

Экспериментальное и расчетное  
обоснование конструктивных  
решений индустриальных  
конструкций с петлевыми стыками

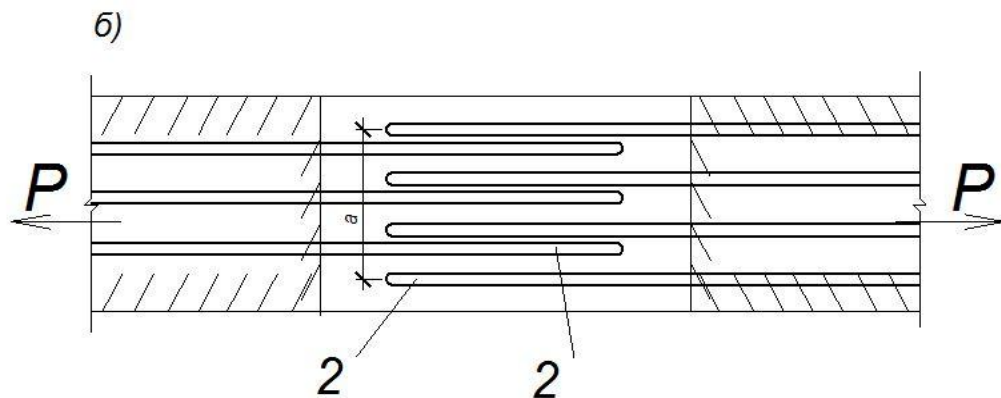
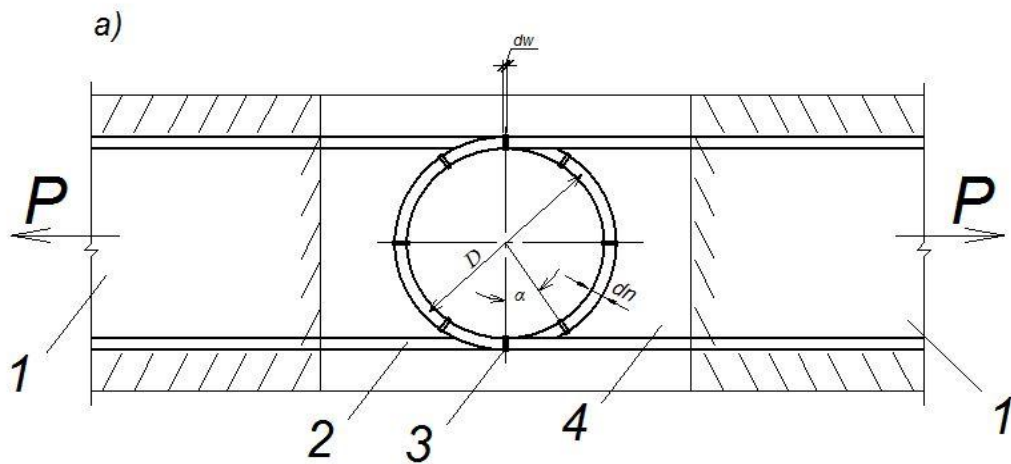
Уровень индустриализации строительства, особенно специальных типов сооружений, во многом определяется технологичностью стыкования между собой сборных элементов.

Получившие распространение сварные стыки арматуры трудоемки и не всегда достаточно надежны, в связи с возникновением сварочных напряжений арматуры, трудностью обеспечения надлежащего контроля качества сварки, а также в связи с появлением усталостных явлений.

Петлевые стыки арматуры впервые были предложены академиком Г.П. Передерием для стыкования растянутых элементов сборных железобетонных ферм.

В дальнейшем подобный тип стыка был применен для соединения растянутой арматуры изгибаемых железобетонных элементов.

# Принципиальная схема петлевого стыка



а) – фасад;

б) – план

1 – соединяемые элементы;

2 – рабочая арматура;

3 – парные поперечные шпильки;

4 – бетон омоноличивания;

Петлевые стыки являются надежным видом соединений рабочей арматуры сборных железобетонных элементов, при этом отпадает необходимость проведения сварочных работ, что дает возможность петлевым стыкам обладать достаточно высокой усталостной прочностью.

Однако, широкое использование бессварных стыков в практике строительства сдерживается из-за отсутствия методик расчёта и в связи с отсутствием требований по конструированию петлевых стыков в нормативных документах.

## Петлевое соединение обладает несомненными преимуществами перед традиционными сварными, муфтовыми, стыками-перепусками:

- технологичность монтажа;
- отсутствие жестких требований по несоосности арматуры;
- отсутствие сварочных напряжений;
- повышенная надежность по анкерующей способности в связи с замкнутостью ветвей растянутой и сжатой арматуры по сравнению с прямыми перепусками;
- благоприятное напряженное состояние бетонного ядра стыка, образованного встречными арматурными петлями, не требующего, как правило, поперечной арматуры;
- высокая усталостная прочность.

