



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

N4, ТОМ 14 (2008) 245-251

УДК 624.07

(08)-0170-1

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПІДВИЩЕННЯ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ ПІДКРАНОВИХ БАЛОК В РАЙОНІ ТРІЩИНИ З ВУГЛЕПЛАСТИКОВОЮ НАКЛАДКОЮ

О.І. Давіденко¹, В.В. Стоянов²

¹Науково-дослідний інститут будівельних конструкцій, 5/2, вул. Кліменко, 01037, м. Київ, Україна.

²Київський національний університет будівництва і архітектури,
4, вул. Дідріхсона, 65029, м. Одеса, Україна.

E-mail: stoyanov@mail@bk.ru

Отримана 20 жовтня 2008; прийнята 27 жовтня 2008

Анотація. В статті розглядається дослідження методом математичного моделювання тріщиностійкості підкранової балки в районі тріщини з вуглепластиковою накладкою. Данне моделювання дозволяє визначити коефіцієнт інтенсивності напруження в вершині тріщини і порівняти його з критичним значенням коефіцієнту інтенсивності, що дає змогу оцінювати тріщиностійкість конструкції, які мають дефекти як на стадії проектування, так і для продовження експлуатації підкранових балок при умові наклеювання вуглецевих волокон. Моделювання тріщини виконується в обчислювальному комплексі «Ліра Windows» за допомогою суперелементу.

Ключові слова: тріщина, тріщиностійкість, суперелемент, вуглеродний холст, підкранова балка.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПОДКРАНОВОЙ БАЛКИ В РАЙОНЕ ТРЕЩИНЫ С УГЛЕПЛАСТИКОВОЙ НАКЛАДКОЙ

А.И. Давиденко¹, В.В. Стоянов²

¹Научно-исследовательский институт строительных конструкций,
5/2, ул. Клименко, 01037, г. Киев, Украина.

²Одесская государственная академия строительства и архитектуры,
4, ул. Дидрихсона, 65029, г. Одесса, Украина.

E-mail: stoyanov@mail@bk.ru

Получена 20 октября 2008; принята 27 октября 2008

Аннотация. В статье рассматривается исследование методом математического моделирования трещиностойкости подкрановой балки в районе трещины с углепластиковой накладкой. Данное моделирование позволяет определить коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины и сравнить его с критическим значением коэффициента интенсивности, что дает возможность оценки трещиностойкости конструкций с имеющимися дефектами как на стадии проектирования, так и для продления эксплуатации подкрановых балок при условии наклеивания углеродных волокон. Моделирование трещины выполняется в вычислительном комплексе «Лира Windows» с помощью суперэлементов.

Ключевые слова: трещина, трещиностойкость, суперэлемент, углеродный холст, подкрановая балка.

HOW TO INCREASE CRACK RESISTANCE OF A CRANE WAY GIRDER NEAR A CRACK WITH A COAL-PLASTIC JOINT BY MATHEMATICAL MODELING

A.I. Davidenko¹, V.V. Stoyanov²

¹State Research Institute of Building Constructions, 5/2, Klimenko Str., Kyiv, 01037, Ukraine.

²Odessa State Academy of Building and Architecture, 4, Didrihsona Str., Odessa 65029, Ukraine.

E-mail: stoyanovmail@bk.ru

Received 20 October 2008; accepted 27 October 2008

Abstract. The article is devoted to the investigation of crack resistance of a crane way girder near a crack with a coal-plastic joint by mathematical modeling. This modeling makes it possible to find out the stress rate coefficient at an apex of crack and to compare it with a critical meaning of the rate coefficient to estimate crack stability of structures with defects both at the stage of designing and to extend a crane way girder operation life under attaching carbon fibres. A crack modeling is being done in the computing complex "Lira Windows" with the help of super-elements.

Keywords: crack, crack resistance, super-element, carbon linen, crane way girder.

