

*Бактыгулов К.*

## БАЙЛАНЫШТАРЫ МЕНЕН АЙКАЛЫШТЫРЫЛГАН УСТУНДАРДЫ ЭСЕПТӨӨ УСУЛДАМАЛАРЫ

*Бактыгулов К.*

## МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ БАЛОК СО СВЯЗЯМИ

*Бактыгулов К.*

## THE CALCULATION METHOD REINFORCED CONCRETE COMPOSITE BEAMS WITH TIES

УДК: 624.012.35-624.012.45

*Бул макалада ийилүүгө дуушар болгон бириктирилген темир бетон конструкцияларын эсептөө усулдары талданган, курама темир бетон сундурмаларына таянма болот профилденген төшөмдөр менен арматураланган чулу темир бетон калкаларынын бирге иштөөсүн камсыздоо ыкмалары келирилген, ошондой эле эсептөөчү машиналарга салуу менен топтолгон деформациялар усулунун негизинде бириктирилген устундарды эсептөөнү ишке ашыруу тууралуу баяндалган.*

**Негизги түшүнүктөр:** бириктирилген устун; такта-сундурма; текиши жайылган жүктөм; жүк көтөрүмдүүлүк жана деформациялуулук; топтолгон деформациялар усулу.

*В данной статье проведен анализ методов расчета комбинированных изгибаемых железобетонных конструкций и способы обеспечения совместной работы монолитных железобетонных перекрытий, армированных стальными профилированными настилами и опертых на сборные железобетонные прогоны, а также изложено о создании методики расчета комбинированных балок на основе метода сосредоточенных деформаций с реализацией на вычислительной технике.*

**Ключевые слова:** комбинированная балка; плита-прогон; равномерно-распределенная нагрузка; несущая способность и деформативность; метод сосредоточенных деформаций.

*This work considers the analysis of the method of calculation of the combined bending ferro-concrete constructions and providing the co-work of the monolytic ferro-concrete coverings fitted by steel profiled flooring and combined ferro-concrete purlins, as well as the creating of the method of calculation of combined beams basing on the method of concentrated deformations realized on calculating technology.*

**Key words:** combined beam; slab purlin; equally-distributed loading; carrying capacity and deformability; method of concentrated deformations.

В многоэтажных зданиях и сооружениях комбинированная балка, по конструктивной форме, представляет собой изгибаемый элемент, состоящий из железобетонной плиты и прогона. Несущая способность и деформативность таких железобетонных конструкций определяется прочностью и жесткостью самих элементов и связи между ними. При отсутствии деформации сдвига на контакте «плита – прогон» комбинированная балка может рассматриваться как монолитная. Однако такое

допущение не строго характеризует работу таких конструкций, так как при связях с любой степенью жесткости имеет место взаимный сдвиг элементов.

Вместе с тем для ряда практических задач, при обеспечении определенных соотношений прочности и жесткости самих элементов и связи между ними, этой погрешностью пренебрегают. В этом случае продольные деформации по высоте сечения комбинированных балок принимаются как линейно распределенные. В частности такой подход реализован при проектировании мостовых сооружений по методике приведенных сечений [1]. При этом приведение комбинированного сечения к однородному осуществляется делением ширины плиты на отношение модулей упругости стали ( $E_s$ ) и бетона ( $E_b$ ). Для расчета комбинированных балок необходимо выполнение условий: чтобы нейтральная ось пересекала стальной прогон, а напряжения в верхнем и нижнем поясе прогона достигли расчетных значений одновременно.

Дальнейшее развитие данный метод получил в работе [7], где предложено учитывать пластическую работу бетона и ограниченное развитие пластических деформаций стали в поясах прогона. Критерием предельного состояния по прочности принимается величина предельных упруго-пластических деформаций в центре тяжести бетонного сечения  $\varepsilon_b^{pp} = 1,6\%$  и стальных поясов  $\varepsilon_s^{pp} = 0,6-2,5\%$ .

