УДК 624.074.5
Мещеряков В.М. – доктор технических наук, профессор
Косенко Е.Е. – кандидат технических наук, доцент
E-mail: eekosenko@yandex.ru
Косенко В.В. – кандидат технических наук, доцент
Ростовский государственный строительный университет
Адрес организации: 344022, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162
Черпаков А.В. – младший научный сотрудник
E-mail: alex837@yandex.ru
НИИ механики и прикладной математики им. Воровича И.И. федерального государственного автономного образовательного высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»
Адрес организации: 334090, Россия, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, д. 200, корп. 1
Шакирзянов Ф.Р. – кандидиат физико-математических наук, ассистент
E-mail: faritbox@mail.ru
Казанский государственный архитектурно-строительный университет
Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Моделирование напряженного состояния арматуры железобетонных конструкций с учетом влияния концентраторов напряжения в виде периодического профиля*

Аннотация

Для исследования свойств сечения арматурных сталей в состоянии поставки и после упрочнения одноосным растяжением, сопоставления этих значений с характеристиками натурных образцов разработана методика эксперимента с использованием термомеханически упрочненных арматурных сталей классов А500С и Ат800. Рассмотрены диаграммы растяжения натурных образцов и образцов с удаленными концентраторами напряжений в виде периодического профиля. Исследования проводились на образцах в состоянии поставки и упрочненных одноосным растяжением до различных уровней. Приведен анализ результатов проведенных экспериментов.

Ключевые слова: концентраторы, арматура, одноосное растяжение, ударное вдавливание.

Технологические и эксплуатационные свойства арматуры, применяемой при производстве железобетонных конструкций, тесно связаны с ее химическим составом и структурой, что выражается большой группой упругих и механических характеристик [1]. Небольшие отклонения химического состава исходных и промежуточных материалов, технология изготовления, наличие концентраторов напряжений в виде периодического профиля объясняют случайный характер распределения механических характеристик. Наличие концентраторов напряжений в виде периодического профиля, изменчивость механических свойств по сечению создают сложное напряженно-деформированное состояние при растяжении, особенно это касается современных видов арматуры, характеризующихся значительной изменчивостью свойств по сечению. В связи с этим определение изменения механических характеристик по сечению и их связь с механическими свойствами натурных образцов являются одной из задач настоящей работы.

Ранее проведенными исследованиями [3, 4, 5] установлена возможность упрочнения одноосным растяжением арматуры класса Ат800 до коэффициента упрочнения $K_y = 1{,}15\ \sigma_T$. Коэффициент упрочнения K_y представляет собой отношение действующего напряжения к физическому или условному пределу текучести. В процессе изготовления у таких видов арматуры наряду со сложной структурой сечения [2] создается сложный рельеф поверхности,

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (проект 2012-1.4-12-000-1004-006).

характеризующийся наличием концентраторов напряжений в виде периодического профиля и соответственно различными отклонениями значений диаметра. Упрочнение арматуры выше значений предела текучести вызывает увеличение напряжений в сечении, при этом в поверхностном слое эти изменения больше, в отличие от сердцевины [4]. При исследовании влияния упругопластического деформирования на свойства материала арматуры важно учитывать влияние концентраторов напряжений, т. к. при упрочнении одноосным растяжением арматуры длиной 6 и более метров (например, до коэффициента упрочнения $K_y = 1{,}05\ \sigma_T$), действие концентраторов в виде периодического профиля значительно усиливается.

Для определения влияния различных факторов на арматурный стержень, в процессе его упрочнения одноосным растяжением, решено провести ряд экспериментов, связанных с определением: изменчивости свойств в сечении арматурных сталей, влияния концентраторов напряжений на диаграммы растяжения зон материала в сечении арматуры. Результаты проведенных экспериментов будут использованы для создания конечно-элементной модели стержня, которая позволит наглядно определить наиболее опасные сечения в арматурном стержне при его упрочнении одноосным растяжением.

Рис. 1. Образец для измерения твердости в сечении арматуры

Для определения механических характеристик в сечении арматуры использовался неразрушающий метод, основанный на ударном вдавливании усеченного индентора [3].

