

УДК 624

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО
НАПРЯЖЕННЫХ БЕТОННЫХ БАЛОК АРМИРОВАННЫХ
БАЗАЛЬТПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРОЙ**

*Гигинейшвили Дж., Мацаберидзе Т. ,
Чикваидзе Г. Н., Гигинейшвили Д.Д.
ООО «ПРОГРЕСИ», г. Тбилиси, Грузия*

1. Введение

На территории Грузии во многих месторождениях (*Ахалцихе, Марнеули, Каспи, Боржоми, Чиатура и др.*) находятся карьеры, из сырья которых получают высококачественные базальтовые волокна, на основе которых можно получить строительные материалы, конструкций и предметы широкого потребления. Базальтовые неметаллические строительные материалы, конструкций и предметы широкого потребления, полученное из этих карьеров, обладает высокой исходной прочностью и долговечностью.

На основе переработки базальтового щебня можно получить высококачественное базальтовое волокно (ровинг, нити, базальтовые фибры и др.), обладающее следующими физико-механическими характеристиками:

1. - разрывная прочность 18000-19000кгс/см²;
2. - -265^0 - $+600^0$ С в температурном интервале не меняет физико-механических характеристик;
3. - коррозионная стойкость по сравнению железа и стальных изделий 15-20раз выше;
4. - по сравнению материалов на основе железа и сталей, вес конструкции полученные на основе базальтового волокна легче 3.5-3.6 раза.
5. Модуль упругости базальтового волокна находится в пределах 650000-700000 кгс/см².

Популярность среди строительных фирм базальтпластиковой арматуры (БПА) растет с каждым днём. В настоящее время в ряде стран Мира, и в том числе в Грузии, уже построены заводы по производству волокон из базальтового камня, а также планируется производство БПА для армирования бетонных элементов конструкций. В связи с этим, нами проведены исследования с целью широкомасштабного применения БПА в строительстве.

БПА обладает рядом преимуществ перед стальной арматурой. Главные из них это:

1. **Легкость** - это значительный плюс, для выполнения всех видов строительных работ. Незначительный вес БПА арматуры не только облегчает ее доставку (расходы на транспорт), разгрузку и монтаж, также за счет этого вес самой конструкции невелик и затраты на работы и общий вес в целом здания или сооружения также уменьшаются, что удешевляет расходы на фундамент и другие несущие конструкций.

2. **Надежность** - арматура из БПА прочнее стальной арматуры во много раз. Такая арматура обладает высокой прочностью на разрыв. Она способна выдерживать воздействие 1000-1200МПа. Этот показатель позволяет

использовать данную арматуру в строительстве зданий и сооружений различного масштаба и назначения.

3. **Инертность к электричеству (диэлектрик)** - это качество позволяет усиливать коэффициент безопасности от пожаров. Исключает появление блуждающих токов и накапливание статистического напряжения.

4. **Высокий показатель стойкости к коррозионным процессам** - БПА не поддается коррозии и практический не разрушается от коррозии.

5. **Низкая теплопроводность** - применение БПА позволяет снизить расход тепла, соответственно и энергии через мостики холода, которые возникают, когда используется стальная арматура. Это качество очень важно и должно учитываться при строительстве эффективных сооружений с точки зрения расхода тепловой энергии.

БПА арматура не выделяет вредных веществ, не подвержена коррозии, не создает магнитных и электрических полей, не создает Клетку Фарадея, мобильные телефоны, Wi-fi и любые другие беспроводные устройства ловятся лучше.

Использование неметаллической БПА арматуры, взамен металлической, даст возможность получить материалы не только неметаллические, но и имеющие качественно новые более высокие характеристики, позволяющие увеличить срок службы конструкций используемых в агрессивной среде, снизить металлоемкость конструкций, их вес и стоимость, и соответственно, трудоемкость строительства. По сравнению со стальной арматурой, БПА обладают значительно более высокой коррозионной стойкостью, теплозащитными и диэлектрическими свойствами, немагнитны и радиопрозрачны.