Расчет прочности стальных поясов осуществляется в традиционной форме проверки напряжений с введением к моменту сопротивления или расчетным сопротивлениям материалов поправочных коэффициентов, приводящих расчет к деформационному критерию предельного состояния. Прогобы комбинированных балок определяются по правилам строительной механики с учетом жесткостей приведенных сечений.

На основе методики расчета железобетонных перекрытий с жесткой арматурой, изложенной в руководстве [6] показано, что комбинированные перекрытия при обеспечении полной совместной работы плиты и стальных прогонов могут рассматриваться как железобетонные конструкции с жесткой арматурой. Для комбинированных балок таврового сечения рассматривается 3 случая положения

нейтральной оси: в бетонной полке; в стенке или верхней полке прогона. Однако, для первого случая, в отличие от [6], с целью удобства построения алгоритма расчета на вычислительной технике принято, что нейтральная ось не совпадает с осью полки.

Согласно английским нормам комбинированные балки рассчитываются по несущей способности также в зависимости от положения нейтральной оси: ось в пределах полки таврового сечения; она проходит по верхней полке и пересекает стенку стального прогона.

Рассмотренные методики справедливы для расчета комбинированных балок с достаточно жесткими и прочными связями. Однако, экспериментальные исследования многих ученых свидетельствуют о значительном влиянии податливости анкерных связей на прочность и деформативность комбинированных конструкций. Работа таких конструкций, в предположении упругой работы составляющих элементов, наиболее строго может быть описана теорией составных стержней [5].

Основной характеристикой в составных конструкциях с податливыми связями является коэффициент жесткости ( $\xi$ ), представляющий собой отношение сдвигающего усилия ( $T$ ), к деформации сдвига связей ( $\Delta$ ).

Согласно [5] прочность составного сечения проверяется по формуле

$$M \leq M_b + M_f + T_i \cdot Z_i \quad (1)$$

где:  $M_b$  и  $M_f$  - изгибающие моменты, воспринимаемые соответственно прогоном и полкой комбинированных балок;

$T_i$  - сдвигающее усилие, воспринимаемое  $i$ -й связью;

$Z_i$  - расстояние между осями прогона и полки в  $i$ -ом сечении.

Усилия сдвига в связях определяются решением известного дифференциального уравнения

$$T''/\xi = \gamma \cdot T + \Delta \quad (2)$$

где:  $\gamma = (I/(E_b \cdot A_b)) + (I/(E_f \cdot A_f)) + (Z^2/(E \cdot J))$ ;

$$\Delta = -(M^0 \cdot Z_i)/(\sum E \cdot J)$$

Решение уравнения (2) для свободно опертых однопролетных составных стержней, загруженной равномерно-распределенной нагрузкой записывается

$$T = ((q \cdot Z_i)/(2 \cdot \gamma \cdot \sum E \cdot J)) \cdot (\ell^2 - x^2) - ((q \cdot Z_i)/(\gamma \cdot \lambda^2 \cdot \sum E \cdot J)) \cdot ((1 - \operatorname{ch} \lambda x)/(\operatorname{ch} \lambda \ell))$$

$$\tau = T' = -(q \cdot Z \cdot x)/(2 \cdot \gamma \cdot \sum E \cdot J) - ((q \cdot Z_i)/(\gamma \cdot \lambda \cdot \sum E \cdot J)) \cdot ((\operatorname{sh} \lambda x)/(\operatorname{ch} \lambda \ell)) \quad (2)$$

где:  $\lambda = \sqrt{\xi \cdot \gamma}$ ;  
 $\ell$  - половина пролета;  
 $x$  - координаты сечения.

В формулах (3) первые члены равенств представляют собой значения  $T$  и  $\tau$ , возникающие в монолитной балке, а вторые члены выражают влияние податливости связей сдвига.