Для исследования свойств сечения арматурных сталей в состоянии поставки и после упрочнения одноосным растяжением, сопоставления этих значений с характеристиками натурных образцов разработана методика эксперимента с использованием термомеханически упрочненных арматурных сталей классов А500С и Ат800 диаметром 12 и 14 мм, периодического профиля. Количество образцов для каждого эксперимента составило в среднем 60 шт. В процессе проведения эксперимента оценивали распределение характеристик в сечении на примере твердости, для определения которой изготовили образцы из арматуры в состоянии поставки диаметром 12 мм и длиной 20 мм. Каждый образец поместили в стальное кольцо диаметром 22,4 мм, высотой 20 мм и толщиной стенки 2 мм. Пространство между образцами и кольцом заполнили эпоксидной смолой и выдержали положенное время для ее отвердения (рис. 1). После полировки измеряли твердость по Виккерсу. Результаты измерений представлены в виде графических зависимостей (рис. 2, 3).

При проведении испытаний акцент сделан на исследование арматуры классов А500С и Ат800, т.к. после термомеханической обработки в потоке проката и приобретения сложной структуры сечения рассматриваемые классы арматуры могут использоваться в качестве напрягаемой. При анализе зависимостей видно, что у арматуры, находящейся в состоянии поставки, твердость в центре значительно ниже, чем в поверхностном слое, что характерно для термомеханически упрочненных сталей.

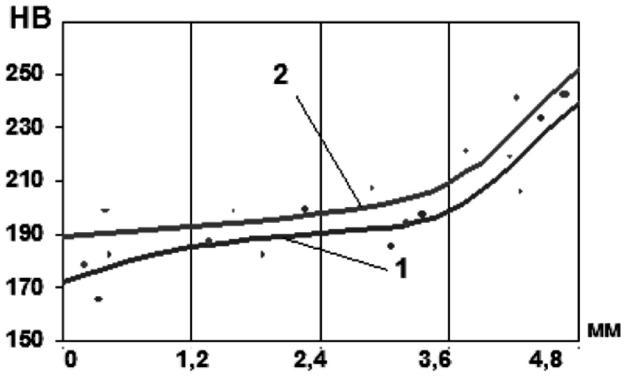

Рис. 2. Распределение твердости в сечении арматурной стали класса А500С диаметром 12 мм: 1 – в состоянии поставки; 2 – упрочненная вытяжкой до Ку = 1,15σт (ε = 6 %)

Упрочнение одноосным растяжением приводит к незначительному и равномерному увеличению твердости, что можно объяснить общим напряженным состоянием арматуры и снижением пластичности.

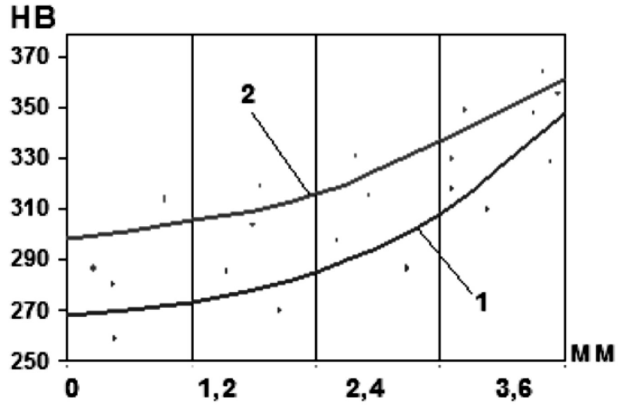

Рис. 3. Распределение твердости в сечении арматуры класса Ат800 диаметром 12 мм: 1 – в состоянии поставки; 2 – упрочненная вытяжкой до Ку = 1,15σт (ε=2,5 %)

