

**АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗГИБУ НЕРАЗРЕЗНЫХ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК, АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТНОЙ И СТАЛЬНОЙ
АРМАТУРОЙ В РАСТЯНУТОЙ ЗОНЕ НАД ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ОПОРОЙ**

А. И. ГИЛЬ¹

¹старший преподаватель кафедры строительных конструкций
Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой
г. Новополоцк, Республика Беларусь

Аннотация. В статье представлено сопоставление результатов ранее проведенных экспериментальных и теоретических исследований сопротивления изгибу неразрезных железобетонных балок, армированных композитной и стальной арматурой (комбинированное армирование) в растянутой зоне над промежуточной опорой. Сопоставлены опытные и теоретические значения углов пластического поворота сечения над промежуточной опорой в зависимости от величины действующего изгибающего момента при предельной и эксплуатационной нагрузке, предельных опорных изгибающих моментов, изгибающих моментов образования трещин нормального отрыва в зоне над промежуточной опорой, ширины раскрытия трещины нормального отрыва над промежуточной опорой. Представлены характерные стадии работы неразрезных балок под нагрузкой. Представлен вариант описания пластического шарнира над промежуточной опорой в виде зависимости величины угла пластического поворота сечения от величины опорного изгибающего момента. Показан вариант ограничения уровня перераспределения изгибающих моментов между пролетами и опорой для рассматриваемых конструкций.

Ключевые слова: неразрезные железобетонные балки, композитная арматура, комбинированное армирование, сопротивление изгибу, угол пластического поворота

**ANALYSIS OF EXPERIMENTAL AND THEORETICAL RESULTS
STUDIES OF BENDING RESISTANCE OF CONTINUOUS REINFORCED CONCRETE
BEAMS REINFORCED WITH COMPOSITE AND STEEL REINFORCEMENT
IN THE STRETCHED ZONE ABOVE THE INTERMEDIATE SUPPORT**

A. I. HIL¹

¹senior lecturer of the Department of Building Structures
Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk
Novopolotsk, Republic of Belarus

Abstract. The article presents a comparison of the results of previously conducted experimental and theoretical studies of the bending resistance of continuous reinforced concrete beams formed by composite and steel reinforcement (combined reinforcement) in the stretched zone above the intermediate support. Experimental and theoretical values of the angles of plastic rotation of the cross section above the intermediate support are compared depending on the magnitude of the acting bending moment at the maximum and operational load, the maximum support bending moments, the bending moments of the formation of cracks of normal tear in the zone above the intermediate support, the width of the crack opening of normal separation above the intermediate support. The characteristic stages of operation of continuous beams under load are presented. A version of the description of a plastic hinge over an intermediate support is presented in the form of a dependence of the magnitude of the angle of plastic rotation of the section on the magnitude of the supporting bending moment. A version of limiting the level of redistribution of bending moments between the spans and the support for the structures under consideration is shown.

Keywords: continuous reinforced concrete beams, composite reinforcement, combined reinforcement, bending resistance, angle of plastic rotation

Введение.

На сегодняшний день все большее внимание уделяется разработкам экономически выгодных и эффективных вариантов применения композитной арматуры в изгибаемых железобетонных элементах, которые не будут требовать дополнительных технологических мероприятий на устранение главных недостатков композитной арматуры. Высокое сопротивление растяжению (более 1100 МПа) композитной арматуры не позволяет решить главную проблему ее применения в качестве рабочей в железобетонных изгибаемых конструкциях, а именно низкого значения модуля упругости (не более 50 ГПа). Исследования [1; 2] показывают, что при работе железобетонного изгибаемого элемента, армированного в растянутой зоне только композитной арматурой, после образования трещин нормального отрыва практически полностью отсутствует зона пластического деформирования и разрушение происходит из-за раздробления сжатой зоны бетона. Ситуация может быть значительно улучшена при использовании в растянутой зоне железобетонного элемента совместно композитной и стальной арматуры (комбинированное армирование). Был рассмотрен вариант применения комбинированного армирования в растянутой зоне над промежуточной опорой неразрезных железобетонных балок.

