

О деформировании стержневых элементов из композитных материалов при однородном сжатии

С. И. Роговой

Полтавский государственный технический университет им. Ю. Кондратюка,
Полтава, Украина

На основе обобщения результатов исследований работы стержневых элементов из композитных материалов отмечена недостаточная изученность влияния различных факторов на их деформативность. Сравнение напряженно-деформированного состояния различных моделей, в качестве которых рассматриваются бетонные и армированные элементы, позволило обосновать суть влияния продольного армирования (степень насыщения, прочностные и деформативные характеристики) на критические деформации сечения. По результатам выполненных исследований даны рекомендации по определению критического значения степени насыщения арматурой (коэффициента армирования), при превышении которого может иметь место влияние армирования на деформативность рассматриваемых сечений. Отмечена особенность снижения сопротивления хрупкой основы композита с неоднородной структурой вследствие деструктивных процессов и обоснована необходимость уточнения существующей методики расчета такого снижения прочности. Рассматривается проблема определения предельного значения коэффициента армирования.

Ключевые слова: композитные материалы, деформативность, деструктивные процессы, полная диаграмма деформирования, оценка прочности, критическое армирование.

В настоящее время актуальными являются многоплановые исследования и разработка физико-химических основ прогнозирования процессов эффективного получения и надежной эксплуатации композитных материалов с применением многокомпонентного природного и техногенного сырья. Конструктивные элементы из этих материалов находят широкое применение в машиностроении и других отраслях техники. Однако некоторые из них являются хрупкими и обладают свойствами, при которых на стадии, предшествующей предельному состоянию, имеют место деструктивные преобразования.

Всесторонне деструктивные процессы исследовались О. Я. Бергом [1, 2] и его последователями. Преобразования структуры весьма существенно влияют на закономерности деформирования хрупких материалов и должны учитываться при оценке прочности. Поэтому исследование деформативности с учетом деструктивных процессов, протекающих в композите при его нагружении, – одна из важных задач, которую необходимо уточнять и учитывать при прочностных расчетах с целью широкого использования рассматриваемых материалов в реальных конструктивных элементах.

В качестве модели для анализа явлений, происходящих в процессе деструктивных преобразований, рассмотрим линейные элементы из композитных материалов, состоящие из хрупкой основы с неоднородной структурой и многочисленными дефектами и усиленные в разной степени стержнями из однородного высокопрочного материала. Примером такого композита могут служить стержневые бетонные элементы, усиленные (армированные) сталью.

Установлено, что деформирование бетона, который, как и выбранная модель, обладает неоднородной структурой с многочисленными дефектами, сопровождается деструктивными процессами, способствующими развитию уже существующих дефектов, а также появлению и развитию новых микротрещин. Такие деструктивные процессы начинаются при невысоких уровнях напряжений бетона и далее прогрессируют по мере повышения этого уровня, вплоть до наступления предельного состояния [2].

Стальная арматура, имеющая надежное сцепление с бетоном и работающая с ним совместно, является жесткой внутренней связью и поэтому сдерживает развитие его деформаций. Влияние арматуры может наблюдаться на разных уровнях напряжений, включая предельный. При этом происходит релаксация и перераспределение напряжений с бетона на арматуру, которая более эффективно включается в работу и напряжения которой могут существенно возрасти. Влияя таким образом на работу бетона, арматура может значительно повышать деформативность сечения.

