

Рисунок 5. Структура поверхностного слоя после ЭПО (x100).

### Вывод

Проведенные исследования позволили установить влияние режимов ЭПО на тонкую структуру материала, механизмы модификации поверхностного слоя, закономерности влияния параметров процесса ЭПО на свойства поверхности обрабатываемого материала. Установлено, что ЭПО способствует снижению плотности дислокаций, снижению микротвердости и изменению фазового состава поверхностного слоя. Кроме того, ЭПО продолжительностью до 3 мин способствует повышению коррозионной стойкости.

### Литература

1. Плазменно-электролитическая анодная обработка металлов / Баковец В.В., Поляков О.В., Долговесова И.П. - Новосибирск: Наука.Сиб. отд-ние, 1991. -168с.
2. Исследование и внедрение технологии электролитно-плазменной обработки конструкционных сталей и алюминия / В.К. Станишевский, А.А. Кособуцкий, А.Э. Паршутто и др. // Отчет о НИР №01.88.0014649. - Минск. 1990. - 68 с.
3. Гуляев А.П. Металловедение. М.: Металлургия, 1978. 647 с.
4. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. Учеб. пособие для вузов/С.С. Горелик, Ю.А. Скакова; Л.Н. Расторгуев. - М.: МИСИС, 2002. -360 с.

УДК 539.4.015.2

## ЗАВИСИМОСТЬ ПРОЧНОСТИ КОМПОЗИТА ОТ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЕГО КОНТАКТИРУЮЩИХ ФАЗ

Кузёмкина Г. М., Шимановский А. О., Якубович О. И.

Белорусский государственный университет транспорта,  
г. Гомель, Республика Беларусь

Постановка арматуры в матрицу композита дает возможность увеличения прочности и жесткости машиностроительных и строительных конструкций. Качества композитного материала в значительной степени зависят от свойств поверхностей сцепления его контактирующих фаз [1, 2]. В последние годы в мире большое внимание уделяется уточненным расчетам напряженно-деформированного состояния конструкций из композитных материалов. Среди программных комплексов, реализующих расчеты таких конструкций методом конечных элементов, наиболее известны ANSYS, NASTRAN, MARC [3 – 5].

На базе современных вычислительных комплексов решен ряд практических задач о деформировании железобетонных строительных конструкций. Например, в исследованиях Д. Качлакева и др. [10] выполнен расчет железобетонной балки с помощью программы ANSYS. Проведено сравнение расчетов с экспериментальными данными, причем отклонение значений напряжений и перемещений составило от 5 до 24%. Для укрепления конструкций авторы работы предлагают использовать армированные волокном полимеры, которые предотвращают развитие раскрытых трещин. В указанной статье также даны практические рекомендации по расчетам железобетонных конструкций в ANSYS.

Аналогичные исследования проведены П. Фаннингом [11]. Автор выполнил сопоставление результатов расчетов железобетонной балки на ANSYS и экспериментальных данных. Расчеты показали, что экспериментальные значения перемещений практически не отличаются от расчетных. Максимальная расчетная нагрузка оказалась на 12% меньше разрушающей, полученной опытным путем.

С. Лимкэйтано и Е. Спакоун [12] предложили три метода решения задач об определении напряженно-деформированного состояния железобетонных балок с учетом возможности относительного смещения арматуры внутри матрицы, что позволило им установить расположение областей, в которых происходит отслоение арматуры от бетона.

И. Брозовски [13] выполнил расчет стыка двух панелей двумя различными способами: с помощью программного комплекса ANSYS и разработанной автором программы, основанной на методе конечных элементов. В обеих программах учтены свойства материала. Результаты расчетов близки к экспериментальным данным.

Однако авторы упомянутых исследований моделируют арматуру тонкими стержнями, воспринимающими только продольные нагрузки. Это, во-первых, не позволяет достоверно оценить напряжения в областях взаимодействия арматуры и матрицы композита, поскольку не учитывает неравномерность распределения напряжений по сечению арматуры, во-вторых, не дает возможность учесть, как влияет трение между контактирующими фазами композита на его напряженно-деформированное состояние.

В данной работе поставлена задача об установлении влияния коэффициента трения между арматурой и матрицей композита на деформации конструкции и напряжения в различных ее элементах. Расчет выполнялся с применением метода конечных элементов. Особенностью разработанной модели являлось представление арматуры в виде трехмерного деформируемого твердого тела, причем использовались двадцатиузловые призматические конечные элементы.