Экспериментальные исследования проводились в испытательной лаборатории учреждения образования «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой» [3]. Программа экспериментальных исследований включала испытания неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием растянутой зоны над промежуточной опорой с различным соотношением предельных усилий в композитной и стальной арматуре [3; 4]. Характеристики опытных балок представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Характеристики опытных балок

Маркировка балок	Размеры поперечного сечения $b \times h$, мм	Армирование растянутой зоны над промежуточной опорой	$N_{ult,f}$ — $N_{ult,s}$
Б1Э	120x190	2Ø12 S500	—
Б2Э		2Ø10FRP ¹⁾	—
Б3		2Ø10 S500, Ø8FRP	0,42
Б4		2Ø8 S500, Ø10FRP	1,03
Б5		2Ø6 S500, Ø12FRP	3
Б6		2Ø6 S500, 2Ø10FRP	4,2

Примечание: FRP – композитная арматура на основе стеклянных волокон;
 $N_{ult,f}$ – предельное растягивающее усилие в композитной арматуре, Н;
 $N_{ult,s}$ – предельное растягивающее усилие в стальной арматуре, Н.

Результаты экспериментальных исследований сопоставлялись с результатами теоретических исследований, согласно расчетной модели и методике расчета сопротивления изгибу неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием растянутой зоны над промежуточной опорой [5].

Результаты исследований и их анализ.

Одной из целей исследования было получение значений предельных углов пластического поворота поперечного сечения над промежуточной опорой и их зависимость от соотношения значений высоты сжатой зоны бетона после перераспределения усилий (x_u) к значениям рабочей высоты сечения над промежуточной опорой (d), которые были получены в ходе экспериментальных и теоретических исследований. Полученные зависимости углов поворота от соотношения (x_u/d) сравнивались с установленными допускаемыми зависимостями для стальной арматуры в соответствии с СП5.03.01-2020 и с зависимостями для неразрезных железобетонных конструкций с соотношением предельных усилий в композитной и стальной арматуре комбинированного армирования 0,43 (процентное соотношение предельного усилия в композитной арматуре к стальной 30/70), 1 (50/50) и 2,3 (70/30), построенными в соответствии с методикой расчета [5].

Анализ графика предельных значений углов пластического поворота сечения над промежуточной опорой опытных железобетонных балок (рис. 1), показывает, что опытные значения уг-

лов пластического поворота и соотношения (x_u/d) соответствуют расчетным и не превышают предельные значения, приведенные для балок, армированных стальной арматурой.

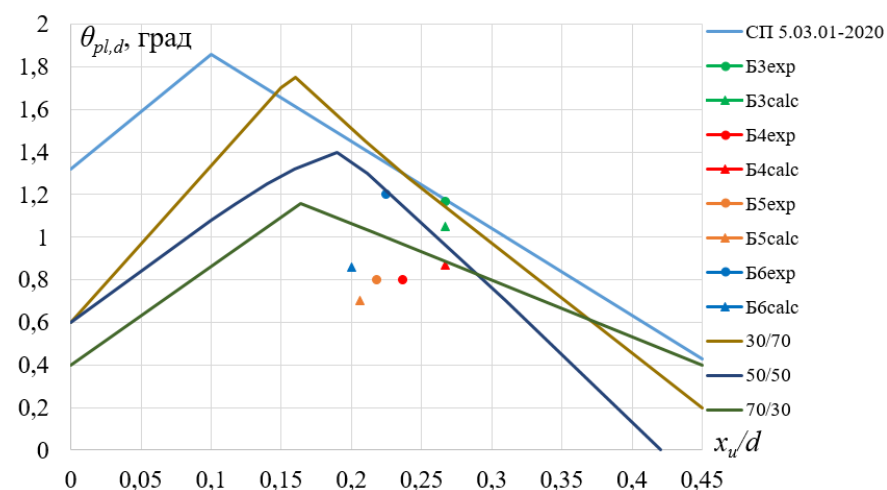


Рисунок 1 – Предельные значения углов пластического поворота сечения над промежуточной опорой опытных балок

Было проведено сопоставление опытных зависимостей «опорный изгибающий момент – угол поворота» с расчетными, определенными по методике [5], иллюстрируют их качественное и количественное соответствие (рис. 2).