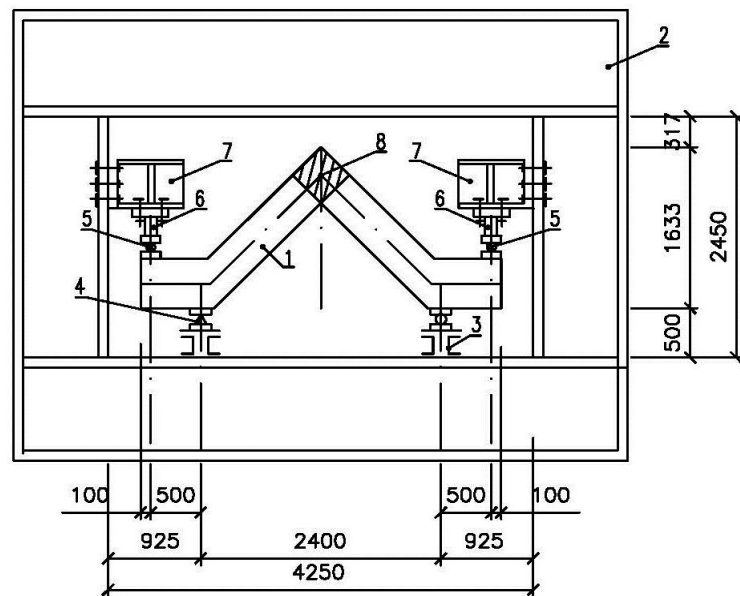
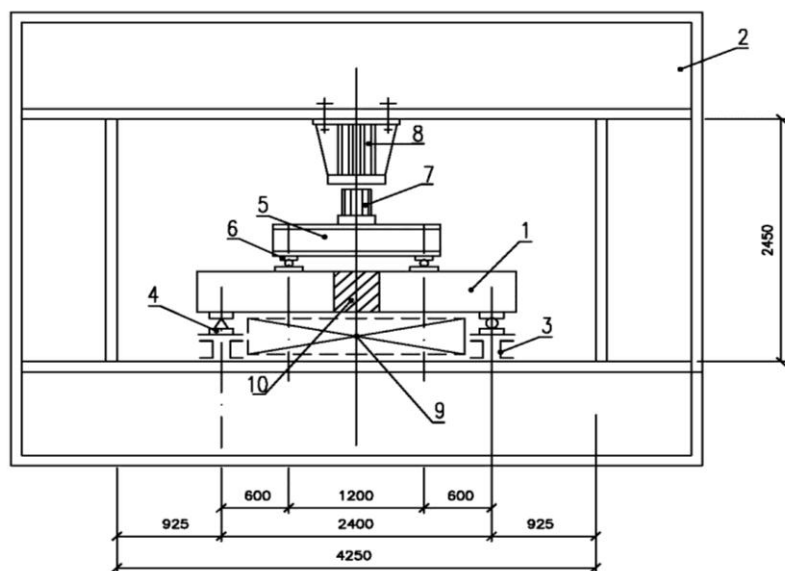
Кроме того, петлевой стык может в равной степени использоваться как в пролёте, так и в угловых соединениях перекрытий со стеновыми конструкциями.

При проектировании железобетонных строительных конструкций АЭС ВВЭР-ТОИ были приняты технические решения, снижающие использование трудоёмких сварных соединений арматуры, за счёт применения бессварных петлевых стыков.

Заложенные в проекте конструктивные решения стыков с петлевым перепуском ранее в строительстве не применялись, и отличаются от разработанных, и применяемых в основном, в мостостроении и гидротехническом строительстве петлевых стыков «Передерия».

Это обстоятельство вызвало необходимость экспериментальной проверки на крупномасштабных моделях принятых проектных решений.

При разработке крупномасштабных моделей петлевых стыков принято геометрическое подобие между натурной конструкцией и моделью. Для получения прямых результатов, дополнительно принято решение выполнить модели двух типов стыков «углового» и «линейного» в натуральную величину.





Модели «линейных» стыков были разработаны в пяти вариантах. Это связано с тем, что помимо статических испытаний, модели «линейных» стыков были испытаны на следующие нагрузки и воздействия:

- на статические нагрузки с учётом температурных воздействий;
- на действие поперечной силы;
- на динамические воздействия (сейсмические воздействия);
- испытания контрольной монолитной балки без стыка, на указанные выше воздействия.

Особенность испытания «углового» стыка состоит в том, что он может быть нагружен как положительным изгибающим моментом (закрытие угла), так и отрицательным изгибающим моментом (открытие угла).

