

На правах рукописи

Круциляк Михаил Михайлович

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКОГО
КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ
БЕТОНА ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
КОНСТРУКЦИЙ

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции, здания
и сооружения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Магнитогорск – 2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Научный руководитель: Варламов Андрей Аркадьевич
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Ивашенко Юлий Алексеевич
ГОУ ВПО «ЮУрГУ» г. Челябинск

кандидат технических наук, доцент
Куршпель Владимир Хрисанфович
ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ» г. Екатеринбург

Ведущая организация – ОАО «НИЦ«Строительство», г. Москва

Защита состоится «07» июля 2010 г. в 13.00 час. на заседании диссертационного совета ДМ 212.298.08 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд. 1001

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан « 02 » июня 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

Трофимов Б.Я.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы: Несмотря на то, что бетон и железобетон являются основными строительными материалами, до настоящего времени не существует законченной теории их деформирования и разрушения.

Известно, что явление разрушения бетона и железобетона представляет собой сложный многоступенчатый процесс появления, роста и развития трещин. Отсюда возникает необходимость изучения бетона и железобетона с позиций механики разрушения, которая в широком смысле этого понятия включает в себя ту часть науки о прочности материалов и конструкций, которая связана с изучением несущей способности тела с учетом начального распределения трещин, а также с изучением различных закономерностей их развития.

Критический коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} (МПа·м^{1/2}) при нормальном отрыве (в последующем ККИН), одна из основных механических характеристик конструкционных материалов, которая характеризует сопротивление материала образованию и развитию трещин.

На сегодняшний день затруднительно экспериментально определить характеристики трещиностойкости эксплуатируемых конструкций. Для определения ККИН необходимо извлечение образцов из конструкции для испытаний, что в подавляющем большинстве случаев дорого или не представляется возможным. Имеющиеся опытные данные о сопротивлении бетона распространению трещин относятся в основном к лабораторным образцам. Перенос значений опытных данных, на эксплуатируемые конструкции в большинстве случаев пока невозможен. В связи этим сегодня выдвигаются гипотетические модели развития систем трещин и трещиноподобных дефектов, на которых строится прогнозирование долговечности и оценка технического состояния железобетонных элементов.

Поэтому разработка метода определения K_{Ic} в реальных конструкциях является актуальной.

Цель работы: разработка методики определения ККИН эксплуатируемых конструкций при статическом нагружении.

Объект исследования: эксплуатируемые бетонные и железобетонные конструкции.

Предмет исследования: критический коэффициент интенсивности напряжений.

Научную новизну работы составляют:

- Экспериментальный метод, заключающийся в отломе «углового» сегмента, который позволяет более точно определять значение ККИН бетона эксплуатируемых конструкций при статическом нагружении.
- Закономерности, описывающие влияние ряда изученных факторов (масштабный, геометрический, наличие арматуры) на определение ККИН при отломе «углового» сегмента.

Практическое значение работы:

- Метод определения ККИН на эксплуатируемых конструкциях.
- Методика определения ККИН применена при обследовании объектов ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», ОАО «Магнитогорский калибровочный завод», ЗАО «Механоремонтный комплекс» г. Магнитогорск.

Апробация работы.

Основные положения и результаты работы представлялись в виде докладов и тезисов на научных семинарах, заседаниях и конференциях:

- Научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ за 2003 – 2006 гг., Магнитогорск, 2003-2006.
- III-IV Международная научно-практическая Интернет-конференция «Состояние современной строительной науки», Полтава, 2005-2006.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ в научных журналах, сборниках статей и материалах конференций, в том числе 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы. Общий объем 140 страниц машинописного текста, включая 72 рисунка и 37 таблиц. Список литературных источников содержит 90 наименования.

На защиту выносятся:

- Метод определения ККИН в лабораторных условиях и на эксплуатируемых конструкциях.
- Результаты экспериментальных исследований по определению ККИН.
- Результаты статистического анализа взаимосвязи ККИН с геометрическими и силовыми факторами.
- Методика определения ККИН на эксплуатируемых конструкциях.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой темы, изложены цели и задачи исследований, проведенных в работе над диссертацией, и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе изложены результаты исследований трещиностойкости и долговечности квазиоднородных и композитных материалов.