Наблюдение за состоянием подкрановых балок свидетельствует о том, что начало развития трещин происходит обычно в зонах концентрации напряжений, вблизи сварных швов. Верхние и нижние пояса подкрановых балок работают в разных условиях, поскольку к верхнему поясу через рельс от катка крана передается местный момент, который вызывает кручение пояса на участке между ребрами жесткости и обуславливает возникновение дополнительных напряжений в верхнем поясе и прилегающей к нему части стенки. Сложное напряженное состояние верхней части балки и большое число циклов нагружений является основанием для образования трещин в околошовных зонах.

В качестве конструктивного решения выберем метод так называемой "консервации" трещины [1]. Идея консервации трещины предусматривает конструктивные мероприятия на базе современных высокомодульных композитов, которые обеспечивают неизменными габариты трещины при проектной работе и заданном периоде ее работы [1].

Для проектирования отмеченных выше мероприятий необходимо установить возможные величины критической длины трещины ($l_{кр}$) и критических напряжений возле вершины трещины [2].

$$l_{кр} = \frac{2E\gamma}{(\pi\sigma^2)}, \quad (1)$$

$$\sigma_{кр} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{(\pi l)}}, \quad (2)$$

Механизм консервации трещины использует известное явление утверждающее, что рост трещины сопряжен с обязательным расширением ее берегов. Очевидно, постановка связей между берегами трещины лишит ее возможности развиваться, т.е. образовывать новые поверхности, и, следовательно, рост трещины прекратится или в худшем случае – замедлится. В качестве ограничительных связей рекомендуется использовать углепластиковые накладки (Рис.1).

Длину накладки (l_n) принимают из расчета обеспечения необходимой площадки для работы клеевого шва на скалывание. Ширину накладки (b_n) назначают из условия закрытия пространства в $2l_{np}$ с расширением от вершины трещины на $2\delta_{cm}$ с целью выровнять возможные концентрации напряжений [1]:

$$l_n = 2(l_{ск} - l_{кр}), \quad (3)$$

$$b_n = 2l_{кр} + 4\delta_m, \quad (4)$$

Толщину накладки (δ_n) выбираем из условия. $\delta_n \leq \frac{1}{20}\delta_{cm}$. При этом временный предел прочности на растяжение материала накладки должен быть больше на порядок показателя металла стенки, т.е. $\sigma_{ny}^u \geq 10\sigma_{ny}^m$, а

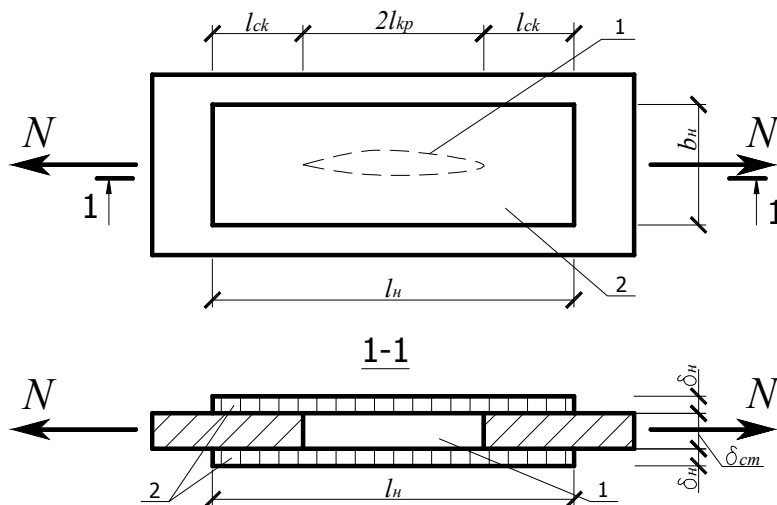


Рис.1. Схема установки углепластиковой наклейки: 1 – трещина; 2 – углепластиковые наклейки.