# Общий вид линейной модели при испытаниях на статическую нагрузку:



## Общий вид угловой модели:





# Общий вид испытаний на температурную нагрузку:



# Общий вид испытаний на динамическое воздействие:



# Результаты испытаний железобетонных моделей с петлевыми стыками на статическую нагрузку.

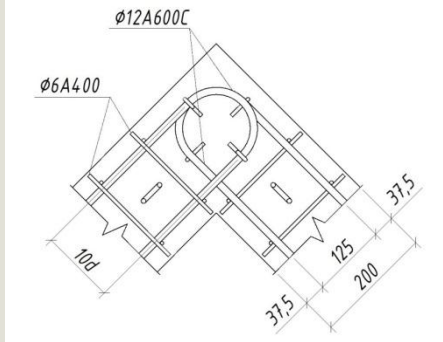
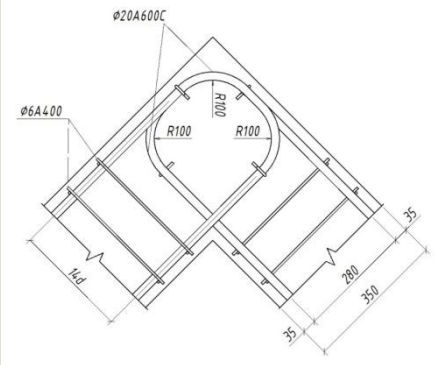
№ п/п	Индекс модели	Вид испытания	Конструкция стыка	Вычисленная разрушающая нагрузка $P_m$ , тс	Опытная разрушающая нагрузка $P_o$ , тс	Прочностной коэффициент $k_1=P_o/P_m$	Опытная предельная нагрузка $P_p$ , тс	Прочностной коэффициент $k_2=P_p/P_m$
1	БМ-1	На действие изгибающего момента		28,90	33,50	1,16	37,96	1,31
2	СЛ 2.1.1.1. (1)	На действие изгибающего момента		10,96	11,60	1,06	13,60	1,24
3	СЛ 2.1.1.1. (2)			10,98	11,50	1,05	12,16	1,11



№ п/п	Индекс модели	Вид испытания	Конструкция стыка	Вычисленная разрушающая нагрузка $P_m$ , тс	Опытная разрушающая нагрузка $P_o$ , тс	Прочностной коэффициент $k_1 = P_o/P_m$	Опытная предельная нагрузка $P_p$ , тс	Прочностной коэффициент $k_2 = P_p/P_m$
4	СЛ 2.2.1. (1)	На действие изгибающего момента		28,98	23,25	0,80	24,05	0,83
5	СЛ 2.2.1. (2)	На действие изгибающего момента		29,00	24,25	0,84	28,23	0,97
6	СЛ 2.2.2. (1)	На действие изгибающего момента		28,95	24,50	0,85	26,14	0,90
7	СЛ 2.2.2. (2)	На действие изгибающего момента		29,00	24,05	0,83	26,67	0,92

№ п/п	Индекс модели	Вид испытания	Конструкция стыка	Вычисленная разрушающая нагрузка $P_m$ , тс	Опытная разрушающая нагрузка $P_o$ , тс	Прочностной коэффициент $k_1=P_o/P_m$	Опытная предельная нагрузка $P_p$ , тс	Прочностной коэффициент $k_2=P_p/P_m$
8	СЛ 2.2.4. (1)	На действие изгибающего момента		28,97	24,05	0,83	26,93	0,93
9	СЛ 2.2.4. (2)			28,97	20,91	0,72	22,74	0,78
10	СЛ 2.2.3. (1)	На действие поперечной силы		34,86	38,50	1,10	42,97	1,23
11	СЛ 2.2.3. (2)			37,34	40,00	1,07	47,50	1,27



№ п/п	Индекс модели	Вид испытания	Конструкция стыка	Вычисленная разрушающая нагрузка $P_m$ , тс	Опытная разрушающая нагрузка $P_o$ , тс	Прочностной коэффициент $k_1 = P_o / P_m$	Опытная предельная нагрузка $P_p$ , тс	Прочностной коэффициент $k_2 = P_p / P_m$
12	СУ 1.1.1 (1)	На действие изгибающего момента		11,36	11,00	0,97	11,56	0,94
13	СУ 1.1.1 (2)			11,47	13,00	1,13	14,00	1,12
14	СУ 1.2 (1)	На действие изгибающего момента		34,64	34,06	0,98	38,97	1,13
15	СУ 1.2 (3)			34,90	35,94	1,03	40,00	1,15

