



УДК 624.012.35/45

Илшат Т. Мирсаяпов

ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ УСТАЛОСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕЙСТВИЮ ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ

В настоящее время в практических расчетах, установленных нормами проектирования, расчет выносливости наклонных сечений железобетонных изгибаемых элементов сводится к ограничению величины главных растягивающих напряжений на уровне центра тяжести приведенного сечения, определенных на основе упругого расчета, расчетными сопротивлениями, величина которых зависит от коэффициентов асимметрии циклов напряжений. Эта методика является условной и не отражает действительную работу железобетонного элемента в зоне действия поперечных сил и характер его усталостного разрушения.

В действительности бетон в этой зоне работает в условиях плоского напряженного состояния, при наличии нормальных и наклонных трещин испытывает неупругие деформации. В продольной арматуре, в месте пересечения с наклонной трещиной, происходит интенсивный рост осевых усилий N_s (выравнивание), возникают изгибающий момент M_s и нагельные силы Q_s , которые увеличиваются в процессе циклического нагружения. После образования и развития наклонных трещин происходит интенсивный рост деформаций и напряжений в поперечной арматуре, в местах пересечения с наклонной трещиной. При этом из-за большой скорости нагружения распределение напряжений в стержнях поперечной арматуры по длине наклонной трещины имеет неравномерный характер. Под воздействием циклических нагрузок из-за виброползучести бетона происходит непрерывное накопление остаточных деформаций в сжатой зоне. В связи с тем, что виброползучесть сжатого бетона протекает в стесненных условиях в бетоне сжатой зоны, в продольной и поперечной арматуре появляются и накапливаются остаточные напряжения, т.е. происходит непрерывное изменение напряженного состояния. Накопление остаточных напряжений приводит к изменению коэффициентов асимметрии цикла напряжений $r_b(t)$, $r_s(t)$, $r_w(t)$ и, как следствие, к изменению пределов выносливости бетона, продольной и поперечной арматуры. В зоне совместного действия поперечных сил и изгибающих моментов изменение относительного пролета среза

$\frac{c_0}{h_0}$ (c_0 - расстояние между опорой и грузом) приводит к изменению соотношения между составляющими плоского напряженного состояния s_x, s_y, t_{xy} в

бетоне. В результате меняются механизм работы, механизм и форма усталостного разрушения элемента и расчетная схема.

Усталостные испытания железобетонных балок прямоугольного сечения в зависимости от относительного пролета среза позволяют установить 3 формы усталостного разрушения изгибаемых элементов в зоне действия поперечных сил и дают возможность разработать физические модели усталостного сопротивления элементов для каждой формы разрушения, отражающие их действительную работу в процессе циклического нагружения. Учитывая характер усталостного разрушения, все изгибаемые элементы в зависимости от пролета среза можно разбить на три группы: 1) Изгибаемые элементы с малым пролетом среза $c_0 < 1,2h_0$; 2) Изгибаемые элементы с большим пролетом среза $c_0 > 2h_0$; 3) Изгибаемые элементы с средним пролетом среза $1,2h_0 < c_0 < 2h_0$. Каждой из этих групп присущи свои механизм работы, форма усталостного разрушения и расчетная схема.

Особенностью работы изгибаемых элементов при малых пролетах среза $c_0 < 1,2h_0$ является образование локальных полос напряжений, связанных с точками приложения сосредоточенных внешних усилий, в пределах которых и происходит усталостное разрушение. Как показывают экспериментальные исследования, при опорных и грузовых пластинах $l_{sup} > 0,3h_0$ в процессе циклического нагружения происходит образование и развитие двух характерных наклонных трещин, выделяющих из тела элемента наклонную сжатую полосу между опорой и грузом (рис. 1), т.е. трещины выделяют сформировавшийся на начальных стадиях нагружения наклонный поток сжимающих напряжений. Первая наклонная трещина образуется и развивается уже в процессе первого нагружения до максимальной нагрузки цикла Q_{max} и следует параллельно и вблизи линии, соединяющей внутренние границы опорной и грузовой площадок. Направление развития этой трещины – от внутренней границы опорной площадки к внутренней границе грузовой площадки, т.е. от опоры к грузу (рис. 1). Вторая наклонная трещина образуется гораздо позже, в процессе циклического нагружения, например, при