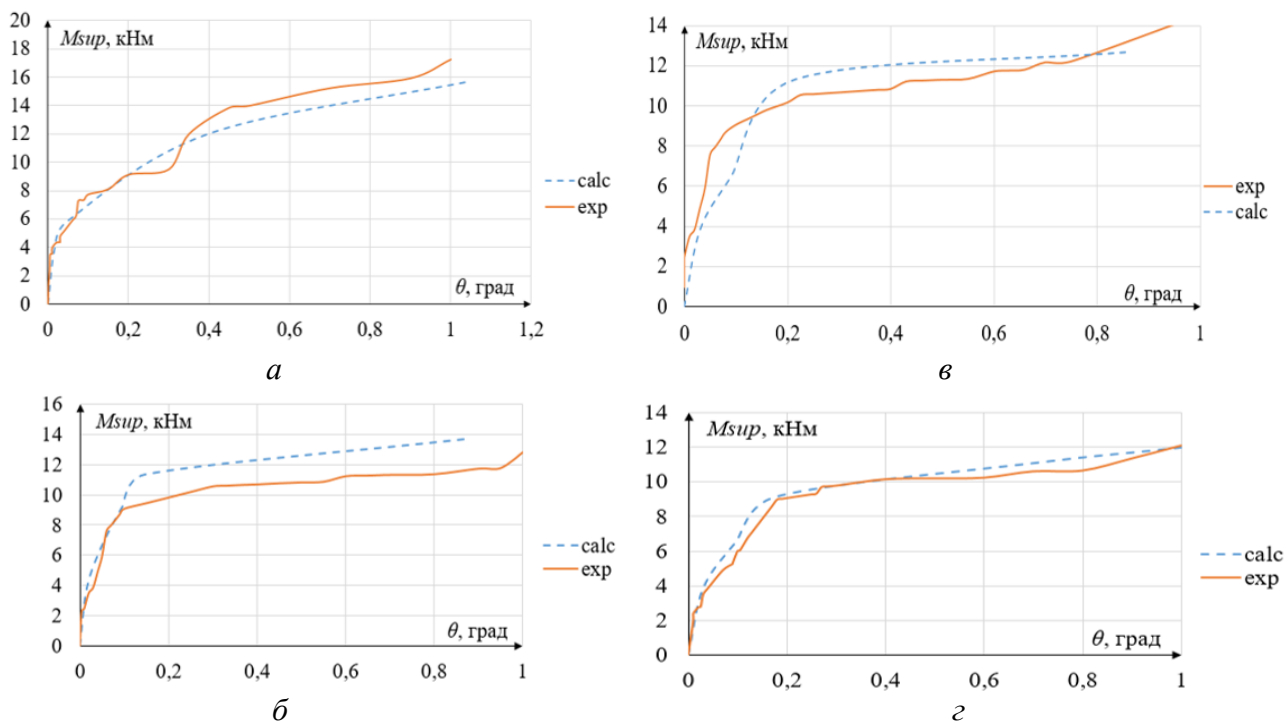


Рисунок 2 – Опытные (exp) и расчетные (calc) зависимости «опорный изгибающий момент – угол поворота» для опытных балок: а – Б3; б – Б4; в – Б5; г – Б6

Результаты сопоставления значения опытного опорного изгибающего момента с расчетным при предельной нагрузке приведены в табл. 2. Сравнение расчетных опорных изгибающих моментов при предельной нагрузке с опытными для балок Б3–Б6 показали их удовлетворительную сходимость.

Таблица 2 – Результаты сопоставления опытного значения опорного изгибающего момента при предельной нагрузке с расчетным

Опытная балка	$M_{Ru,sup}^{exp}$, кНм	$M_{Ru,sup}^{clc}$, кНм	$M_{Ru,sup}^{exp} / M_{Ru,sup}^{clc}$
Б1Э	20,99	20,0	1,05
Б2Э	5,8	6,8	1,17
Б3	17,27	15,6	1,11
Б4	12,81	13,7	0,94
Б5	13,23	12,7	1,04
Б6	12,07	11,1	1,09

Расчетный изгибающий момент образования трещин в растянутой зоне над промежуточной опорой определялся в соответствии с [5], с учетом эффективной высоты растянутой зоны поперечного сечения сопоставлялся с опытными данными (табл. 3).