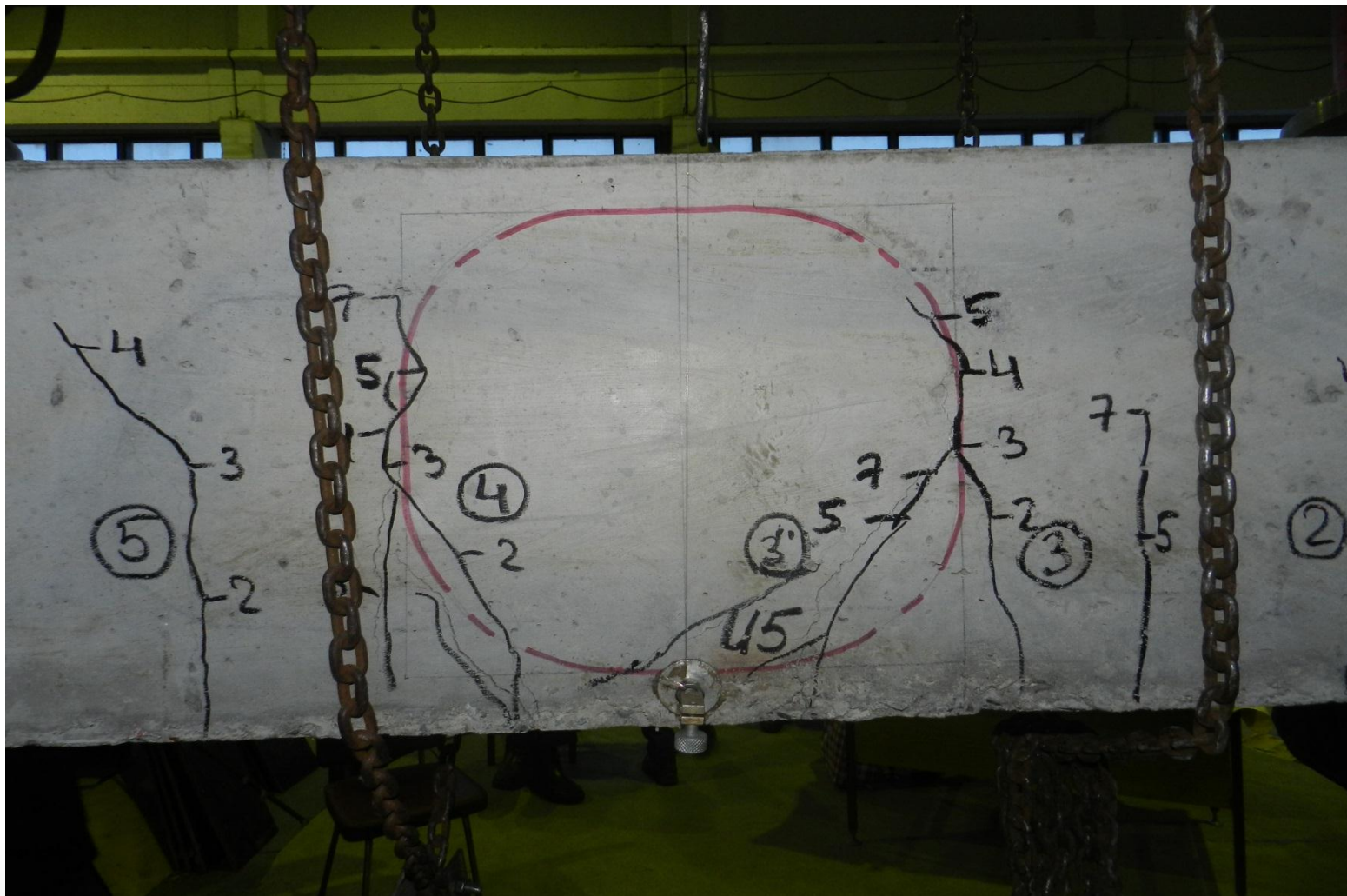
№ п/п	Индекс модели	Вид испытания	Конструкция стыка	Вычисленная разрушающая нагрузка $P_m$ , тс	Опытная разрушающая нагрузка $P_o$ , тс	Прочностной коэффициент $k_1 = P_o / P_m$	Опытная предельная нагрузка $P_p$ , тс	Прочностной коэффициент $k_2 = P_p / P_m$
16	СУ 1.2 (2)	На действие изгибающего момента		34,77	37,97	1,09	40,00	1,15
17	СУ 1.2 (4)			34,78	40,00	1,15	44,38	1,28

# Результаты испытаний петлевых стыков на температурные воздействия

Индекс модели	Конструкция стыка	Нагрузка, соответствующая температурному изгибающему моменту по заданному температурному перепаду, тс		Опытная разрушающая нагрузка в условиях воздействия заданного температурного перепада, тс
		Вычисленная	Опытная	
БМ-1		6,54 (проектная авария)	6,54	35,03
сл 2.2.2 (3)		13,64 (запроектная авария)	16,30	19,03
сл 2.2.2 (4)		6,30 (проектная авария)	10,40	19,35

# Характер разрушения статических моделей

Линейная модель:



Угловая модель:





Характер разрушения модели при испытании на динамические воздействия:



# ВЫВОДЫ

1. При испытаниях зафиксированы два вида разрушения моделей:
  - интенсивное проявление деформации текучести по прямолинейным сечениям по контакту с ядром или по круговым сечениям вокруг ядра петлевого стыка-перепуска;
  - по наклонным в плане сечениям петлевых стыков.
2. В моделях, испытанных на температурное воздействие совместно со статической нагрузкой зафиксировано нарушение анкерующей способности петлевых выпусков в результате влияния термоусадочных трещин в сжатой зоне.
3. Испытания стыков с поперечной и вспомогательной арматурой показали, что несущая способность не изменяется. Это показывает, что анкерующая способность обеспечивается без поперечной арматуры.
4. Испытание стыков на совместное действие изгибающего момента и поперечной силы показало, что трещины «обходят» ядро стыка и несущая способность конструкции со стыком в зоне поперечных сил превышает теоретическую разрушающую на 25%.
5. Испытания угловых стыков, в общем, показали более значительную прочность по сравнению с линейными стыками, даже при меньших перепусках – 10d и 14d их прочность обеспечивается.