В работах П.Ф. Дроздова получено дифференциальное уравнение продольной силы в столбах односвязной диафрагмы, загруженной горизонтальной нагрузкой, распределенной по любому закону по высоте здания

$$N'' - \lambda^2 \cdot N = (1/S) \cdot ((M_b/B_a) - (M_u/\sum B)) \quad (4)$$

где:  $\lambda^2 = (K \cdot B_u) / (S \cdot \sum B)$ ;

$S$  - характеристика податливости связей.

Уравнение (4), учитывающее податливость перемычек диафрагмы, совпадает с уравнением (2), хотя оно получено иным путем.

На основе основных положений работ [5] разработана методика расчета монолитных железобетонных плит пол стальному профилированному настилу [8]. В этой работе получены дифференциальные уравнения сдвигающих усилий, прогибов, учитывающие податливость между составными поясами (бетонной плиты и настила) до и после образования трещин, даны их решения. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили правильность расчетных положений.

Метод расчета прочности комбинированных балок со сплошными плитами, который основывается на предположении, что прочность нормального сечения ограничивается прочностью связей:

$$T < N_f \quad (5)$$

$$x = T / (R_b \cdot b'_f) \quad (6)$$

При  $x \leq h'_f$  прочность нормального сечения выражается

$$M \leq T \cdot (h_0 - 0,5 \cdot x) \quad (7)$$

При  $x > h'_f$  усилие сжатой части стального прогона ( $N'_{pr}$ ) определяется

$$N'_{pr} = (R_{pr} \cdot A_{pr} - T) / 2 \quad (8)$$

А несущая способность нормального сечения комбинированной балки вычисляется как сумма моментов внутренних сил относительно точки приложения равнодействующей усилий растяжения в стальном прогоне

$$M \leq T \cdot e_1 - N'_{pr} \cdot e_2 \quad (9)$$

В исследованиях Р.П. Джонсона показано, что в отдельных случаях прочность комбинированных балок может быть определена несущей способностью бетонной плиты на раскалывание. Рекомендуется для этого случая определять величину сдвигающего усилия, воспринимаемого железобетонной плитой, по формуле

$$T = 0,9 \cdot \ell_x + 0,8 \cdot R_b \cdot \ell_x + 0,7 \cdot R_w \cdot f_w \quad (10)$$

где:  $\ell_x$  - длина пролета среза;

$f_{\omega}$  – площадь поперечного сечения арматуры в рассматриваемом сечении.

Перемещения (прогибы) комбинированных балок с достаточно жесткими и прочными связями сдвига определяют по правилам строительной механики с учетом кратковременной и длительной ползучести бетона.

Расчет прогибов комбинированных балок с податливыми связями в соответствии с теорией составных стержней при загрузке равномерно-распределенной нагрузкой с интенсивностью  $q$  определяются по формуле

$$Y_{(0)} = (q/(\lambda^4 \cdot D)) \cdot (1/(\text{ch}\lambda\ell) + (\lambda^2 \cdot \ell^2) / 2 - 1) + (5 \cdot q \cdot \ell^4) / (24 \cdot E_0 \cdot J_0) \quad (11)$$

где:  $1/D = 1/(\sum E \cdot J - 1/(E_0 \cdot J_0))$ ;

$$E_0 \cdot J_0 = \sum E \cdot J + (E_b \cdot A_b \cdot E_f \cdot A_f \cdot Z_i^2) / (E_b \cdot A_b + E_f \cdot A_f)$$

В зарубежных нормах величину прогибов комбинированных балок определяют в зависимости от соотношений расчетной ширины полки ( $b'_f$ ) к пролету ( $\ell_0$ ) с ограничением предельной их величины минимальным значением отношения пролета к полной высоте балок ( $\leq 25$ ).