Вопросом определения трещиностойкости посвящены работы А. Гриффитса, Р. Ирвина, Е. Орована, Д. Райса, Я.Б. Фридмана, Г.И. Баренбланта, Д.С. Дагдейла, А.А. Уэллса, В.Э. Партона, А. Эванса, Г.П. Черепанова, Л.П. Трапезникова, М.Я. Леонова, В.В. Панасюка, Ю.В. Зайцева, А.Б. Пирадова, К.А. Пирадова, Е.А. Гузеева, Н.И. Карпенко, Р. Мамажанова, С.Н. Леоновича, В.А. Перфилова и других исследователей.

В главе рассмотрены основные подходы и критерии разрушения материалов (энергетический подход, критерий предельных напряжений, деформационный критерий, кинетический критерий). Так же приведены известные методы, и схемы проведения испытаний, с помощью которых определяли и определяют характеристики трещиностойкости.

На сегодняшний день ГОСТ 29167-91 «Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении», является единственным нормативным документом Российской Федерации, где рассмотрены все предлагаемые методы определения ККИН и других характеристик трещиностойкости на лабораторных образцах.

Систематизированы и представлены ранее изученные факторы, влияющие на ККИН. Среди них: масштабный эффект, влияние крупности заполнителя, влияние длины трещины (надреза), влияние ширины и геометрии надреза, влияние водоцементного отношения, влияние возраста цементного камня и бетона в момент испытания, влияние воздушных пор в цементном камне и бетоне, влияние напряженного состояния.

В результате анализа приведенных методик и критериев определения ресурса работы материалов было выделено два подхода. В первом случае ККИН определяется по методике предлагаемой ГОСТ 29167-91. Во втором, ККИН вычисляется на основании модельных схем развития, объединения, локализации системы трещин их классификации по видам и относительному количеству в объеме при начальной концентрации.

В ряде специфических условий эксплуатации конструкций, нельзя с полной мерой надежности определять существующими методами характеристики трещиностойкости с дальнейшим их прогнозом развития.

В связи с вышеизложенным были поставлены следующие задачи:

1. Разработать метод определения ККИН бетона эксплуатируемых конструкций;
2. Изучить основные факторы, влияющие на определение ККИН;
3. Отработать метод на лабораторных образцах;
4. Разработать методику определения ККИН бетона на эксплуатируемых конструкциях;
5. Определить ККИН бетона на эксплуатируемых конструкциях.

Вторая глава содержит сведения об исходных материалах и опытных образцах, методике проведения экспериментальных исследований.

Опытные образцы были изготовлены в лаборатории кафедры «Строительные конструкции» ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова». Размеры образцов и пропилов в образцах для трехточечного изгиба соответствовали требованиям ГОСТ 29167-91. Для изготовления образцов использовали составы бетонов, которые были подобраны с помощью трехуровневого плана эксперимента. Класс бетона образцов находился в пределах В12,5÷В60. Всего было изготовлено 64 призмы размером 100×100×400 мм, 18 железобетонных призм размером 100×100×400 мм с арматурой класса А-III диаметром Ø14÷25 мм, 33 призмы размером 150×150×600 мм и 84 куба размером 100×100×100 мм.

В главе представлена методика проведения испытаний на трехточечный изгиб на специально изготовленной установке (рис. 1), позволяющей получить полную диаграмму поведения бетона, включая ниспадающую ветвь.

Отличительной особенностью изготовленной установки от предлагаемой ГОСТ 29167-91, было то, что она была расположена в горизонтальной плоскости. Тем самым испытываемый образец воспринимал нагрузку в горизонтальном направлении, беспрепятственно деформировался и не испытывал влияния собственного веса. Загружение образцов происходило по жесткой схеме.

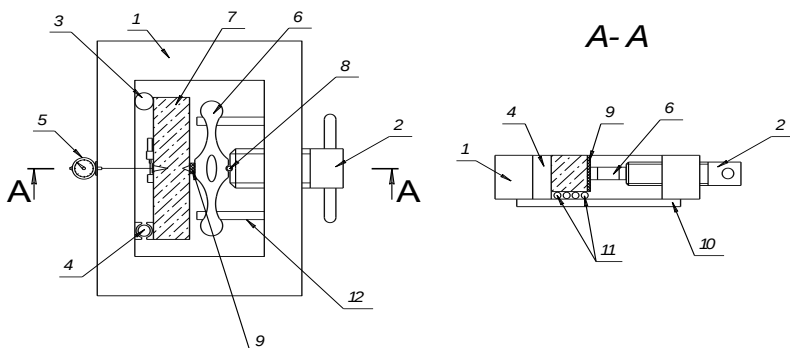


Рис. 1 Схема экспериментальной установки

1-силовая рама; 2- силовой винт; 3- шарнирно подвижная опора; 4- шарнирно неподвижная опора; 5- индикатор часового типа; 6- динамометр; 7- образец; 8- шарнир; 9- распределительная пластина; 10- поддон; 11- шарики; 12- опоры для динамометра.