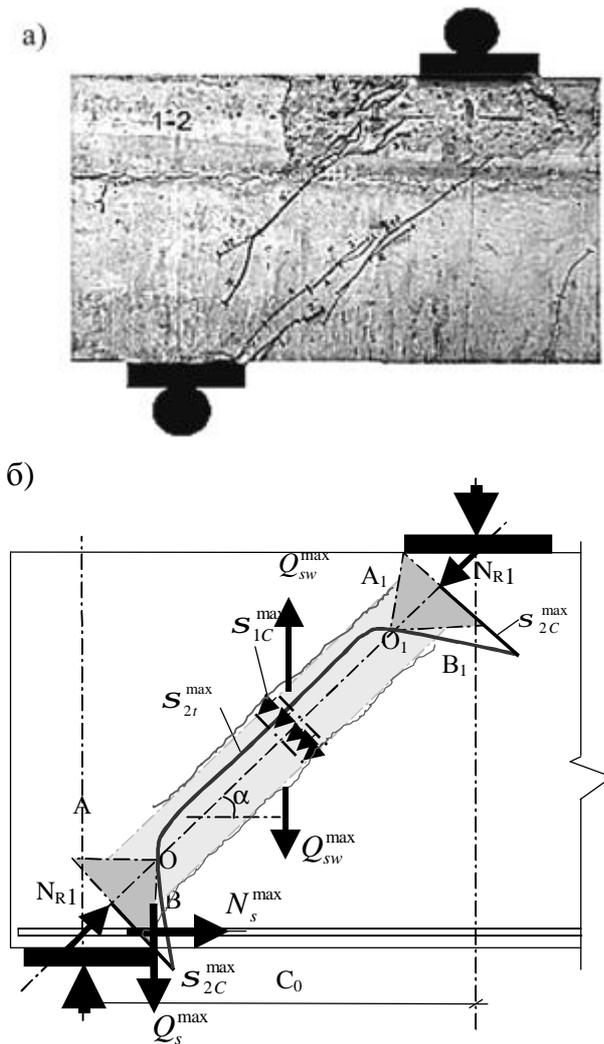


Рис.1. Характер образования трещин при циклическом нагружении и усталостного разрушения: а) физическая модель элемента; б) при малых пролетах среза и грузовых пластинах $l_{sup} > 0,3h_0$

нагрузках, близких к пределу выносливости элемента, через (200-500) тыс. циклов нагружения. При этом направление развития этой трещины противоположно направлению первой, и она следует от внешней границы грузовой площадки к внешней границе опорной, т.е. от груза к опоре. Незадолго до разрушения происходит резкое раскрытие обеих трещин, и усталостное разрушение в пределах наклонного сжимающего силового потока происходит из-за усталостного разрыва стержней поперечной арматуры в местах пересечения с этими двумя наклонными трещинами, т.е. усталостный разрыв поперечной арматуры происходит по двум плоскостям отрыва, проходящим вдоль границ ядра сжатия наклонной полосы (рис.1). Усталостное разрушение по растянутой зоне элемента может происходить в результате усталостного разрыва продольной растянутой арматуры в месте пересечения с первой наклонной

трещиной от совместного действия осевых $N_s^{max}(t)$ и нагельных $Q_s^{max}(t)$ усилий. Другой возможной формой разрушения по растянутой зоне является нарушение анкеровки продольной арматуры из-за усталости сцепления между арматурой и бетоном. Анализ характера усталостного разрушения таких элементов показывает, что для практических расчетов усталостной прочности изгибаемых элементов в зоне действия поперечных сил при малых пролетах среза наиболее простой и приемлемой расчетной моделью является общеизвестная каркасно-стержневая система (КСС), состоящая из наклонной сжатой полосы и растянутого арматурного пояса, замыкающихся в местах приложения внешних нагрузок. Поэтому усталостная прочность изгибаемого элемента в зоне действия поперечных сил при малых пролетах среза определяется выносливостью каждого элемента КСС: наклонных сжатых полос и продольного растянутого пояса. Напряженное состояние внутри наклонного сжимающего силового потока (рис.1) аналогично напряженному состоянию в плосконапряженных элементах при действии местной нагрузки. Эту модель упрощенно можно представить в виде клиньев, расположенных под грузовыми и опорными площадками, распорные сжимающие усилия по боковым поверхностям которых вызывают растягивающие усилия в плоскости, соединяющей концы этих клиньев. В пределах клиньев уплотнения бетон работает в условиях “сжатие-сжатие”, между вершинами уплотнений, в средней части сжатой полосы – в условиях “растяжение-сжатие”, вдоль граней клиньев уплотнений – в условиях сдвига (рис.1). С момента, когда уровень сжимающих напряжений S_{1C}^{max} , действующих в пределах наклонного сжимающего силового потока, становится больше, чем нижняя граница микротрещинообразования, от микропор в теле бетона или усадочных микротрещин по линии действия растягивающих напряжений S_{2t}^{max} (рис.1), в средней зоне “растяжение-сжатие” образуются и развиваются микро- и макротрещины отрыва. Уменьшение ширины опорных и грузовых площадок приводит к уменьшению ширины ядра сжатия наклонного сжимающего силового потока, а, следовательно, и расстояния между наклонными трещинами, выделяющими этот силовой поток. При циклическом нагружении происходит нарушение сцепления между поперечной арматурой и бетоном в пределах ядра сжатия. Поэтому усталостное разрушение в пределах наклонного сжимающего силового потока, при $l_{sup} < 0,3h_0$, происходит либо с образованием только одной трещины отрыва (рис. 2а), образующейся и развивающейся вдоль оси наклонного сжимающего силового потока либо по одной плоскости

