

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С
УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ
БЕТОНА**

Постернак С. А., Уразманова Н. Ф., Постернак А. А. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса)

Приводятся результаты экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния железобетонных изгибаемых элементов с учетом технологической поврежденности бетона.

На приопорных участках изгибаемых элементов под воздействием поперечной силы и изгибающего момента в сечениях, наклонных к оси, развивается напряженно-деформируемое состояние, характеризующееся определенными стадиями. Если в процессе нагружения главные растягивающие напряжения превысят сопротивление бетона растяжению, то возникает система наклонных трещин, разделяющая элемент на отдельные блоки, которые связаны между собой продольной арматурой в растянутой зоне, поперечной арматурой и не треснувшей частью бетона над вершиной наклонной трещины в сжатой зоне (рис. 1) [1...3].

Залесов А.С. и Климов Ю.А. в монографии [1] приводят две основные формы разрушения балок по наклонной трещине (рис. 1.). Первая характеризуется резким раскрытием наклонной трещины с последующим разрушением сжатого бетона над ее верхним концом - разрушение по сжатой зоне (рис. 1,а, б), вторая - резким раскрытием наклонной трещины при текучести продольной арматуры или исчерпание прочности ее анкеровки за опорой - по растянутой зоне (рис. 1,в). В обоих случаях напряжение в поперечной арматуре достигает текучести. Разрушение по сжатой зоне происходит в результате раздробления бетона над наклонной трещиной, проявляющееся в образовании ряда мелких горизонтальных трещин (рис. 1,а) или разрыва (среза) бетона по направлению развития наклонной трещины, и выход ее на сжатую грань балки (рис. 1,б).

Основная цель статьи заключается в исследовании напряженно-деформированного состояния железобетонных изгибаемых элементов с учетом технологической поврежденности бетона.