Для определения ККИН на эксплуатируемых конструкциях разработан метод, заключающийся в отломе «углового» сегмента (рис.2).

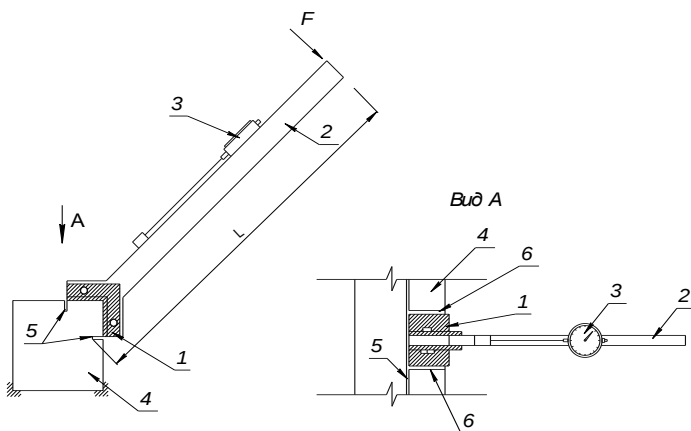


Рис.2.Схема проведения испытаний на эксплуатируемой конструкции
1-металлический уголок; 2 – рычаг; 3 – индикатор часового типа; 4 - испытываемый образец (элемент конструкции); 5 - продольные пропилы; 6 - поперечные пропилы.

Для нахождения ККИН, при помощи алмазного диска выполняли продольные и поперечные пропилы, после чего к обособленно-

му «угловому» сегменту приклеивали металлические уголки. Для измерения приложенного момента использовали индикатор часового типа с ценой деления 0,001 мм.

Для теоретического определения ККИН, были определены математические модели физического эксперимента для трехточечного изгиба и отлома «углового» сегмента. Для расчета использовали программный комплекс SCAD 7.31 R3. Для вычисления ККИН в обеих математических моделях анализировали растягивающие поля напряжений у вершины трещины. Значение ККИН вычисляли, используя формулу Ирвина.

В третьей главе приведены результаты испытаний призм на сжатие и на трехточечный изгиб. В результате испытаний на трехточечный изгиб были получены полностью равновесные диаграммы деформирования бетона (рис.3), по которым согласно ГОСТ 29167-91 вычисляли ККИН.

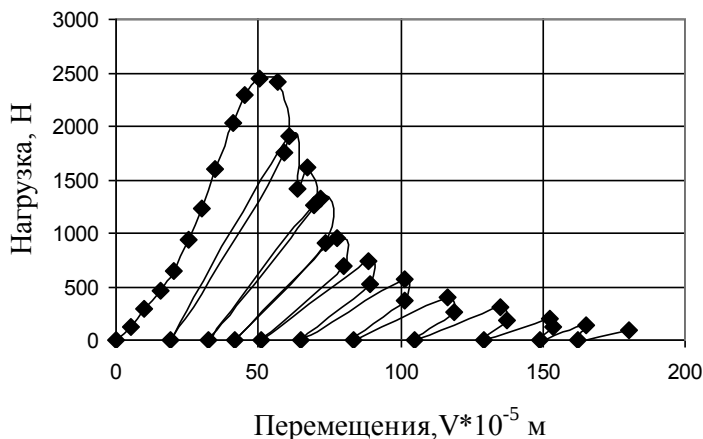


Рис. 3 Характерные результаты испытаний

Одновременно с этим ККИН был определен с помощью J-интеграла и по формуле Д. Броека. Полученные результаты были сопоставлены с данными полученными другим исследователями (рис. 4).