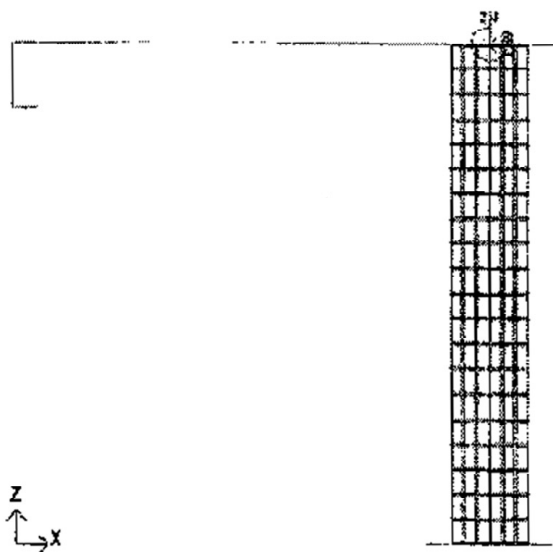


Рис.2. Компоновка сечения подкрановой балки.

модуль упругости материала наклейки выбираем не менее модуля упругости стали, т.е. $E_n \geq E_{cm}$ [1]. Все это ограничивает деформации наклейки (Δ_n) величиной менее 0,01 мм и, тем самым исключает передвижение берегов и расширение устья берегов [2].

Для оценки эффективности использования холстов из углеродных волокон, приклеенных в околошовной зоне на величину трещиностойкости подкрановой балки была разработана конечно-элементная модель подкрановой балки пролетом $L=12$ м под два крана тяжелого режима работы грузоподъемностью $Q=150/30$ кН. Компоновка сечения подкрановой балки приведена на рис.2.

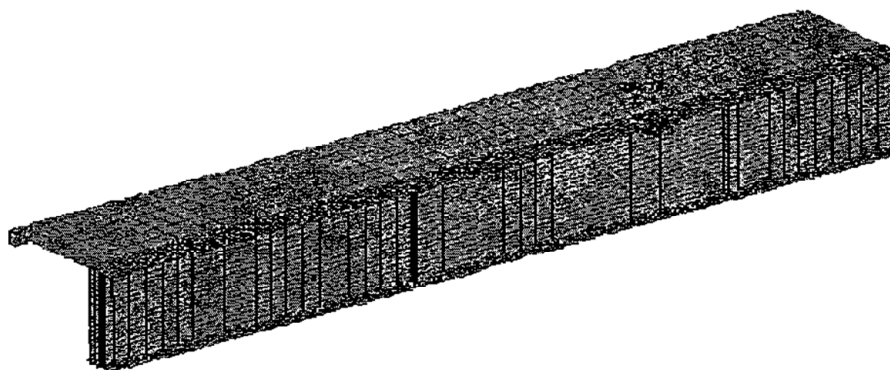


Рис.3. Фрагмент конечно-элементной модели подкрановой балки.

В соответствии с заданной системой сил на подкрановую балку максимальный изгибающий момент располагали под слой, ближайшей к середине пролета балки. Для определения наибольшей поперечной силы одну из сил располагали над опорой, остальные – как можно ближе к этой опоре. Расчетные усилия также определяли от нагрузок, позволяющих получить наибольшие касательные и нормальные напряжения, соответственно в первом от опоры отсеке и в середине балки. Фрагмент конечно-элементной модели подкрановой балки приведен на рис.3.

Целью расчетов являлось сопоставление коэффициентов интенсивности напряжений в элементах с трещиной в подкрановой балке и элементов с холстом из углеродных волокон, наклеенных на указанную трещину, расположенную в околошовной зоне, а также выяснение возможности распространения трещины при дальнейшей эксплуатации.

Решение поставленной задачи было выполнено методом конечных элементов с использованием вычислительного комплекса «Лири Windows». Последовательное решение задачи включало создание конечно-элементной аппроксимации подкрановой балки и определение полей напряжений.

Задача по определению трещиностойкости конструкции всегда связана с определением напряжений в вершине трещины. По мере приближения к вершине трещины сетка элементов должна сгущаться. Максимальный размер сетки при определении коэффициента интенсивности напряжений в данной задаче принят равным 1 мм. Решение по переходу от крупноразмерных конечных элементов к мелкогабаритным выполнено с использованием метода суперэлементов.