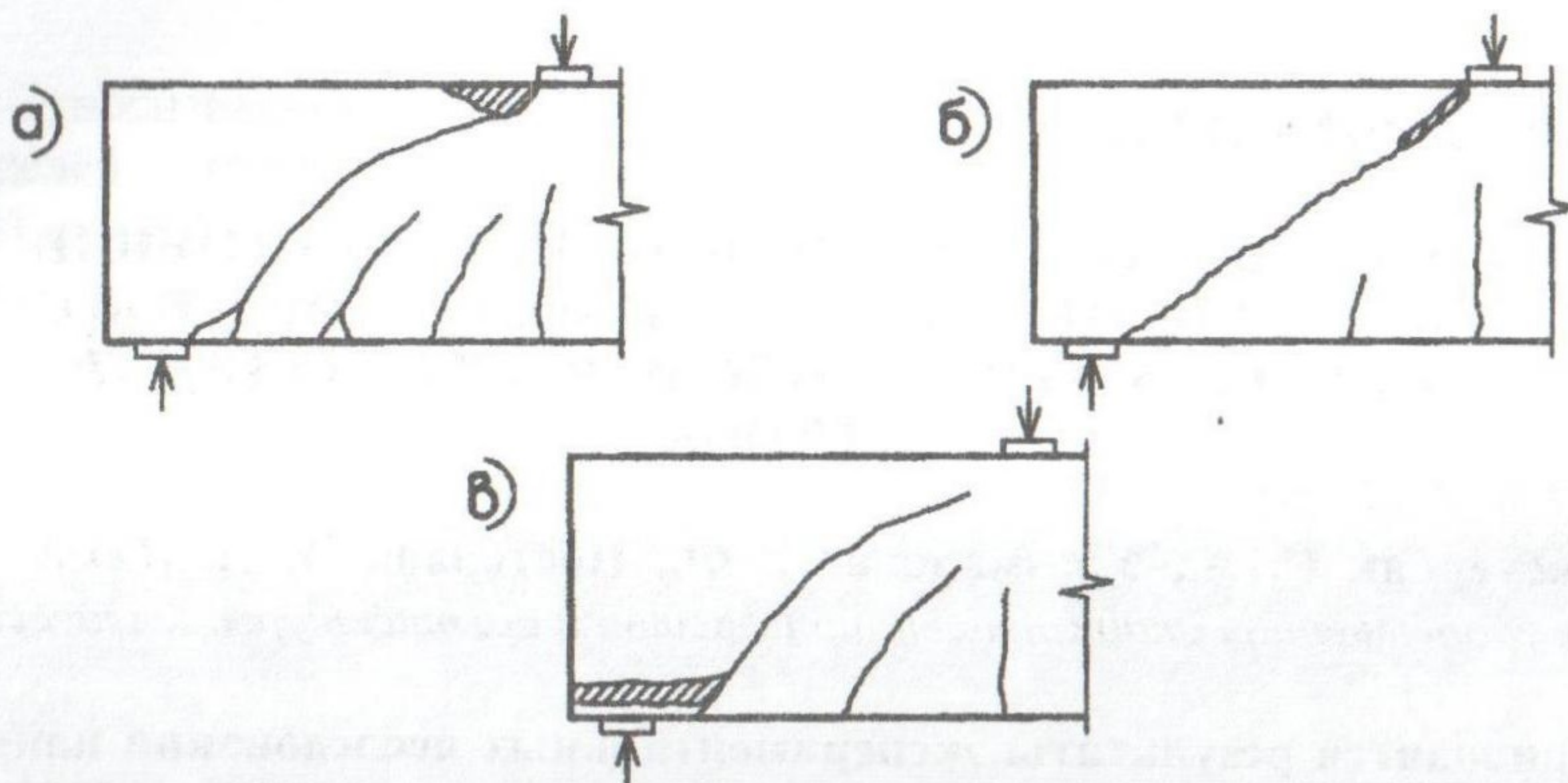


Рис. 1. Формы разрушения железобетонных элементов при совместном действии поперечных сил и изгибаемых моментов:
 а, б) по наклонной трещине и сжатой зоне бетона;
 в) по наклонной трещине и растянутой арматуре.

Для получения искомым результатов был выполнен эксперимент, методика проведения которого, состав бетонной смеси, характеристики используемых материалов и опытных образцов приведены в работах [4, 6]. Методика исследования технологической поврежденности бетонных образцов и железобетонных изгибаемых элементов, в частности оценки технологической поврежденности при помощи коэффициентов технологической поврежденности по площади (Kn_s) и характерным линиям (Kn_L), а также их обоснование и физический смысл представлены в работах [4, 5]. Результаты определения технологической поврежденности на поверхности образцов-балок, схема армирования и схема нагружения представлены в работе [7].

Анализ результатов эксперимента показывает, что существуют четыре основные стадии работы железобетонных балок на восприятие поперечных сил: первая – до образования трещин, вторая – образование и раскрытие нормальных трещин, третья – образование и раскрытие наклонных трещин, четвертая – разрушение по наклонной трещине, в частности, по одной из форм, приведенных на рис. 1.

В стадии I, элемент работает как сплошное тело из упругого материала. Деформации сжатия и растяжения бетона в нормальных сечениях распределяются по высоте элемента в соответствии с гипотезой плоских сечений, по длине пролета среза – в соответствии с эпюрой

изгибающих моментов. Деформации сдвига распределяются по всей высоте нормальных сечений. Продольная арматура деформируется совместно с окружающим бетоном, деформации не велики и распределяются они по длине продольной арматуры как в бетоне растянутой зоны – в соответствии с эпюрой изгибающих моментов. На первых этапах нагружения зависимость между напряжениями и деформациями бетона линейная, и эпюры нормальных напряжений в сжатой и растянутой зоне имеют треугольную форму. Постепенно увеличивается прогиб и уменьшается высота сжатой зоны.