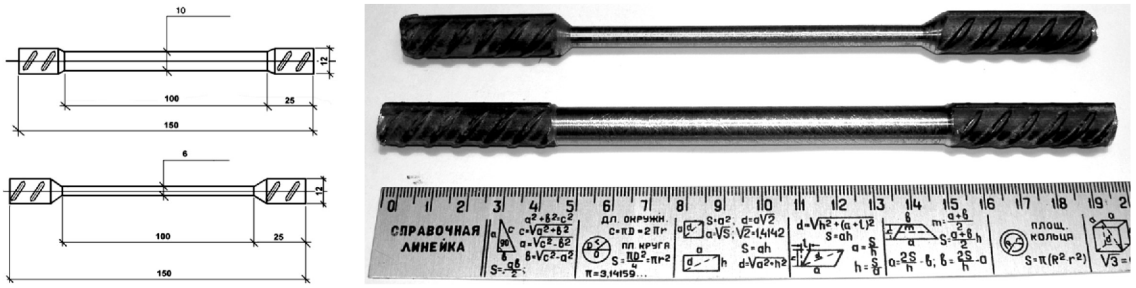

Рис. 4. Образцы с выточкой

Учитывая то, что в составе железобетонной конструкции арматура испытывает растягивающие воздействия, необходимо определить диаграммы растяжения зон материала в сечении. Для определения механических характеристик арматуры без влияния концентраторов напряжений и характеристик сердцевины изготовили образцы с выточкой на токарном станке с различными диаметрами в месте выточки (рис. 4). Таким образом, у первого типа образцов диаметр в месте выточки составил 10 мм (образцы для определения диаграммы растяжения арматуры без влияния концентраторов напряжений в виде периодического профиля), у второго – диаметр в месте выточки составил 6 мм (образцы для определения диаграмм растяжения центрального слоя арматуры). Выточка производилась по центру образцов длиной 100 мм.

При работе в составе железобетонной конструкции арматура испытывает растягивающие усилия, поэтому основным видом испытаний является разрушение натурных образцов одноосным растяжением. Для определения необходимой информации проведены эксперименты, для которых изготовили образцы с выточкой двух типов из арматурных сталей классов А500С и Ат800. Диаграммы растяжения исследуемых типов образцов представлены на рис. 5, 6.

У образцов с выточкой диаметром 10 мм значение механических характеристик несколько выше в сравнении с натурными образцами, что видно из расположения диаграмм. Это указывает на то, что концентраторы напряжения в виде периодического профиля оказывают определенное влияние на свойства арматуры, незначительно снижая прочность арматуры.

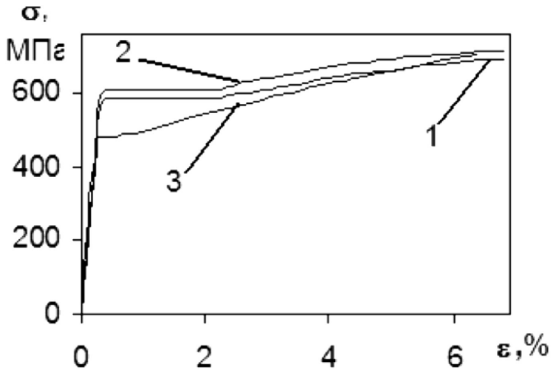

Рис. 5. Диаграммы растяжения натурных образцов и образцов с выточкой арматурной стали класса А500С:
1 – натурные образцы без выточки; 2 – образцы с выточкой диаметром 10 мм;
3 – образцы с выточкой диаметром 6 мм

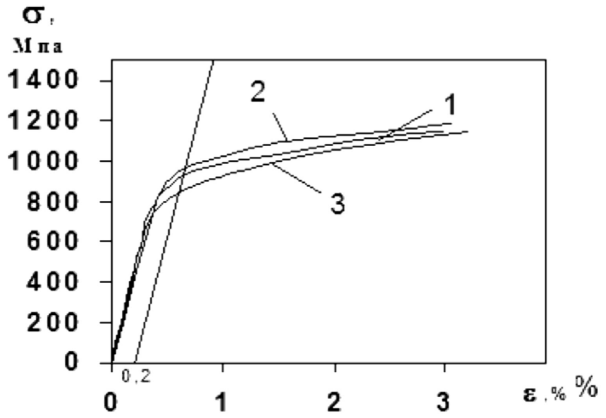

Рис. 6. Диаграммы растяжения натурных образцов и образцов с выточкой арматурной стали класса Ат800:
1 – натурные образцы без выточки; 2 – образцы с выточкой диаметром 10 мм;
3 – образцы с выточкой диаметром 6 мм

Образцы с выточкой диаметром 6 мм выявили более низкие значения предела текучести, чем у натурных образцов. При этом у арматуры класса А500С значения предела текучести ниже на 18 %, у арматуры класса Ат800 – на 8 %. Значения предела прочности соответствуют значениям натурных образцов. Деформации при достижении значений предела прочности у образцов с выточкой несколько выше. Разница составляет около 0,2 %.