Одной из особенностей метода суперэлементов является возможность создания трещины различных по размеру и направлению в соответствии с их реальным расположением и, главное, возможность включения суперэлемента в зоны конечно-элементной модели конструкции, в которых предлагаются либо реально обнаружены трещиноподобные дефекты. В результате имеется возможность оценки трещиностойкости конструкций с имеющимися дефектами, полученными в процессе эксплуата-

ции до и после наклеивания холстов из углеродных волокон.

Суперэлемент приведен на рис.4. Трещина горизонтальная, размером 12 мм, расположенная в суперэлементе, приведена на рис.5. Суперэлемент располагали в середине пролета подкрановой балки в околошовной зоне верхнего пояса.

Моделирование наклеивания холста из углеродных волокон (система Sika Wrap Hex-230C) осуществляли в выделенном с помощью фрагментации суперэлементе с целью увеличения трещиностойкости околошовной зоны подкрановой балки. Волокна раскатывали вдоль длины подкрановой балки. Связи волокон в суперэлементе с размерами 27х27 мм выполняли через 1 мм. Конечные элементы холста из углеродных волокон системы Sika Wrap Hex-230C в количестве 27 шт. и стальной стенки балки были приняты с разными типами жесткости. Так, для элементов, моделирующих углеродные волокна, модуль упругости $E=230000$ МПа.

Выполнение расчета конструкции подкрановой балки позволило получить распределение напряжений $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$, а также главных напряжений как на общем виде, так и в суперэлементах с трещинами. Изолинии напряжений σ_x в подкрановой балке приведены на рис.6, где показана также разгрузка конечных элементов, прилегающих к поперечным ребрам жесткости.

Как следует из рисунков 6, 7, напряжения в конечных элементах подкрановой балки не превышали предела текучести. Моделирование трещины с помощью суперэлемента выполнено в зоне максимальных напряжений в среднем отсеке подкрановой балки между поперечными ребрами жесткости.

Поскольку направление нормальных напряжений в стенке балки и в сварном шве от местного момента и давления катка крана перпендикулярно нормальным напряжениям от общего изгиба балки, развитие трещины происходит по виду отрывного смещения. Однако действие местного изгиба не позволяет применить традиционный подход механики разрушения к расчету трещиностойкости стенки с трещиной. Об этом свидетельствуют распределения главных напряжений на выпуклой и вогнутой сторонах стенки подкрановой балки в конечных элементах, примыкающих к трещине.

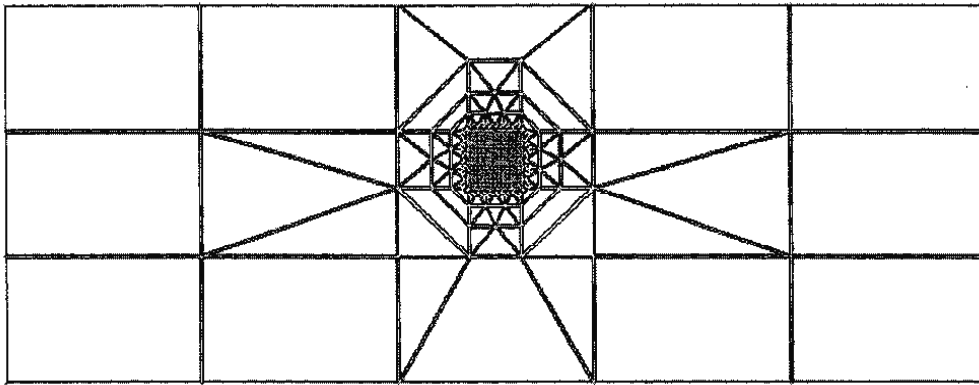


Рис.4. Общий вид суперэлемента.