Таблица 3 – Результаты сопоставления опытного значения опорного изгибающего момента образования трещин с расчетным

Опытная балка	$M_{cr,sup}^{exp}$, кНм	$M_{cr,sup}^{clc}$, кНм	$M_{cr,sup}^{exp} / M_{cr,sup}^{clc}$
Б1Э	5,92	6,6	0,9
Б2Э	2,82	2,58	1,09
Б3	3,52	2,3	1,07
Б4	2,77	2,5	1,08
Б5	3,84	3,01	1,13
Б6	3,47	3,3	1,08

Ширина раскрытия центральной трещины в уровне центра тяжести растянутых стальных и композитных стержней над промежуточной опорой определялась в соответствии с [5], как сумма значений взаимного проскальзывания композитной и стальной арматуры относительно бетона на длине рассматриваемых участков слева и справа от краев трещины нормального отрыва и сопоставлялась с опытными данными (табл. 4). Сравнение расчетных значений опорных изгибающих моментов трещинообразования и ширины раскрытия трещин с опытными значениями для балок Б3–Б6 показали их удовлетворительную сходимость.

Таблица 4 – Результаты сопоставления опытного значения ширины раскрытия центральной трещины над промежуточной опорой при предельной нагрузке с расчетным

Опытная балка	w_{sup}^{exp} , мм	w_{sup}^{clc} , мм	$w_{sup}^{exp} / w_{sup}^{clc}$
Б1Э	0,21	0,24	1,14
Б2Э	0,54	0,4	1,35
Б3	0,25	0,22	1,14
Б4	0,3	0,27	1,11
Б5	0,35	0,31	1,13
Б6	0,34	0,31	1,1

Анализ работы опытных балок под нагрузкой показал, что упругое состояние работы растянутой зоны с комбинированным армированием над промежуточной опорой (стальная и композитная арматура работают упруго, большую часть растягивающих усилий воспринимает стальная арматура) характеризуется перераспределением усилий за счет проскальзывания стальных и композитных стержней в бетоне. При начале текучести стальной арматуры в составе комбинированного армирования происходит увеличение угла поворота сечения над промежуточной опорой, при этом опорный изгибающий момент замедляет увеличение. В это время композит-

ная арматура в составе комбинированного армирования начинает воспринимать все большие растягивающие усилия, используя потенциал пластического деформирования зоны над промежуточной опорой, и достигается дополнительное перераспределение изгибающих моментов между пролетами и промежуточной опорой балок.

Для описания параметров пластического шарнира в растянутой зоне над промежуточной опорой с комбинированным армированием изгибаемых балок, возможно использование билинейной зависимости «опорный изгибающий момент – угол поворота». Базовые точки графика принимаются исходя из расчетных данных с координатами (M_{sup} (кНм); θ (град)).

При упрощенном расчете сопротивления изгибу неразрезных балок с комбинированным армированием растянутой зоны над промежуточной опорой допустимая степень перераспределения внутренних изгибающих моментов может ограничиваться максимальным углом пластического поворота поперечного сечения над промежуточной опорой при его предельной прочности.

Опытные значения углов пластического поворота при эксплуатационной нагрузке в поперечном сечении над опорой сравнивались с расчетными данными, в критическом сечении в пролете с предельным углом поворота по [5]. Результаты приведены в табл. 5.

Таблица 5 – Результаты сопоставления значения угла пластического поворота в растянутой зоне в пролете и над промежуточной опорой при эксплуатационной нагрузке с максимально допустимым при заданном уровне загрузки

Опытная балка	θ_{sup}^{calc} , град	θ_{sup}^{exp} , град	θ_{sup}^{max} , град	θ_{sp}^{calc} , град	θ_{sp}^{max} , град
Б3	0,55	0,6	1,1	0,527	1,6
Б4	0,527	0,5	1,1	0,637	1,6
Б5	0,6	0,55	1,05	0,67	1,7
Б6	0,872	1,0	1,1	1,28	1,4

Сопоставление опытных значений изгибающих моментов в неразрезных двухпролетных балках с комбинированным армированием растянутой зоны над промежуточной опорой с расчетными значениями, полученными по методике [5], в рассматриваемых конструкциях с вписанными пластическими шарнирами, описанными по билинейным зависимостям «опорный изгибающий момент – угол поворота» и ограничением угла пластического поворота в растянутой зоне над опорой по графику 1, в пролетной зоне согласно [6, с. 28] для опытных балок Б3–Б6 при эксплуатационной нагрузке, показывает перераспределение изгибающих моментов между зоной над промежуточной опорой и в пролете. Расхождение между теоретическими и опытными данными не превышает 12 %.