В целом запроектированные конструкции испытанных петлевых стыков отвечают требованиям по несущей способности.

# ВЫВОДЫ

- При испытании монолитных железобетонных моделей на динамическую нагрузку, задаваемую поэтапно, был определён уровень динамической нагрузки, при которой возникают в арматуре напряжения текучести.
- Анализ формы разрушения петлевых стыков опытных моделей показал, что разрушение произошло от потери анкерующей способности петлевых выпусков, не имеющих надёжную анкеровку в сжатую зону, образующуюся в натурной конструкции при совместном действии статических и особых воздействий.
- Параллельно экспериментальным исследованиям разрабатывалась инженерная аналитическая методика расчёта усилий разрушения петлевых стыков: были рассмотрены четыре возможные формы разрушения, в том числе разработана методика расчёта усилий, при которых происходит потеря анкерующей способности петлевых выпусков. Результаты экспериментов не противоречат результатам, полученным с использованием аналитической методики.



# Методика Расчетов петлевых стыков по предельным состояниям

## Расчеты по первой группе предельных состояний

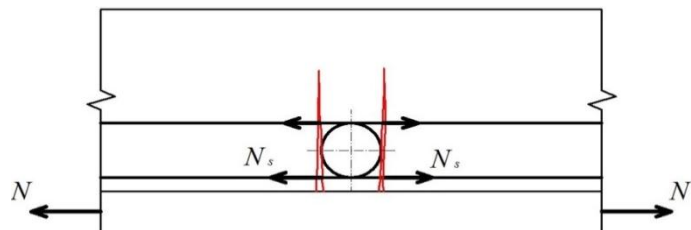
Формы разрушения и виды предельных состояний бетонного ядра петлевого стыка

Обозначение формы разрушения	Формы разрушения и виды предельных состояний бетонного ядра	Тип стыка	Расчётные формы разрушения стыков
А	Раскалывание ядра под петлями	Л-1	А или Б – на раскалывание ядра под петлями и на срез по наклонным сечениям (в зависимости от шага петель)
Б	Срез ядра по наклонным площадкам от вторичных поперечных сил	Л-2	Б, В** и Г – на срез по наклонным сечениям, кручение и на анкерующую способность
В	Сдвиг ядра от кручения	У-1	Б, В** и Г – на срез по наклонным сечениям, кручение и на анкерующую способность
Г	Потеря анкерующей способности петлевых выпусков с образованием шарнира	У-2	А и Г – на кручение и на анкерующую способность

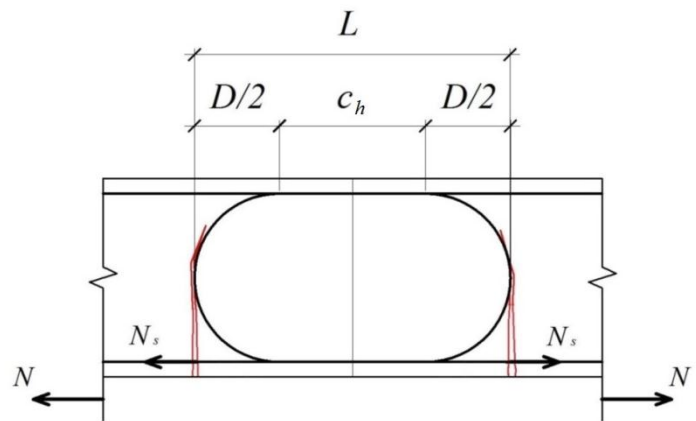
\*\* Методика распространяется на конструкции, испытывающие динамические воздействия (ударная волна, сейсмическая нагрузка) и претерпевающие попеременное растяжение на противоположных гранях.

## Схемы передачи усилий и положения магистральных трещин в линейных петлевых стыках

а)



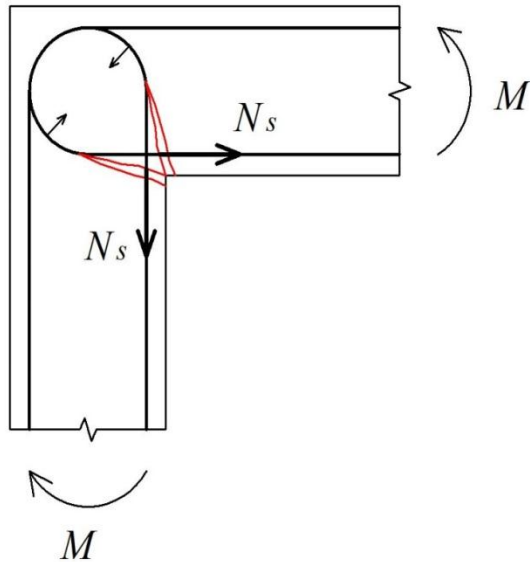
б)