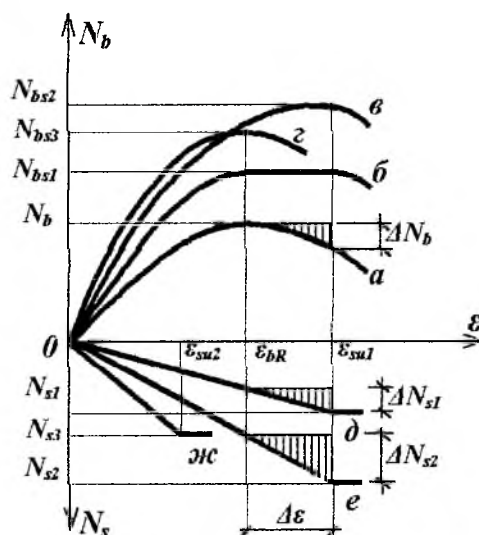
Закономерности деформирования достоверно установлены опытным путем многими исследователями, проведены многочисленные эксперименты и получены эмпирические зависимости [3, 4], позволяющие оценивать деформативность сечений в зависимости от коэффициента армирования и некоторых других параметров. Теоретических исследований в этом плане, на наш взгляд, выполнено недостаточно. Поэтому настоящее исследование посвящено восполнению этого пробела.

Рассматривая усилие, воспринимаемое армированным стержневым элементом, как сумму равнодействующих в бетоне и арматуре, можно установить следующее. Соотношения равнодействующих, которые зависят от геометрических размеров сечений бетона и арматуры, а также их прочностных и деформативных характеристик, могут определять ε_{bu} – критическую деформативность бетона, соответствующую предельному состоянию сечения [5]. При относительно высоких коэффициентах продольного армирования μ_s , больших некоторого критического значения μ_{su} , деформативность нормального сечения с их увеличением может существенно повышаться. Продольная арматура на уровнях деформирования сечения $\varepsilon > \varepsilon_{bR}$, где ε_{bR} – деформация бетона в вершине диаграммы деформирования [6], соответствующая прочности R_b , может воспринимать на себя значительную часть нагрузки.

В противном случае, при $\mu_s < \mu_{su}$ и если деформации сечения достигнут и превысят значение ε_{bR} , наблюдается другая картина. Под влиянием деструктивных процессов прочность бетона, работающего по закону нисходящей ветви, будет снижаться. Арматура при небольшом проценте армирования, а значит, и небольшом резерве несущей способности, догружаясь в процессе деформирования, не может компенсировать это снижение прочности бетона. Усилие, воспринимаемое армированным сечением, после достижения деформаций ε_{bR} увеличиваться не сможет, поэтому такие деформации являются критическими, т.е. в этом случае следует считать $\varepsilon_{bu} = \varepsilon_{bR}$.

Наглядной иллюстрацией таких закономерностей деформирования может служить модель напряженно-деформированного состояния, полученная

графоаналитическим способом для различных однородно деформированных элементов. С целью упрощения модели предположим, что рассматривается стальная арматура, обладающая механическими свойствами, при которых она деформируется в соответствии с идеализированной диаграммой Прандтля. Для этих случаев не сложно смоделировать зависимости, иллюстрирующие характер поведения различных элементов при силовом воздействии (рисунок).



Диаграммы деформирования (усилия N_b – деформации ϵ) для разных элементов: a – бетонный; $б, в$ и $г$ – армированные; $д, е$ и $жс$ – арматурные.

Рассматриваются стержневые однородно сжатые элементы при кратковременном действии нагрузки. Четыре из них: образцы-близнецы, выполненные из одинакового композитного материала: a – бетонный; $б$ и $в$ – армированные одинаковой продольной арматурой с коэффициентами армирования соответственно μ_{s1} и μ_{s2} , при этом $\mu_{s1} < \mu_{s2}$, для этих элементов соблюдается условие $\epsilon_{bR} < \epsilon_{su}$ (ϵ_{su} – критические деформации арматуры, соответствующие ее предельному состоянию); $г$ – армированный продольной арматурой другого класса с меньшей предельной деформативностью и коэффициентом армирования μ_{s3} , для этого элемента $\epsilon_{bR} > \epsilon_{su}$. Три других: $д, е$ и $жс$ – арматурные элементы, которые используются в армированных образцах ($д$ и $е$ – соответственно в элементах $б$ и $в$, $жс$ – в элементе $г$). С целью исследования закономерностей деформирования элементов смоделируем их поведение при разных уровнях нагружения.