В работе [3], как уже отмечалось выше, исследовалась совместная работа комбинированных балок со стальными и железобетонными прогонами шпоночного соединения с монолитной железобетонной плитой, армированной стальными профилированными настилами. По результатам испытания опытных образцов на сдвиг на основе расчета анкеров закладных деталей железобетонных конструкций получена зависимость для определения прочности анкерных связей

$$T_a = ((0,477 \cdot \sqrt[3]{R_b} \cdot \sqrt{R_s} \cdot f_a \cdot m_a) / (1 + 0,3 \cdot f_a)) \cdot (0,1 \cdot m_a + 0,9) \cdot (\sqrt{b_{cp}} / \sqrt{h}) \quad (12)$$

где:  $T_a$  – расчетное значение сдвигающего усилия, воспринимаемое одной анкерной связью;

$f_a$  – площадь поперечного сечения одного анкерного стержня;

$m_a$  – количество анкерных стержней на расчетном участке;

$h$  – высота ребра плиты, см;

$b_{cp}$  – средняя ширина ребра плиты, см.

При этом за предельное значение сдвигающих усилий принималась так называемое критическое его значение, которому соответствует точка с минимальной кривизной на графике зависимости «сдвигающая сила – перемещение».

На основании исследования комбинированных балок на действие вертикальных нагрузок автором предлагаются формулы для определения несущей способности с учетом податливости анкеров. Для конструкции комбинированных балок со стальными

прогонами в зависимости от положения нейтральной оси эти формулы имеют вид:

а) при расположении нейтральной оси в верхней полке прогона

$$M = T \cdot (a + h_{пл} - x/2) + b_n \cdot b_n \cdot [(\delta - a)^2 + \delta \cdot (h_c - \delta)] + 2 \cdot b_c \cdot \delta_c \cdot (h_c/2 - \delta) \cdot (h_c/2 - a) \quad (13)$$

в) при пересечении нейтральной осью стенки стального прогона

$$M = T \cdot (a + h_{пл} - x/2) + b_n \cdot b_n \cdot \delta \cdot (h_c - \delta) + b_c \cdot \delta_c \cdot [(h_c/2 - a)^2 + (h_c/2 - \delta)^2] \quad (14)$$

Вертикальные перемещения (прогибы) комбинированных балок со стальными прогонами определялись по методике, применяемой для расчета предварительно напряженных ригелей с внешним армированием, основанной на теории составных стержней

$$f = f'_1 \cdot [(B_n / (B_\delta + B_a)) - 1] \cdot v \quad (15)$$

где:  $B_n$ ,  $B_\delta$ ,  $B_a$  – соответственно жесткость приведенного сечения относительно его центра тяжести и суммарная жесткость бетонного и стального сечений относительно собственных центров тяжести;  $v$  – коэффициент податливости связи, определяемой по таблице 7 рекомендаций [4] с учетом податливости анкерных связей.