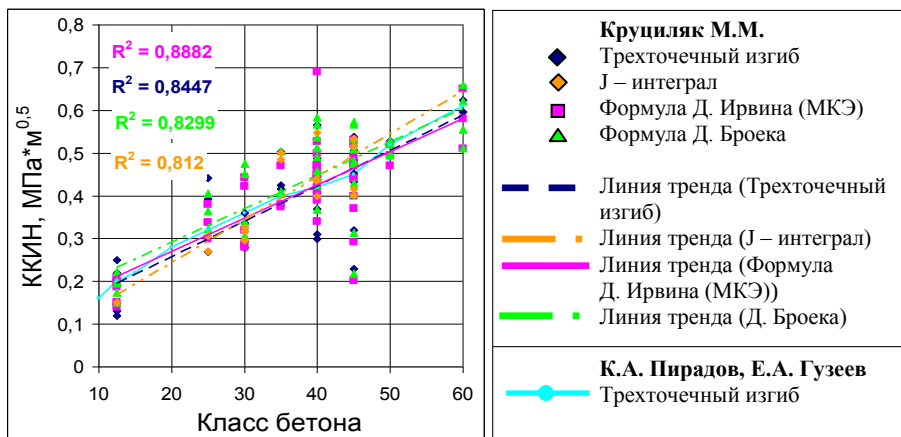


Рис.4 Графики зависимости R_b - K_{Ic}

Результат сравнения показал расхождение, не превышающее 12 % с данными полученными другими исследователями. Математическая модель трехточечного изгиба показала, что она хорошо описывает экспериментальные данные. Поэтому в расчетной схеме «углового» сегмента использовали те же параметры моделирования как в трехточечном изгибе. Отлом «углового» сегмента производили на половинках образцов, испытанных на трехточечный изгиб. Результаты, полученные при отломе «углового» сегмента, представлены на рис. 5.

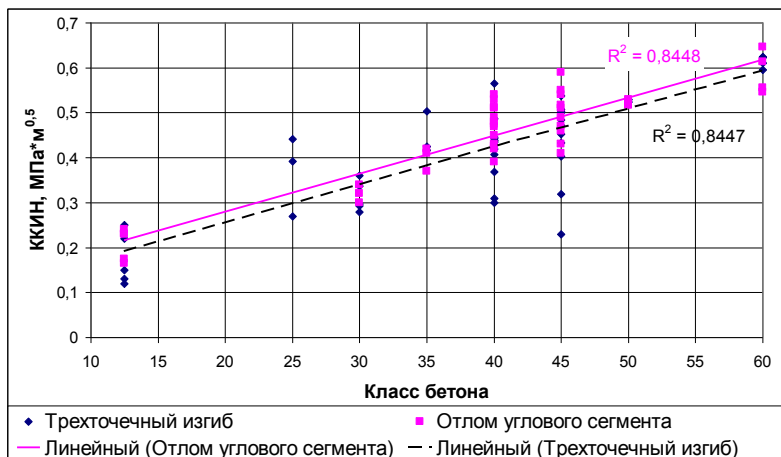


Рис. 5 Сравнение результатов эксперимента

По результатам испытаний, используя ПК «STATISTICA» (фирма-производитель StatSoft ® Inc., USA), была выведена регрессионная зависимость (с обеспеченностью 0,95) для определения ККИН:

$$K_{ic} = 0,666 + 0,00183 M - 5,206 b - 4,415 l, \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5},$$

где M – разрушающий момент (Н·м); b – расстояние между поперечными пропилами (м); l – расстояние между кончиками продольных пропилов (м).

За эталонные параметры пропилов приняты: глубина продольных пропилов 10 мм; расстояние между поперечными пропилами 50 мм; расстояние от продольного пропила до ребра образца, на обеих гранях 45 мм.

Используя данный метод в производственных условиях, зачастую из-за различных факторов и условий, невозможно выдержать все требования по эталонным параметрам пропилов. Вследствие чего были изучены основные отклонения от этих параметров.

На рис.6б представлены результаты испытаний по исследованию влияния ширины используемого уголка на определение ККИН. При этом значения b_1 и b изменялось от 50 мм до 100 мм с шагом 10 мм (рис.6.а).