Анализ закономерностей деформирования бетонного элемента a показывает, что по достижении деформаций $\epsilon = \epsilon_{bR}$ воспринимаемое им усилие имеет максимальное значение N_b . Дальнейшее устойчивое его деформирование возможно только при снижении этого усилия, начиная с деформации ϵ_{bR} в вершине диаграммы $N_b - \epsilon$. Под устойчивыми деформациями подразумеваются такие, в пределах которых со временем наблюдается тенденция к их затуханию. После достижения деформаций ϵ_{bR} и дальнейшего

их повышения на величину $\Delta\varepsilon$ (рисунок) бетон будет работать в области нисходящей ветви диаграммы. При деформировании на участке $\Delta\varepsilon$ усилие N_b уменьшится на величину ΔN_b , оценку такого снижения можно провести согласно [5], при этом разность деформаций $\Delta\varepsilon$ определяется зависимостью

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{su}(\sigma_{su}, E_s) - \varepsilon_{bR}(R_b), \quad (1)$$

где σ_{su} – критическое напряжение арматуры, соответствующее условному или физическому пределу текучести; E_s – модуль упругости стали.

В армированных и арматурных сжатых элементах на характер диаграмм деформирования существенное влияние оказывает интенсивность армирования. Угол наклона кривых δ – ε зависит от такой интенсивности и определяется величиной соответствующих коэффициентов $\mu_{s1} \dots \mu_{s3}$. Здесь имеет место следующая закономерность: чем больше коэффициент армирования μ_{si} , тем сильнее снижается зависимость $N_{si} - \varepsilon$ и тем большей для элементов δ и ε будет разница ΔN_{si} на участке $\Delta\varepsilon$. Изменяя μ_{si} , можно подобрать такое значение, при котором величина ΔN_{si} на участке $\Delta\varepsilon$ будет соответствовать заданной.

Для армированного элемента b коэффициент армирования μ_{s1} подобран таким образом, что максимальное усилие, воспринимаемое арматурой, равно N_{s1} (кривая δ), а на участке деформирования $\Delta\varepsilon$ усилие в арматуре увеличивается на величину $\Delta N_{s1} = \Delta N_b$. По достижении деформации ε_{su1} , за которую можно принять деформацию, соответствующую условному или физическому пределу текучести стали, дальнейший рост усилия в арматуре прекращается, и далее будет происходить ее пластическое деформирование. При соблюдении равенства $\Delta N_{s1} = \Delta N_b$ рассматриваемый армированный элемент, достигнув усилия

$$N_{b,s1} = N_b(\varepsilon_{bR}) + N_{s1}(\mu_{s1}, \varepsilon_{s1}) - \Delta N_b(N_b, \Delta\varepsilon), \quad (2)$$

воспринимать дальнейшее увеличение сжимающей нагрузки не сможет. По достижении деформаций ε_{bR} рассматриваемый элемент на участке $\Delta\varepsilon$ будет деформироваться без снижения и увеличения нагрузки, а при деформациях $\varepsilon \geq \varepsilon_{bR} + \Delta\varepsilon$ начнет проявляться нисходящая ветвь диаграммы $N_{b,s1} - \varepsilon$. В этом случае снижение усилия бетона на участке $\Delta\varepsilon$ будет компенсироваться эквивалентным приращением усилия в арматуре. Физически деформирование можно представить в виде геометрического равенства площадей треугольников с основанием $\Delta\varepsilon$ и высотой ΔN_b и ΔN_{s1} (кривые a и d).