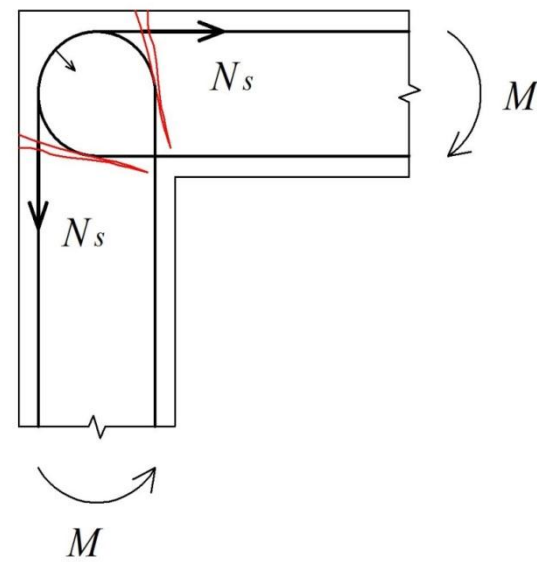
- а) тип Л-1 - петлевой стык с двумя рядами арматуры у растянутой грани;  
б) тип Л-2 - петлевой стык-перепуск с одним рядом арматурных сеток у растянутой и сжатой грани.

# Схемы передачи усилий и положения магистральных трещин в угловых петлевых стыках

а)



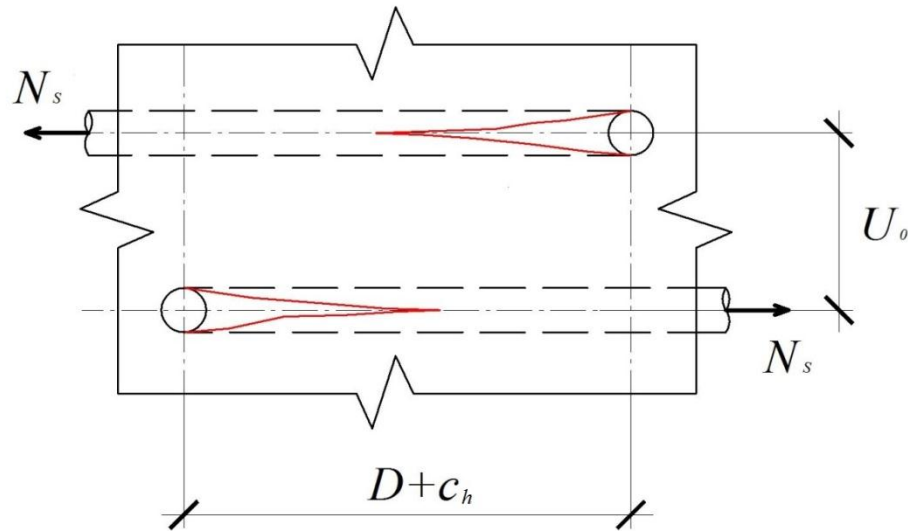
б)



а) Тип У-1 – угловой стык с растянутой внутренней гранью;

б) Тип У-2 – угловой стык со сжатой внутренней гранью.

## Предельное состояние при раскалывании – форма разрушения «А»



Расчет на раскалывание бетона под петлями производят из условия:

$$N_{cl} \geq N_s,$$

где  $N_{cl}$  – несущая способность ядра петлевого стыка;

$N_s$  – усилие в одном арматурном стержне.

Несущую способность ядра петлевого стыка  $N_{cl}$  определяют по формуле:

$$N_{cl} = \left[ 2.3 \left( \frac{U_0}{D + c_h} \right)^2 + 1.3 \right] \cdot S_{cl} \cdot k_c \cdot R_{bt},$$

где  $U_0$  — расстояние между стержнями арматуры в зоне стыка;

$c_h$  — длина горизонтальной прямой вставки;

$S_{cl}$  — площадь ядра петлевого стыка, определяемая по формуле:

$$S_{cl} = 0.25\pi \cdot D^2 + c_h \cdot (D + c_v) + c_v \cdot D,$$

где  $c_v$  — длина вертикальной прямой вставки;

$k_c$  — коэффициент, учитывающий повышение прочности ядра в зависимости от его армирования:

- в стыке типа Л1:

$$k_c = 1 + 0,125 \cdot \frac{A_c}{A_s} \leq 1.5,$$

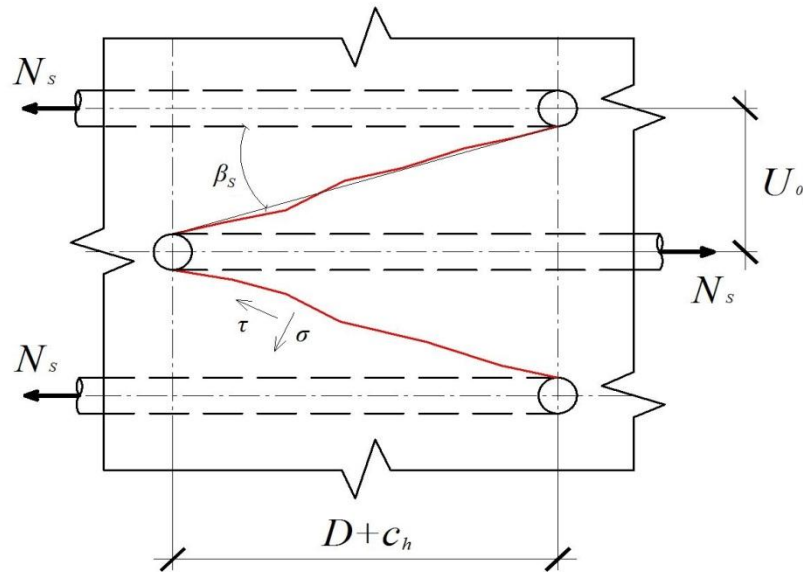
где  $A_s$  — площадь сечения одного стержня рабочей арматуры;

$A_c$  — площадь сечения всех стержней, армирующих ядро.

- в стыке-перепуске типа Л2 и угловых стыках-перепусках типа У1 и У2:

$$k_c = 1 + \frac{4 \cdot A_c}{\pi \cdot D^2} \cdot \frac{E_s}{E_b} \leq 1.5.$$

## Предельное состояние от среза ядра по наклонным сечениям, соединяющим встречные петли – форма разрушения «Б»



Расчет петлевых стыков при срезе по наклонным сечениям производят из условия:

$$N_{cl} \geq N_s,$$

$$N_{cl} = \gamma_l \cdot S_s \cdot k_c \cdot ([\tau] \cdot \cos \beta_s + [\sigma] \cdot \sin \beta_s),$$

$\beta_s$  – угол среза, определяемый по формуле:

$$\beta_s = \operatorname{arctg} \frac{U_0 - d}{D + c_h};$$

$S_s$  – площадь наклонного сечения, определяемая по формуле:

$$S_s = \frac{S_{cl}}{\cos \beta_s},$$

где  $S_{cl}$  – площадь ядра петлевого стыка;

$[\sigma]$  – средние нормальные напряжения в наклонном сечении:

$$[\sigma] = \frac{1.35 R_{bt}}{1 - k_R + 2 \cdot \sqrt{k_R} \cdot \operatorname{ctg} \beta};$$

где:

$$k_R = \frac{R_{bt}}{R_b};$$

$[\tau]$  – средние касательные напряжения в наклонном сечении:

$$[\tau] = [\sigma] \cdot \operatorname{ctg} \beta.$$

## Предельное состояние от кручения – Форма разрушения «В»

Максимальные касательные напряжения в ядре от кручения возникают по его контуру и не суммируются с максимальными касательными напряжениями, возникающими в средней части наклонного сечения при рассмотрении напряженного состояния многопролетной «балки». Структура разработанной формулы учитывает зависимость крутящего момента от упруго-пластичного полярного момента сопротивления и максимальных касательных напряжений.

Методика распространяется на конструкции, испытывающие динамические воздействия (ударная волна, сейсмическая нагрузка) и претерпевающие попеременное растяжение на противоположных гранях.

Расчет на кручение производят из условия:

$$D_k \geq D_{req},$$

где  $D_k$  – диаметр эквивалентного кругового ядра, определяемый по формуле:

$$D_k = 2 \sqrt{\frac{S_{cl}}{\pi}};$$

$D_{req}$  – требуемый диаметр петлевого стыка, определяемый по формуле:

$$D_{req} = k \cdot d \cdot \sqrt{\frac{R_s}{R_b}},$$



## Предельное состояние от потери анкерующей способности петель – форма разрушения «Г»

В основе методики лежит условие равновесия арматурного стержня, состоящего из прямолинейных и криволинейных участков. В методике используется прочность сцепления криволинейного анкера и бетоном, полученная в результате обработки и анализа разрушающих усилий (образование шарниров) при испытаниях балок с петлевыми круговыми перепусками

Расчет на потерю анкерующей способности производят из условия:

$$D_k \geq D_{req},$$

где  $D_k$  – диаметр эквивалентного кругового ядра, определяемый по формуле.

Требуемый диаметр ядра петлевого стыка определяют по формуле:

$$D_{req} = \frac{0.5R_s \cdot d}{\pi \cdot R_{bond3}},$$

где  $R_{bond3}$  – среднее сопротивление сцепления арматуры с бетоном по криволинейному анкеру, определяемое по формуле:

$$R_{bond3} = \eta_3 \cdot R_{bt},$$

где  $\eta_3$  – коэффициент, учитывающий влияние диаметров петли и арматуры и определяемый по формуле:

$$\eta_3 = 5.7 - 0.12 \cdot \frac{D}{d},$$

Если  $D_{req} > D_k$ , определяют длину прямой вставки из зависимости:

$$c = \frac{0.25 \cdot R_s \cdot d - 0.5 \cdot \pi \cdot D \cdot R_{bond3}}{\eta_1 \cdot R_{bt}}$$