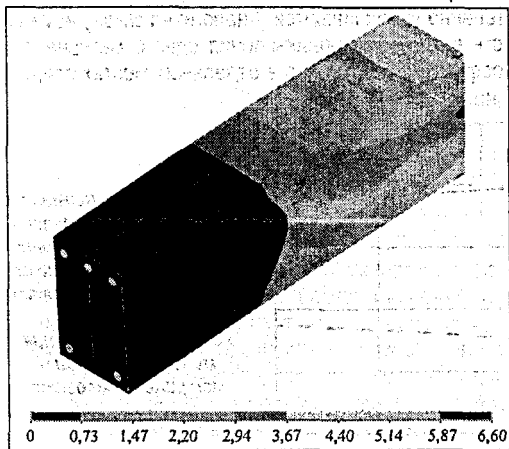
Для анализа особенностей взаимодействия металлической арматуры и матрицы композита выполнен анализ напряженно-деформированного состояния консольной балки с длиной 1 м и прямоугольным поперечным сечением 20 x 30 см, армирование которой обеспечивалось пятью стальными стержнями диаметром 2 см [14, 15]. Принималось, что модули упругости материала матрицы и арматурной стали 27 и 200 ГПа соответственно. Нагружение балки осуществлялось силами тяжести ее элементов и равномерно распределенным давлением 170 кПа, приложенным к верхней грани.

Для уменьшения объема вычислений при создании конечноэлементной модели учитывалась симметрия рассчитываемой конструкции, поэтому разработанная модель представляла собой половину реальной балки, рассеченной продольной вертикальной плоскостью. Поскольку заранее неизвестны площадки скольжения арматуры и матрицы, то возникла необходимость использования мелких конечных элементов (с длиной ребра менее 1 см), позволяющих установить закон распределения сил трения по области контакта фаз материала. Общее число конечных элементов модели оказалось равным 78800.

Расчеты выполнены исходя из того, что между материалами композита имеется сухое трение, определяемое законом Кулона. Значения коэффициентов трения принимались в диапазоне от 0 до 1, которые соответствуют разным физическим свойствам поверхностей контактирующих фаз композита. Учет адгезии между материалами может приводить к значениям коэффициента трения, превышающим 1.

В результате расчетов получено распределение напряжений по объему рассчитываемой конструкции. На рисунке 1 приведена схема распределения эквивалентных по Мизесу напряжений по объему матрицы композита. Области с разными значениями напряжений различаются интенсивностью цвета в соответствии со шкалой напряжений,

приведенной в нижней части рисунка: Полученные результаты свидетельствуют о том, что наибольшие напряжения наблюдаются в области закрепления балки. Наличие арматурных стержней приводит к переменности напряжений по ширине поперечного сечения балки. Это наиболее заметно вблизи места защемления балки.



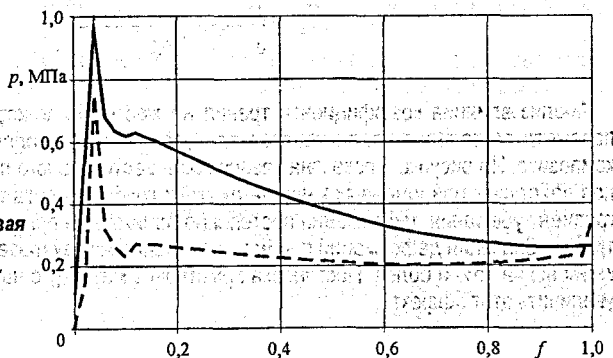
**Рисунок 1.** Схема распределения эквивалентных по Мизесу напряжений, в МПа, по объему матрицы композита

Анализ состояния контакта между соприкасающимися поверхностями показал, что проскальзывание отсутствует только на небольших участках соприкосновения между арматурой и матрицей композита. Эти участки расположены в верхних частях арматурных стержней на расстояниях, не

превышающих пяти диаметров арматуры от места защемления.

Выполнен анализ изменения напряжений по длине арматурного стержня. При отсутствии трения максимальные эквивалентные напряжения наблюдаются в заделанном поперечном сечении. При увеличении коэффициента трения место с максимальными эквивалентными напряжениями смещается от защемленного конца балки. На рисунке 2 приведены графики распределения контактных напряжений по верхней образующей верхнего арматурного стержня в зависимости от расстояния до защемленного конца балки при отсутствии внутреннего трения и для коэффициента трения  $f = 1$ . Из приведенных графиков видно, что максимальные контактные напряжения возникают на расстоянии, соответствующем двум диаметрам арматурного стержня от места заделки. При отсутствии трения контактные напряжения постепенно понижаются по направлению к свободному концу балки. Учет трения позволил установить, что на свободном конце арматурного стержня наблюдается скачок контактного давления.