В армированном элементе b коэффициент армирования $\mu_{s2} > \mu_{s1}$ подобран так, что максимальное усилие, воспринимаемое арматурой, равно N_{s2} (кривая e), а на участке деформирования $\Delta\varepsilon$ усилие в арматуре увеличивается на величину $\Delta N_{s2} > \Delta N_b$. По достижении деформаций ε_{su1} дальнейший рост усилия в арматуре также прекращается, и далее будет происходить ее пластическое деформирование. В таком армированном элементе после достижения в сечении деформаций ε_{bR} на участке $\Delta\varepsilon$ будет наблюдаться повышение усилия до величины

$$N_{b,s2} = N_b(\varepsilon_{bR}) + N_{s2}(\mu_{s2}, \varepsilon_{s1}) - \Delta N_b(N_b, \Delta\varepsilon). \quad (3)$$

И только после достижения деформаций $\varepsilon \geq \varepsilon_{bR} + \Delta\varepsilon$ начнет проявляться нисходящая ветвь диаграммы $N_{b,s2} - \varepsilon$. Для этого элемента воспринимаемая сечением нагрузка повысится за счет приращения усилия в арматуре на участке $\Delta\varepsilon$ на величину $\Delta N_{s2} > \Delta N_b$. Физическая суть повышения усилия геометрически предопределяется разностью площадей треугольников с основанием $\Delta\varepsilon$ и высотой ΔN_{s2} и ΔN_b (кривые e и a).

Анализируя вышеизложенное и сравнивая характер деформирования армированных элементов b и $в$, есть основание считать, что таким образом подобранный коэффициент армирования, как для элемента b , можно принять за некоторое критическое значение $\mu_{su} = \mu_{s1}$, в пределах которого влияние арматуры на критическую деформативность бетона ε_{bu} не наблюдается. Поэтому при коэффициентах $\mu_s \leq \mu_{su}$ увеличения усилия, воспринимаемого армированным сечением после достижения бетоном деформации ε_{bR} , не происходит.

Критический коэффициент армирования μ_{su} может определяться итерационным способом из соответствующего уравнения равновесия как функции μ_s , ε и других параметров. Такое уравнение можно представить в виде

$$N = N_b(\varepsilon) + N_s(\mu_s, \varepsilon). \quad (4)$$

В процессе итераций, изменяя коэффициент μ_s при прочих равных параметрах, можно установить такое его значение, в пределах которого при $\varepsilon \leq \varepsilon_{bR}$ усилие N повышаться не будет. Определенные значения следует считать критическими (μ_{su}). В численных экспериментах для средних классов бетона и арматуры критический коэффициент составляет приблизительно 0,6%.

Таким образом, в армированных элементах при относительно малых коэффициентах армирования $\mu_s \leq \mu_{su}$ после достижения деформаций ε_{bR} дальнейшего повышения сжимающего усилия не происходит, и отмеченные деформации для данного элемента являются критическими. Это объясняется тем, что приращение усилия в арматуре при ее незначительном коэффициенте армирования не может компенсировать снижение прочности, связанное с деструктивными процессами в бетоне, работающем по закону нисходящей ветви диаграммы деформирования. Если коэффициент армирования $\mu_s > \mu_{su}$, то после достижения бетоном деформаций ε_{bR} возможно дальнейшее повышение нагрузки, воспринимаемой сечением. Эти деформации для данного элемента не являются критическими, таковыми для него будут деформации $\varepsilon_{bu} > \varepsilon_{bR}$.

Обратим внимание еще на одну важную особенность деформирования стержневых элементов из композитных материалов. Влияние коэффициента армирования $\mu_s > \mu_{su}$ на критические деформации бетона в случае однородного сжатия имеет место только в том случае, когда критические деформации арматуры $\varepsilon_{su} > \varepsilon_{bR}$. Если используется арматура с деформациями $\varepsilon_{su} < \varepsilon_{bR}$, то деформации сечения ε_{bu} не могут превышать критические деформации бетонных элементов при однородном деформировании.

