

## СОВМЕСТИМОСТЬ – КАК КРИТЕРИЙ ОТБОРА ЭФФЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РЕМОНТА БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Гедулян С.И., Коваль С.В., Савченко С.В.

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г.Одесса, Украина*

Ремонт железобетонных или бетонных конструкций представляет собой сложный многосторонний процесс, включающий в себя этапы обследования и диагностики конструкций, определение причин разрушения, планирование проведения ремонтных работ, выбор необходимых материалов и технологий (рис.1). Для достижения наилучшего результата необходим системный подход при выборе материалов для производства ремонтных работ [1].

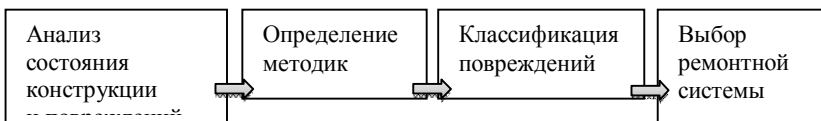


Рис.1. Обоснование выбора материалов для производства ремонтных работ

Основной проблемой, которая должна быть решена на предремонтном этапе - выбор ремонтного материала (РМ). Эффективный РМ должен обеспечить качество ремонта и сохранение его последствий. Отремонтированная конструкция в период дальнейшей эксплуатации должна обладать надежностью и иметь все необходимые функции «здоровых» конструкций. Необходимо обосновать рациональный РМ, отвечающий требованиям по нанесению и обеспечению характеристик по прочности и деформативности, обеспечивающий совместимость со «старым» бетоном, что является гарантией долговечности РМ [2]. Ремонтруемый фрагмент конструкции не может быть чужеродным. При этом учитывается, что любой РМ (даже имеющий такие же характеристики, как и у «старого бетона») будет отличаться от субстрата.

Согласно EN 1504 «Материалы и системы для ремонта и защиты бетонных конструкций» средство свойств (совместимость) должно охватывать: прочность при сжатии и растяжении, сцепление в плоскости контакта, механическую и тепловую деформативность, физические свойства (водонепроницаемость, газопроницаемость, морозостойкость, водопоглощение, стойкость к истиранию). Необходимо также учесть химические свойства (реактивность заполнителя, проводимость, электрохимические потенциалы), деформативные свойства (усадка, ползучесть), огнестойкость и другие специфические характеристики ремонтных и ремонтируемых систем в конкретных условиях эксплуатации.

Понятия совместимости (*compatibility*) или несовместимости (*incompatibility*) давно используются, например, в психологии, медицине, электронике. В последнее время эти понятия привлекаются и в материаловедении (Emmons и Czarnеcki [2], Morgan [3], Кулезнев [4]). В случае ремонтных материалов «совместимость» определяется [60] как «равновесие физических, химических, электрохимических и деформационных характеристик между материалом и ремонтируемым бетоном для достижения способности конструкции после ремонта сопротивляться напряжениям, вызванным изменениями объёма, коррозионными, химическими или электрохимическими и другим воздействиям без отказов и повреждений в течение назначенного периода времени». Несовместимость материалов является главной причиной плохого ремонта. Выделяется несколько видов совместимости [2, 5].

*Химическая совместимость*, которая может быть связана с содержанием щелочей и хлоридов. Повышенное содержание ионов натрия и калия может активировать щелочную реакцию заполнителей в бетоне, а повышение концентрации ионов хлора (например, при использовании некоторых добавок) - ускорить коррозию арматуры.

*Электрохимическая совместимость*, например, заключается в соответствии электрического сопротивления и уровня pH, что позволяет избежать формирования микроочагов коррозии стали. Содержащаяся в порах бетона жидкость (pH около 12,5) создает на поверхности стальной арматуры пассивный защитный слой Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, что гарантирует защиту арматуры от коррозии. Несовместимость может определяться повышением концентрации Fe<sup>2+</sup>, реакцией  $Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2$  и снижением защитной способности покрытия относительно арматуры.

*Физическая совместимость* – соответствие тепловых и упругих деформаций, что достигается при качественно выбранных отдельных механических (прочность) и физических (главным образом тепловых) характеристиках. Совместимость подразумевает характер поведения материала как в затвердевшем, так и в твердеющем состоянии.

