

УДК 624.016:539.3

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ БЕТОННОЙ БАЛКИ, АРМИРОВАННОЙ СТЕКЛОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРОЙ

**В.В. Семёнов<sup>1</sup>, И.А. Буторов<sup>2</sup>**

Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

В статье рассматриваются напряженно-деформированное состояние стеклопластиковой арматуры (АСП), а также НДС балки, усиленной с её помощью. Производится сравнение физико-механических свойств АСП с традиционной стальной арматурой. Выявляются достоинства и недостатки такой арматуры и границы её применения на сегодняшний день.

*Ключевые слова:* стеклопластиковая арматура; усиление конструкций композитами; физико-механические свойства АСП; НДС конструкций армированные АСП.

### STRESS AND STRAIN STATE OF CONCRETE BEAM REINFORCED WITH FIBREGLASS PLASTIC REBAR

**V.Semionov, I. Butorov**

Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov Str., Irkutsk, 664074, Russia

The article discusses the stress and strain state of fibreglass plastic rebar (FRP rebar) as well as that of the beam reinforced with it. The authors compare physical-mechanical properties of FRP rebar with traditional steel reinforcement and reveal the advantages and disadvantages of such a rebar and its application today.

*Keywords:* fibreglass rebar; reinforcement of structures with composites; physical-mechanical properties of FRP rebar; the stress and strain state of fibre-reinforced plastic rebar.

В современном строительстве композитная арматура (далее АСП) набирает всю большую популярность у строителей и проектировщиков, в первую очередь из-за относительной дешевизны и некоторых свойств, которыми не обладает традиционная арматура. Однако на данный момент детально не изучено поведение АСП в различных условиях работы, что ставит задачу перед механикой деформируемого твердого тела разработать теорию расчета конструкций армированных АСП. Композиционные материалы (в частности АСП) по сравнению с традиционными требуют более детального и глубокого анализа в связи с их анизотропией и неоднородностью.

К примеру, влияние ползучести композиционных материалов на несущую способность конструкций подробно не изучено, это связано с отсутствием современного испытательного оборудования для такого вида материала, математической модели, которая в полной мере могла бы отразить работу композиционных материалов.

Из-за недостатка этих знаний, практическое применение композитов в несущих конструкциях опасно для дальнейшей их эксплуатации, что приводит к увеличению расхода материала для компенсации прочности, и увеличивает стоимость конструкций. Но прежде чем рассчитывать и анализировать напряженно-деформированное состояние (далее НДС) конструкции на основе стеклопластиковой арматуры, нужно изучить физико-механические свойства самой АСП и её НДС при растяжении-сжатии.

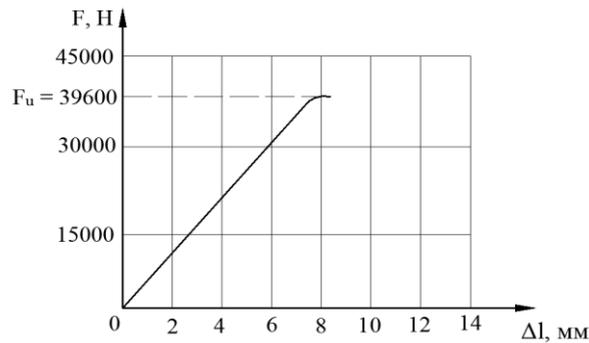
#### Напряженно-деформированное состояние АСП при осевом растяжении-сжатии

Для того чтобы охарактеризовать механические и деформативные свойства АСП, в данной статье использовались результаты лабораторных исследований Центральной научно-исследовательской лаборатории (ЦНИЛ) г. Липецк, которая испытывала арматуру АСП с диаметром  $d = 6$  мм. Диаграмма растяжения образца представлена на рис. 1.

<sup>1</sup> Семёнов Валерий Васильевич, кандидат технических наук, профессор кафедры сопротивления материалов и строительной механики, e-mail: 665057@mail.ru

Semenov Valeriy, Candidate of Technical Sciences, Professor of Materials Strength and Structural Mechanics Department, e-mail: 665057@mail.ru

<sup>2</sup> Буторов Илья Айратович, студент 3 курса Института архитектуры и строительства, e-mail: Butorov-96@mail.ru  
Butorov Ilya, a third-year student of Architecture and Construction Institute, e-mail: Butorov-96@mail.ru



**Рис. 1. Диаграмма  $F - \Delta l$  растяжения образца (АСП)**

Опыты показали, что разрушение происходит при нагрузке в 3960 кг, или в единицах силы 39,6 кН. Используя эти данные, вычислим предел прочности:

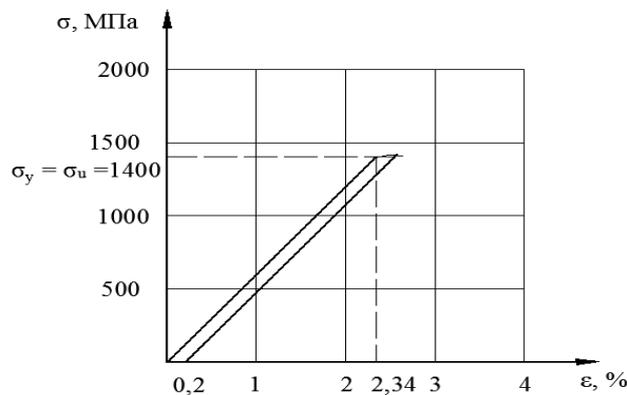
$$\sigma_u = \frac{4 \cdot F_u}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 39,6 \cdot 10^3}{3,14 \cdot 36} = 1400 \text{ МПа}$$

и максимальную относительную деформацию

$$\varepsilon = \frac{\sigma_u}{E_{АСП}} = \frac{1400}{6 \cdot 10^4} \cdot 100\% = 2,33\%$$

где  $E_{АСП}$  – модуль упругости АСП.

Используя эти данные, построим диаграмму растяжения материала (рис. 2). Как видно из рисунка, условный предел текучести практически совпадает с пределом прочности АСП, следовательно, материал практически не течет. Отсутствие шейки в образце свидетельствует об упругой работе АСП вплоть до разрыва (рис. 4).



**Рис. 2. Диаграмма  $\sigma - \varepsilon$  материала (АСП)**

Для того чтобы оценить физико-механические свойства АСП, сравним ее с диаграммой  $\sigma - \varepsilon$  растяжения малоуглеродистой стали марки Ст3 (рис. 3).

Сравнивая диаграммы  $\sigma - \varepsilon$  растяжений АСП и стали марки Ст3 можно заключить следующее:

- при малых нагрузках в области упругой работы АСП более деформативна по сравнению со Ст3 ( $E_{АСП} < E_{Ст3}$ );
- закон Гука в металле ограничивается пределом пропорциональности тогда, когда АСП работает в упругой стадии вплоть до своего предела прочности ;
- предельное сопротивление у АСП больше, чем у Ст3 ( $\sigma_{u,АСП} > \sigma_{u,Ст3}$ );
- АСП почти не претерпевает пластического деформирования перед разрывом;
- предельное сопротивление АСП определяется пределом прочности, а стали – пределом текучести, при этом  $\sigma_{u,АСП} \gg \sigma_{y,Ст3}$ .