Наглядной иллюстрацией рассмотренных закономерностей деформирования может служить модель напряженно-деформированного состояния армированного элемента ε . Армирование выполнено из арматуры, для которой критические деформации $\varepsilon_{su2} < \varepsilon_{bR}$. Поэтому к моменту достижения сечением деформаций ε_{bR} усилие в арматуре N_{s3} , определяемое коэффициентом армирования μ_{s3} (элемент \mathcal{M}), увеличиваться не может, поскольку оно достигло наибольшего значения при ε_{su2} , и при деформациях ε_{bR} арматура сжимается пластически. После достижения рассматриваемым армированным сечением деформаций ε_{bR} воспринимаемое им усилие будет иметь максимальное значение $N_{bs3} = N_b + N_{s3}$, и дальнейшее его устойчивое деформирование возможно только при снижении этого усилия, начиная с деформации ε_{bR} в вершине диаграммы $N_{bs3} - \varepsilon$.

Как видно, при критических деформациях арматуры $\varepsilon_{su} < \varepsilon_{bR}$ коэффициент армирования никакого влияния на критические деформации сечения не оказывает. Это связано с тем, что к моменту деформирования бетона до уровня ε_{bR} напряжения в арматуре достигают критических значений, и дальнейшего влияния на воспринимаемое сечением усилие и его деформативность арматура оказывать не может.

Анализируя вышеизложенное, можно заключить, что критические деформации армированного сечения при соответствующих параметрах армирования ($\mu_s > \mu_{su}$ и $\varepsilon_{su} > \varepsilon_{bR}$) могут значительно превышать таковые для однородно сжатого неармированного бетона. Такой вывод подтверждается многочисленными экспериментами разных авторов, отмеченными в работе [7]. Аналитическую оценку влияния параметров армирования на критические деформации рассматриваемых сечений можно проводить с учетом представленных выше рекомендаций.

Исследуя деформативность армированного сечения при однородном сжатии, необходимо также отметить существование проблемы определения предельного значения коэффициента армирования $\mu_{s,lim}$, при котором деструктивные процессы бетона выходят за пределы допустимых. Это связано с тем, что превышение коэффициентом армирования μ_s некоторого критического значения μ_{su} способствует, при известных условиях ($\varepsilon_{su} > \varepsilon_{bR}$), увеличению критических деформаций сечения ε_{bu} . Бетон в таких случаях при деформациях $\varepsilon > \varepsilon_{bR}$ работает по закону нисходящей ветви диаграммы деформирования и подвержен интенсивному образованию и развитию микротрещин. Причем начало деструктивных процессов, как известно, имеет место еще задолго до наступления указанных уровней деформаций [2].

Деструктивные процессы находятся в прямой зависимости от уровня деформирования при разных силовых воздействиях. Таким образом, чем выше коэффициент армирования ($\mu_s > \mu_{su}$), тем выше критический уровень деформирования, а значит, и степень деструктивных преобразований бетона. Преобразования структуры, кроме того, что они ощутимо, а при определенных условиях весьма существенно влияют на прочность бетона, по достижении определенной границы деструктивных преобразований могут привести к неудовлетворительному качеству материала, т.е. к его непригодности для нормальной дальнейшей эксплуатации в конструкциях.

Отмеченную опасность снижения сопротивления бетона необходимо учитывать в расчетах прочности, когда происходит повреждение структуры

и тем в большей степени, чем серьезнее накопленные повреждения. На это указывали в своих публикациях А. А. Гвоздев с соавторами [8], О. Я. Берг [1], однако в действующих нормах такой учет не реализован. Что касается влияния деструктивных процессов на качество материала, имеются в виду такие показатели, как плотность, морозостойкость, антикоррозионные защитные свойства, то в некоторых литературных источниках [2, 9] упоминается об этих проблемах, однако эксперименты, насколько нам известно, еще не проводились. До начала исследований ограничение верхней границы коэффициента армирования $\mu_{s,lim}$ можно осуществлять исходя из конструктивных требований, принятых в соответствующих нормах.

Обобщая полученные выводы, можно заключить, что напряжения в бетоне и арматуре одновременно могут достигать предельных значений только в случаях, если критические деформации арматуры уже достигнуты или выше к моменту достижения бетоном предельной прочности. Это связано с тем, что деформативность арматуры, как правило, превышает таковую бетона. Оценивая таким образом критическую деформативность сечения, представляется возможным определить расчетное сопротивление бетона, работающего в условиях нисходящей ветви диаграммы деформирования, и расчетное сопротивление арматуры в предельном состоянии. Такие расчетные характеристики можно определять как переменные параметры в зависимости от геометрических и механических характеристик материалов.

