-Б-12 измерительной базой 20 мм ($R = 201 \pm 0,1 \text{ Ом}$) на поперечной арматуре и 5П1-50-300-Б-12 измерительной базой 50 мм ($R = 308 \pm 0,1 \text{ Ом}$) на бетоне.



Рис. 2. Электронно-измерительные приборы:

а – датчик деформаций 5П1-10-200-Б-12 (тензорезистор) с базой 20 мм; *б* – датчик деформаций 5П1-50-300-Б-12 с базой 50 мм; *в* – устройство для измерения перемещения опоры; *г* – прогибомер WayCon SL50-G-SR; *д* – силомер ДСТ 4126; *е* – датчик ускорений – акселерометр Tokyo Sokki Kenkyujo corporation, ARE-100000A

После присоединения выводных проводов тензорезисторы покрывались гидроизоляционным слоем, приготовленным на основе эпоксидной смолы.

Измерение приращения деформаций податливых опор при деформировании производилось при помощи специально разработанного устройства (патент на полезную модель РФ: № 176603), основанного на базе прогибомеров WayCon SL50-G-SR, измерение прогибов различных участков конструкции осуществлялось прогибомерами WayCon SL150-G-SR. Измерение величины нагрузки и опорных реакций производилось силоизмерительным устройством ДСТ 4126, ускорение различных участков конструкции регистрировалось акселерометрами Tokyo Sokki Kenkyujo corporation, ARE-100000A.

Фиксация и обработка данных измерительных приборов осуществлялись с использованием системы электронно-вычислительного оборудования MIC300M и MIC400D (рис. 3).

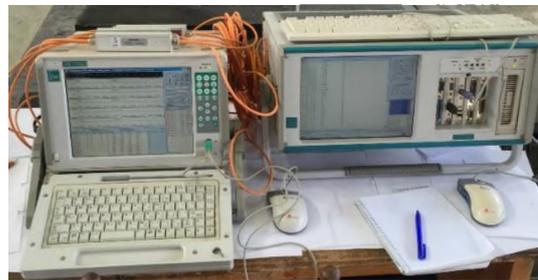


Рис. 3. Комплекс электронно-вычислительного оборудования: MIC300M (слева); MIC400D (справа)

Размещение измерительного оборудования осуществлялось в соответствии с расчетной схемой экспериментальных исследований и характером деформирования и разрушения изгибаемых и сжато-изгибаемых конструкций по наклонным сечениям (рис. 4, 5).

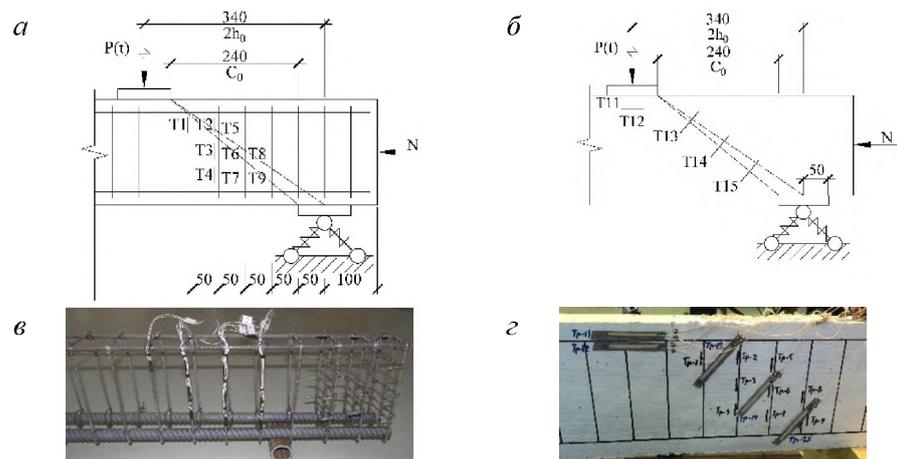


Рис. 4. Схема расположения тензорезисторов на поперечной арматуре (а) и бетоне (б); общий вид расположения тензорезисторов на поперечной арматуре (в) и бетоне (г)

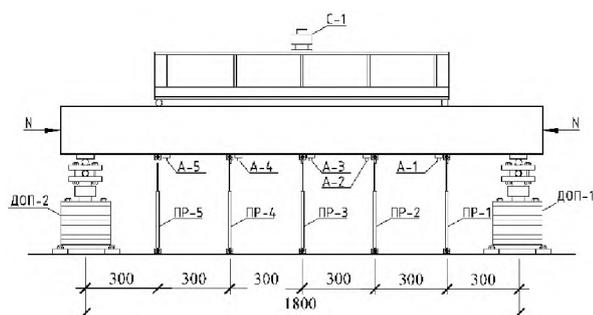


Рис. 5. Схема расположения прогибомеров (ПР-1...ПР-5), акселерометров (А-1...А-5), динамометрических опор (ДОП-1... ДОП-2) и силомера (С-1)

Датчики деформаций поперечной арматуры и бетона располагались в зоне предполагаемого образования и развития критической наклонной трещины, проходящей между внешним краем грузовой и внутренним краем опорной площадок. Датчики ускорений и перемещений были размещены в зоне чистого изгиба под грузовой площадкой и равномерно в пролете балки с шагом 300 мм.