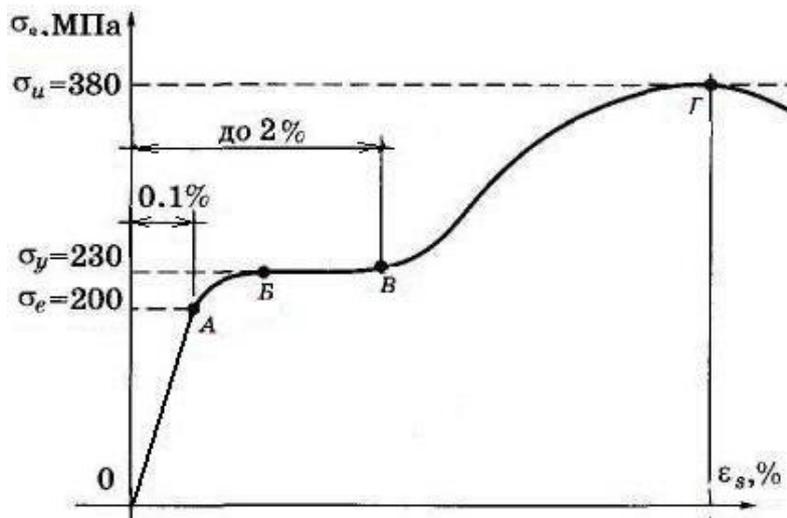


Рис. 3. Диаграмма  $\sigma - \varepsilon$  стали марки Ст. 3

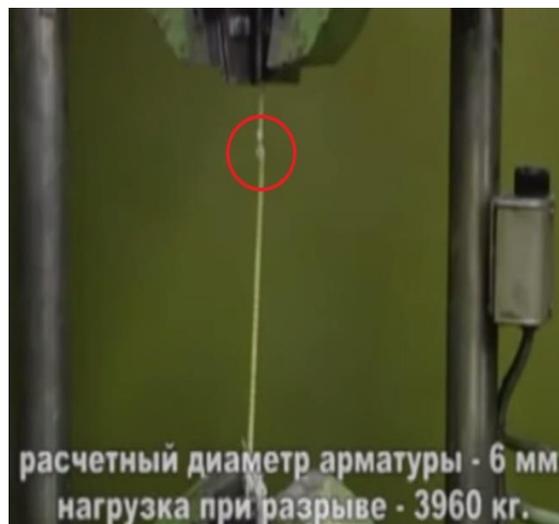


Рис. 4. Момент разрушения АСП

Достоинством АСП перед стальной арматурой является ее небольшая масса, что приводит к облегчению конструкции, а также высокие физико-механические свойства по сравнению со стальной арматурой. Однако деформативность АСП намного выше, чем у стали.

#### Физико-механические свойства АСП

По физико-механическим свойствам (таблица) можно определить главные достоинства и недостатки АСП по сравнению со стальной арматурой, а также границу применения АСП в конструкциях различного вида.

АСП нетеплопроводна, что является отличным свойством для ограждающих конструкций. Благодаря отсутствию теплопроводности, у АСП исключаются мостики холода, следовательно, тело конструкции не промерзает, микроклимат помещения остается в норме, уменьшается плата за тепловую энергию.

Второе немаловажное свойство АСП – коррозионная стойкость. Благодаря этому свойству срок службы бетонных конструкций увеличивается в 2–3 раза, не требуется дополнительных мер по коррозионной защите, что в свою очередь уменьшает стоимость изготовления конструкции.

## Механические и физические свойства АСП

Свойства	
Механические	Физические
Предел прочности $\sigma_u = 1400$ МПа. (В зависимости от класса арматуры предел прочности варьируется от 1300 -1700 МПа)	Плотность $\rho = 1900 - 2100$ кг/м <sup>3</sup>
Модуль Юнга $E = 6 \cdot 10^4$ МПа. (В зависимости от класса арматуры предел прочности варьируется от $6 \cdot 10^4$ - $8 \cdot 10^4$ МПа)	Нетеплопроводна
Упруго-пластичный материал при стремлении к пределу прочности	Является диэлектриком
Коэффициент Пуассона $\nu = 0,22 - 0,25$	Коррозионная стойкость
	Малая масса

Химическая стойкость АСП позволяет применять бетон, армированный АСП, для резервуаров химической промышленности. АСП является диэлектриком, предотвращая распространение блуждающих токов в конструкции, а также позволяет монтаж электрического оборудования, не опасаясь в случае аварии распространения электрического тока по всему сооружению.

Малая масса позволяет уменьшить собственный вес бетонных конструкций в разы.

АСП является дешевым материалом в тех случаях, когда возможна замена стальной арматуры на неё.

Легкость монтажа позволяет увеличить производство работ на строительной площадке.

К недостаткам АСП можно отнести высокую деформативность по сравнению со стальной арматурой. АСП также является не термостойким материалом, что при пожаре может нарушать конфигурацию армирования в теле бетона, вследствие чего могут возникать дополнительные усилия, концентрация напряжений и разрыв в некоторых частях конструкции. Ограниченная область применения из-за не достатка теорий расчета таких конструкций.

Сцепление АСП с бетоном также влияет на НДС конструкции. От этого зависит возникновение дополнительных усилий и напряжений. Например, при заклинивании арматуры в теле бетона появляется сила распора и сопровождающие его силы трения. Или микронеровности арматуры вызывают вокруг себя концентрации напряжений, что в дальнейшем могут только расти, приводя к разрушению всей конструкции. Однако при усадке в процессе твердения бетона АСП обжимается, в результате чего повышается сцепление. Поэтому можно утверждать о необходимости дальнейшего изучения вопросов сцепления АСП с бетоном в различных условиях.

В наше время АСП используют в основном в малоэтажном строительстве, для армирования фундаментов, монолитных стен, перекрытий. В многоэтажном строительстве она практически не используется, либо – в комбинации со стальной арматурой. В промышленном строительстве её начали применять недавно и только для армирования бетонных полов или стен, не воспринимающих большие нагрузки.

Такое ограничение АСП в строительстве имеет ряд причин.

Во-первых, до 2014 года не существовало никаких нормативных документов, позволяющих проектировать конструкции на основе АСП и других композиционных материалов. Только в 2014 году появился СП 164.1325800.2014 "Проектирование усиления железобетонных конструкций композитными материалами".