Жесткость анкерных связей рекомендуется определять по формуле

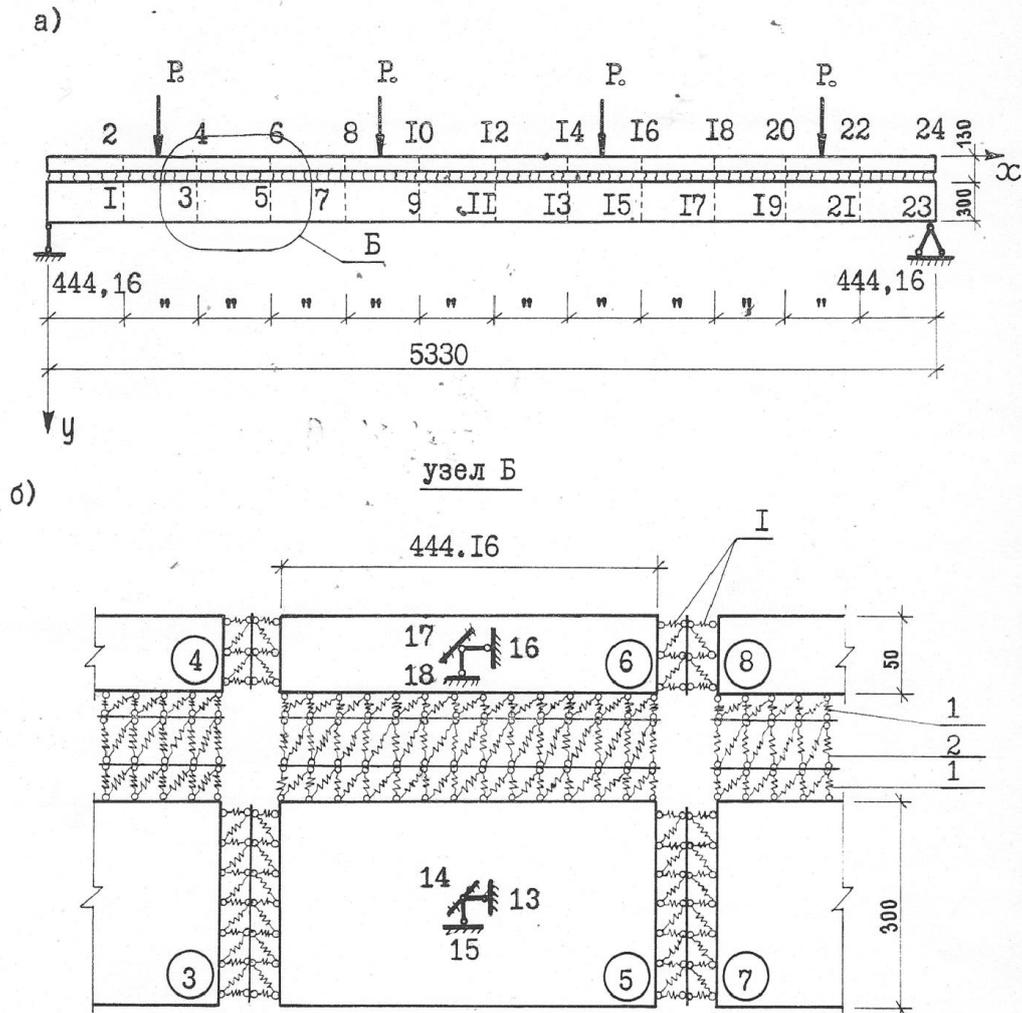
$$\xi_a = 0,14 \cdot E_b \cdot d_a \cdot (b_{cp}/h) \cdot (6/h)^3 \cdot m_a \quad (16)$$

где:  $d_a$  – диаметр анкерного стержня.

В работе отмечается, что в комбинированной балке со сборным железобетонным прогоном предлагаемой конструкции обеспечивается полная совместность работы составляющих ее элементов. На основе сказанного расчет по несущей способности и деформациям предложено осуществлять как для монолитного железобетонного изгибаемого элемента.

Расчет железобетонных конструкций, объединенных податливыми связями, может выполняться методом сосредоточенных деформаций [2 и др.]. Простота учета податливых соединений между элементами или в опорных устройствах при расчете сборно-монолитных железобетонных или вообще составных конструкции является одним из достоинств этого метода. Основные положения метода сосредоточенных деформаций были выдвинуты А.Р. Ржаницыным, применительно же к расчету железобетонных конструкций разработаны М.И. Додоновым и далее развито А.М. Зулпуевым.

Расчетная модель комбинированной балки представлена на рис. 1, а.



**Рис.1.** Расчетная модель комбинированной балки по методу сосредоточенных деформаций  
 а)-схема разбивки комбинированной балки; б)-элементы и связи метода сосредоточенных деформаций;  
 1-фигтивные швы; 2-реальные швы.

Степень дискретизации конструкции по длине на элементы МСД определяется, как обычно, требуемой точностью расчета. Вертикальные плоскости сосредоточенных деформаций образуют связи МСД, жесткость которых определяется свойствами материалов, сечениями прогона и плиты; в горизонтальной плоскости располагаются, кроме того, реальные связи сдвига между составляющими элементами составной конструкции. Совместно реальные и собственные связи, работая

по схеме последовательного соединения между собой, образуют комплексные связи метода сосредоточенных деформаций (рис. 1, б).