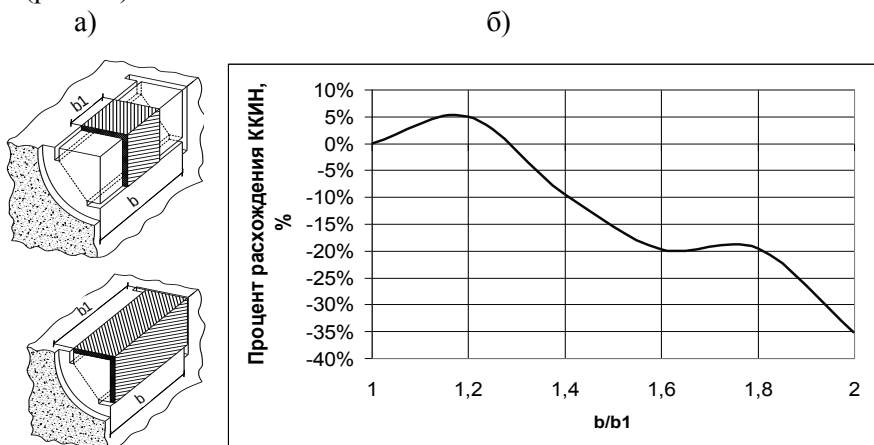


Рис. 6. Влияние отношения b/b_1 на определение ККИН

Как видно из результатов испытаний ширина металлического уголка оказывает существенное влияние на значение ККИН. Для корректного определения ККИН необходимо чтобы отношение b/b_1 находилось в пределах 1÷1,3. Стоит отметить, что при испытании бетона

класса В25 и ниже лучше всего использовать более высокое значение b . Во время проведения испытаний усилие от веса рычага может быть достаточным для отлома «углового» сегмента. В таблице приведены рекомендуемые значения b для различных классов бетона.

Рекомендованные расстояния между поперечными пропилами b

Класс бетона	12,5	15	25	30	35	40	45	50	60
b , мм	100	70-100	70-100	50-70	50-70	50-70	50	50	50

На рис.7а представлен график изменения значения ККИН в зависимости от отклонения угла наклона плоскости отлома, от принятого за эталонный. Отклонение плоскости отлома выполняли путем изменения глубины одного из продольных пропилов (рис. 7б). При осуществлении эксперимента было предусмотрено два варианта отклонения плоскости. В первом глубина продольного пропила постоянно увеличивалась (положительное значение α), во втором – постоянно уменьшалась (отрицательное значение α).

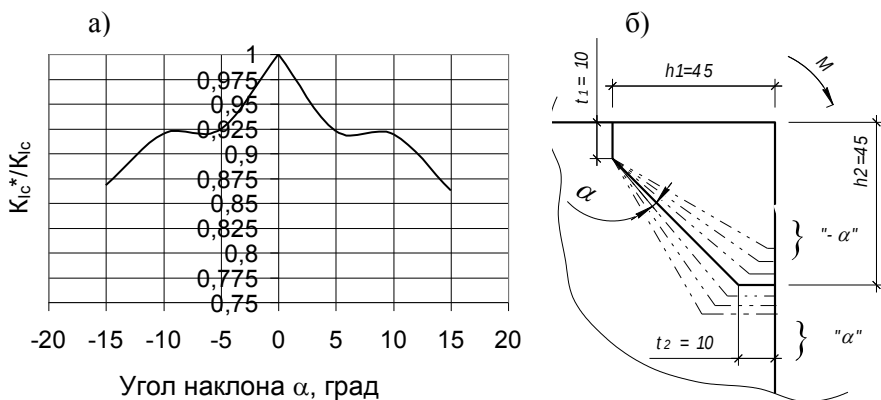


Рис. 7. Влияние угла наклона плоскости отлома

K_{Ic} - ККИН полученный при одинаковой глубине двух продольных пропилов (эталонный). K_{Ic}^* - ККИН полученный при соответствующем угле отклонения плоскости отлома.

Результаты математического моделирования различных углов наклона продольных пропилов, представлены на рис.8. За эталонное значение ККИН принята величина, которая получена при значениях углов $\beta_1=\beta_2=135^\circ$.