Во-вторых, нет точных математических моделей и программных комплексов, позволяющих проектировать такого вида конструкции.

В-третьих, психологический фактор, заключающийся в том, что строители и даже проектировщики считают АСП простым "пластиком", не способным нести нагрузку.

### Напряженно-деформированное состояние бетонной балки, армированной АСП, при прямом поперечном изгибе

Испытание балки проводилось в ДГТУ (Дагготехуниверситет). В качестве образца для испытаний выбрали балку, армированную АСП, размерами 120x60x400 мм.

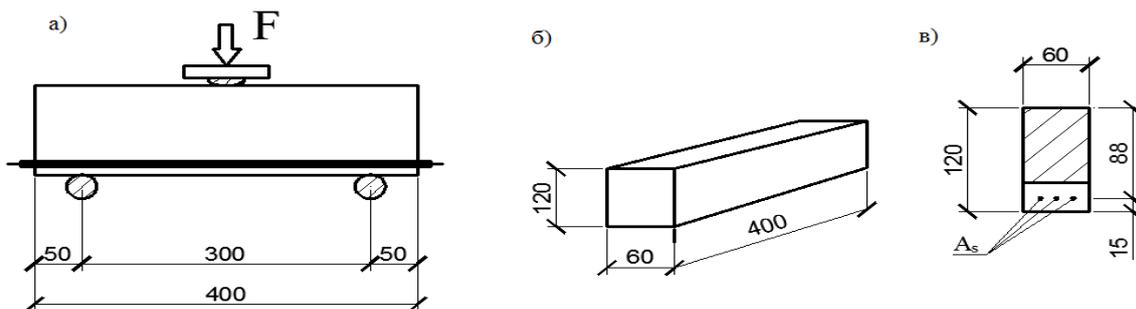


Рис. 5. Балка, армированная АСП: а – расчетная схема; б – геометрические размеры; в – схема армирования

При  $F = 45 \text{ кН}$  балка разрушилась с образованием трещины ближе к опоре (рис. 6, а, б).

Для сравнения несущей способности взяли такую же балку с такой же схемой армирования только вместо АСП использовали стальную арматуру А-I (А 240)  $\varnothing 6 \text{ мм}$ .

Разрушение балки со стальной арматурой произошло при  $F = 27 \text{ кН}$  (рис. 7, а, б).

Построим в программном комплексе SCAD эпюры изгибающих моментов и поперечных сил балки, армированной АСП, и балки, армированной стальной арматурой (рис. 8). На основе этих эпюр вычислены и представлены эпюры касательных и нормальных напряжений в поперечных сечениях балок (рис. 9).

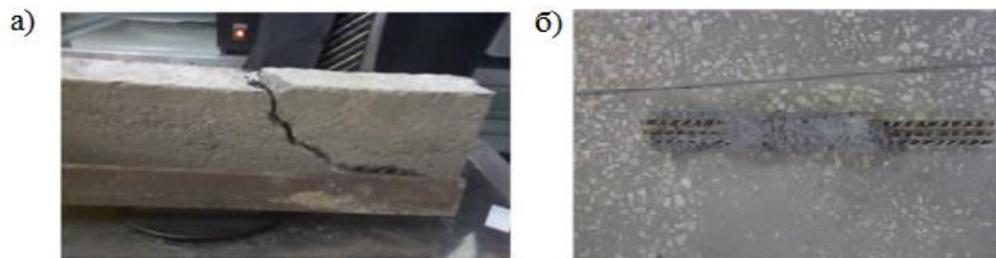


Рис. 6. Характер разрушения балки, армированной АСП: а – вид сбоку; б – вид снизу

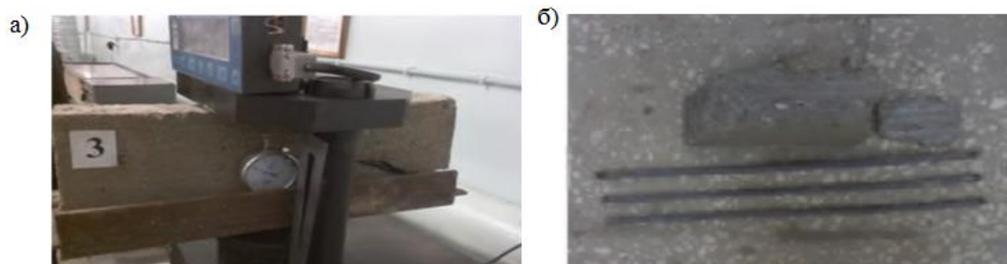


Рис. 7. Характер разрушения балки, армированной стальной арматурой А-I (А 240)  $\varnothing 6 \text{ мм}$ : а – вид сбоку; б – вид снизу