При расчетах конструкций с петлевыми стыками на сейсмическое воздействие рекомендуется учитывать их повышенную деформативность и особенности трещинообразования, что оказывает влияние на частоты собственных колебаний, способность к рассеиванию энергии и степень допустимой повреждаемости:

- для назначения изгибной жесткости строительных конструкций с петлевыми стыками при сейсмических воздействиях следует использовать произведение коэффициента приведенного сечения  $K$  и изгибной жесткости сечения  $E_b I$ , где  $E_b$  — начальный модуль упругости бетона при сжатии и растяжении,  $I$  — момент инерции сечения при изгибе. Коэффициент приведенного сечения  $K$  принимается согласно таблице 9.2.2 в зависимости от параметров конструкции (пролета, высоты сечения диаметра продольной рабочей арматуры, наличия петлевых стыков только в пролете или в пролете и на опорах).

Коэффициент изгибной жесткости приведенного сечения  $K$  конструкций с петлевыми стыками и шагом арматуры 200 мм

Отношение пролета и высоты $l/h$	Диаметр арматуры $d$ , мм	
	25	40
<b>Петлевые стыки только на опорах</b>		
4,3	0,196	0,381
6,0	0,280	0,471
8,6	0,379	0,561
15,0	0,526	0,723
<b>Петлевые стыки на опорах и в пролете</b>		
8,6	0,199	0,379
12,0	0,299	0,484
17,1	0,424	0,597
30,0	0,608	0,736

- для конструкций с петлевыми стыками, коэффициент  $K_e$ , учитывающий особые условия эксплуатации АС при сейсмическом воздействии, и входящий в формулу 4.2 [3], рекомендуется принимать не менее значений указанных в таблице.

Рекомендованные значения коэффициента снижения сейсмической силы  $K_e$

Процент демпфирования конструкции в долях от критического	4%	7%
$K_e$	0.67	0.96

- динамическую прочность бетона рекомендуется определять с помощью коэффициента динамического упрочнения бетона:

$$K_y = 1 + 10^{-4} \cdot (2 \cdot z^4 - 12 \cdot z^3 + 124 \cdot z^2 + 91 \cdot z)$$

где  $z = \log\left(\frac{d\sigma}{dt}\right)$  – десятичный логарифм скорости напряжений, кгс/см<sup>2</sup> · сек

## Расчеты по второй группе предельных состояний

Расчеты петлевых стыков по предельным состояниям второй группы включают:

- расчеты по образованию трещин, которые следует производить как для монолитных конструкций по СП 63.13330.2012 для проверки необходимости учета трещин при расчете по деформациям;
- расчеты по раскрытию трещин, которые необходимо выполнять согласно 9.3 из условия, по которому ширина раскрытия трещин в стыке от различных нагрузок и воздействий не должна превышать предельно допустимых значений, устанавливаемых в зависимости от требований, предъявляемых к конструкции, условий ее эксплуатации, воздействия окружающей среды и характеристик материалов с учетом особенностей коррозионного поведения арматуры и бетона;
- расчеты по деформациям, которые следует выполнять как для монолитных конструкций по СП 63.13330.2012 из условия, по которому перемещения и амплитуды колебаний конструкции от различных нагрузок и воздействий не должны превышать соответствующих предельно допустимых значений, при превышении которых нарушается нормальная эксплуатация ЖБК или исчерпывается ресурс их долговечности.

Раскрытие магистральной трещины в сечении по контуру ядра определяется деформацией растянутой арматуры и деформацией бетонного ядра и суммируется из трех составляющих:

- деформации арматуры вне ядра;
- деформации арматуры в зоне прямой вставки;
- деформации ядра.

Для угловых и линейных стыков ширину раскрытия трещин определяют формуле:

$$a_{crc} = \left[ \left( 0.062 \frac{d}{R_{bt,n}} \cdot \sigma_{s,crc} + 0.5 \cdot D \right) \cdot \Psi_s \frac{\sigma_s}{E_s} + 0.25 \cdot \Psi'_s \frac{\sigma'_s}{E_s} \cdot c + 1.56 \cdot \frac{d^2}{U_0} \cdot \frac{\sigma'_s}{E_{b,\tau}} \right]$$

где  $\sigma_{s,crc}$  — напряжение в растянутой арматуре в сечении с трещиной сразу после образования нормальных трещин;

$\Psi_s$  — коэффициент, учитывающий неравномерное распределение относительных деформаций растянутой арматуры между;

$\Psi'_s$  — коэффициент, учитывающий неравномерное распределение относительных деформаций растянутой арматуры между трещинами в зоне прямой вставки с двойным армированием;

$E_{b,\tau}$  — длительный модуль упругости бетона;

$\sigma'_s$  — напряжение в арматуре в начале криволинейного участка петлевого выпуска, определяемое по формуле:

$$\sigma'_s = \sigma_s \cdot \left( 1 - \frac{0,25c}{l_{0an}} \right).$$