Изложенный подход к оценке прочности композитных материалов вносит определенный элемент новизны, что позволяет более объективно оценивать напряженно-деформированное состояние рассматриваемых сечений на стадии, предшествующей разрушению. Таким образом, имеется возможность избежать некоторой переоценки несущей способности элементов, которая может иметь место при использовании действующих норм, особенно для высокопрочных материалов – бетона и арматуры. В действующих нормативных документах принято, что в бетоне и арматуре для всех случаев сочетаний физических и механических параметров в предельном состоянии усилия достигают критических значений одновременно, а прочностные характеристики рассматриваются как некоторые константы, независимо от уровня деформирования. Однако такая оценка далеко не всегда соответствует действительной картине напряженно-деформированного состояния. Рассматриваемый подход к оценке деформативности армированного сечения элемента из композитного материала при однородном сжатии с учетом объективных закономерностей деформирования бетона и протекающих в нем деструктивных процессов позволит проектировать сечения более надежными.

Резюме

На основі узагальнення результатів досліджень роботи стрижневих елементів із композитних матеріалів відзначено недостатнє вивчення впливу різних факторів на їхню деформативність. Порівняння напружено-деформованого стану різних моделей, якими можуть служити стрижневі бетонні та армовані елементи, дозволило обґрунтувати суть впливу поздовжнього армування

(ступінь насичення, характеристики міцності і деформативності) на критичні деформації перерізу. За результатами виконаних досліджень даються рекомендації з визначення критичного значення ступеня насичення арматурою (коефіцієнта армування), при перевищенні якого може мати місце вплив армування на деформативність розглянутих перерізів. Відзначено особливість зниження опору крихкої основи композита з неоднорідною структурою, що має дефекти, внаслідок деструктивних процесів і обгрунтовано необхідність уточнення існуючої методики розрахунку такого зниження. Розглядається проблема визначення граничного значення коефіцієнта армування.

1. Берг О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. – М.: Госстройиздат, 1961. – 96 с.
2. Берг О. Я., Щербаков Е. Н., Нисанко Г. Н. Высокопрочный бетон. – М.: Стройиздат, 1971. – 208 с.
3. Чистяков Е. А., Бакиров К. К. Высокопрочная арматура в сжатых элементах с косвенным армированием // Бетон и железобетон. – 1976. – № 9. – С. 35 – 36.
4. Матков Н. Г. О диаграммах деформирования сжимаемых железобетонных элементов с продольным и поперечным армированием // Совершенствование методов расчета статически неопределимых железобетонных конструкций: Сб. тр. – М.: НИИЖБ, 1987. – С. 135 – 142.
5. Роговой С. И. К уточнению расчетного сопротивления бетона, работающего по закону нисходящей ветви диаграммы деформирования // Наук. вісник будівництва. – 2000. – Вип. 11. – С. 113 – 117.
6. Роговой С. И. К определению критических деформаций в вершине полной диаграммы деформирования бетона // Коммунальное хоз-во городов. Серия: Техн. науки. – 2001. – Вып. 27. – С. 163 – 167.
7. Гвоздев А. А., Дмитриев С. А., Крылов С. М. и др. Новое о прочности железобетона / Под ред. К. В. Михайлова. – М.: Стройиздат, 1977. – 272 с.
8. Гвоздев А. А., Байков В. Н. К вопросу о поведении железобетонных конструкций в стадии, близкой к разрушению // Бетон и железобетон. – 1977. – № 9. – С. 22 – 24.
9. Бондаренко В. М., Бондаренко С. В. Инженерные методы нелинейной теории железобетона. – М.: Стройиздат, 1982. – 287 с.

Поступила 06. 06. 2001