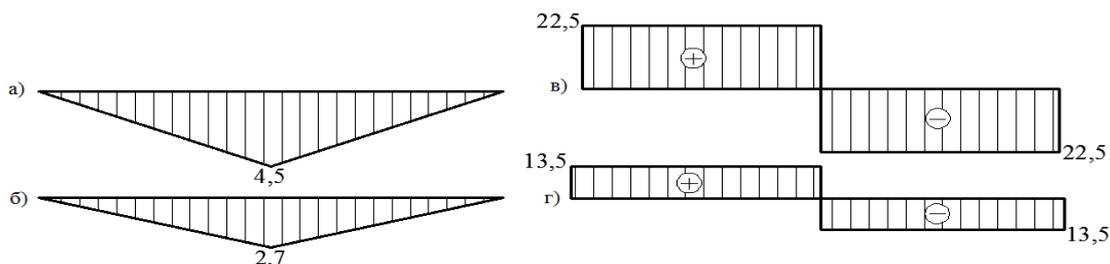
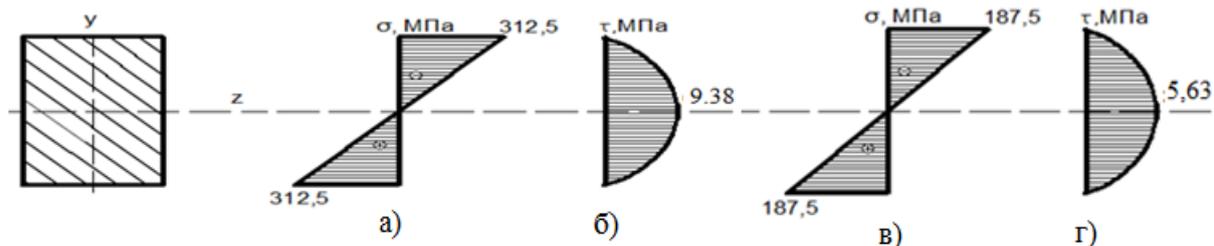


Рис. 8. Эпюра изгибающего момента  $M$ : а – балки, армированной АСП, кНм; б – балки, армированной стальной арматурой, кНм; в – эпюра поперечных сил  $Q$  балки, армированной АСП, кН; г – эпюра поперечных сил  $Q$  балки, армированной стальной арматурой, кН



**Рис. 9. Эпюры нормальных  $\sigma$  и касательных  $\tau$  напряжений балки, армированной АСП соответственно (а, б) , МПа; в, г – эпюры нормальных  $\sigma$  и касательных  $\tau$  напряжений балки, армированной стальной арматурой соответственно, МПа**

Из эпюр напряжений видно, что максимальные нормальные напряжения, возникающие в балке при ее армировании АСП больше, чем в балке армированной стальной арматурой: ( $\sigma_{z, \max}^{АСП} = 312,5 \text{ МПа} > \sigma_{z, \max}^{A240} = 187,5 \text{ МПа}$ ), тоже самое можно сказать о касательных напряжениях ( $\tau_{z, \max}^{АСП} = 9,38 \text{ МПа} > \tau_{z, \max}^{A240} = 5,63 \text{ МПа}$ ).

Несущая способность балки, армированной АСП, увеличилась в 1,7 раза по сравнению с балкой, армированной стальной арматурой, без увеличения поперечного сечения.

Поэтому при проектировании бетонных конструкций, армированных АСП, можно назначать меньшее сечение, что позволит сэкономить материал и уменьшить собственный вес конструкции.

#### Библиографический список

1. Михайлов А.М. Сопротивление материалов: учебник для студ. вузов. – М.: ИЦ «Академия», 2009. – 448 с.
2. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов: учеб. для вузов. – 2-е изд. испр. – М.: Высш. шк., 2001. – 560 с.
3. ГОСТ 31938 – 2012 Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия.
4. СП 164.1325800.2014 Проектирование усиления железобетонных конструкций композитными материалами.
5. Фудзии Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов: пер. с япон. – М.: Мир, 1982. – 232 с.
6. Дагестанский государственный технический университет [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dstu.ru>
7. Центральная научно-исследовательская лаборатория (ЦНИЛ) г. Липецк [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cnil-lipetsk.narod.ru>