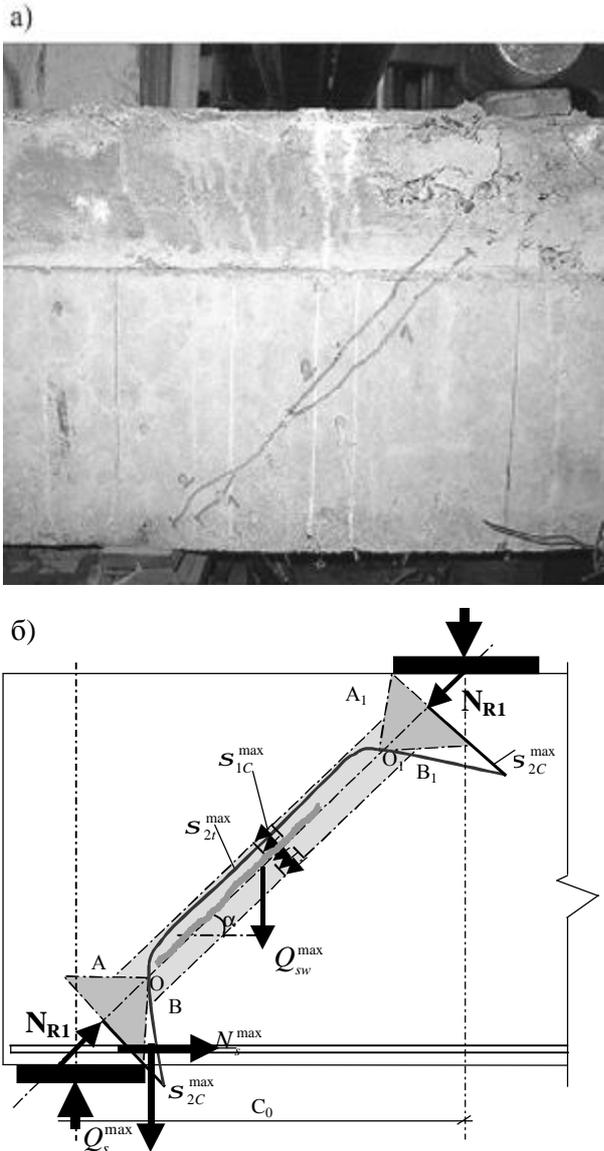


Рис.2. Характер образования трещин при циклическом нагружении и усталостного разрушения: а) физическая модель элемента; б) при малых пролетах среза и грузовых пластинах $l_{sup} < 0,3h_0$

отрыва, расположенной между 1-й и 2-й наклонными трещинами, параллельно им. При этом в элементах без поперечной арматуры усталостное разрушение в пределах наклонной сжатой полосы происходит в тот момент, когда длина трещины отрыва, идущей вдоль оси силового потока, достигает критической длины l_{cr} , а в элементах с поперечной арматурой - в результате усталостного разрыва стержней поперечной арматуры в месте пересечения с трещиной вдоль оси наклонного силового потока. Поэтому физическую модель сопротивления элементов при $l_{sup} < 0,3h_0$ можно представить в измененном виде (рис. 2б).

