

УДК 539.3:691.87:691.175-419.8:678.067.5

## Особенности испытаний композитной полимерной арматуры

**Андрей Владимирович БЕНИН**, кандидат технических наук, зав. механической лабораторией им. проф. Н. А. Белелюбского, e-mail: benin.andrey@mail.ru

ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения», 190031 Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Сергей Георгиевич СЕМЕНОВ**, инженер, e-mail: semenov.serg@ksm.spbstu.ru

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», 195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

**Аннотация.** Рассматриваются особенности испытаний полимерной арматуры в соответствии с ГОСТ 31938. Приводятся технические решения для проведения подобных испытаний, предложенные в 1960-х гг. в механической лаборатории им. проф. Н. А. Белелюбского ЛИИЖТ (ныне – ПГУПС). Описаны трудности, с которыми столкнулись исследователи, и пути их решения, проведено сравнение данных методов с современными нормативными требованиями к методам испытаний, а также сравнение с опытом зарубежных исследователей. Обсуждаются особенности закрепления образцов и измерения деформаций и перемещений. Анализируется изменение механических свойств полимерной арматуры от первого к текущему поколению. Отмечается важность учета влияния окружающей среды на длительную прочность полимерной арматуры. **Ключевые слова:** композитная полимерная арматура, испытания, оснастка для испытаний, предел прочности при растяжении, модуль продольной упругости.

### PECULIARITIES OF COMPOSITE POLYMERIC BARS TESTS

**Andrey V. BENIN**, e-mail: benin.andrey@mail.ru, Petersburg State Transport University, Moskovskaya Av., 9, St. Petersburg 190031, Russian Federation

**Sergey G. SEMENOV**, e-mail: semenov.serg@ksm.spbstu.ru, St. Petersburg State Polytechnical University, Politehnicheskaya St., 29, St. Petersburg 195251, Russian Federation

**Abstract.** Peculiarities of fiber reinforced plastic bars tests according to normative requirement of GOST 31938-2012 standard are considered. Technical solutions for such tests proposed in 1960s by researchers from Prof. Belebubsky mechanical laboratory of LIIZHT (now – PSTU) are given. Difficulties met by researchers are described; the comparison of these methods with contemporary normative requirements for methods of testing as well as comparison with the experience of foreign researchers is made. Peculiarities of the specimen fixture and measurement of deformations and displacements are discussed. The evolution of reinforced plastic bars mechanical properties from the first to the current generations is analyzed. The importance of considering the environmental influence on the long-term strength of polymer reinforcement is noted.

**Key words:** FRP bars, tests, test equipment, ultimate stress limit, elastic modulus.

**В** настоящее время в России заметно возрос интерес к армированию бетонных конструкций стеклопластиковой арматурой (СПА).

Разработан и введен в действие ГОСТ 31938, регламентирующий проведение различных видов испытаний (приемо-сдаточные, периодические, типовые) для контроля качества арматуры, выпускаемой достаточно большим количеством отечественных и зарубежных производителей. Ведется активная научно-исследовательская работа [1–4] с целью изучения возможности эквивалентной замены стальной арматуры в широком спектре конструкций. Создана ассоциация «Неметаллическая композитная арматура», объ-

единившая производителей и потребителей композитной арматуры и изделий из нее. Ассоциация выпускает специализированные сборники по производству и применению композитной арматуры [5], в которых приводятся ее технические характеристики по фирмам-производителям и примеры применения СПА в строительстве.

Однако СПА не новинка для строителей. Разработка подобной арматуры началась еще в 1960-х гг. [6]. За рубежом этот вид арматуры начал разрабатываться значительно позже – с 1983 г. [7]. На тот момент такая арматура из-за ее высокой стойкости к химической и электрохимической коррозии применялась

в основном в специальном строительстве (армирование ванн химических производств и несущих элементов электротехнических устройств).