Исследования конструкций выполнялись на специально разработанном и изготовленном стенде – копровой установке (патенты на полезную модель РФ: № 161908; № 152647, евразийский патент на изобретение № 027864) (рис. 6).

Динамическое нагружение осуществлялось путём свободного падения груза 3 по вертикальным направляющим 11. Нагрузка на образец передавалась в двух сечениях в соответствии с расчетной схемой (рис. 4) посредством распределительной траверсы 7. В опорной зоне располагалась податливая опора 12.

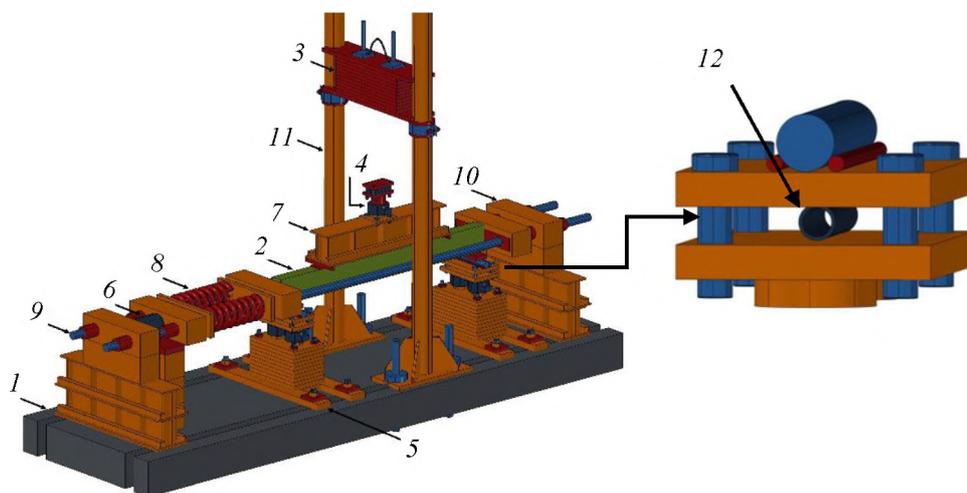


Рис. 6. Схема стенда для испытаний сжатых конструкций поперечной кратковременной динамической нагрузкой:

1 – силовой пол; 2 – образец; 3 – груз; 4 – силомер; 5 – динамометрическая опора с установленной податливой вставкой; 6 – гидродомкрат; 7 – распределительная траверса; 8 – пружина; 9 – горизонтальные тяжи; 10 – упорные траверсы; 11 – вертикальные направляющие; 12 – податливая опора

Согласно предварительным расчетам балок на действие однократной динамической нагрузки и анализу деформирования идентичных конструкций на действие статической нагрузки, масса груза была принята 265 кг, высота его падения 150 мм для случая, в котором рассматривается работа поперечной арматуры в области упругих деформаций (состояние 1^а) и 650 мм для случая деформирования образцов при работе поперечной арматуры, выходящей за условный предел текучести арматурной стали (состояние 1^б).

С целью исключения отскока образцов после динамического воздействия и получения более достоверных данных о сопротивлении железобетонных конструкций при динамическом воздействии, предварительно была произведена фиксация балок на опорах, исключая вертикальное перемещение конструкций, но допускающая их поворот на опоре (рис. 7).

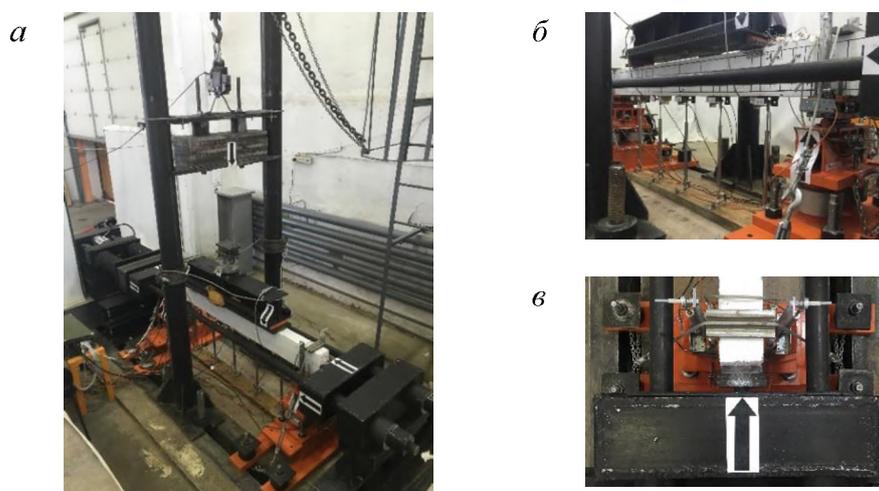


Рис. 7. Общий вид испытательного стенда на действие кратковременной динамической нагрузки (а); размещение измерительного оборудования (б); устройство опорного закрепления на динамометрической опоре (вид сверху) (в)