Прочность и жесткость комбинированной балки с плитой по стальному профилированному настилу определяются главным образом характеристиками нормальных сечений прогона (рис. 2, а) и сдвиговыми характеристиками ребристых связей между плитой и прогоном (рис. 2, б).

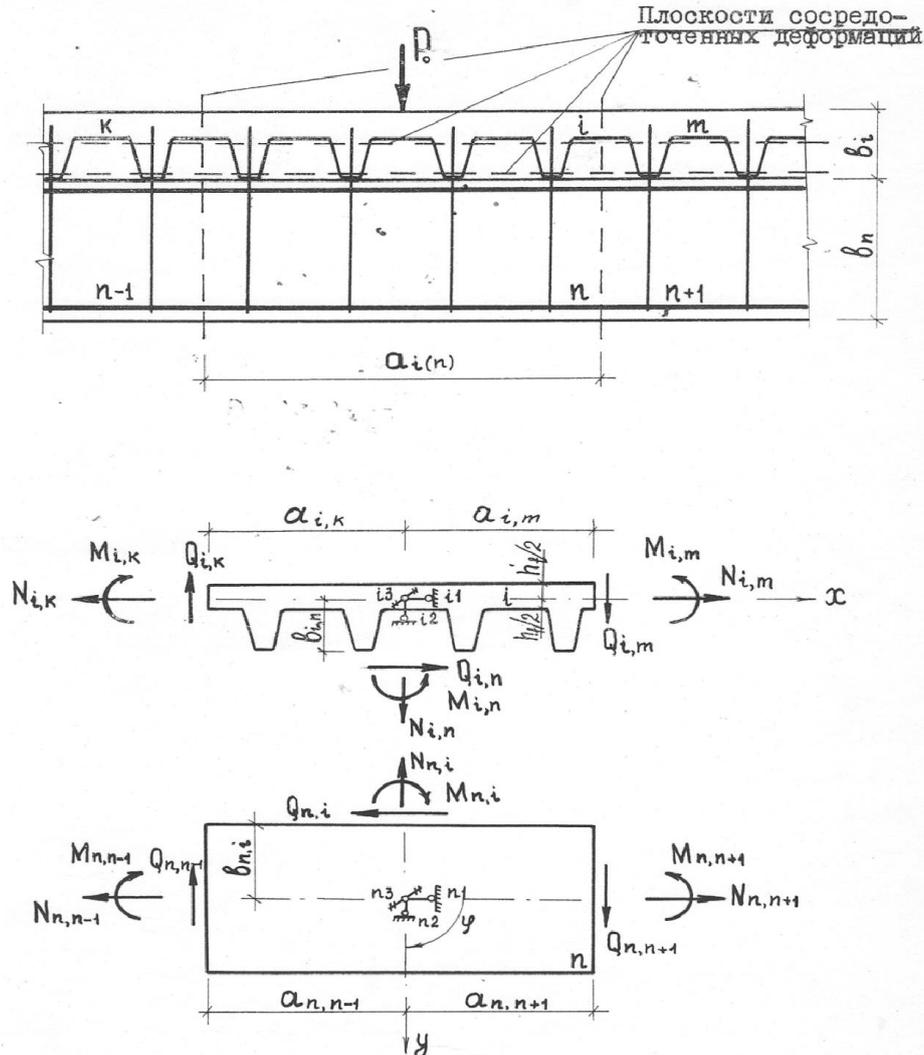


Рис. 2. Расчетная схема комбинированной балки по методу сосредоточенных деформаций  
а)-схема разбивки; б)-схема внутренних усилий

Деформативность контакта «плита - прогон» через вертикальные ребра плиты и гибкие стержневые анкеры будет определяющей в направлении сдвига между плитой и прогоном; в то же время жесткость такого соединения в направлении от плиты к прогону очень большая.