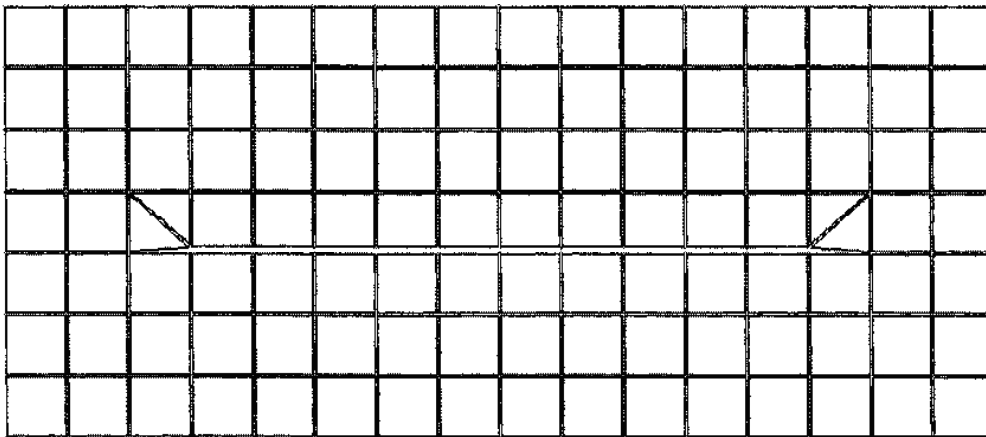


Рис.5. Фрагмент суперэлемента с горизонтальной трещиной.

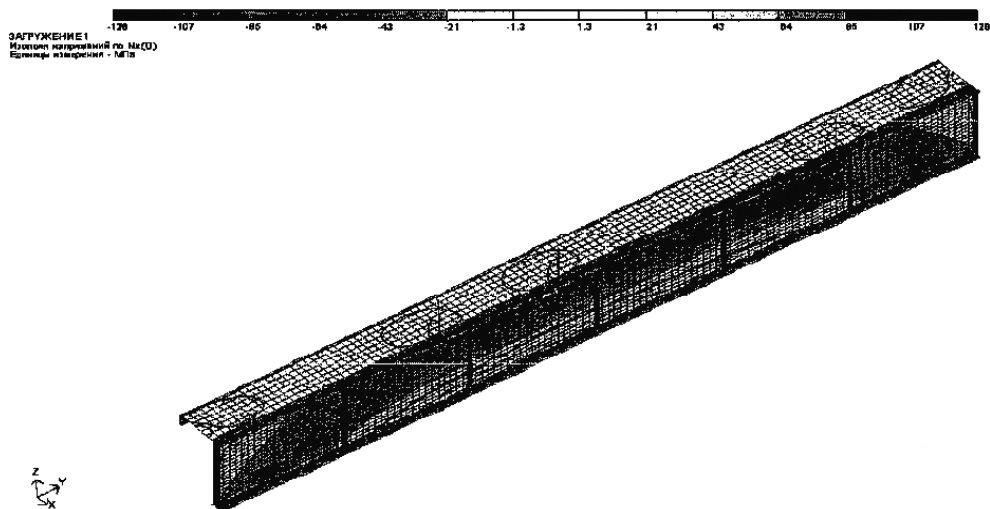


Рис.6. Изолинии напряжений σ_x в подкрановой балке.

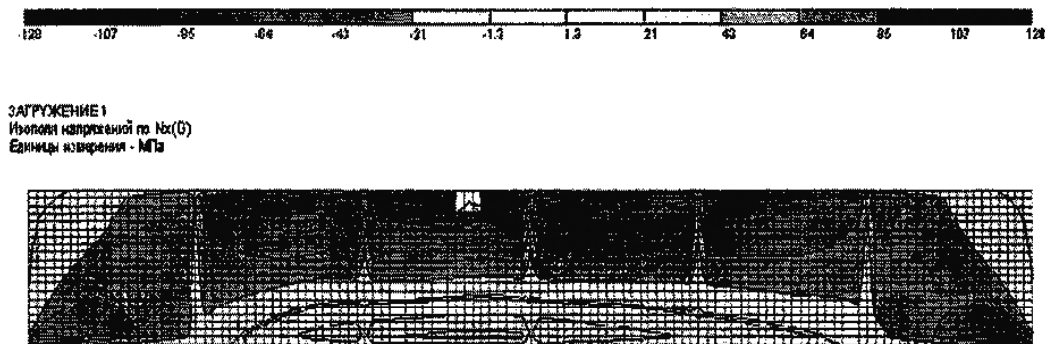


Рис.7. Фронтальная проекция распределения напряжений σ_x в подкрановой балке и место расположения суперэлемента.