При больших пролетах среза ($c_0 > 2h_0$)

усталостное разрушение изгибаемых элементов происходит с образованием критической наклонной трещины, положение которой связано не с точками приложения действующих на элемент внешних усилий и реакций опор (местное возмущение напряженного состояния ощутимо только вблизи этих точек), а с внутренними силовыми факторами, действующими в рассматриваемых по длине пролета среза сечениях (моментами и поперечными силами).

Усталостные испытания железобетонных балок при $c_0 = 3h_0$ (рис.3) позволяют выдвинуть следующую гипотезу образования и развития критической наклонной трещины и разработать модель усталостного разрушения железобетонных изгибаемых элементов в зоне действия поперечных сил при многократно повторяющихся нагружениях. Задолго до образования нормальных и наклонных трещин в глубине пролета среза, тем более до формирования и развития критической наклонной трещины, в нормальном сечении в конце пролета среза образуется нормальная трещина (первая). К моменту образования остальных трещин в зоне действия поперечных сил эта нормальная трещина в конце пролета среза развивается на большую высоту и растянутая зона практически исключается из работы; эпюра напряжений $s_x^{max}(t)$ искривляется (рис.3),

увеличивается полнота эпюры W_s и начинает образовываться пластический участок в верхней части эпюры; уменьшение высоты нетрещиновой части бетона в этом нормальном сечении с трещиной приводит к увеличению полноты эпюры W_t касательных напряжений и к резкому увеличению максимального значения касательных напряжений $t_{xy}^{max}(t)$. Поэтому

в пределах пластического участка сжатой зоны X_{pl} резко увеличивается равнодействующая

$$N_{R2}^{max} \text{ нормальных } N_{b1}^{max} = \int_{A_{pl}} s_x^{max}(t) \cdot dA \quad \text{и}$$

$$\text{касательных } Q_{b1}^{max} = \int_{A_{pl}} t_{xy}^{max}(t) \cdot dA \text{ усилий, где } A_{pl} -$$

площадь пластического участка сжатой зоны в нормальном сечении с трещиной в конце пролета среза.

Под воздействием усилия N_{R2}^{max} в сжатой зоне, действующего в пределах ограниченной грузовой площадки $X_{pl}/\cos g$, в направлении действия этого усилия возникает наклонный сжимающий силовой поток. Характер распределения напряжений внутри этого наклонного сжимающего силового потока такой же, как при смятии. Как известно, при смятии, как и при местном сжатии, под грузовой площадкой

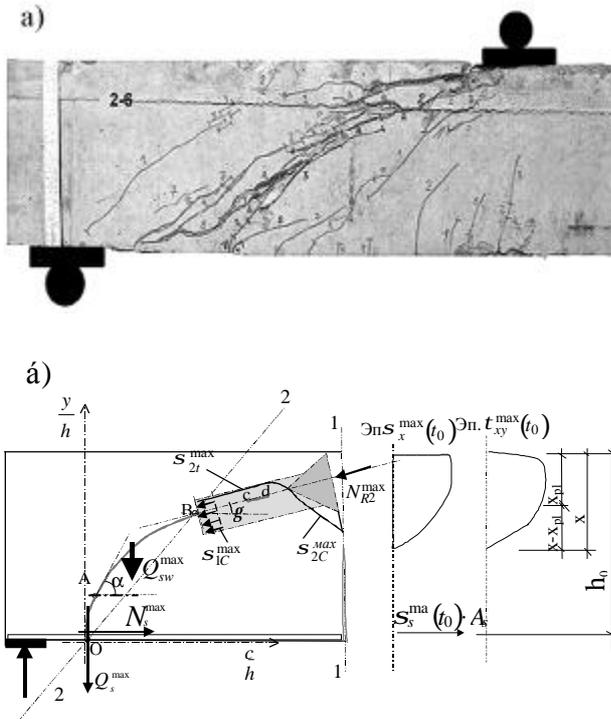


Рис. 3. Характер образования трещин при циклическом нагружении и усталостного разрушения: а) физическая модель элемента; б) при больших пролетах среза