**Рисунок 2.** Схемы распределения контактных напряжений по верхней образующей арматурного стержня в зависимости от расстояния между сечением и местом заделки балки; верхняя кривая – без учета трения, нижняя – для коэффициента трения  $f = 1$



На рисунке 3 представлены зависимости максимальных контактных давлений и контактных давлений на свободном конце балки от коэффициента трения между арматурой и матрицей композита. Из приведенных графиков видно, что максимальные контактные напряжения монотонно убывают при увеличении коэффициента трения, а контактные напряжения на свободном конце постепенно увеличиваются. Аналогична закону изменения контактного давления зависимость взаимного проникновения одного материала в другой. Отметим, что при больших коэффициентах трения в отдельных местах появляются зазоры между арматурой и матрицей композита.

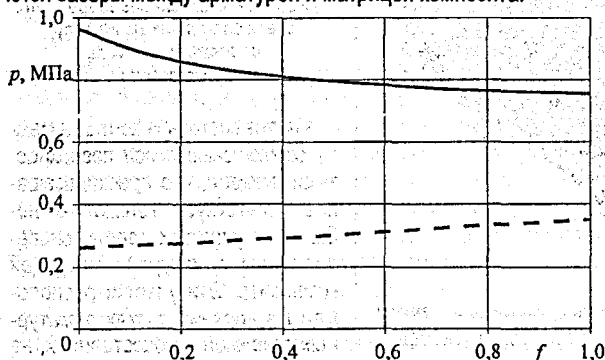
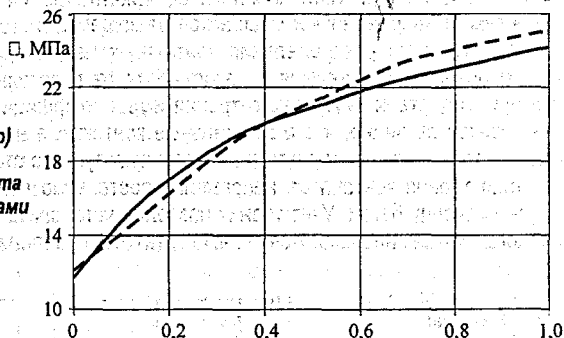


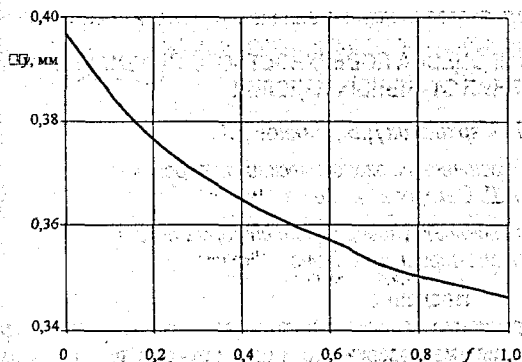
Рисунок 3. Зависимости максимальных контактных давлений (сплошная линия) и контактных давлений у свободного конца балки (пунктир) от коэффициента трения между арматурой и матрицей композита

Анализ значений максимальных эквивалентных по Мизесу напряжений в материале арматуры показал, что они монотонно возрастают по мере увеличения коэффициента трения. Аналогичная зависимость обнаружена и для первого главного напряжения (рисунок 4).

Рисунок 4. Зависимость максимальных главных (сплошная линия) и эквивалентных (пунктир) напряжений в материале арматуры от коэффициента трения между компонентами



Анализ влияния коэффициента трения на жесткость конструкции показал, что этот параметр постепенно увеличивается при увеличении сцепления между материалами композита. На рисунке 5 показана зависимость вертикального перемещения конца балки под действием приложенных к ней нагрузок от коэффициента трения. Из нее видно, что градиент убывания деформации постепенно понижается при увеличении коэффициента трения. Значения деформаций при наличии трения между фазами композита могут быть снижены на 15% и более. Постановка арматуры в матрицу с натягом может еще больше увеличить этот эффект.



**Рисунок 5 – Зависимость вертикального перемещения конца балки от коэффициента трения**

Таким образом, в ходе выполнения работы получены следующие основные результаты:

1. Разработана конечноэлементная модель взаимодействия цилиндрической металлической арматуры с бетонной матрицей, особенностью которой является учет

распределенного трения между поверхностями контактирующих фаз.

2. Выполненные численные расчеты напряженно-деформированного состояния композитной балки позволили установить влияние коэффициента трения между соприкасающимися фазами на прочность и жесткость конструкции.

Результаты работы могут быть использованы при разработке новых композиционных материалов, обладающих улучшенными механическими свойствами.