Таким образом, результаты проведенных экспериментов являются основой для последующих исследований свойств арматурных сталей, проведенных в настоящей работе.

При исследовании механических характеристик арматурных сталей следует учитывать ряд факторов, влияющих на свойства арматуры и являющихся причиной их изменения, при воздействии внешних условий [3]. К таким факторам относятся технологические операции, при которых арматура подвергается деформированию и нагреву.

Для определения влияния упрочнения одноосным растяжением на характер изменения механических характеристик в сечении исследуемых классов арматурных сталей использовались образцы с различными уровнями упрочнения.

Из прутков изготовили образцы в соответствии с ГОСТ 12004-81 длиной 200 мм. После нумерации общее число отрезков разделили на две партии для каждого класса стали. Обе партии подвергли упрочнению одноосным растяжением на разрывной машине ИР-200 до следующих значений коэффициента упрочнения: для стали класса А500С и Ат800 - до 1,05 $\sigma_т$ и 1,15 $\sigma_т$. После нагружения образцов до определенного значения нагрузку снимали. Предварительно разрушили партию образцов каждого класса стали в количестве 10 штук для определения уровня нагружения по диаграмме растяжения. В настоящей работе выбор коэффициентов упрочнения для арматуры класса А500С 1,05 $\sigma_т$ и 1,15 $\sigma_т$, связан с необходимостью предельно возможного исследования части диаграммы растяжения между пределами текучести и прочности. Методики экспериментов и образцы исследуемых арматурных сталей одинаковые, поэтому для корректного сопоставления результатов значения коэффициентов упрочнения для арматуры класса Ат800 также выбраны равными: 1,05 $\sigma_т$ и 1,15 $\sigma_т$.

Диаграммы растяжения образцов с выточкой исследуемых классов арматурных сталей, упрочненных одноосным растяжением, представлены на рис. 7-10. Полученные диаграммы показывают, что упрочнение одноосным растяжением повышает значения пределов текучести у натурных образцов арматуры класса А500С на 6 %, у арматуры класса Ат800 – на 9 %. Вид диаграмм растяжения образцов с характеристиками сердцевины арматуры идентичен вышеописанным, но с более низкими значениями предела текучести и незначительным увеличением деформаций. Упрочнение одноосным растяжением рассмотренных классов арматуры приводит к снижению ее деформативных характеристик у натурных образцов для А500С до 3,2 %, для Ат800 – до 2,6 %. Напряжения в сечении рассмотренных классов арматуры, возникающие как в натурных образцах, так и в образцах с выточкой при упрочнении одноосным растяжением, имеют достаточно близкие значения. Таким образом, упругопластическое деформирование приводит к выравниванию прочностных характеристик в сечении арматуры класса А500С и равномерному повышению предела текучести для арматуры класса Ат800.

Оценка характеристик поверхностного слоя с помощью натурных испытаний затруднена, в связи со сложностью изготовления образцов. Поэтому для определения механических характеристик поверхностного слоя использован метод ударного вдавливания индентора, позволяющий определять механические характеристики на незначительном участке металла. Результаты представлены в табл. Для сравнения наряду с характеристиками сечения арматуры в таблице приведены характеристики натурных образцов. При анализе табличных данных видно, что в центре исследуемых классов арматуры значения пределов текучести ниже, чем в поверхностном слое, а значения предела прочности отличаются незначительно. Увеличение прочностных характеристик от центра к поверхности указывает на наличие переходных структур с различными механическими характеристиками. Значения механических характеристик натурных образцов находятся между значениями характеристик поверхностного слоя и сердцевины арматуры. Это говорит о сложном механизме распределения напряжений в арматуре при разрушении одноосным растяжением, при котором в равной степени участвуют центральный и поверхностный слой. Для сравнения в таблице представлены значения механических характеристик натурных образцов, которые определяли с учетом диаграмм растяжения образцов, после различных уровней упрочнения. При упрочнении одноосным растяжением значения пределов текучести натурных образцов сближаются со значениями предела текучести поверхностного слоя, что говорит о снижении пластичности арматуры в целом. Наличие более прочного поверхностного слоя позволяет арматуре выдерживать усилия, соответствующие характеристикам этого слоя [6]. Несмотря на то, что значения механических характеристик натурных образцов находятся между значениями поверхностного слоя и сердцевины, вывести корреляционную зависимость достаточно сложно.