небольшой ширины образуется клин уплотнения, который находится в условиях двухосного сжатия. Под воздействием клина уплотнения в средней части сжимающего силового потока возникает плоское напряженное состояние “растяжение-сжатие”. При циклическом нагружении, еще до образования критической наклонной трещины, внутри наклонного сжимающего силового потока от микропор в теле бетона или усадочных микротрещин по линии действия главных растягивающих напряжений зарождаются и развиваются усталостные микротрещины отрыва, а затем они объединяются в макротрещину отрыва cd под углом g к продольной оси элемента (рис.3). При увеличении уровня нагрузки при первом нагружении или увеличении количества циклов нагружений происходит появление и развитие других трещин в глубине пролета среза. При увеличении количества циклов нагружения одна из таких наклонных трещин начинает развиваться более интенсивно, чем остальные и становится критической. Причиной превращения одной из наклонных трещин в критическую, дальнейшего развития критической наклонной трещины и более интенсивного ее раскрытия по сравнению с остальными наклонными трещинами, а также резкого увеличения напряжений $s_s^{\max}(t)$ в продольной арматуре в месте пересечения с критической наклонной трещиной (выравнивание усилий) является наклонный сжимающий силовой поток, образованный ранее от действия

равнодействующей N_{R2}^{\max} усилий в сжатой зоне. Это можно объяснить тем, что согласно [1] наиболее характерной особенностью развития трещин нормального отрыва, развивающихся вдоль линии действия сжимающих усилий, является стремление любой, даже первоначально наклонной к линии действия сжимающего усилия трещины выравнивать свою траекторию в направлении сжатия, т.е критической становится та наклонная трещина, которая попадает в зону влияния наклонного сжимающего силового потока. Критическая наклонная трещина в растянутой зоне развивается по траектории,

описываемой уравнением $\frac{y}{h} = \frac{a}{b + \frac{h}{c}}$, в котором a и

b определяются исходя из граничных условий. При этом угол ее наклона $a_i \neq const$ и меняется в каждой следующей точке. Далее, попадая под влияние наклонного сжимающего силового потока, она продолжает развиваться также под углом $g = const$ к продольной оси изгибаемого элемента, как и макротрещина отрыва cd внутри наклонного сжимающего силового потока. Усталостное разрушение таких элементов в зоне действия поперечных сил происходит либо в результате усталостного раздробления бетона над наклонной трещиной от совместного действия напряжений $s_x^{\max}(t), t_{xy}^{\max}(t), s_y^{\max}(t)$ в сжатой зоне, либо в результате разрыва наиболее нагруженных стержней поперечной арматуры, либо в результате усталостного разрыва продольной арматуры в месте пересечения с критической наклонной трещиной, либо в результате нарушения анкеровки продольной арматуры за критической наклонной трещиной.

Изгибаемые элементы с средним пролетом среза $1,2h_0 < c_0 < 2h_0$ находятся на границе двух предыдущих расчетных условий. Поэтому при средних пролетах среза проявляются особенности элементов как с малым пролетом среза, так и с большим пролетом среза, т.е. на характер образования и развития трещин в зоне действия поперечных сил и усталостного разрушения таких элементов оказывают влияние как внутренние силовые факторы, действующие в рассматриваемых по длине пролета среза элемента сечениях (моменты и поперечные силы), так и местные возмущения напряженного состояния и концентрации напряжений в определенных зонах, связанные с точками приложения сосредоточенных внешних сил. Усталостные испытания балок прямоугольного сечения с пролетом среза $c_0 = (1,48 - 1,67)h_0$ позволяют установить следующую картину