Деформативность наклонных сечений при работе поперечной арматуры в зоне упругих деформаций

Экспериментальные исследования показали, что при повышении уровня продольного сжимающего усилия происходит увеличение реакции конструкции на динамическое воздействие. Данную закономерность можно проследить на диаграммах сопротивления балочных конструкций по наклонным сечениям при динамическом нагружении (рис. 8).

Причем отмеченная закономерность проявляется как для сжато-изгибаемых балок, испытанных на жестких опорах, так и для конструкций на податливых опорах. При этом для балок на податливых опорах при одинаковом уровне продольного обжатия произошло уменьшение реакции конструкции в два раза.

Так для балки без продольного обжатия на жестких опорах (БДЖ-0^в) реакция конструкции равна 67,3 кН (рис. 8, а), а на упругопластических опорах (БДУП-0^в) – 32,7 кН (рис. 8, в).

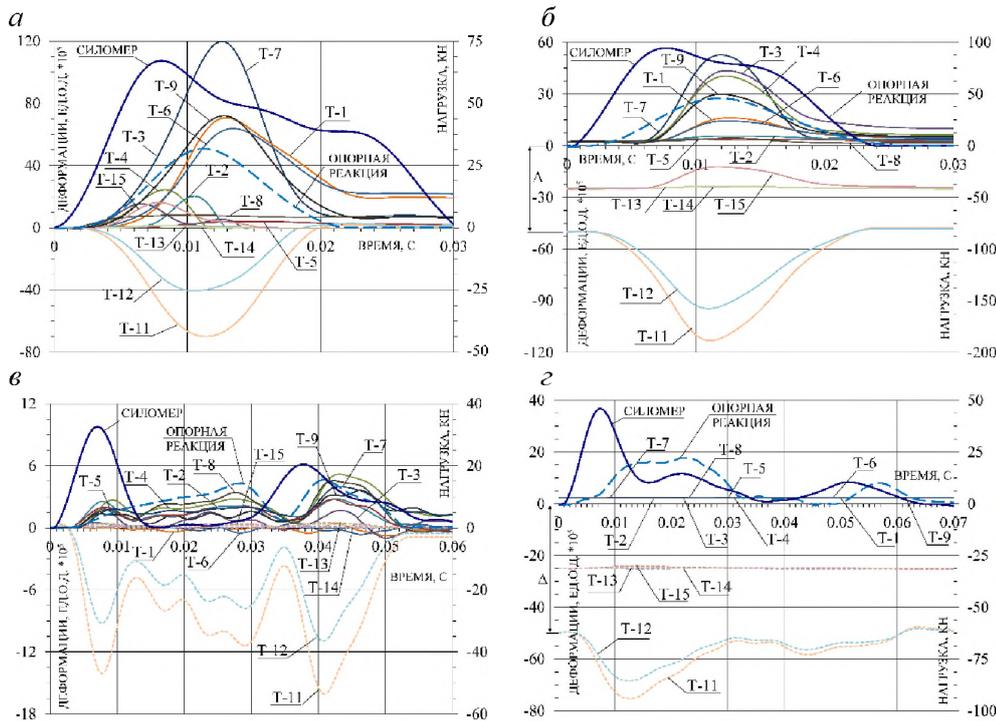


Рис. 8. Диаграмма сопротивления и деформации арматуры и бетона в наклонном сечении образцов: (БДЖ-0^(0.4N)) (а); (БДЖ-04^(0.4N)) (б); (БДУП-0^(0.4N)) (в) и (БДУП-04^(0.4N)) (г) при кратковременном динамическом нагружении; Δ – начальные деформации бетона в результате предварительного продольного обжатия

С продольным обжатием $N = 0,4N_{\max}$ на жёстких опорах реакция балки (БДЖ-04^(0.4N)) равна 95 кН (рис. 8, б), а на упругопластических опорах (БДУП-04^(0.4N)) – 46 кН (рис. 8, г).