Выводы.

Результаты исследований показывают, что при расчете сопротивления изгибу неразрезных железобетонных балок, армированных стальной и композитной арматурой в растянутой зоне над промежуточной опорой, допустимая степень перераспределения изгибающих моментов между пролетами и промежуточной опорой может быть ограничена в зависимости от соотношения предельных растягивающих усилий в композитной и стальной арматуре комбинированного армирования согласно расчетной модели [5].

Литература:

1. Лешкевич, О. Н. Перспективы применения композитной арматуры / О. Н. Лешкевич // Проблемы современного бетона и железобетона : материалы III международного симпозиума (Минск, 9–11 ноября 2011 г.) : в 2 т. / [редкол.: М. Ф. Марковский (гл. ред.) и др.]. – Т. 1: Бетонные и железобетонные конструкции. – С. 262–268.
2. Мясников А. Л. Изгибаемые конструкции со стеклопластиковой арматурой / А. Л. Мясников, Е. П. Телешман, А. А. Варламов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 72-й международной научно-технической конференции / под ред. В. М. Колокольцева. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2014. – Т.2. – С. 70–74.
3. Гиль, А. И. Методика экспериментальных исследований неразрезных железобетонных балок с гибридным армированием растянутой зоны центрального опорного сечения / А. И. Гиль, Е. Д.

Лазовский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Строительство. Прикладные науки. – 2019. – № 16. – С. 59–64.

4. Гиль, А. И. Результаты экспериментальных исследований сопротивления изгибу статически неопределимых железобетонных балок с комбинированным армированием растянутой зоны опорного сечения / А. И. Гиль // Вестн. Полоцкого государственного университета. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2021. – № 16. – С. 58–64.

5. Hil, A. I. Analysis of the bending continuous rc-beams with hybrid reinforcement in the tensile zone under intermedia support / A. I. Hil, Y. D. Lazouski // Вестн. Брест. гос. ун-та. – 2021. – № 3. – С. 5–8.

6. СП 5.03.01-2020 Бетонные и железобетонные конструкции / М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь. – Минск: 2020. – 236 с.

References:

1. Leshkevich, O. N. *Perspektivy primeneniya kompozitnoj armatury* / O. N. Leshkevich // Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona : materialy III mezhdunarodnogo simpoziuma (Minsk, 9–11 noyabrya 2011 g.) : v 2 vol. / [redkol.: M. F. Markovskij (gl. red.) i dr.]. – Vol. 1: Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii. – P. 262–268. (rus)

2. Myasnikov A. L. *Izgibaemye konstrukcii so stekloplastikovej armaturoj* / A. L. Myasnikov, E. P. Teleshman, A. A. Varlamov // Aktual'nye problemy sovremennoj nauki, tekhniki i obrazovaniya: materialy 72-j mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii / pod red. V. M. Kolokol'ceva. Magnitogorsk: Izd-vo Magnitogorsk. gos. tekhn. un-ta im. G. I. Nosova, 2014. Vol.2. P. 70–74. (rus)

3. Gil', A. I. *Metodika eksperimental'nyh issledovanij nerazreznyh zhelezobetonnyh balok s gibridnym armirovaniem rastyanutoj zony central'nogo opornogo secheniya* / A. I. Gil', E. D. Lazovskij // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. – 2019. – № 16. – P. 59–64. (rus)

4. Gil', A. I. *Rezultaty eksperimental'nyh issledovanij soprotivleniya izgibu staticheski neopredelimyh zhelezobetonnyh balok s kombinirovannym armirovaniem rastyanutoj zony opornogo secheniya* / A. I. Gil' // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki. – 2021. – № 16. – S. 58–64. (rus)

5. Hil, A. I. *Analysis of the bending continuous rc-beams with hybrid reinforcement in the tensile zone under intermedia support* / A. I. Hil, Y. D. Lazouski // Vestnik BrGTU. – 2021. – № 3. – P. 5–8.

6. SP 5.03.01-2020 *Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii* / M-vo arhitektury i stroi-tel'stva Resp. Belarus'. – Minsk: 2020. – 236 pp. (rus)