Одним из сдерживающим фактором массового применения БПА для армирования бетонов является увеличенная деформативности бетонных элементов конструкций армированных БПА, что и привело к необходимости проведения многочисленных экспериментальных исследований, и в том числе данного исследования. БПА изготавливалось на опытной установке в г. Тбилиси, по производству базальтовой арматуры и других профильных изделий на основе непрерывного базальтового волокна. Для производства БПА, использовались базальтовое волокно, «производства Руставского завода из пароды базальтов Марнеульского происхождения». Диаметр БПА 6.5мм, диаметр оплетки 1.0мм. Напрягающий цемент производства Пашийского завода РФ НЦ-20. бетон марки В22.5.

2. Основная часть

Предварительно-напряжённая конструкция была получена на основе расширения бетона. В начальной стадии работы конструкции предполагаем, что они равны, так как принимаем, что на этом этапе скольжение арматуры отсутствует. Усилие, затрачиваемое на обжатие арматуры при расширении бетона, определяем из условия равновесия при переходе к напряжениям

$$\sigma_0^6 F_6 = \sigma_0^a F_a . \quad (1a)$$

Здесь σ_0 индексом 0 обозначено значение величины напряжения сразу после затвердения бетона и завершения основного процесса расширения. Значения моментов от внецентренного приложения усилий и предварительного обжатия конструкций подсчитывалось по формуле 1

$$M_0 = N_0 / (h/2 - a) , \quad (1)$$

из 1-ого можно получить усилия от обжатия:

$$N_0 = \frac{M_0}{(h/2 - a)} = \frac{M_T^{on} - M\xi}{(h/2 - a)} \quad (2)$$

С целью изучения вопроса деформирования рассмотрим сечения балок в зоне чистого изгиба. Известно, что при чистом изгибе, деформацию балок можем рассматривать как результат поворота плоских сечений относительно друг -друга. В результате поворота сечений, нижние слои удлиняются, а верхнее укорачиваются, а изменение кривизны нейтрального слоя можно выразить следующим образом (формулой):

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{dz} , \quad (3)$$

В следствие расширения, на уровне центра растянутой арматуры сечения балок получит приращение в длины Δa , тогда мы можем записать выражения определяющее углы поворота:

$$\theta_a = \frac{\varepsilon_{ac} \ell}{r} , \quad (4)$$

$$\theta_b = \frac{\varepsilon_{bcp} \ell}{r} , \quad (5)$$

где: ε_{ac} - среднее удлинения БПА.,

ε_{bcp} - среднее укорочение бетона на уровне нейтральной линий.,

r - расстояние от нейтральной арматуры.

Суммарное удлинение растянутой БПА, а также и значение поворота сечений из формул 4-5, с применением компьютерного моделирования положенных в работах [13,14 и 15] можем записать так:

$$\varepsilon_{ac} = \frac{2\theta_a (h_0 - X_{cp})}{\ell} \quad (6)$$

Для кривизны нейтрального слоя относительно центра поворота поперечных сечений справедлива следующая запись:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{2\theta}{\ell} = \frac{\varepsilon_{ac}}{h_0 - X_{cp}} = \frac{\varepsilon_{bc}}{X_{cp}} = \frac{\varepsilon_{ac} + \varepsilon_{bc}}{h_0} = \frac{\varepsilon_{ac} + \varepsilon_{bc}}{r} \quad (7)$$

Как известно [13,14 и 15], среднюю кривизну на участке с нарушенной сплошностью материала (1), можем записать так:

$$\left(\frac{1}{\rho}\right)_{cp}^{\ell_n} = \frac{\Psi_a^{\ell_n} \varepsilon_b + \Psi_b^{\ell_n} \varepsilon_a}{h_0} \quad (8)$$

При измерении средних деформаций БПА на некоторой фиксированной базе ℓ , коэффициент Ψ_a , учитывающий работу растянутого бетона между трещинами, может быть представлен выражением

$$\Psi_a = \frac{\int_0^{\ell} \varepsilon_{ax} dx}{\ell \varepsilon_a^{\ell, \max}} = \frac{\varepsilon_{ac}^{\ell}}{\varepsilon_a^{\ell, \max}} \quad (9)$$

Плечо внутренней пары сил в сечении с трещиной и без, отличаются мало. Для первого приближения примем, что они равны. Запишем значения углов поворота от перемещений в следующем виде:

$$\theta_a^{on} = \frac{4Y_{\max}}{\ell} \quad (10)$$

где: Y_{\max} - максимальные значения прогибов в пролете,

l - зона чистого изгиба.