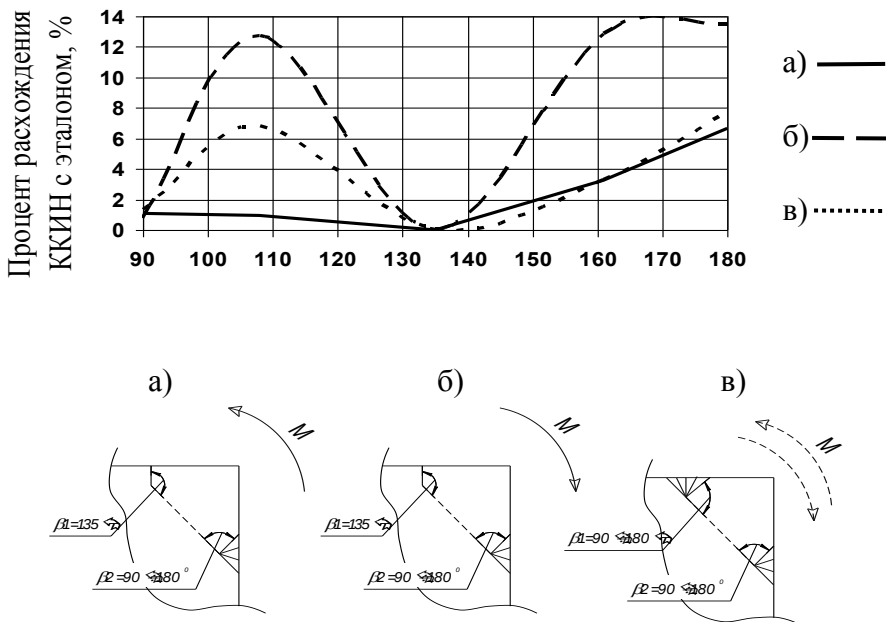


Рис.8. Влияние угла наклона продольного пропила

Во время моделирования были рассмотрены три варианта схем углового сегмента при изменении угла наклона продольного пропила. Так первая схема рассматривала случай когда, угол наклона β_2 изменялся в диапазоне от 90 до 180 градусов, в то время как угол второго продольного пропила β_1 оставался постоянным и составлял 135 градусов. Направление действия разрушающего момента было таким, чтобы магистральная трещина начала свое зарвитие со стороны пропила выполненного под углом β_2 (рис.8а). Вторая схема идентична первой, но разрушающий момент прикладывали в противоположном направлении, т.е. магистральная трещина начинала свое развитие со стороны пропила выполненного под углом β_2 (рис.8б). В третьей схеме, углы наклона β_1 и β_2 были равны друг другу, при этом направление действия разрушающего момента не имело значение. Угол наклона пропилов варьировали в диапазоне от 90 до 180 градусов (рис.8в).

В результате исследования влияния арматуры при отломе «углового» сегмента и проведенного факторного анализа полученных экспериментальных данных получена поправочная поверхность. В случае если в площадь отлома попадает арматура, то значение по-

правки на величину ККИН рекомендуется определять, используя горизонтальную проекцию поверхности (рис.9).

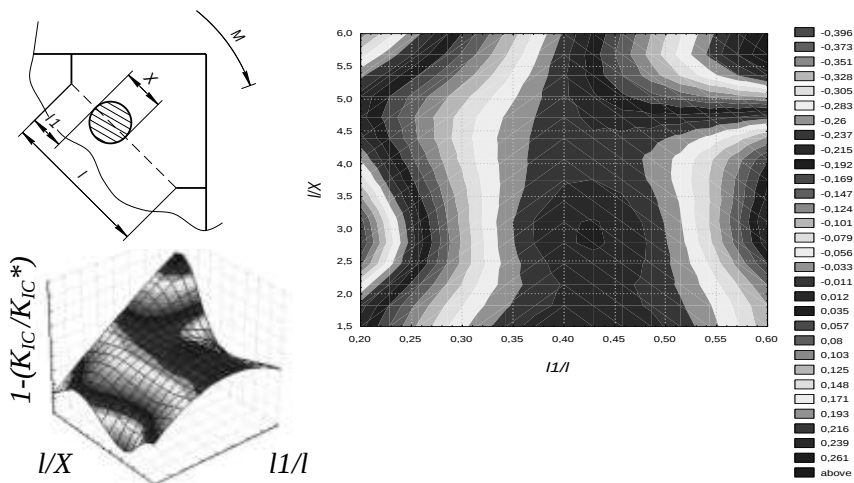


Рис. 9. Поверхность и её проекция на горизонтальную плоскость ХУ.

K_{IC} – ККИН полученный при отсутствии арматуры в площади отлома.

K_{IC}^* - ККИН полученный при попадании арматуры в площадь отлома.