На диаграммах прослеживается увеличение времени сопротивления конструкций по наклонным сечениям, испытанных на податливых опорах (50 мс) (рис. 8, в, г), по отношению к образцам на жестких опорах (рис. 8, а, б) (15 мс) в 2,5–3 раза, что говорит о более пластичной работе наклонного сечения, причем данный характер деформирования отмечается для конструкций с продольным обжатием и без него.

При испытании образцов на податливых опорах (рис. 8, в, г) в процессе динамического воздействия зафиксировано несколько характерных пиков на диаграммах опорных реакций, свидетельствующих об активной работе сминаемых вставок.

При увеличении продольного обжатия наблюдается повышение уровня динамического сопротивления и опорной реакции конструкций, что свидетельствует об их более жесткой работе. Причем данная закономерность справедлива как при жестком, так и при податливом опирании.

Наибольшее значение динамической реакции балки и её опорной реакции наблюдается при испытании образцов на жестких опорах при уровне продольного обжатия $N = 0,4N_{\max}$ (БДЖ-04^(0.4N)).

При испытании конструкций без продольного обжатия (БДЖ-0^(y)) величина сопротивления и опорной реакции снизилась на 29,2 % по отношению к образцу с продольным обжатием $N = 0,4N_{\max}$ (БДЖ-04^(y)).

Деформативность наклонных сечений при работе поперечной арматуры за условным пределом текучести

Экспериментальными исследованиями конструкций при поперечном динамическом воздействии установлено, что с повышением уровня продольного обжатия происходит увеличение реакции конструкции на динамическое воздействие. Данную закономерность можно проследить на диаграммах сопротивления наклонных сечений балок динамической нагрузке (рис. 9–12).

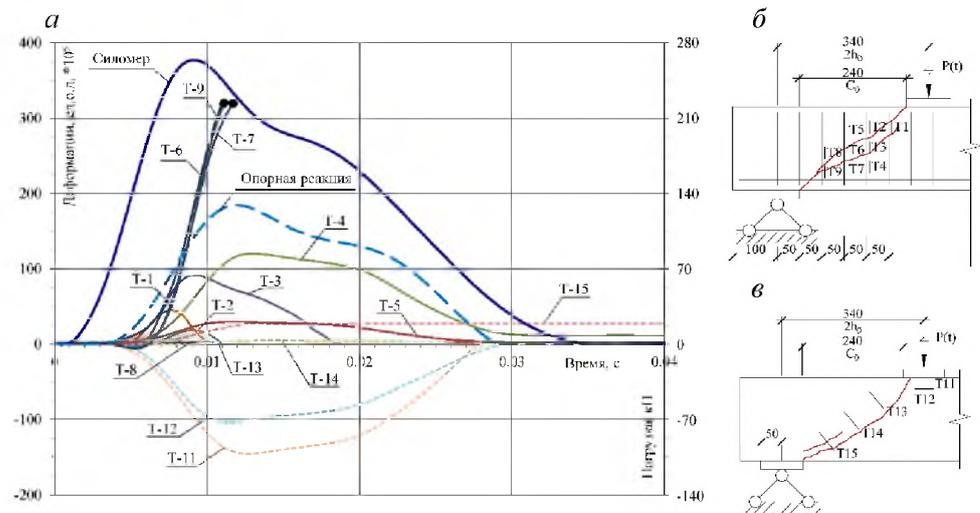


Рис. 9. Диаграмма сопротивления и деформации арматуры и бетона в наклонном сечении изгибаемой конструкции (БДЖ-0^(y)) при кратковременном динамическом нагружении (а); схема трещинообразования и размещения тензорезисторов (б, в); ● – обрыв датчика или превышение измерительного диапазона

Степень влияния продольного сжимающего усилия и податливости опор на прочность и деформативность наклонных сечений изгибаемых железобетонных конструкций при поперечном динамическом воздействии можно оценить на основе деформаций поперечной арматуры при опирании на жесткие (рис. 9, 10) и упругопластические (рис. 11, 12) опоры.

На диаграммах сопротивления конструкций по наклонным сечениям (рис. 9–12) прослеживается увеличение времени деформирования образцов, испытанных на упругопластических опорах (БДУП⁽ⁿ⁾) ($\approx 30\text{--}35$ мс), по отношению к образцам, испытанным на жестких опорах (БДЖ⁽ⁿ⁾) ($\approx 15\text{--}20$ мс), в среднем в два раза. Это говорит о более пластичной работе наклонного сечения при использовании податливых опор. Вместе с тем увеличение уровня продольного обжатия до $N = 0,4N_{\max}$ приводит к сокращению времени деформирования конструкций по наклонным сечениям.