Определяем приведённый момент инерции БПА в сечении между трещинами:

$$I_{am} = \frac{M\ell^2}{8E_a Y_{\max}}; \quad (11)$$

Приведённый момент инерции БПА в сечении с трещиной:

$$I_{am} = F_{am} Z_{am}^2 \cong F_{am} (0.9h_0)^2, \quad (12)$$

тогда:

$$F_{am} = \frac{I_{am}}{0.81h_c^2} \quad (13)$$

Если работает только БПА, то $I_{am} = 0.81h_0^2 E_{am}$ и прогибы получаются значительно большие. Если работает арматура и растянутый бетон, то прогибы меньше, что равносильно при неизменном $Z_{am}^2 \times 0.81 \times h_0^2 \times E_{am}$, увеличению площади БПА F_a . Тогда деформация БПА F_{am} при равенстве прогибов $Y_{max} \rightarrow \varepsilon$

$$\varepsilon_a = \frac{M}{Z_{am} F_{am} E_0}, \quad (14)$$

$$\varepsilon_{ac} = \psi_a \varepsilon_a; \quad z_{am} = 0.9h_0; \quad (15)$$

где:

$$M = F_a \sigma_a 0.9h_0 = E_0 F_a 0.9h_0 = F_a \frac{\varepsilon_{ac}}{\psi_a} 0.9h_0 E_a$$

После преобразования получим:

$$\varepsilon_{ac} = \frac{M \psi_a}{E_a F_{ac} 0.9h_0}. \quad (16)$$

Геометрические размеры, схемы армирования и приложения нагрузок, а также результаты исследования предварительно напряженных бетонных балок армированных БПА представлены в виде диаграмм зависимостей и представлены на рис. 2,3.

С целью уточнения теоретических результатов и получения подробного распределения деформаций и напряжений, самонапряженных бетонных балок армированных БПА, проведен анализ на основе компьютерного моделирования с применением вычислительного комплекса «ЛИРА САПР 2013», учитывающий особенностей нелинейного деформирования материалов. Полученные результаты представлены на рис. 4.

Для моделирования конструктивных элементов были применены универсальные модули, из библиотеки «ЛИРА САПР 2013», соответствующие следующим типам конечных элементов:

- 208- специальный физически нелинейный двухузловой КЭ, предварительного натяжения (моделирует БПА);

- 36 – Универсальный пространственный восьмиузловой изопараметрический КЭ (моделирует бетон);

- опоры для балок: - шарнирные .

Нагрузки: 1. Собственный весь. 2. Предварительное напряжение. 3. Нагрузка на балку приложена по ступеням в третьих частях пролета.

Данные для расчета получены на основании исследований опытных образцов конструкций с БПА периодического профиля, изготовленного методом протяжки на экспериментальной установке (в г. Тбилиси).

Усилие для предварительного напряжения на каждый арматурный стержень было принято $N_0 = -6тс$.

Диаграмма «напряжение-деформация» БПА полученного при таком способе производства практически прямолинейна вплоть до разрыва (см. рис. 1.). Однако, приведенные данные являются экспериментальными и подлежат дальнейшим уточнениям, с учетом особенностей содержания самого волокна. Существенным является тот факт, что диаметр влияет на значение временного сопротивления БПА, чем тоньше арматура, тем выше ее прочность.