Было изучено влияние различных климатических условий на ККИН. Были рассмотрены три варианта условий окружающей среды: первый - $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi=60\%$; второй – $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi=100\%$; третий - $t = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi=60\%$. Испытания проводили по двум алгоритмам. В первом алгоритме образцы с выполненными пропилами находились в рассмотренных климатических условиях 24 часов. Во втором алгоритме, после нахождения образца 24 часа в рассмотренных условиях, выполнялись пропилы, после чего сразу производили отлом «углового» сегмента. В результате проведенного эксперимента был сделан вывод о том, что временной промежуток в 24 часа не оказывает ни какого влияния на ККИН при рассмотренных климатических условиях.

Четвертая глава содержит систематизированную информацию по проделанной работе – это методика определения параметров трещиностойкости бетона на эксплуатируемых конструкциях. Приведены результаты измерения ККИН однотипной конструкции со сроком эксплуатации 34, 25, 20, 15, 10 и 3 года.

Методика определения параметров трещиностойкости состоит из: описания испытательного оборудования, требований по выполне-

нию «углового сегмента», алгоритма определения ККИН и поправочных графиков (закономерностей) для определения ККИН.

Требования, предъявляемые к выполнению «углового сегмента»:

1. Расстояние между кончиками продольных пропилов l должно составлять 60 мм.
2. Расстояние от ребра образца до продольного пропила, $h_1 = h_2$ должны быть равны 45 мм.
3. Рекомендованная глубина продольных пропилов $t_1 = t_2 = 10$ мм.
- 3.1 Допускается изменять глубину одного продольного пропила в пределах $t_2 = 2 \div 20$ мм, при глубине второго $t_1 = 10$ мм. В этом случае магистральная трещина должна начать свое развитие с пропила t_1 . При этом требование №2 опускается, но должно соблюдаться требование №1: $l = 60$ мм.
4. Угол наклона продольных пропилов (β) должен составлять 135° по отношению к плоскости отлома, т.е. 90° к грани элемента.
- 4.1 Допускается изменение угла наклона одного продольного пропила в диапазоне $\beta = 90^\circ \div 180^\circ$ при, этом угол второго продольного должен составлять $\beta = 135^\circ$, либо оба угла наклона пропилов должны быть равны друг другу в диапазоне $90^\circ \div 180^\circ$. При этом не имеет значение с конца какого пропила начнет развитие магистральная трещина.
5. Расстоянием между поперечными пропилами должно составлять $b = 50 \div 100$ мм.
6. Угол наклона поперечных пропилов должен составлять 90° к граням элемента.
7. Отношение расстояния между поперечными пропилами b к ширине используемого металлического уголка b_1 должно быть в интервале $1 \div 1,3$.
8. Расстояние от кончика продольного пропила до арматуры l_1 , со стороны, где начнет развитие магистральная трещина, должно составлять не менее 10 мм.
9. В случае если в площадь отлома попадает арматура, то поперечные пропилы огибают арматуру, обеспечивая обособленность «углового сегмента» от основного тела бетона.

Алгоритм определения ККИН



Данный алгоритм применим в не агрессивных средах. В агрессивных средах действия (5) и (6) меняются местами. Промежуток времени между действиями (5) и (7) не должен превышать 24 часов.

Представленная рекомендация №1, обусловлена требованиями ГОСТ 29167-91 по длине начальных надрезов в призме прямоугольного сечения для испытаний на изгиб. Так расстояние между начальными пропилами в призме с максимальным размером зерна заполнителя 5-10мм, составляет 60 мм. Рекомендации №№2, 3 обеспечивают соблюдение данного требования.

В случае если максимальный размер зерна заполнителя не попадает в данный диапазон (5-10 мм), то значения геометрических параметров представленных в рекомендациях №№1, 2, 3 изменяется в соответствии с табличными требованиями ГОСТ 29167-91.

В Приложении представлен пример расчета долговечности железобетонной балки в крупнопанельном жилом доме. Расчет выполнен согласно предложенному К.А. Пирадовым способу расчета долговечности железобетонных конструкций. Вычисленное значение ККИН при отломе «углового» сегмента оказалось на 25% меньше, чем значение ККИН найденное по таблицам в зависимости от прочности растворной части бетона и объемного содержания заполнителя.