Как показано на рис. 2, а, по высоте комбинированной балки можно провести две горизонтальные плоскости сосредоточенных деформаций. При такой разрезке полка плиты рассматривается как самостоятельные элементы МСД, а вертикальные ребра считаются реальными связями объединения элементов плиты и прогона.

В принятой расчетной схеме внутренние силы между прогоном и плитой отнесены только к одной плоскости сосредоточенных деформаций - к верхней грани прогона (рис. 2, а).

Каждый жесткий  $i$ -й элемент МСД обладает тремя степенями свободы - он может перемещаться поступательно на величину  $U_i$  и  $V_i$  в направлении

осей  $X$  и  $Y$  и поворачиваться на угол  $\varphi_i$  в плоскости составной балки (рис. 2, б).

Расчет по МСД ориентирован прежде всего на использование ЭВМ.

В расчет закладываются полные диаграммы « $\sigma$  -  $\epsilon$ » для бетона и арматуры, полученные в условиях одноосного сжатия и растяжения эталонных образцов, а также диаграммы деформирования реальных связей при сдвиге « $S$  -  $\Delta$ ».

Условия равновесия системы выражается матричным уравнением вида

$$[R] \cdot \{\omega\} = \{P\} \quad (17)$$

где  $[R]$  - матрица внешней жесткости системы;  
 $\{\omega\}$  - вектор перемещений;  
 $\{P\}$  - вектор внешних сил.

Глобальную нумерацию элементов МСД и связей метода перемещений для всей системы целесообразно вести по короткому направлению (в данном случае сверху - вниз - направо), при этом

ширина ленты матрицы внешней жесткости  $[R]$  будет сравнительно узкой. Как показано на рис. 1, а, при такой нумерации число элементов рассчитываемой конструкции в коротком направлении будет  $m = 2$ , а ширина ленты составит  $L = 3 \cdot 2 + 2 = 8$ .

Связь между внутренними усилиями по плоскостям сосредоточенных деформаций и соответствующими деформациями выражается в виде

$$\{F\} = [C] \cdot \{\lambda\} \quad (18)$$

где  $\{F\}$  – вектор внутренних усилий;  
 $[C]$  – матрица внутренней жесткости сечений;  
 $\{\lambda\}$  – вектор сосредоточенных деформаций (взаимных смещений и поворотов элементов МСД).

Для всех сечений элементов МСД по плоскостям сосредоточенных деформаций принимается гипотеза плоских сечений.

В качестве результатов счета находятся перемещения, взаимные смещения и внутренние силы элементов несущей системы при обеспечении прочности по нормальным сечениям, при необходимости в расчет могут быть заложены условия прочности то наклонным сечениям. Расчетom проверяется несущая способность принятых сечений при заданных внешних силах или находятся значения последних, при которых наступит разрушение конструкции.

Результаты расчета сборного железобетонного перекрытия по методу сосредоточенных деформаций на действие горизонтальной нагрузки, с учетом нелинейной деформации межплитных швов, показали хорошую сходимость с данными опыта.

Комбинированные перекрытия с использованием стальных профилированных настилов нашли широкое применение в зарубежном строительстве. Особенно эффективным оказалось использование этих конструкций в высотном строительстве в сочетании со стальным несущим каркасом. Как следует из обзора, возведение монолитных железобетонных перекрытий в опалубке-арматуре из стальных профилированных настилов, взамен традиционно возводимых, существенно снижает трудозатраты, сокращает сроки строительства.

Обеспечением совместной работы составляющих элементов конструктивной системы (настила с бетоном и плиты с прогонами) достигается снижение расхода материалов. Имеющиеся примеры использования и многочисленные исследования показали перспективность вертикальных стержневых анкеров с точки зрения индустриальности и практической надежности в работе для объединения монолитной плиты с прогонами. Разработанные в странах СНГ и за рубежом специальное сварочное оборудование для приварки стержневых анкеров позволяют снижать трудоемкость анкеров.