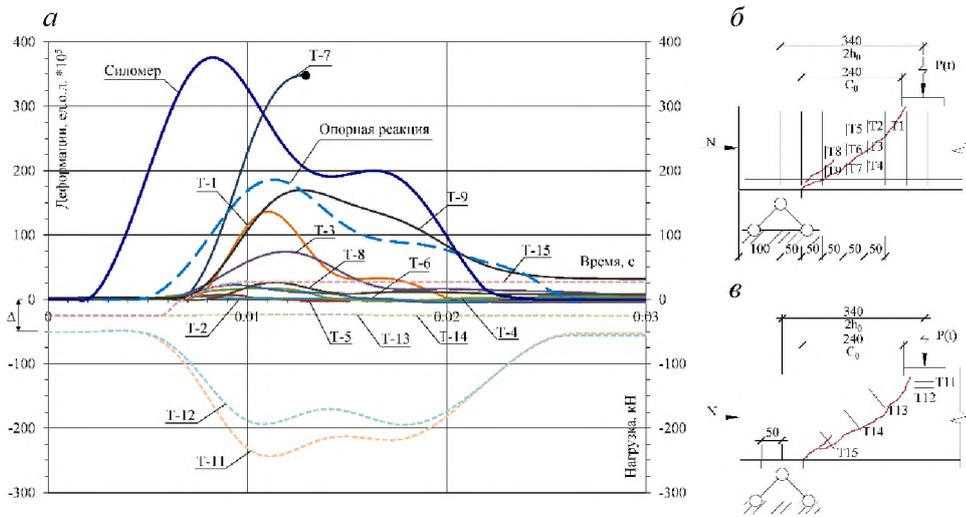


Рис. 10. Диаграмма сопротивления и деформации арматуры и бетона в наклонном сечении сжато-изгибаемой конструкции (БДЖ-04⁽ⁿ⁾) при кратковременном динамическом нагружении с продольным обжатием $N = 0,4N_{\max}$ (а); схема трещинообразования и размещения тензорезисторов (б, в); ● – обрыв датчика или превышение измерительного диапазона; Δ – деформации бетона в результате предварительного продольного обжатия балки

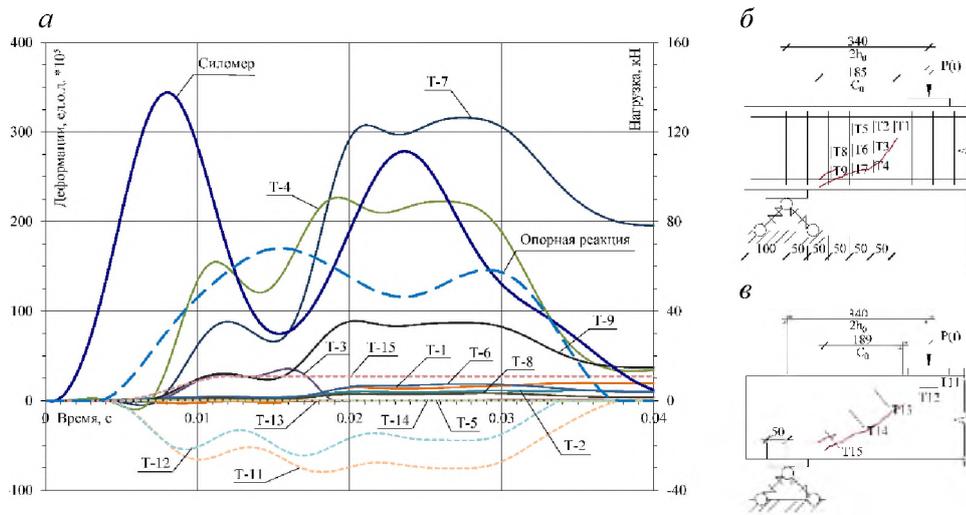


Рис. 11. Диаграмма сопротивления и деформации арматуры и бетона в наклонном сечении изгибаемой конструкции (БДУП-0⁽ⁿ⁾) при кратковременном динамическом нагружении (а); схема трещинообразования и размещения тензорезисторов (б, в)

В большей степени это наблюдается при жестком опирании и в меньшей степени проявляется при работе конструкций на пластических опорах. Время деформирования образцов на жестких опорах с обжатием $N = 0,4N_{\max}$ (БДЖ-04⁽ⁿ⁾) снижается на 20 % относительно опытных балок без обжатия (БДЖ-0⁽ⁿ⁾).