При постепенном увеличении нагрузки в конце пролета среза (зоне действия максимальных изгибающих моментов) в бетоне растянутой зоны начинает развиваться неупругие деформации, эпюра напряжений становится криволинейной, напряжения приближаются к пределу прочности на растяжение, и образуются нормальные трещины при нагрузке от 9,8 кН (опыт №8) до 21,3 кН (опыт №6). В начале нормальные трещины развиваются по траекториям технологических трещин (энергетически выгодному пути), затем с увеличением нагрузки, трещины стали пересекать структурные блоки (ячейки). Это объясняется тем, что технологические трещины представляют собой ослабленные связи между структурными блоками бетона, а при приложении нагрузки эти связи разрываются в первую очередь. С дальнейшим ростом нагрузки аналогичные процессы происходят и в других сечениях по длине пролета среза, и зона образования нормальных трещин смещается в сторону опор. Прогибы в момент образования нормальных трещин составили от 0,05мм (опыт №4) до 0,32мм (опыт №6). Образование в пролете нормальных трещин определяет переход к стадии II напряженно-деформированного состояния. С образованием нормальных трещин нарушается однородность напряженно-деформированного состояния бетона по длине пролета среза. В нормальных сечениях с трещиной и между трещинами напряженно-деформированное состояние бетона отличается друг от друга. Одновременно с развитием нормальных трещин наблюдается уменьшение высоты сжатой зоны. Начинают проявляться неупругие деформации в бетоне сжатой зоны. При нагрузке от 0,38 до 0,56 F_{max} развитие нормальных трещин, достигающих 2/3 высоты сечения, приостанавливается. Максимальная ширина раскрытия нормальных трещин при этом достигает 0,1мм и остается неизменной с момента стабилизации зоны чистого изгиба и до полного разрушения железобетонных балок. Нормальные трещины во всех балках, примерно, равномерно распространяются по длине элемента в зоне действия максимального изгибающего момента с шагом 5-10 см.

Начало стадии III напряженно-деформированного состояния определяется образованием наклонных трещин, что приводит к значительным качественным и количественным изменениям напряженно-деформированного элемента в целом, бетона и продольной арматуры в частности. Образуются наклонные трещины в районе середины высоты железобетонных балок или развиваются из нормальных при нагрузке от $0,56Q_{u,exp}$ (опыты №№5,6,8) до $0,69Q_{u,exp}$ (опыт №9), что согласовывается с опытами авторов монографии [1], в которой они утверждают, что критические наклонные трещины образуются при нагрузке 0,5 – 0,6 от разрушающей. Прогибы в момент образования наклонных трещин составили от 0,83 мм (опыт №4) до 2,1 мм (опыт №6). Высота сжатой зоны балок при этом стабилизируется и в дальнейшем практически не изменяется, составляя от 3,2 см (опыт №3) до 6,2 см (опыт №2). По ходу своего развития наклонные трещины вызывают перераспределение деформаций бетона по высоте и длине элемента, но наиболее значительное – вблизи критической (магистральной) трещины. Далее развиваясь по направлению к грузу, критическая наклонная трещина разделяет сжатую зону по высоте нормальных сечений на две части, при этом в вершине трещины наблюдается явно выраженный перелом эпюры деформаций сжатия, и, при этом, деформации сжатия над вершиной наклонной трещины растут значительно быстрее (в 3 – 4 раза), чем под ней. С этого момента балка работает по диско – связевой системе, так как трещины разбили балку на блоки, равновесие которых обуславливается работой связей. Эпюра относительных деформаций в сжатой зоне – треугольной формы с максимальным значением в верхней грани балки. Прогибы на этой стадии работы балок нарастают в виду искривления геометрической оси элемента в результате действия максимального момента. Обращает на себя внимание тот факт, что на начальном этапе развития траектория наклонных трещин, как и нормальных, совпадает с траекторией технологических. Следовательно, опять таки поврежденность бетона технологическими дефектами предопределила направление развития наклонных трещин в начальный период работы балок, и как следствие повлияла на их работу, поэтому несущая способность балки зависит также и от того, как прошла наклонная трещина.

Конец третьей и переход к четвертой стадии напряженно – деформированного состояния определяется моментом, когда элемент перестает сопротивляться воздействию внешней нагрузки и происходит разрушение.

В проведенном эксперименте два элемента разрушилось по сжатой зоне в результате раздробления бетона над вершиной наклонной трещины (опыты №№2,8), два элемента разрушилось по сжатой зоне в результате разрыва (среза) бетона над вершиной наклонной трещины (опыты №№3,6), а все остальные элементы по растянутой зоне в результате текучести продольной арматуры в месте пересечения ее наклонной трещиной. Рассмотрим каждое из них.