В СССР полномасштабные исследования свойств СПА проводились в НИИЖБ, 25-летний опыт работы которого в области исследований композитной арматуры приведен в монографии [2]. Экспериментальными исследованиями свойств композитной арматуры занимались и в механической лаборатории им. проф. Н. А. Белелюбского ЛИИЖТ (ныне – ПГУПС) [8, 9], где в середине 1960-х гг. по заказу Ленинградского метрополитена проводились исследования работы элементов конструкций, армированных стеклопластиковой арматурой,

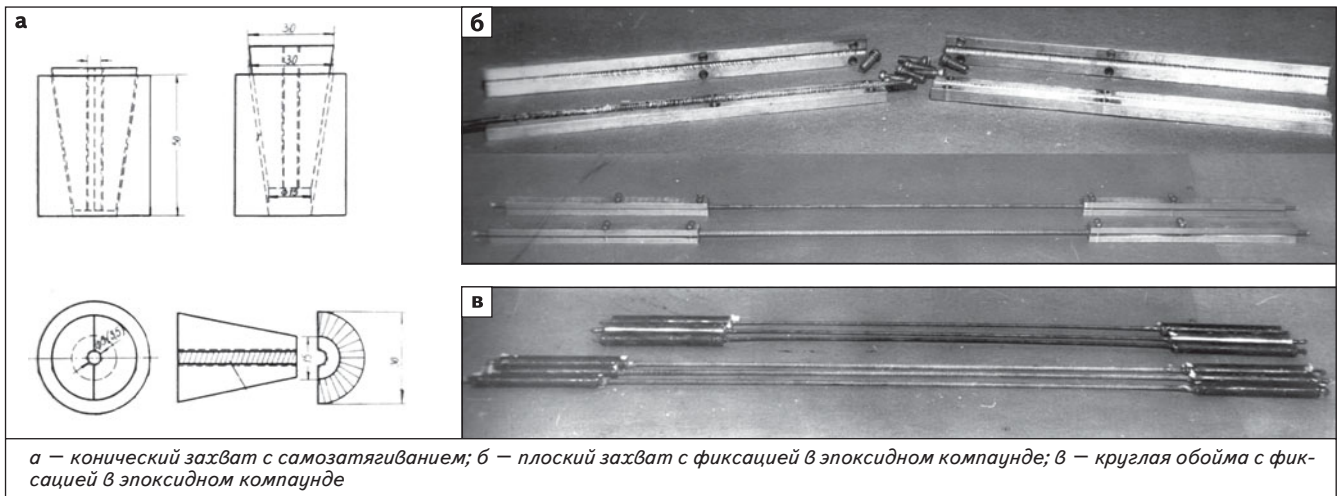


Рис. 1. Варианты крепления СПА в захватах машины, используемые в работе [10]

изготовленной Полоцким заводом. Результаты испытаний, а также выводы и рекомендации приведены в техническом отчете [10]. В статье содержатся выдержки из этого отчета и сравнение выбранных методов исследований с современными требованиями ГОСТ 31938.

В рамках исследования [10] проводились испытания на растяжение (с учетом старения арматуры), определялась прочность сцепления арматуры с бетоном, испытывались элементы бетонных конструкций, армированных СПА.

В результате были сделаны следующие основные выводы:

- модуль продольной упругости СПА — порядка 50 ГПа, следовательно, в тяжелых бетонах СПА должна предварительно напрягаться, а в легких бетонах ее можно использовать и без преднапряжения;
- предел временной прочности при растяжении — от 1226 МПа ( $\varnothing 5$  мм) до 1364 МПа ( $\varnothing 3,5$  мм);
- предел длительной прочности — 65 % от предела временной прочности;
- отмечена склонность к старению (ухудшению механических свойств), особенно при хранении во влажной среде и в воде;
- сцепление арматуры с бетоном при сухом хранении образцов удовлетворительное, но при влажном хранении, даже в течение непродолжительного времени, наблюдалось резкое ухудшение данного параметра, поэтому, по условию надежного

сцепления с бетоном, СПА следует применять только в конструкциях, не подверженных воздействию значительной влажности или защищенных от нее;

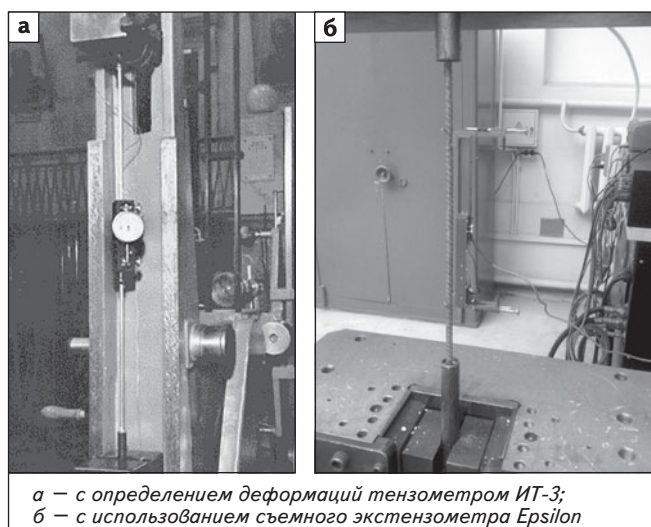
- остаточная деформация арматуры не превосходит 2,5 %;
- СПА практически не стесняет усадки бетона;
- в бетонных элементах, армированных СПА, прочностные резервы последней используются не полностью, кроме того, стеклопластиковая арматура в отличие от стальной недостаточно сопротивляется действию поперечных сил.