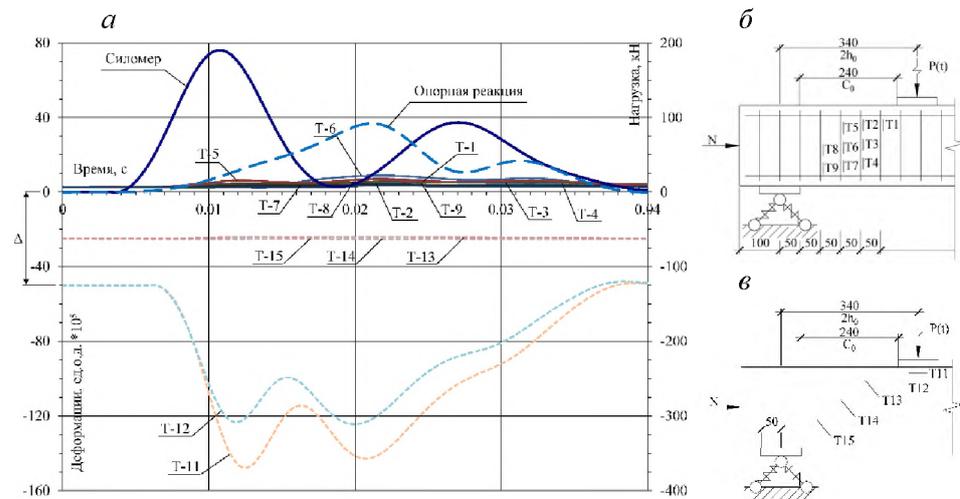


Рис. 12. Диаграмма сопротивления и деформации арматуры и бетона в наклонном сечении сжато-изгибаемой конструкции (БДУП-04^(н)) при кратковременном динамическом нагружении с продольным обжатием $N = 0,4N_{\max}$ (а); схема размещения тензорезисторов (б, в); Δ – деформации бетона в результате предварительного продольного обжатия балки

При увеличении обжатия до $N = 0,4N_{\max}$ для конструкций на пластических податливых опорах (БДУП-04^(н)) сокращение времени деформирования составляет 7 % относительно образцов без продольного обжатия (БДУП-0^(н)).

При испытании образцов на пластических опорах (БДУП) (рис. 11, 12) в процессе динамического воздействия зафиксировано несколько характерных пиков кривых развития опорных реакций и реакций балок, свидетельствующих об активной работе сминаемых вставок.

С увеличением значения продольного обжатия наблюдается повышение величины динамического сопротивления и опорной реакции конструкций, что свидетельствует о более жесткой работе образца. Причем данная закономерность справедлива для всех рассматриваемых типов опор.

Для образцов, испытанных на жестких опорах, снижение величины опорной реакции и значения сопротивления динамическому воздействию при продольном обжатии $N = 0$ (БДЖ-0^(н)) по отношению к $N = 0,4N_{\max}$ (БДЖ-04^(н)) составило 28,6 %. В результате анализа динамического сопротивления конструкций на пластических опорах (БДУП^(н)) установлено, что при повышении уровня продольного обжатия, как и в случае с жестким и упругим опиранием, происходит увеличение значения опорной реакции и повышение сопротивления конструкции. Так, для конструкции без обжатия $N = 0$ (БДУП-0^(н)) значение сопротивления и опорной реакции уменьшилось в 1,39 раза по отношению к образцу с уровнем продольного обжатия $N = 0,4 N_{\max}$ (БДУП-04^(н)).

Установлено, что выявленная закономерность справедлива и для жесткого опирания. Для балки без продольного обжатия $N = 0$ (БДЖ-0^(н)) по отношению к образцу с обжатием $N = 0,4N_{\max}$ (БДЖ-04^(н)) значение динамического сопротивления и опорной реакции уменьшилось в 1,44 раза.

Вместе с тем установлено, что при испытании конструкций на опорах, работающих в пластической (БДУП^(н)) стадии, происходит снижение динамического сопротивления и значения величины опорной реакции по отношению к жесткому (БДЖ^(н)) опиранию. Так, для образцов без продольного обжатия $N = 0$, испытанных на жестких опорах, по отношению к конструкциям, испытанным на опорах, сработавших в пластической стадии, уменьшение составляет $\text{БДЖ-0}^{(н)}/\text{БДУП-0}^{(н)} = 1,78-2,1$; при увеличении значения обжатия до $N = 0,4N_{\max}$ происходит уменьшение опорной реакции и реакции балок, испытанных на жестких и упругих опорах, по отношению к образцам, испытанным на пластических опорах: $\text{БДЖ-04}^{(н)} / \text{БДУП-04}^{(н)} = 1,86-2,15$.