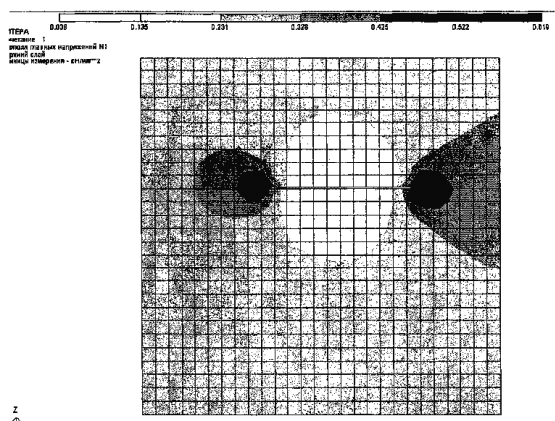


Рис.8. Распределение главных напряжений в суперэлементе с горизонтальной трещиной в стенке подкрановой балки без наклеивания углеродных волокон.

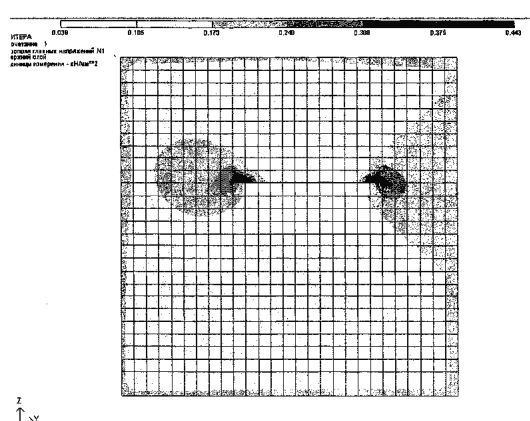


Рис.9. Распределение главных напряжений в суперэлементе с горизонтальной трещиной в стенке подкрановой балки с наклеиванием углеродных волокон.

Преобладающими на выпуклой стороне являются растягивающие напряжения, а на вогнутой стороне – сжимающие.

Определение коэффициента интенсивности напряжений выполнено в данном случае по распределению напряжений σ_1 в суперэлементе с горизонтальной трещиной на выпуклой стороне. Значения главных напряжений на расстоянии 1 мм от вершины трещины в суперэлементе без наклеивания холста из углеродных волокон составило $0,619 \text{ кН/мм}^2$, а в суперэлементе с наклеиванием холста из углеродных волокон – $0,375 \text{ кН/мм}^2$, рис. 8, 9. Таким образом, наклеивание холста из углеродных волокон привело к снижению главных напряжений в вершине трещины на 39%. Значение коэффициента интенсивности напряжений, вычисленного по напря-

жениям на расстоянии 1 мм от вершины трещины в балке без наклеивания волокон, согласно рис.8, составило $K_1=1,54 \text{ кН/мм}^{3/2}$, что превышает трещину в стенке подкрановой балки без наклеивания углеродных волокон.

Критическое значение коэффициента интенсивности напряжений, $K_{1c}=0,96 \text{ кН/мм}^{3/2}$. Следовательно, трещина в околошовной зоне подкрановой балки будет развиваться. Значение коэффициента интенсивности напряжений, вычисленного по напряжениям на расстоянии 1 мм от вершины трещины в балке с наклеиванием волокон, согласно рис.9, составило $K_1=0,93 \text{ кН/мм}^{3/2} < K_{1c}=0,96 \text{ кН/мм}^{3/2}$. Следовательно, наклеивание углеродных волокон приводит не только к снижению напряжений в вершине трещины, но и к повышению

трещиностойкости конструкции, остановке трещины (торможению ее дальнейшего развития). Таким образом, трещина на выпуклой стороне стенки подкрановой балки при наклеивании волокон не представляет опасности с точки зрения ее развития.