Следует отметить, что в исследовании [10] использовалась арматура только небольшого диаметра (3,5 и 5 мм).

**Определение предела прочности при растяжении.** В отчете [10] авторы отмечают что «возникли определенные трудности с анкерровкой концов образцов в захватах испытательной машины. В обычных захватах испытательной машины концы стеклопластикового стержня либо сминались, разрушаясь еще до приложения нагрузки, либо проскальзывали в захватах при недостаточном поперечном усилии в захвате». В этой связи предлагаются три варианта закрепления СПА (рис. 1). Отмечается, что наилучших результатов удалось достичь при использовании захватов с фиксацией в эпоксидном компаунде (рис. 1б, в), обеспечивающих разрушение в средней трети образца.

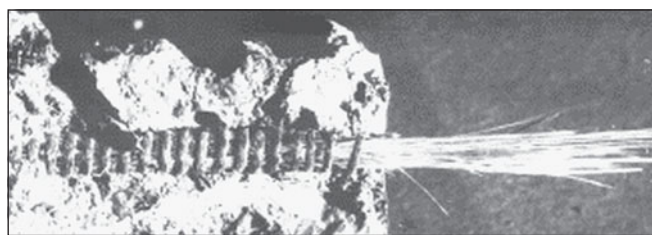
С проблемой надежности закрепления образцов в захватах испытательной машины при отсутствии концентрации напряжений в арматуре и разрушения вне захватов машины сталкиваются и современные исследователи. Учитывая, что СПА является анизотропным материалом, использование гидравлических, пневматических или клиновых захватов ведет к передавливанию арматурного стержня и разрушению в захвате. На данный момент одним из ведущих производителей испытательного оборудования — немецкой компанией «Zwick/Roell» разработаны специальные губки с прорезиненными вкладышами для пневматических захватов с регулируемой по произвольному закону силой прижатия. С использованием этих захватов удастся обеспечить стабильность фиксации образцов малых диаметров (до 8 мм) и их разрушение в рабочей зоне. Наличие у испытательных машин автоматического экстензометра позволяет также одновременно определить и модуль продольной деформации.

Однако современные производители выпускают композитную арматуру больших диаметров (20 мм и более), что делает невозможным испытания в приводных захватах и влечет за собой применение достаточно длинных круглых обойм с фиксацией в эпоксидном (или другом) компаунде (как рекомендует ГОСТ 31938), что вызывает удорожание экспериментов и увеличивает срок



а — с определением деформаций тензOMETром ИТ-3;  
б — с использованием съемного экстензометра Epsilon

**Рис. 2.** Испытания СПА на определение модуля продольной упругости при растяжении



**Рис. 4.** Разрушение СПА при испытаниях на определение сил сцепления с бетоном [10]

их проведения. Тем не менее сегодня фиксация образцов в обоймах и в компаунде (например, эпоксидном) является наиболее надежным и простым методом фиксации всей нomenclатуры СПА и обеспечивает хорошую повторяемость.