Характер развития трещин в зоне действия поперечных сил представлен на рис. 9, б, в – 12, б, в. Установлено, что развитие наклонной трещины происходит от внутренней грани опорной площадки до внешней грани загрузочной пластины. Причем данная картина трещинообразования независима от уровня продольного обжатия и характера опирания (жесткое/податливое) образца. Вместе с тем стоит отметить, что при увеличении уровня продольного обжатия до $N = 0,4N_{\max}$ наклонная трещина от растянутой зоны элемента развивается под более острым углом, тогда как развитие трещины в сжатой зоне, напротив, происходит под более тупым углом к продольной оси элемента. При испытании образцов на жестких (БДЖ^(н)) опорах, вне зависимости от уровня продольного обжатия, развитие наклонных трещин происходит на всю высоту сечения по длине пролета среза. В случае испытания образцов на податливых опорах, сработавших в пластической стадии (БДУП^(н)) без продольного обжатия, видно, что наклонная трещина развивается на 2/3 и 3/4 высоты сечения соответственно. При повышении уровня продольного обжатия до $N = 0,4N_{\max}$ для образцов, испытанных на пластических опорах (БДУП-04^(н)), образование трещин не произошло.

Анализ деформаций поперечной арматуры (рис. 9–12) показал, что наибольшие значения наблюдаются на участках, пересекаемых наклонной трещиной. Стоит отметить, что для образцов, испытанных на жестких (БДЖ^(н)) опорах, деформации в арматуре превысили значения, соответствующие напряжениям условного предела текучести арматурной стали ($\sigma_{0,2}$). Для образцов, испытанных на пластических (БДУП^(н)) опорах, можно установить, что при повышении обжатия до $N = 0,4N_{\max}$ снижение деформаций составило 97 %.

Анализ влияния податливости опор показал, что при одинаковом уровне продольного обжатия, равном $N = 0,4N_{\max}$, снижение деформаций поперечной арматуры при пластическом опирании (БДУП^(н)) относительно конструкций, испытанных на жестких (БДЖ^(н)) опорах, составило 97,5 %. Установлено, что наибольшие деформации поперечной арматуры в наклонных сечениях возникают при испытании образцов без продольного обжатия $N = 0$ для балок, испытанных на жестких (БДЖ-0^(н)) опорах, и превышают значение $350 \cdot 10^{-5}$ ед.о.д (рис. 9). Наименьшие значения деформации поперечной арматуры в наклонных сечениях зафиксированы при испытании образцов на пластических опорах при уровне продольного обжатия $N = 0,4N_{\max}$ (БДУП-04^(н)), составляющие $4,5 \cdot 10^{-5}$ ед.о.д (рис. 12).

Выводы

1. Установлено, что при испытании образцов на податливых опорах прослеживается увеличение времени сопротивления конструкций по наклонным сечениям по отношению к образцам на жестких опорах. При напряжениях в поперечной арматуре, не превышающих условного предела текучести (состояние 1^а), данное увеличение находится в пределах от 2,5 до 3 раз. При работе поперечной арматуры за условным пределом текучести (состояние 1^б) – в 2 раза. Такой характер деформирования конструкции отмечается для всех рассматриваемых уровней продольного обжатия ($N = 0$; $N = 0,2N_{\max}$; $N = 0,4N_{\max}$).

2. Экспериментально получено, что при поперечном изгибе с увеличением продольного обжатия до уровня $N = 0,4N_{\max}$ происходит уменьшение деформаций поперечной арматуры для конструкции, работающей в условно-упругой стадии на 55 %, и на 97 % при полном исчерпании несущей способности элемента. Установлено, что применение упругопластических податливых опор в сравнении с жестким опиранием при одинаковом уровне продольного обжатия и внешнем динамическом воздействии при работе конструкции в условно-упругой стадии приводит к снижению деформаций поперечной арматуры до 95 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Poonaya S., Thinwongpituk C., Teeboonma U. An Analysis of Collapse Mechanism of Thin-Walled Circular Tubes Subjected to Bending // Proceedings of WASET. 2007. № 26. P. 329–334.
2. Mata P., Barbat A., Oller S., Boroschek R. Constitutive and geometric nonlinear models for the seismic analysis of re structures with energy dissipators // Arch. comput. methods eng. 2008. № 15. P. 489–539.
3. Olabi A., Morris E., Hashmi M. Metallic tube type energy absorbers: A synopsis // Journal of Thin-Walled Structures. 2008. № 45. P. 706–726.
4. Marzbanrad J., Mehdikhanlo M., Saeedi Pour A. An energy absorption comparison of square, circular, and elliptic steel and aluminum tubes under impact loading // Turkish J. Eng. Env. Sci. 2009. № 33. P. 159–166.
5. Расторгуев В.С. Применение динамических гасителей колебаний при взрывных воздействиях // Строительная механика и расчет сооружений. 2009. № 1. С. 50–57.
6. Кумпяк О.Г., Галыаутдинов З.Р., Кокорин Д.Н. Strength of concrete structures under dynamic loading / II All-Russian Scientific Conference of Young Scientists «Advanced Materials in Technology and Construction». 2015. № 1698.
7. Chiaia B., Kumpyak O.G., Placidi L., Maksimov V.B. Experimental analysis and modeling of two-way reinforced concrete slabs over different kinds of yielding supports under short-term dynamic loading // Engineering Structures. 2015. № 96. P. 88–99.
8. Кумпяк О.Г., Мещеулов Н.В. Deformability of oblique section of RC beams on yielding supports under dynamic impact / IV International Young Researchers Conference «Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects». 2017. № 1800.
9. Кумпяк О.Г., Мещеулов Н.В. Numerical simulation of yielding supports in the shape of annular tubes under static and short-term dynamic loading // IJCCSE. 2017. 13(4). P. 103–113.
10. Кумпяк О., Галыаутдинов З. Deformation of reinforced concrete plates on yielding supports under dynamic impact // Earthquake engineering. Constructions safety. 2017. I. 1. P. 28–34.
11. Галыаутдинов З., Кумпяк О. Design of reinforced concrete beams on yielding supports under short-term dynamic loading // Structural Mechanics and Analysis of Constructions. 2019. I. 4. P. 63–70.
12. Tonkikh G., Kumpyak O., Galyautdinov Z. Design of civil defense constructions on yielding supports in the form of crushable inserts with ring cross-sections // Tehnologii grazhdanskoj bezopasnosti. 2020. V. 17. I. 4. P. 94–97.