Основное требование физической совместимости – соответствие его **деформационных характеристик** РМ соответствующим характеристикам субстрата при выполнении условия [2]


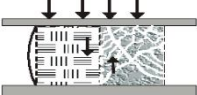

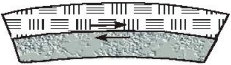
$$R_D^{\text{PM}} \approx \frac{\left( \varepsilon_{\text{ct}}^{\text{PM}} - \frac{f_{\text{ct}}^{\text{PM}}}{E_b} \right)}{E^{\text{PM}} + E_b} E^{\text{PM}} E_b, \quad (1)$$

где  $E_b$ ,  $E^{\text{PM}}$  – модули упругости бетона и ремонтного материала (МПа),

$f_{\text{ct}}^{\text{PM}}$  – прочность бетона на растяжение (МПа),

$\varepsilon_{\text{ct}}^{\text{PM}}$  – деформации при растяжении (%),

Величина **модуля упругости** РМ должна быть близкой к модулю упругости субстрата, как и **показатели прочности на сжатие и растяжение**. Различие модулей бетона  $E_b$  и ремонтного материала  $E^{\text{PM}}$ , соответствующих прочностей  $f_{\text{cm}}$  и  $f_{\text{cm}}^{\text{PM}}$  может привести к несовместимым напряжениям и вызвать перераспределение нагрузок (рис. 2). Высокая прочность  $f_{\text{cm}}^{\text{PM}}$  на сжатие может в ряде случаев негативно влиять на другие свойства, которые необходимы для обеспечения качественного ремонта, при этом прочность на растяжение  $f_{\text{ct}}^{\text{PM}}$  далеко не всегда коррелируются с прочностью на сжатие  $f_{\text{cm}}^{\text{PM}}$ .

Свойство	Проявление несовместимости	Условие совместимости
 <p><b>Модуль упругости</b></p>		$E_b \cong E^{\text{PM}}$
 <p><b>Тепловые деформации</b></p>		$\alpha_T^b \cong \alpha_T^{\text{PM}}$

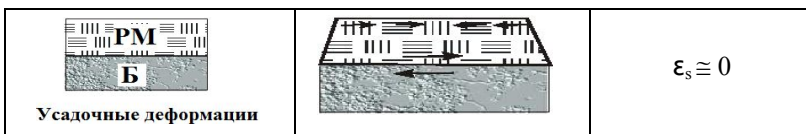


Рис.2. Некоторые условия совместимости РМ и субстрата [2]

При выборе РМ необходимо учитывать **прочность сцепления** ремонтного материала с субстратом, которая является основным требованием качественного ремонта. Если касательное напряжение в контактной зоне превышает прочность сдвига в этой зоне, наступает отслоение и как следствие, повреждения раствора [5].

По этой причине контактная зона старого материала с новым определяет долговечность ремонта. Стандартно для улучшения контактной зоны применяется грунтовочный слой, который повышает сцепление и значительно ограничивает результирующие касательные напряжения.

Условие совместимости по прочности записывается как:

$$f_{ct}^{\frac{PM}{B}} \geq f_{ct}^b, \quad (2)$$

где  $R^{PM/B}$  – прочность сцепления РМ и «старого» бетона, МПа;  $f_{ct}^b$  – прочность бетона на растяжение, МПа.

Способность к образованию трещин также анализируется через различие прочностей РМ и «старого» бетона на растяжение как [2]:

$$\frac{f_{ct}^{PM} \cdot h^{PM}}{f_{ct}^b} \cdot \varepsilon_{ct}^{PM} (1 + \varepsilon_{ct}^{PM}) \geq \Delta \alpha_r. \quad (3)$$

где  $h^{PM}$  – толщина ремонтного слоя (м),  $\Delta \alpha_r$  – прирост ширины раскрытия трещин (мм).

Плохое сцепление между ремонтным материалом и правильно подготовленным бетонным субстратом часто происходит *из-за разности температурных деформаций* твердеющего ремонтного состава и основания и из-за его усадки при твердении. При изменении температуры величина деформаций конструкции пропорциональна коэффициенту температурного линейного расширения материала.

**Тепловая совместимость** ремонтного состава и субстрата описывается уравнением [2]:

$$R_r^{\frac{PM}{B}} > \frac{(\alpha_r^{PM} - \alpha_r^b) E^{PM} \cdot E_b}{E^{PM} + E_b} \quad (4)$$

где  $\alpha_T^{PM}$ ,  $\alpha_b$  – коэффициенты линейного теплового расширения ( $K^{-1}$ ),  $\Delta T$  – прирост температуры (K).

С позиций сопротивляемости тепловому удару совместимость может быть учтена как:

$$\frac{\lambda_b}{\lambda^{PM}} < \frac{E_b \cdot \alpha_T^b}{B} \quad (5)$$

$$B = \frac{(\alpha_T^{PM} - \alpha_T^b)}{E^{PM} - E_b} \cdot E^{PM} \cdot E_b \quad (6)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности ( $Вт \cdot м / К$ ).