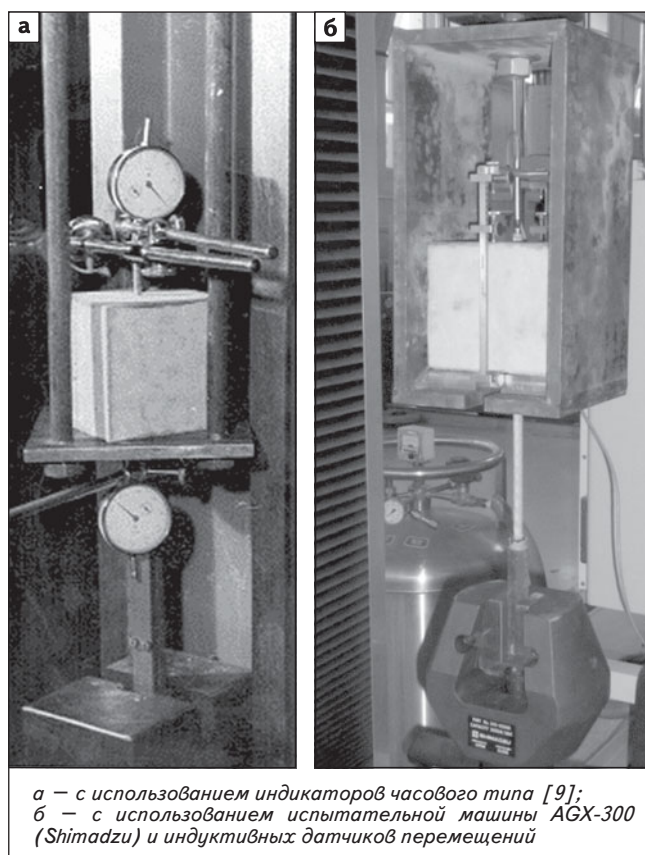
Испытания показали схожие параметры старой и современной СПА: предел прочности при растяжении композитной арматуры, выпускаемой Полоцким заводом в 1960-х гг. составил от 1226 МПа (Ø5 мм) до 1364 МПа (Ø3,5 мм), по ГОСТ 31938 данный параметр для современной СПА — не менее 800 МПа.

**Определение модуля продольной упругости.** Авторы отчета [10] отмечают, что «модуль продольной упругости СПА составляет порядка 50 ГПа, т. е. является величиной того же порядка, что и модуль упругости тяжелого высокопрочного бетона. Поэтому эффективное применение стеклопластиковой арматуры в сочетании с тяжелыми бетонами возможно лишь в предварительно напряженных конструкциях. В случае при-

менения легких бетонов эффективное использование стеклопластиковой арматуры возможно и без ее предварительного натяжения».

На рис. 2 приведены фотографии испытаний по определению модуля продольной упругости, проведенных в 1960-е гг. (рис. 2а) и в настоящее время (рис. 2б). В этом виде испытаний особых изменений не произошло, даже индикаторы часового типа, использованные нашими коллегами в прошлом веке, до сих пор часто с успехом применяются, если испытательные машины не оснащены автоматическими или съемными экстензометрами с автоматической регистрацией показаний.

Значения модуля упругости СПА (50 ГПа), полученные 50 лет назад, совпадают с нормами, закрепленными ГОСТ 31938 (не менее 50 ГПа), что полностью соответствует ожидаемым значениям, получаемым в соответствии с правилом смеси, позволяющим определить верхние и нижние границы таких характеристик, как модуль упругости, массовая плотность, пре-



а — с использованием индикаторов часового типа [9];  
б — с использованием испытательной машины AGX-300 (Shimadzu) и индуктивных датчиков перемещений

**Рис. 3.** Определение сил сцепления арматуры с бетоном

дел прочности при разрыве, удельная тепло- и электропроводность [11–14]. Никакие механические усовершенствования на макроуровне (которые в последнее время часто декларируются производителями) не смогут кардинально повысить значения модуля упругости.

**Определение сцепления СПА с бетоном.** На рис. 3 приведены фотографии, иллюстрирующие испытания на определение предела прочности сцепления арматуры с бетоном. И в этом случае принципиальных изменений в технической реализации методов испытаний не произошло.

Вследствие различных вариантов закрепления образцов в бетонных кубках (с начальным участком без сцепления — по ГОСТ 31938 и без такого участка — в исследованиях прошлых лет) сравнение результатов испытаний было бы некорректным. Исследователями [10] было установлено резкое ухудшение сцепления арматуры с бетоном при влажном (воздушно-влажном и водном)

хранении образцов даже в течение небольшого периода времени (образцы испытывались в возрасте 3, 7, 28, 90, 180 и 360 сут твердения) и сделан вывод о том, что «надежное сцепление стеклопластиковой арматуры с бетоном может быть обеспечено только в том случае, если бетон, в котором будет находиться арматура, будет достаточно водонепроницаемым и трещиностойким». На рис. 4 приведен пример разрушения арматуры при испытаниях на сцепление с бетоном.