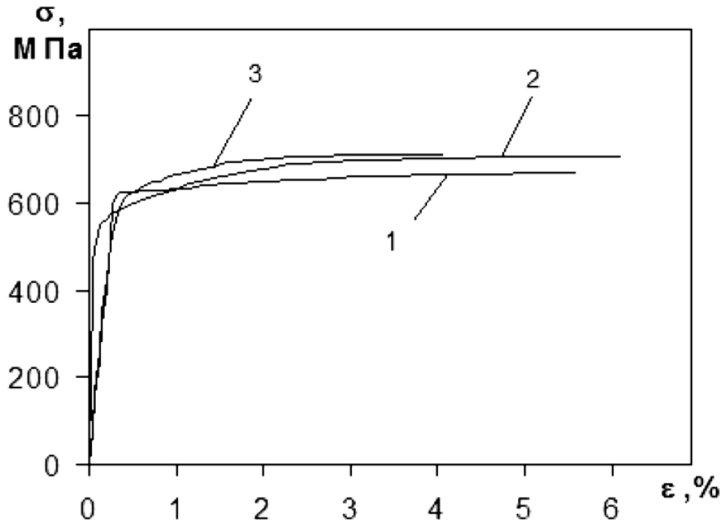

Рис. 7. Диаграммы растяжения образцов арматурной стали класса А500С диаметром 12 мм, упрочненных одноосным растяжением, до 1,05 значений предела текучести (ε = 3 %):
1 – натурные образцы; 2 – образцы диаметром 6 мм в месте выточки;
3 – образцы диаметром 10 мм в месте выточки

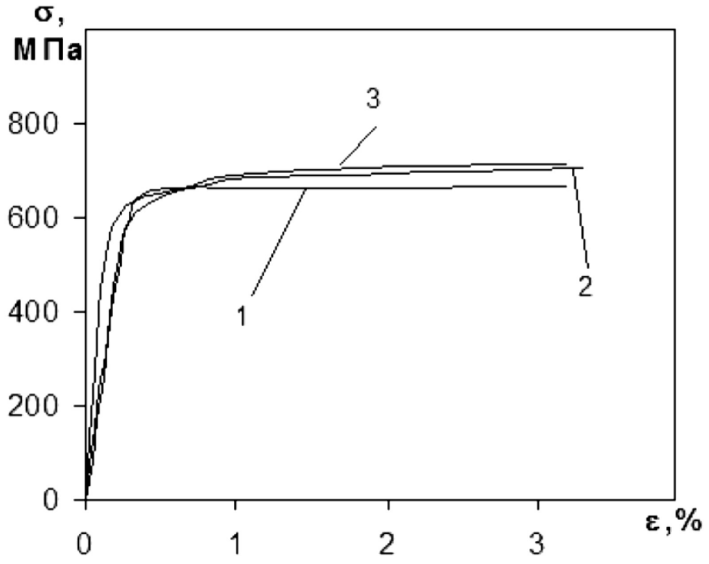

Рис. 8. Диаграммы растяжения образцов арматурной стали класса А500С диаметром 12 мм, упрочненных одноосным растяжением, до 1,15 значений предела текучести (ε = 6 %):
1 – натурные образцы; 2 – образцы диаметром 6 мм в месте выточки;
3 – образцы диаметром 10 мм в месте выточки

Причиной этому служит влияние множества факторов, которые делают значения характеристик случайными, даже если характер их распределения остается без изменения. Поэтому значения механических характеристик для различных партий будут различными. Использование метода ударного вдавливания индентора для оценки механических характеристик арматуры неразрушающим способом возможно только в случае однородной структуры сечения с равномерным распределением механических характеристик по сечению.