Основные результаты и выводы работы

1. Разработан новый метод, который позволяет определять ККИН тяжелых бетонов классов В12,5÷В60 на эксплуатирующихся элементах железобетонных конструкций при статическом нагружении, заключающийся в образовании с помощью алмазного диска «углового» сегмента с последующим его отломом. Использование метода позволяет повысить точность определения ККИН и тем самым повысить точность расчетов: несущей способности, прогибов, ширины раскрытия трещины, долговечности и многих других, которые позволяет выполнять аппарат механики разрушения.
2. Изучены основные факторы, влияющие на определение ККИН при отломе «углового» сегмента. Результаты исследований факторов показали, что отклонения от масштабных, геометрических параметров и наличие арматуры в площади отлома, могут влиять на значение ККИН до 39,6%. В связи с этим были получены новые закономерности представленные в виде поправочных функций. Полученные закономерности позволяют определять ККИН в более широком диапазоне масштабных, геометрических и конструктивных (наличие арматуры) параметров, тем самым увеличить воз-

возможности использования разработанного метода. Исследование влияния промежутка времени между выполнением пропилов и отломом «углового» сегмента показало, что временной промежуток в 24 часа не оказывает влияния на значение ККИН.

3. Сравнение результатов полученных с помощью разработанного метода с известным методом трехточечного изгиба показало различие в среднем 2,7%. В абсолютном выражении величина ККИН разработанного метода оказалось на $0,02 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ больше по сравнению с трехточечным изгибом во всем исследуемом диапазоне бетонов. Установленная теснота взаимосвязи с данными известных исследователей (коэффициент детерминации – 0,9397) показала состоятельность данного метода для применения его как в лабораторных условиях так и на эксплуатирующихся конструкциях.
4. Разработана методика определения ККИН на эксплуатируемых конструкциях состоящая из описания оборудования, требований предъявляемых к геометрическим параметрам при выполнении «углового» сегмента, алгоритма определения ККИН и поправочных функций (закономерностей).
5. Разработанный метод экспериментально апробирован на однотипных эксплуатируемых железобетонных конструкциях имеющих возраст от 1 года до 34 лет. Выявлено уменьшение ККИН во времени в 1,7 раза за 34 года.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1. Девятченко Л.Д. Варламов А.А. Круциляк М.М. Оценка эффективности управления характеристиками качества бетона методом канонической корреляции.// Математика. Приложение математики в экономических, технических и педагогических исследованиях: Сб. науч. тр. под ред. М.В. Бушмановой. Вып. 2. – Магнитогорск, 2004. – С. 156 – 162.

2. Круциляк Ю.М. Круциляк М.М. Варламов А.А. Определение силовых и энергетических характеристик трещиностойкости бетона // Бетон и железобетон в Украине, №3, 2006.- с.18-23.

3. Круциляк М.М Варламов А.А. Методика определения характеристик трещиностойкости бетона.// Предотвращение аварий зданий и сооружений: Межвуз. сб. науч. тр. под ред. К.И. Еремина – Магнитогорск, 2005. – С. 93 – 102.

4. Круциляк М.М Определение характеристик трещиностойкости бетона при помощи моделирования.// Вестник Магнитогорского

государственного технического университета им. Г.И. Носова. - Магнитогорск, 2005. – С. 69 – 71.

5. Круциляк Ю.М. Круциляк М.М. Варламов А.А. Определение силовых характеристик трещиностойкости бетона на существующих конструкциях.// Состояние современной строительной науки – 2006: сб. науч. тр. – Полтава: Полтавский ЦНТЭИ. -2006. – С.273-275.

6. Варламов А.А., Круциляк Ю.М., Круциляк М.М. Влияние арматуры на определение критического коэффициента интенсивности напряжения. // Предотвращение аварий зданий и сооружений: Сб. науч. тр. под ред. К.И. Еремина – Магнитогорск, 2007. – С. 136 – 140.

7. Круциляк М.М., Чагов А.В., Морозов С.В. Способы определения характеристик трещиностойкости. // Предотвращение аварий зданий и сооружений: Сб. науч. тр. под ред. К.И. Еремина – Магнитогорск, 2007. – С. 188 – 192.

8. Круциляк М.М., Круциляк Ю.М., Варламов А.А. Способ определения характеристики трещиностойкости бетона // Бетон и железобетон, №1, 2008.- с.20.

9. Пат. 2324916 Российская Федерация, МПК⁷ G 01 N 3/00. Способ определения критического коэффициента интенсивности напряжения в изделии / Варламов А.А., Круциляк Ю.М., Круциляк М.М.; заявитель и патентообладатель Магнитогорск. гос. техн. ун-т. им. Г.И. Носова. - №2006137985/28; заявл. 27.10.2006; опубл. 20.05.08, Бюл. №14. -7с.: ил.