Действующий ГОСТ 31938 регламентирует проведение сравнительных испытаний на определение предела прочности сцепления СПА с бетоном при различных видах твердения образцов (воздушно-влажное, водное и т. д.), поэтому данный вопрос должен быть дополнительно исследован научными лабораториями. В настоящее время в механической лаборатории им. проф. Н. А. Белелюбского проводятся подобные исследования, и их результаты обяза-

тельно будут опубликованы после окончания всей экспериментальной программы.

Следует отметить, что ГОСТ 31938 требует определения дополнительных параметров, которые не исследовались в 1960-е гг.: предельной температуры эксплуатации, снижения предела прочности при растяжении после выдержки в щелочной среде, предела прочности сцепления арматуры с бетоном после выдержки в щелочной среде. Существуют противоречивые мнения о необходимости определения данных параметров при типовых испытаниях арматуры, особенно учитывая, что длительность последних испытаний составляет почти 2 мес.

Однако опыт испытаний образцов СПА в нашей лаборатории показывает, что разрушение арматуры путем отслаивания оплетки в процессе пребывания арматуры в тепловой камере в щелочной среде является, к сожалению, не единичным случаем. Поэтому считаем, что если испытания по

определению предельной температуры эксплуатации и сцепления с бетоном после выдержки в щелочной среде возможно ограничить только приемо-сдаточными, и может быть периодическими, то стойкость к воздействию щелочной среды самой арматуры необходимо исследовать при всех видах испытаний.

#### Выводы

1. Жесткостные и прочностные свойства СПА практически не изменились со времени первых исследований.

2. Сегодня, как и в 1960-е гг., все также актуальна проблема фиксации образцов в захватах испытательной машины.

3. Необходимо всестороннее исследование длительной прочности современной арматуры в разных средах. Советские авторы свидетельствуют о значительном снижении прочностных свойств со временем и под влиянием водонасыщенной среды.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Степанова В. Ф., Степанов А. Ю., Жирков Е. П. Арматура композитная полимерная. М.: ООО «Бумажник», 2013. 200 с.
2. Климов Ю. А., Солдатченко О. С., Орешкин Д. А. Экспериментальные исследования сцепления композитной неметаллической арматуры с бетоном [Электронный ресурс]. URL: [http://www.frp-rebar.com/frp-rebar\\_test\\_adhesion\\_concrete.html](http://www.frp-rebar.com/frp-rebar_test_adhesion_concrete.html) (дата обращения: 21.08.2014).
3. Бенин А. В., Семенов С. Г. Экспериментальные исследования сцепления композитной арматуры с плоской навивкой с бетоном // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 9. С. 74–76.
4. Гиздатуллин А. Р., Хозин В. Г., Куклин А. Н., Хуснутдинов А. М. Особенности испытаний и характер разрушения полимеркомпозитной арматуры // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 3(47). С. 40–47.
5. Отраслевой специализированный сборник по производству и применению неметаллической композитной арматуры. Вып. 1. М.: Ассоциация «Неметаллическая композитная арматура», 2014. 72 с.
6. Гвоздев А. А., Михайлов К. В., Никула И. Арматура из стеклопластиков для армирования бетонных конструкций // Бетон и железобетон. 1960. № 3. С. 105–111.
7. Plecnik J. M., Ahmad S.H. Transfer of composite technology to design and construction of bridges. Final Report Prepared for the U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. 1989. 243 p.
8. Елизаров С. В., Каптелин Ю. П., Бенин А. В. Механическая лаборатория им. проф. Н.А. Белелюбского. Страницы 155-летней истории. СПб.: ПГУПС, 2009. 75 с.
9. Елизаров С. В., Каптелин Ю. П., Бенин А. В. Механическая лаборатория им. проф. Н.А. Белелюбского (к 200-летию Петербургского государственного университета путей сообщения) // Alma mater (Вестник высшей школы). 2009. № 9. С. 58–64.
10. Филин А. П., Иохельсон Я. Е., Александров П. Е., Донская З. И. Исследование работы элементов конструкций, армированных неметаллической арматурой. Л.: Институт инженеров железнодорожного транспорта, 1967. 59 с.
11. Stiffness of long fibre composites. University of Cambridge. URL: [http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/fibre\\_composites/stiffness.php](http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/fibre_composites/stiffness.php) (дата обращения: 01.01.2013).
12. Askeland D. R., Fulay P. P., Wright W. J. The Science and Engineering of Materials (6<sup>th</sup> ed.). Cengage Learning. 180 p.
13. Voigt W. (1889). Ueber die Beziehung zwischen den beiden Elasticitätsconstanten isotroper Körper // *Annalen der Physik*, no. 274, pp. 573–587. DOI:10.1002/andp.18892741206.
14. Reuss A. (1929). Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle // *ZAMM – Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, no. 9, pp. 49–58. DOI:10.1002/zamm. 19290090104.