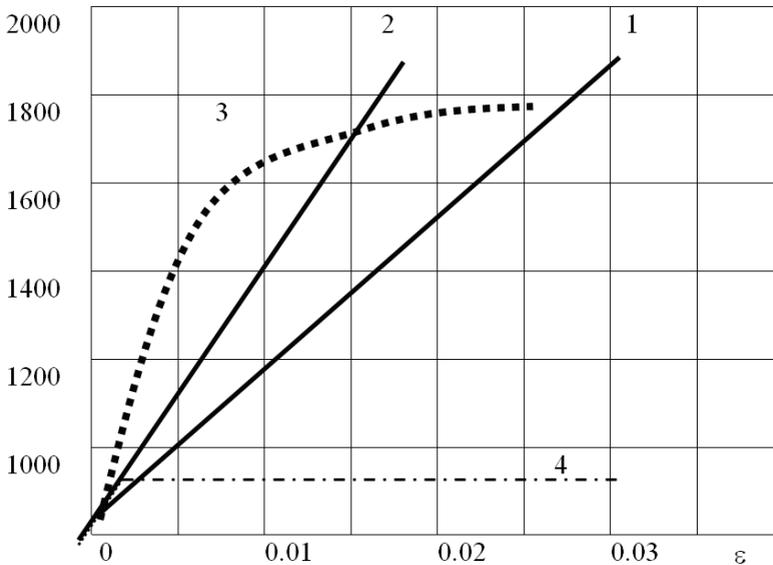


Рис. 1. Зависимость относительного удлинения ϵ от напряжений σ для:
 1-БПА; 2-холоднотянутая сталь; 3-высокопрочный канат;
 4-сталь с высоким пределом текучести.