Таблица

Значения механических характеристик в сечении арматурных сталей классов А500С и Ат800

Класс стали	Уровень упрочнения	Прочн. хар-ки	Значения характеристик по центру образца		Значения характеристик по краю образца (на глубине 0,5-1 мм от поверхности)		Механич. хар-ки натурных образцов, МПа (кН)
			Средние МПа	Рассеивание	Средние МПа	Рассеивание	
А500С	Без упрочнения	σт	484	1,03	715	1,22	583 (66)
		σв	697	1,03	966	1,18	690 (78)
	Упрочненная до Ку = 1,05σт (ε = 4,2 %)	σт	494	1,08	739	1,06	648 (73,3)
		σв	710	1,1	993	1,08	690 (78)
	Упрочненная до Ку = 1,1σт (ε = 4,6 %)	σт	512	1,05	748	1,09	655 (74)
		σв	730	1,09	1003	1,1	690 (78)
	Упрочненная до Ку = 1,12σт (ε = 5,4 %)	σт	523	1,07	762	1,09	669 (75,6)
		σв	744	1,09	1020	1,11	684 (77,4)
	Упрочненная до Ку = 1,15σт (ε = 6 %)	σт	545	1,03	784	1,09	679 (76,8)
		σв	769	1,05	1044	1,1	686 (77,6)
Ат800	Без упрочнения	σ0,2	896	1,21	1073	1,05	902 (102)
		σв	1171	1,18	1370	1,04	1141 (129)
	Упрочненная до Ку = 1,05σт (ε = 2,1 %)	σ0,2	927	1,12	1092	1,11	1040 (118)
		σв	1208	1,1	1392	1,1	1141 (129)
	Упрочненная до Ку = 1,1σт (ε = 2,7 %)	σ0,2	937	1,09	1097	1,08	1097 (124)
		σв	1218	1,11	1398	1,09	1141 (129)
	Упрочненная до Ку = 1,12σт (ε = 2,9 %)	σ0,2	952	1,08	1113	1,09	1123 (127)
		σв	1235	1,09	1416	1,11	1141 (129)
	Упрочненная до Ку = 1,15σт (ε = 3,1 %)	σ0,2	959	1,06	1121	1,04	1132 (128)
		σв	1243	1,08	1425	1,06	1141 (129)

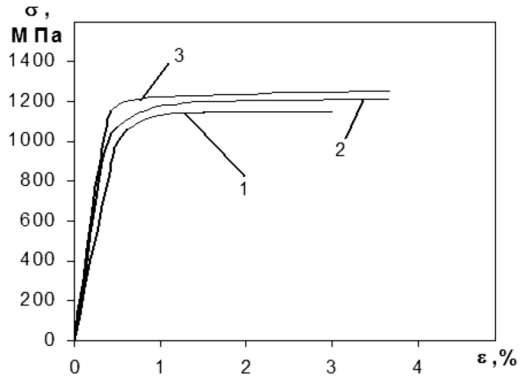

Рис. 9. Диаграммы растяжения образцов арматурной стали класса Ат800 диаметром 12 мм, упрочненных одноосным растяжением, до 1,05 значений предела текучести (ε = 1 %):
1 – натурные образцы; 2 – образцы диаметром 6 мм в месте выточки;
3 – образцы диаметром 10 мм в месте выточки

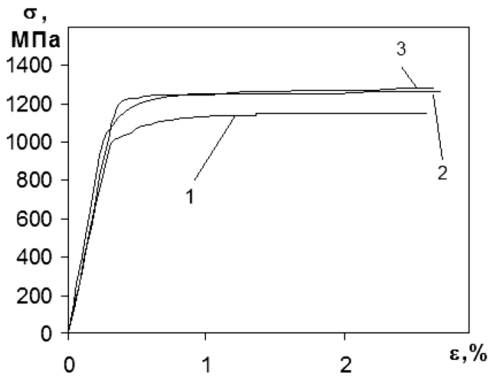

Рис. 10. Диаграммы растяжения образцов арматурной стали класса Ат800 диаметром 12 мм, упрочненных одноосным растяжением, до 1,15 значений предела текучести (ε = 2.5):
1 – натурные образцы; 2 – образцы диаметром 6 мм в месте выточки;
3 – образцы диаметром 10 мм в месте выточки

Проведенные выше эксперименты указывают на необходимость изготовления специальных образцов, как это было проделано в настоящей работе, для определения механических характеристик материала арматуры, прошедшей термомеханическое упрочнение.