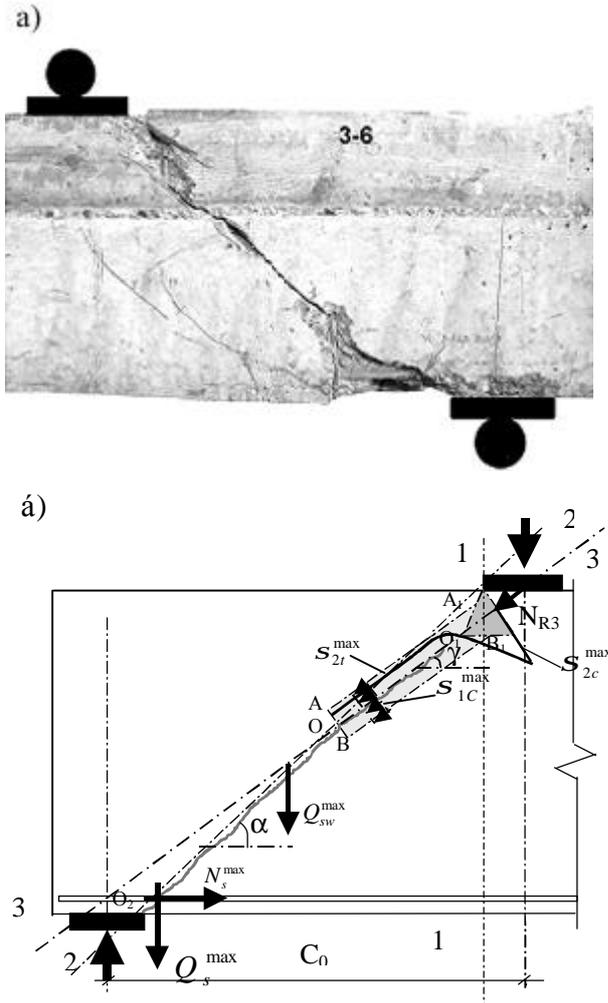


Рис. 4. Характер образования трещин при циклическом нагружении и усталостного разрушения: а) физическая модель элемента; б) при средних пролетах среза

образования и развития трещин и характер усталостного разрушения в зоне действия поперечных сил. При средних пролетах среза критическая наклонная трещина образуется на расстоянии $(0,3 - 0,4)h$ от растянутой грани и развивается в направлениях к опоре и к грузу. В растянутой зоне она развивается вдоль линии 2 – 2 (рис.4), соединяющей внутреннюю границу опорной пластины с внешней границей грузовой пластины и полностью пересекает ее (до внутренней кромки опорной пластины). При своем развитии в направлении к грузу критическая наклонная трещина после того, как доходит до точки О, пересечения линий 3 – 3 и 2 – 2, меняет свое направление и продолжает развиваться вдоль оси 3 – 3 наклонного сжимающего потока, образующегося между точками приложения опорной реакции и сосредоточенной нагрузки, т.е ориентируется вдоль наклонного сжимающего силового потока. В то же

время внутри самого сжимающего силового потока образуется и развивается трещина отрыва вдоль оси 3 – 3 потока, которая затем сливается с начальным участком (ОО₂) критической трещины. Очевидно, что образование, развитие и раскрытие критической трещины в растянутой зоне (участок ОО₂) связаны с плоским поворотом и сдвигом наклонного сечения 2 – 2, а ее развитие и раскрытие в сжатой зоне (ОО₁) – с образованием и развитием микротрещины отрыва по линии действия растягивающих напряжений S_{2t}^{max} (Рис.4б) в зоне “растяжение-сжатие” внутри наклонного сжимающего силового потока, под действием силы N_{R3}^{max} , а затем их слиянием в макротрещину и дальнейшим развитием и раскрытием этой макротрещины отрыва ОО₁. Формирование критической наклонной трещины заканчивается уже при первом нагружении до максимальной нагрузки цикла Q_{max} после того, как трещина ОО₁, попадая под влияние наклонного сжимающего силового потока, ориентируется вдоль него и сливается с трещиной отрыва ОО₁, образованной внутри сжимающего силового потока вдоль его оси. При этом в направлении к грузу критическая трещина (трещина отрыва) развивается только до точки О₁ и останавливается на некотором расстоянии от края грузовой пластины (рис. 4б) и практически до усталостного разрушения дальше не продвигается. Незадолго до разрушения, вдоль верхней границы ядра сжатия АА₁ внутри наклонного сжимающего силового потока образуется еще одна трещина отрыва, а также на линии, соединяющей точку О₁ и внешнюю кромку грузовой пластины, образуется множество мелких параллельных трещин, имеющих определенный угол наклона к этой линии. Усталостное разрушение по сжатой зоне элементов средним пролетом среза происходит в результате усталостного разрыва хомутов в сечении с трещиной ОО₁ или АА₁ (рис.4). Усталостное разрушение по растянутой зоне происходит в результате усталостного разрыва продольной арматуры в месте пересечения с трещиной ОО₂ от совместного действия усилий Q_s^{max} и N_s^{max} . Другой возможной формой разрушения по растянутой зоне является нарушение анкеровки продольной арматуры за критической наклонной трещиной в результате усталости сцепления.

Литература

1. Митченко С.В., Степков В.М. Кинетика развития трещины отрыва вдоль линии сжатия // Проблемы прочности, №11, 1987. – С. 22-25.