REFERENCES

1. Poonaya S., Thinongpituk C., Teeboonma U. An analysis of collapse mechanism of thin-walled circular tubes subjected to bending. *Proceedings of WASET*. 2007. No. 26. Pp. 329–334.
2. Mata P., Barbat A., Oller S., Boroschek R. Constitutive and geometric nonlinear models for the seismic analysis of RC structures with energy dissipators. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2008. No. 15. Pp. 489–539.
3. Olabi A., Morris E., Hashmi M. Metallic tube type energy absorbers: A synopsis. *Journal of Thin-Walled Structures*. 2008. No. 45. Pp. 706–726.
4. Marzbanrad J., Mehdikhanlo M., Saeedi Pour A. An energy absorption comparison of square, circular, and elliptic steel and aluminum tubes under impact loading. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*. 2009. No. 33. Pp. 159–166.
5. Rastorguev V.S. Primenenie dinamicheskikh gasitelei kolebanii pri vzryvnykh vozdeistviyakh [Application of dynamic vibration dampers under explosive loads]. *Building Mechanics and Analysis of Structures*. 2009. No. 1. Pp. 50–57.
6. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N. Strength of concrete structures under dynamic loading. In: *Proc. 2nd All-Russ. Sci. Conf. of Young Scientists "Advanced Materials in Technology and Construction"*. 2015. No. 1698.
7. Chiaia B., Kumpyak O.G., Placidi L., Maksimov V.B. Experimental analysis and modeling of two-way reinforced concrete slabs over different kinds of yielding supports under short-term dynamic loading. *Engineering Structures*. 2015. No. 96. Pp. 88–99.
8. Kumpyak O.G., Meshcheulov N.V. Deformability of oblique section of RC beams on yielding supports under dynamic impact. In: *Proc. 4th Int. Conf. of Young Researchers "Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects"*. 2017. No. 1800.
9. Kumpyak O.G., Meshcheulov N.V. Numerical simulation of yielding supports in the shape of annular tubes under static and short-term dynamic loading. *IJCCSE*. 2017. V. 13. No. 4. Pp. 103–113.
10. Kumpyak O., Galyautdinov Z. Deformirovanie zhelezobetonnykh plit na podatlivykh oporakh pri dinamicheskikh vozdeistviyakh [Deformation of reinforced concrete plates on yielding supports under dynamic impact]. *Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*. 2017. No. 1. Pp. 28–34. (rus)
11. Galyautdinov Z., Kumpyak O. Raschet zhelezobetonnykh balok na podatlivykh oporakh pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении [Strength analysis of reinforced concrete beams on yielding supports under dynamic load]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 2019. No. 4. Pp. 63–70. (rus)
12. Tonkikh G., Kumpyak O., Galyautdinov Z. Raschet prochnosti zashchitnykh sooruzhenii grazhdanskoi oborony na podatlivykh oporakh v vide sminaemykh vstavok kol'tsevogo secheniya [Design of civil defense constructions on yielding supports as crumple inserts with ring cross-sections]. *Tehnologii grazhdanskoy bezopasnosti*. 2020. V. 17. No. 4. Pp. 94–97. (rus)

Сведения об авторах

Кумпяк Олег Григорьевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, ogkumpyak@yandex.ru

Мецеулов Никита Владимирович, канд. техн. наук, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, nikita.meshcheulov@mail.ru

Authors Details

Oleg. G. Kumpyak, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, ogkumpyak@yandex.ru

Nikita. V. Meshcheulov, PhD, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, nikita.meshcheulov@mail.ru