Список литературы

1. Мадатян С.А. Новое поколение арматуры железобетонных конструкций // Бетон и железобетон, 1998, № 2.
2. Мадатян С.А. Арматура железобетонных конструкций. – М.: Воентехлит, 2000.
3. Косенко Е.Е., Косенко В.В., Черпаков А.В. К вопросу о влиянии геометрических размеров на прочностные характеристики арматурных сталей/ Инженерный вестник Дона, 2010, № 4.
4. Бурцева О.А., Нефедов В.В., Косенко Е.Е., Косенко В.В., Черпаков А.В. Моделирование напряженного состояния арматурных стержней, применяемых при производстве преднапряженных железобетонных конструкций / Инженерный вестник Дона, 2011, № 4.
5. Бурцева О.А., Нефедов В.В., Косенко Е.Е., Косенко В.В., Черпаков А.В. Статистическая оценка механических характеристик арматурных сталей // Тр. XV Междунар. конф «Соврем. пробл. механики сплош. ср.», 4-7 декабря 2011 г. Т. II.; ЮФУ. – Ростов-н/Д., 2011. – 272 с.
6. Мещеряков В.М., Косенко Е.Е., Косенко В.В., Черпаков А.В., Ковалев С.М. К вопросу о прочностных возможностях арматурных сталей // «Строительство-2012» Материалы международной научно-практической конференции. – Ростов-н/Д., 2012. – 166 с.

Mecherjakov V.M. – doctor of technical sciences, professor
Kosenko E.E. – candidate of technical sciences, associate professor
E-mail: eekosenko@yandex.ru
Kosenko V.V. – candidate of technical sciences, associate professor
Rostov State Building University
Адрес организации: 344022, Russia, Rostov-na-Donu, Sotsialisticheskaia st., 162
Cherpakov A.B. – junior research associate
E-mail: alex837@yandex.ru
НИИ механики и прикладной математики им. Воровича И.И. федерального государственного автономного образовательного высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»
The organization address: 334090, Russia, Rostov-na-Donu, Stachki pr., 200, korp. 1
Shakirzianov F.R. – candidate of physical and mathematical sciences, assistant
E-mail: faritbox@mail.ru
Kazan State University of Architecture and Engineering
The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Modeling of stress condition of reinforcement concrete structures, with the influence of stress raisers as of periodical profile

Resume

To study the properties section of the reinforcing steel in the as delivered and after hardening uniaxial stretching, a comparison of these values with the characteristics of natural samples developed experimental technique using thermo hardened steel reinforcement classes A500S and At800. Consider the diagram expansion of natural samples and samples with remote stress concentrators, in the form of periodic profile. To determine the influence of various factors on rebar in its hardening uniaxial tension, a number of experiments related to the definition: the variability in the properties section of the reinforcing steel, the effect of stress concentrators at the charts of the material in tension zones of reinforcement. To determine the effect of hardening on the uniaxial tensile behavior of the mechanical characteristics of the cross-sectional study of classes of reinforcing bars used samples with different levels of hardening. The analysis of the results of the experiments conducted. To determine the mechanical properties of reinforcement used in non-destructive method based on shock indentation truncated indenter.

Keywords: concentrators, reinforcement, uniaxial tensile, impact indentation.

References

1. Madatjan S.A. The new generation of reinforcement concrete structures // Concrete and reinforced concrete, 1998, № 2.
2. Madatjan S.A. Reinforcement Concrete Structures. – M.: Voentehlit, 2000.
3. Kosenko E.E., Kosenko V.V., Cherpakov A.V. On the effect of geometric dimensions on the strength characteristics of the reinforcing bars / Journal of Engineering Don, № 4, 2010.
4. Burzeva O.A., Nefedov V.V., Kosenko E.E., Kosenko V.V., Cherpakov A.V. Modeling of stress state of rebars used in the manufacture prestressed concrete structures / Engineering Bulletin Don, № 4, 2011.
5. Burzeva O.A., Nefedov V.V., Kosenko E.E., Kosenko V.V., Cherpakov A.V. Statistical evaluation of the mechanical properties of reinforcing steels / Proc. XV Intern. conf «Sovrem. probl. solid mechanics. Wed», 4-7 December 2011 T. II.; SFU. – Rostov-n-D., 2011. – 272 p.
6. Mesherjakov V.M., Kosenko E.E., Kosenko V.V., Cherpakov A.V., Kovalev S.M. On the possibilities of reinforcing the strength steels / «Construction 2012». Proceedings of the International Scientific-Practical konferentsii – Rostov-n- D., 2012. – 166 p.