Работа выполнена в рамках Государственной программы комплексных научных исследований "Механика", задание "Механика 2.26".

#### Литература

1. Аиелло М. А., Леоне М., Омбрес Л. Моделирование поведения работающих на растяжение бетонных элементов конструкций, армированных стержнями из волокнистого композита // Механика композитных материалов. – 2003. – Т. 39, № 4. – С. 431-444.
2. Тепферс Р., Де Лоренцис Л. Сцепление арматуры из волокнистого композита в бетоне – актуальная проблема // Механика композитных материалов. – 2003. – Т. 39, № 4. – С. 477-496.
3. Басов К. ANSYS в примерах и задачах. – М.: КомпьютерПресс, 2002. – 224 с.
4. Шимкович Д. Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 448 с.
5. Moaveni S. Finite element analysis. Theory and application with ANSYS. – New Jersey: Prentiss Hall Inc. – 1999. – 527 p.
10. Finite element modeling of reinforced concrete structures strengthened with FRP laminates Final Report / United States Department of Transportation, Federal Highway Administration. / Kachlakev D., Miller T., Yim S. etc. – 2001. – 34 p.
11. Fanning P. Nonlinear models of reinforced and post-tensioned concrete beams // Electronic Journal of Structural Engineering. – 2001. – № 2. – P. 111 – 119.
12. Limkatanyu S., Spacone E. Reinforced concrete frame element with bond interfaces. Part 1: Displacement-Based, Force-Based and Mixed Formulations. // Journal of Structural Engineering. – 2002. – Vol. 128, № 3. – P. 346-355.
13. Brožovský J. Modelování fyzikálně nelineárního chování železobetonových konstrukcí: Teze disertační práce: 36 – 06 – 9. – Brno, 2001. – 44 s.
14. Кузёмкина Г. М., Шимановский А.О., Черноус Д.А. Конечноэлементное моделирование бетонной матрицы с упрочняющей арматурой // 4 международная научная конф. «Полимерные композиты, покрытия, пленки. Поликом 2003» – Гомель: ИММС НАНБ, 2003. – С. 53-55.
15. Кузёмкина Г. М. Компьютерное моделирование взаимодействия бетонной матрицы с металлической арматурой // Машиностроение. – Вып. 20, Т. 2. – Минск: УП «Технопринт», 2004. – С. 336-341.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Кундас С.П., Марковник Д.В., Иванов Д.Г.

Международный государственный экологический университет  
им. А.Д. Сахарова, г. Минск

Белорусский государственный университет информатики и  
радиоэлектроники, г. Минск

### Введение

Плазменное поверхностное упрочнение находится в настоящее время широкое и эффективное применение как в условиях мелкосерийного и единичного (в том числе ремонтного), так и крупносерийного и массового производства [1,2].

Особенностью методов поверхностного упрочнения высококонцентрированными источниками нагрева является возможность получения скоростей нагрева и охлаждения материалов, превышающих на несколько порядков значения, характерные для традиционных методов упрочнения (печной закалки, закалки ТВЧ, газопламенной закалки и др.), что способствует получению поверхностных слоев с высоким уровнем эксплуатационных свойств.

В результате многочисленных исследований установлено, что скорость охлаждения поверхностного слоя металла, структура и свойства упрочненной зоны определяются в первую очередь степенью локализации ввода тепла в обрабатываемое изделие (в пятно нагрева) [3].

Одним из эффективных методов исследования и оптимизации процессов плазменного упрочнения является использование компьютерного моделирования, при котором возможно получение максимального объема информации при минимуме дорогостоящих экспериментальных исследований [4].

Исходя из анализа теплофизических и динамических процессов, имеющих место при плазменном упрочнении стальных деталей, можно предложить общую схему их моделирования, основными этапами которой являются:

1. Разработка математической модели теплопередачи от плазменной струи к обрабатываемым деталям.
2. Разработка математической модели нагрева и охлаждения обрабатываемых деталей с учетом фазовых превращений.
3. Разработка математической модели формирования в деталях полей деформаций, напряжений и распределения твердости.
4. Разработка алгоритмов компьютерной реализации моделей с учетом их взаимодействия и сквозной передачи данных в процессе моделирования.

Математическая модель разрабатывалась применительно к плазменному упрочнению рабочей поверхности рельса (рис.1).

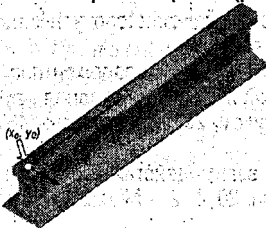


Рис. 1. Модель обрабатываемой детали с указанием направления движения плазмотрона и его начальной точки