Как видно из рисунков 8, 9, наклеивание углеродных волокон привело к разгрузке практически всего суперэлемента (за исключением зон концентрации напряжений) примерно до величины напряжений, численно равных их значениям на берегах трещины в зоне разгрузки (рис. 8, 9).

Приведенная выше методика и результаты расчета позволяют обосновано решать вопросы оценки трещиностойкости конструкций как на стадии проектирования, так и для продления эксплуатации подкрановых балок при условии наклеивания углеродных волокон.

Литература

1. Стоянов В.В. «Новые подходы к продлению срока работоспособности конструкций». В сб. «Современные строительные конструкции из металла и древесины», часть 2. Одесса, 2008. ст. 41 -47.
2. Зайцев Ю.В. «Механика разрушения для строителей» М., Высшая школа, 1991, 285с.
3. Стоянов В.В. «Новые подходы в управлении несущей способности конструкции», В сб. «Совр. стр. констр.» Одесса, ВРС, 2001, 164 – 167с.
4. Стоянов В.В. «Совершенствование армированных деревянных конструкций» Владимир, ВТУ, 2003, 258 – 261с.
5. Стоянов В.В. «Проблемы совершенствования комбинированных строительных конструкций с целью повышения их несущей способности» В сб. «Совр. стр. констр.», Одесса, ВРС, 2003, 4 – 11с.
6. Стоянов В.В. «Новые подходы обеспечения несущей способности строительных металлических конструкций в полном объеме срока эксплуатации» В сб. VII Украинской НТК «Металлические конструкции» К., Сталь, 286 – 292с.
7. Стоянов В.В. «Металлические резервуары – некоторые проблемы проектирования и реконструкции», в ж-ле «Металлические конструкции», Д., УАМК, 2007, 45 – 49с.
8. A.Davidenko, P.Kiryazev, A.Panasenko «Development of effective design approach for upper chord of crane girder» В сб. «Совр. стр. констр.» ч.1., 2008, 54 – 57с.
9. Strengthenig of structures with CFRP strips. Sika Carbo Dur Convention, okt/nov, 1997.
10. Loisean A., Demoney V. Stehan O. ental./ Scsence and Application of Nanotubes / End. D. Tomanek and R.I. Enbody V.I., 2000, p.1 – 16.

Стоянов Володимир Васильович є завідуючим кафедрою «Металевих, дерев'яних та пластмасових конструкцій». Академік Академії будівництва України. Голова Асоціації спеціалістів дерев'яних конструкцій Росії, України, Білорусії. Наукові інтереси: реконструкція і підсилення металевих складених конструкцій високомодульними матеріалами, збірні оболочечні легкі покриття.

Давіденко Олександр Іванович завідуючий відділом ДНДІБК. Член-кореспондент Санкт-Петербурзької академії екології.

Стоянов Владимир Васильевич является заведующим кафедрой «Металлических, деревянных и пластмассовых конструкций». Академик Академии строительства Украины. Председатель Ассоциации специалистов деревянных конструкций России, Украины, Белоруссии (АСДК РУБ). Научные интересы: реконструкция и усиление металлических составных конструкций высокомодульными материалами, сборные оболочечные легкие покрытия.

Давиденко Александр Иванович – заведующий отделом ГНИИСК. Член-корреспондент Санкт-Петербургской академии экологии.

Stoyanov Vladimir Vasil'yevich – Head of Metal, Wood and Plastic Structures Department. An Academician of the Civil Engineering Academy of Ukraine. Chairman of the Association of Wooden Structures Specialists of Russia, Ukraine, Byelorussia. His research interests include reconstruction and reinforcing of metal composite structures by high-modulus materials, composite shell light coatings.

Davidenko Aleksandr Ivanovich – Head of the Department of State Research Institute of Building Structures. A corresponding member of St. Petersburg Ecology Academy.