#### REFERENCES

1. Stepanova V. F., Stepanov A. Ju., Zhirkov E. P. *Armatura kompozitnaja polimernaja* [Reinforcement composite polymer]. Moscow, Bumazhnik Publ., 2013. 200 p. (In Russian).
2. Klimov Ju. A., Soldatchenko O. S., Oreshkin D. A. *Jeksperimental'nye issledovaniya scepnenija kompozitnoj nemetallicheskoj armatury s betonom* [Experimental study of coupling

- non-metallic composite reinforcement with concrete] [Elektronnyj resurs]. URL: [http://www.frp-rebar.com/frp-rebar\\_test\\_adhesion\\_concrete.html](http://www.frp-rebar.com/frp-rebar_test_adhesion_concrete.html) (accessed 21.08.2014). (In Russian).
3. Benin A. V., Semenov S. G. Experimental study of bond behavior between FRP rebars with flat winding and concrete. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2013, no. 9, pp. 74–76. (In Russian).
  4. Gizdatullin A. R., Hozin V. G., Kuklin A. N., Husnutdinov A. M. Features tests and fracture behavior of polymer composite reinforcement. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal*, 2014, no. 3(47), pp. 40–47. (In Russian).
  5. *Otraslevoj specializirovannyj sbornik po proizvodstvu i primeneniju nemetallicheskoj kompozitnoj armatury* [Industry specialized collection on production and use of non-metallic composite reinforcement]. Vol. 1. Moscow, Associacija «Nemetallicheskaja kompozitnaja armatura» Publ., 2014. 72 p. (In Russian).
  6. Gvozdev A. A., Mihajlov K. V., Nikula I. Fittings made of glass-reinforced plastics for reinforced concrete structures. *Beton i zhelezobeton*, 1960, no. 3, pp. 105–111. (In Russian).
  7. Plecnik J. M., Ahmad S.H. *Transfer of composite technology to design and construction of bridges*. Final Report Prepared for the U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. 1989. 243 p.
  8. Elizarov S. V., Kaptelin Ju. P., Benin A. V. *Mehaničeskaja laboratorija im. prof. N. A. Beležubskogo. Stranicy 155-letnej istorii* [Mechanical laboratory. Professor N. A. of Beležubskogo. Page 155-year history]. St. Petersburg : PGUPS Publ., 2009. 75 p. (In Russian).
  9. Elizarov S. V., Kaptelin Ju. P., Benin A. V. Mechanical laboratory. Professor N. A. of Beležubskogo (to the 200th anniversary of Petersburg State Transport University). *Alma mater (Vestnik vysshej shkoly)*, 2009, no. 9, pp. 58–64. (In Russian).
  10. Filin A. P., Iohel'son Ja. E., Aleksandrov P. E., Donskaja Z. I. *Issledovanie raboty jelementov konstrukcij, armirovannyh nemetallicheskoj armaturoj* [The study of structural elements, reinforced non-metallic fittings]. Leningrad, Institut inženerov zheleznodorozhnogo transporta Publ., 1967. 59 p. (In Russian).
  11. *Stiffness of long fibre composites*. University of Cambridge. URL: [http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/fibre\\_composites/stiffness.php](http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/fibre_composites/stiffness.php) (accessed 01.01.2013).
  12. Askeland D. R., Fulay P. P., Wright W. J. *The Science and Engineering of Materials* (6<sup>th</sup> ed.). Cengage Learning. 180 p.
  13. Voigt W. (1889). Ueber die Beziehung zwischen den beiden Elasticitätsconstanten isotroper Körper. *Annalen der Physik*, no. 274, pp. 573–587. DOI:10.1002/andp.18892741206.
  14. Reuss A. (1929). Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle. *ZAMM – Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, no. 9, pp. 49–58. DOI:10.1002/zamm.19290090104.

Для цитирования: Бенин А. В., Семенов С. Г. Особенности испытаний композитной полимерной арматуры // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 9. С. 42–46.

For citation: Benin A. V., Semenov S. G. Peculiarities of composite polymeric bars tests. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2014, no. 9, pp. 42–46. (In Russian). ■