В опытах №№2,8, как сказано выше, разрушение произошло в результате раздробления бетона над вершиной наклонной трещины, что характеризуется достижением нормальными сжимающими напряжениями в этой зоне значений, близких пределу прочности бетона на сжатие. Эпюра напряжений в бетоне над трещиной при разрушении имеет явно выраженную криволинейную форму с максимальными значениями у сжатой грани, близкими к R_b . Прогибы в момент, предшествующий разрушению, составили 4,78 мм (опыт №2) и 6,11 мм (опыт №8). Критическая ширина раскрытия наклонных (магистральных) трещин перед моментом разрушения составила 0,1 мм (опыт №2) и 1,1 мм (опыт №8), что является максимальным значением по нашему эксперименту (см. табл. 1[3]).

В опытах №№3,6 разрушение произошло в результате разрыва (среза) бетона над вершиной наклонной трещины, что характеризуется сложностью оценки напряженно – деформированного состояния при хрупком, в данном случае, характере разрушения. Прогибы в момент, предшествующий разрушению, составили 4,66 мм (опыт №3) и 7,78 мм (опыт №6), что является максимальным значением по нашему эксперименту. Критическая ширина раскрытия наклонных (магистральных) трещин перед моментом разрушения составила 0,05 мм (опыт №3), что является минимальным значением по нашему эксперименту и 0,2 мм (опыт №6) (см. табл. 1[3]).

В опытах №№1,4,5,7,9 разрушение произошло по растянутой зоне в результате исчерпания прочности анкеровки продольной арматуры за опорой, при этом трещины дошли до торца балки. Прогибы в момент предшествующий разрушению составили от 2,16 мм (опыт №4), что является минимальным значением по нашему эксперименту до 5,07 мм (опыт №5). Критическая ширина раскрытия наклонных (магистральных) трещин перед моментом разрушения составила от 0,1 мм (опыт №9) до 1мм (опыт №5) (см. табл. 1[3]). Совместное действие растягивающих напряжений и нагельных усилий в продольной арматуре приводит к отрыву защитного слоя бетона (вследствие совместного деформирования бетона с арматурой) до самых опор и даже за ними.

Происходит разанкеровка продольной арматуры, что приводит к резкому уменьшению сжатой зоны бетона и увеличению касательных напряжений в бетоне и его срезе.

Вывод:

Анализ напряженно – деформированного состояния железобетонных элементов без поперечной арматуры при восприятии поперечных сил показал, что на начальном этапе развития наклонные трещины, как и нормальные, развиваются по траекториям технологических трещин (энергетически выгодному пути). Так же и микротраектория магистральной трещины, при сохранении общего направления, растет по технологическим поверхностным дефектам. Поэтому, управляя технологической поврежденностью, можно изменять условия, кинетику роста и микротраекторию магистральных трещин, а следовательно, и управлять работой материала, деформациями, трещинообразованием и характером разрушения, а также несущей способностью.

Литература

1. Залесов А.С., Климов Ю.А. Прочность железобетонных конструкций при действии поперечных сил. - К.: Будивельник, 1989. – 105 с.
2. Дорофеев В.С., Выровой В.Н. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструк.: Монография–О.: Город мастеров, 1998.–168с.
3. Постернак С.А., Олейник Н.В., Постернак И.М., Постернак А.А. Характер образования и развития трещин в железобетонных изгибаемых элементах // Вісник ОДАБА. Вип. 13, - Одесса, 2004. – с. 138 – 141.
4. Постернак С.А., Олейник Н.В., Постернак И.М. Влияние количества и качества наполнителя на начальную технологическую поврежденность // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. пр. – Рівне: УДУВГП, – 2003. – вип. 9. – С. 105 – 111.
5. Постернак С.А., Постернак А.А., Олейник Н.В., Постернак И.М. Оценка технологической поврежденности бетонных призм // Будівельні конструкції: Зб. наук. пр. – К.: НДІБК. – 2003. – вип. 58. – С. 84 – 89.
6. Постернак С.А., Олейник Н.В., Постернак И.М. Влияние количества и качества наполнителя на прочность и деформативность бетонных призм // Вісник ОДАБА. Вип. 9, - Одесса, 2003. – с. 163 – 168.
7. Постернак С.А., Трещинообразование железобетонных изгибаемых элементов с учетом технологической поврежденности // Вісник ОДАБА. Вип. 10, - Одесса, 2003. – с. 149 – 155.