**Величина усадки** при твердении гидравлических вяжущих на основе цемента оказывает большое влияние на сцепление ремонтного состава с основанием и его прочность. Из материалов, которые обладают другими необходимыми свойствами, при выборе ремонтных материалов предпочтение следует отдавать тем, которые характеризуются самой низкой усадкой при твердении. С позиций усадки при твердении РМ условие совместимости можно записать как [2]:

$$R_{\varepsilon}^{\frac{PM}{B}} \geq \frac{0,3 E^{PM} \cdot \varepsilon_s}{(1 - \nu^{PM})} \quad (7)$$

где  $\varepsilon_s$  – линейная усадка (%),  $\nu^{PM}$  – коэффициент Пуансона ремонтного материала

Обеспечение **барьерных свойств** позволяет, например, снизить упругое действие пара, проникающего через пористое бетонное основание и собирающегося на границе фаз материал «РМ – бетон». Для этого внутренний защитный слой (например, в градирнях) должен быть паро- и водонепроницаемым, а внешний – водонепроницаемым, но паропроницаемым. Совместимость с позиции барьерных свойств может быть проанализирована как:

$$h^{PM} \geq \pi \sqrt{D \cdot \tau} \quad (8)$$

$D$  – коэффициент диффузии ( $см^2 \cdot с^{-1}$ ),  $h^{PM}$  – толщина защитного слоя (м),  $\tau$  – время проникновения (с).

Свойства **технологичности** – это свойства материалов, которыми они обладают в раннем возрасте. Некоторые из свойств технологичности облегчают укладку материала, но могут неблагоприятно отразиться на формировании других свойств материала.

При выборе ремонтных материалов следует учитывать **скорость набора прочности** при твердении. Очень быстрый набор прочности твердеющим материалом может негативно сказаться на транспортировке и укладке материала в конструкцию. Очень медленный рост прочности может создать проблемы со сроками выполнения работ при сжатых сроках сдачи объекта в эксплуатацию, нарушить последовательность технологического потока, а также привести в ряде случаев к негативным последствиям в обеспечении требуемого качества работ. При ремонте эксплуатируемых конструкций РМ, как правило, должен допускать нагружение конструкций через сутки после укладки [6].

На практике однако, не всегда удается найти материалы для ремонта, так что все его особенности, совместимы с характеристиками материала восстанавливаемой конструкции. Поэтому следует всегда указывать основные требуемые для данных условий ведущие свойства материала, а также второстепенные свойства. В большинстве случаев, ведущим свойством является прочность материала, но к примеру, в случае ремонта резервуаров для жидкостей отличительной чертой хорошего материала является водостойкость, в случае конструкции, работающей в условиях попеременных температур – термическая деформативность. Основные характеристики материалов для восстановления и ремонта должно быть абсолютно совместимы, хотя в отношении второстепенных характеристик можно допустить отклонения от этого принципа, достигающие 25% [5].

**Выводы.** Так как все более четко проявляются трудности в выборе материалов для ремонта, в настоящее время развиваются подходы и критерии к оценке совместимости ремонтного материала и ремонтируемого бетона. Проблема совместимости, с аналитической точки зрения, требует дальнейшей разработки. В настоящее время практика опережает теорию и отсутствие аналитических моделей осложняет выбор совместимых материалов. В то же время выбор ремонтных растворов с учетом совместимости с ремонтируемым бетоном позволит существенно повысить эффективность ремонтных работ.

### **Summary**

**In this article we analyzed the problems of repair material compatibility with damaged surface of concrete and reinforced concrete structures, and specified the types of compatibility, as well**

**as the properties, that need to be considered when choosing a compatible repair materials and repaired concrete.**

1. Król M. Naprawy i wzmocnienia konstrukcji budowlanych // Przegląd budowlany 3/2009. –S.30-36.
2. Czarnecki L., Emmons P.H. Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych, Polski Cement, Kraków 2002.
3. Morgan D. Compatibility of concrete repair materials and systems// Constr. and Build. Mater. 1996, vol.10, №1, p.57-67.
4. Кулезнев В.Н. Состояние теории совместимости полимеров // Многокомпонентные полимеры /под ред.Р.Г.Гонда. –М.:Химия, 1974. –328 с.
5. Руководство по ремонту бетонных и железобетонных конструкций транспортных сооружений с учетом обеспечения совместимости материалов. М., ОАО «Научно-исследовательский институт транспортного строительства» (ОАО ЦНИИС), 2010.
6. Ремонт и восстановление железобетонных конструкций с применением полимерцементных составов бюллетень Construction Chemicals, 04 [04], 2008. –С.14-15.