Использование стальных прогонов в составе комбинированного перекрытия при возведении зданий небольшой этажности увеличивает расход металла до 30%. Техничко-экономический анализ

показывает, что с применением железобетонных прогонов можно снизить расход металла на единицу площади перекрытия до 25%. Известные конструкции железобетонных прогонов трудоемки при изготовлении и монтаже. С целью расширения области применения, снижения металлоемкости и трудоемкости возведения комбинированных перекрытий с использованием стального профилированного настила требуется усовершенствование конструкции сборного железобетонного прогона и стыка объединения его с монолитной плитой.

Установлено, что в странах СНГ и за рубежом выполнен значительный объем экспериментальных исследований по изучению работы комбинированных балок со сплошными бетонными плитами и накоплен большой опыт их проектирования. На основании накопленного материала разработаны методы расчета комбинированных балок с достаточно жесткими и прочными связями сдвига, основанные на упругой или пластической работе материалов. Вместе с тем, очень мало исследований, посвященных изучению комбинированных балок с податливыми связями сдвига, что не позволяет разработать обоснованные методы расчета таких конструкций. Имеющиеся разработки в большинстве своем приспособлялись к нормативным руководствам для железобетонных конструкций с гибкой или жесткой арматурой, а также обычных стальных конструкций. Отдельные работы ограничивались рассмотрением только упругой работы связей и материалов конструкции.

На основании вышеизложенных разработана новая конструкция сборно-монолитных железобетонных перекрытий с использованием стальных профилированных настилов. Железобетонные перекрытия такой конструкции обеспечивает снижение его металлоемкости и трудоемкости возведения, разработана методика расчета на основе метода сосредоточенных деформаций с реализацией на вычислительной технике с последующей экспериментальной проверкой.

#### **Выводы:**

1. Разработана методика экспериментального определения коэффициента жесткости связей сдвига и проведения исследования.
2. Выполнен анализ экспериментальных исследований и запроектированы образцы комбинированных балок со сборными железобетонными прогонами предлагаемой конструкции.
3. Исследовано напряженно-деформированное состояние экспериментальных образцов на всех этапах нагружения, вплоть до разрушения.
4. Разработана методика расчета комбинированных балок с податливыми связями сдвига на основе метода сосредоточенных деформаций.

#### **Литература:**

1. Гишман Е.Е. Мосты со стальными балками, объединенные с бетонной плитой. - М.: Дориздат, 1952. - 86 с.

2. Додонов М.И., Бактыгулов К.Б, Экспериментально-теоретическое исследование сборно-монолитных железобетонных перекрытий с внешним армированием / Моск. инж. - строит. ин-т. – М.: 1987. - 41с. - Деп. во ВНИИС, № 8438.
3. Карповский М.Г. Совместная работа балок с плитами перекрытия армированными профилированным стальным настилом. - Дисс. канд. техн. наук. – М.: НИИЖБ. 1985. – 152 с.
4. Рекомендации по проектированию предварительно-напряженных ригелей с внешним армированием для гражданских каркасных зданий с укрупненной сеткой колонн / ЦНИИЭП учебных заведений. - М.: Стройиздат, 1976. – 71с.
5. Ржаницын А.Р. Теория составных стержней строительных конструкций. -М.: Стройиздат., 1948. -192 с.
6. Руководство по проектированию железобетонных конструкций с жесткой арматурой. - М.: Стройиздат, 1978. -55 с.
7. Стрелецкий Н.Н. Сталежелезобетонные мосты. - М.: Транспорт, 1965. –376 с.
8. Хабибулла. Прочность, деформативность и трещиностойкость монолитных балочных плит с внешним армированием профилированным настилом. –Автореф. дисс. ... канд. техн. Наук. –М.: МИСИ им. В.В Куйбышева, 1980. – 20 с.

**Рецензент: к.т.н., доцент Рыспаев Дж.А.**