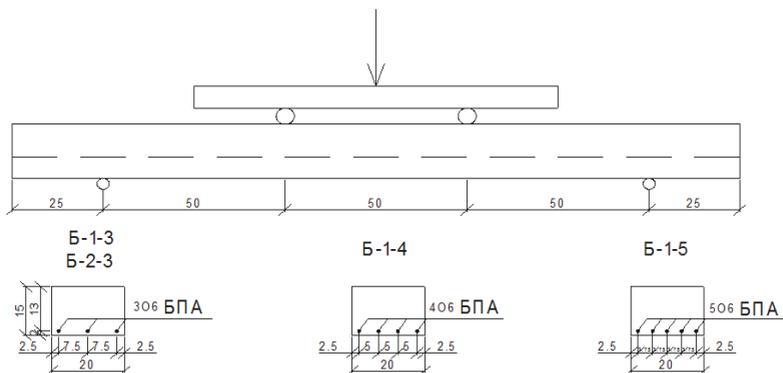


Рис.2. Схема армирования и нагружения предварительно напряженных балок

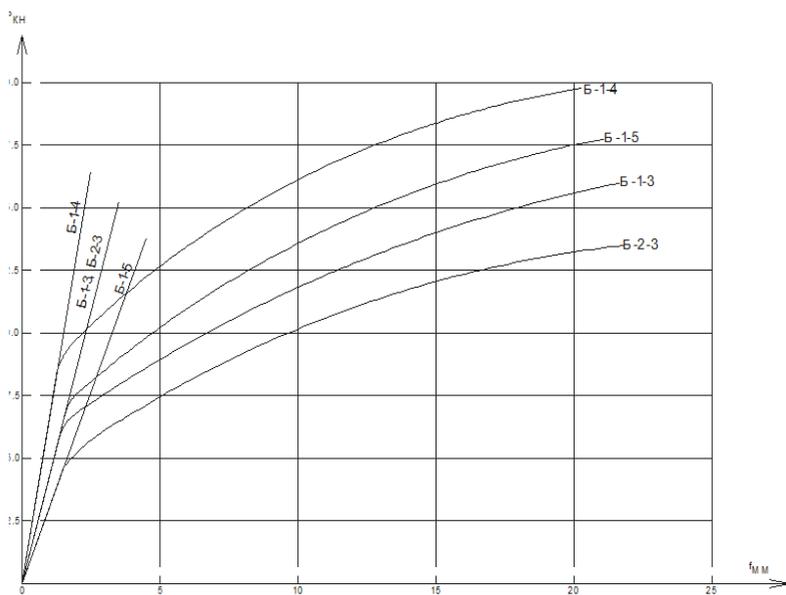
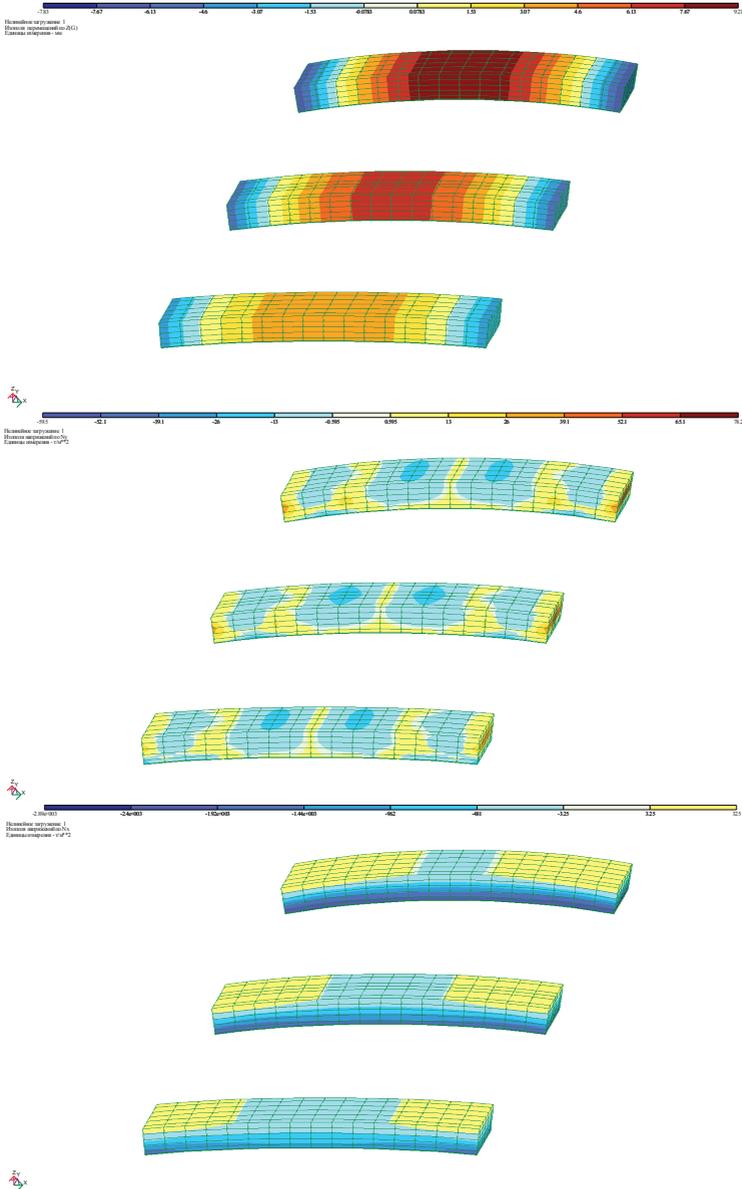


Рис.3 Зависимость нагрузки деформации предварительно напряженных балок, армированных базальтопластиковой арматурой



ВЫВОДЫ:

1. Для создания предварительно-напряженных конструкций армированных из базальтпластиковой арматуры по предложенной технологии не требуются специальные захватные устройства, которые неудобны в обслуживании и к тому же, как правило повреждают арматуру в зоне захвата стержня. По предложенной технологии передача растягивающих усилий происходит благодаря касательным напряжениям, возникающим при расширении напругающего цемента и развивается по контактной линии арматура-бетон;
2. Результаты по предложенной методике и по методике СНиП 11-21-85, а также компьютерного моделирования для определения напряженно-деформированного состояния конструкций, отличаются в среднем на 15%;
3. Использование напругающего цемента с малой энергией расширения и минимальным диаметром БПА (6.5мм) для создания предварительно напряженные конструкций, нужно считать малоэффективным, т.к. разрушение балок происходили до достижения предельных значений в БПА;
4. Практически прямолинейная зависимость σ - ε (напряжение-деформация) БПА до самого разрыва при растяжении, сохраняет предварительно напряженные состояния стадии появления трещин и вплоть до разрушения бетонных балок, при этом уменьшая деформационные показатели элементов конструкций;
5. Высокие физико-механические и деформационные показатели бетонных элементов армированных базальтовой арматурой предопределяют целесообразность применения таких конструкций для сейсмостойких и специальных зданий и сооружений;
6. Проведенные многочисленные исследования подтверждают, что коэффициент прилипания бетона к БПА меньше, чем коэффициент прилипания бетона к стальной арматуре. Поэтому, фактору улучшения зацепления БПА с бетоном должна отводиться еще большая роль и внимание.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. J. Gigineishvili and others. Not welded connections. Invention USSR, N 1830404. Moscow, 1990.
2. J. Gigineishvili. Y. Veriujski and others. . Not welded connections. Invention USSR, N 1830405. Moscow, 1992.
3. J. Gigineishvili and others. Multi-storey suspended structures for complex relief conditions. SAKPATENTI, N 584, Tbilisi, 1995.
4. J. Gigineishvili. Connection of reinforcement shanks, pipes and other elements. SAKPATENTI, N P1755, Tbilisi, 1997.
5. J. Gigineishvili, I. Mgaloblishvili. Technological line of production of compositive nonmetal construction reinforcement bars and pipes. SAKPATENTI, N P 2000, Tbilisi, 1997.

6. J. Gigineishvili, G. Chikvaide. Pipes and pipe-like structures. (6 various Pipes and pipe-like structures in composite basalt fibers) SAKPATENTI, N P2930. Tbilisi, 2000.
7. J. Gigineishvili, L. Gogichaishvil, G.Huhia, G. Tikurishvili, O. Tsisilashvili. Strengthening of slopes by using basalt fibers. SAKPATENTI, Tbilisi, 2004.
8. J. Gigineishvili (I. Veriujski, A. Snitko). Modeling of processes of destruction of compound bodies by a numerical - analytical method of potential. The mechanics Composite Materials. Riga. - 1989. №6, pages 1024-1031.
9. J. Gigineishvili (I. Veriujski). Проектирование быстровозводимых зданий и сооружений в горных районах. IDEEA ONE. First Internasional Design for Extreme Environment Assembl. Houston. Oktober 1991. USA.
10. J. Gigineishvili. Numerical - analytical method POTENTIAL calculation of designs Composite Materials in view of destructions. Teoretical mechanics also is false. To six national congress on the theoretical and applied mechanics. Varna - 1989. Sofia: BAN, 1990. Book. 2, pages 35-38.
11. J. Gigineishvili, (I. Veriujski, A. Snitko). Numerical modeling, dissain and technology of structures for extreme environments. Methods of potential and final elements in the automated researches of engineering designs. The theses of the reports International of conferences. Academi of Siense Russian Federation the House of the scientists. St. Petersburg. 1996. Pages 26-27.
12. J. Gigineishvili. Results numerical and experimental researches without welding of connections of elements of ferro-concrete designs. Materials of All-Union scientific and technical conferences « Modern problems of development of ground base of civil aircraft », Moscow 1989, pages 28-34.
13. J. Gigineishvili (I. Veriujski, G. Sudakov). Application of a numerically analytical method of potential to the decision of contact tasks of account of coupling of the fixture with concrete. New experimental researches and methods of account of ferro-concrete designs. The collection of the proceedings /under. Red. Ampere-second. Zalesov and Ilin/ M. NIJB Gosstroia USSR. 1989, pages 61-72.
14. Городецкий А.С., Евзеров И. Д. Компьютерные модели конструкций. КИЕВ «ФАКТ» 2007.
15. Y. Veriujski, J. Gigineishvili, D. Gigineishvili, T. Matsaberidze. On theoretical and experimental research of building structure made on the sasis of glas and basalt.Kiriak Zavriev Institute of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, Tbilisi, Georgia. 2008, pages 74-78.
16. «Программный комплекс ЛИРА-САПР® 2013. Учебное пособие: Электронное издание», 361 стр., 2013 год.