

The background of the entire cover is a detailed, close-up photograph of a wood grain. The texture is vertical, showing various shades of brown and tan, with prominent grain lines and some darker, more textured areas. The lighting creates a sense of depth and highlights the natural patterns of the wood.

**Б.С.Соколов**

**ТЕОРИЯ СИЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ  
АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ СЖАТИЮ  
И ЕЕ ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ**

**Б.С. Соколов**

**ТЕОРИЯ СИЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ  
АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ СЖАТИЮ  
И ЕЕ ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ**



Издательство Ассоциации строительных вузов

Москва

2011

**Р е ц е н з е н т ы**

академик РААСН, д.т.н., проф. *В.И. Травуш*;  
чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф. *Г.В. Мурашкин*.

**Соколов Б.С.**

Теория силового сопротивления анизотропных материалов сжатию и ее практическое применение: Монография / Издательство АСВ. – М.: 2011. – 160 с.

**ISBN 978-5-93093-810-4**

Основой теории является физическая модель, описывающая разрушение процессом одновременного преодоления сопротивления материала отрыву, сдвигу и раздавливанию. Это позволило получить условия прочности в общем виде по всей длине силового потока, описать возможные схемы разрушения, трещиностойкость элементов и конструкций, учесть их специфические особенности, создать новые и усовершенствовать существующие методики расчета.

Теория в отличие от существующих легко доступна в изучении. Поэтому она рекомендуется для использования в учебном процессе, в научных исследованиях магистрами и аспирантами, реальном проектировании.

**ISBN 978-5-93093-810-4**

© Издательство АСВ, 2011  
© Соколов Б.С., 2011



## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>5</b>
<b>1. КРАТКО ОБ АКТУАЛЬНОСТИ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ.....</b>	<b>7</b>
<b>2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ СЖАТИЮ.....</b>	<b>10</b>
2.1. Рабочая гипотеза о механизме разрушения бетона при сжатии .....	10
2.2. Физическая модель для оценки прочности бетона в условиях плоского напряженного состояния.....	11
2.3. Физическая модель для определения прочности бетона в объемных элементах .....	16
2.4. Модификация модели разрушения для оценки прочности бетона в условиях сжатия-сжатия .....	18
2.5. Оценка трещиностойкости и прочности железобетонных элементов на основе модели разрушения .....	23
2.6. Развитие модели разрушения для расчета прочности каменных конструкций .....	30
<b>3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ И КОНСТРУКЦИЙ.....</b>	<b>31</b>
3.1. Методология научных исследований .....	31
3.2. Плосконапряженные элементы .....	32
3.3. Объемные элементы .....	35
3.4. Стеновые панели – балки-стенки различных конструктивных решений .....	38
3.5. Горизонтальные стыки.....	44
3.6. Каменные кладки.....	62
<b>4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ И КОНСТРУКЦИЙ .....</b>	<b>74</b>
4.1. Плосконапряженные элементы из тяжелого, легкого, пенобетонных.....	74
4.2. Объемные элементы .....	76
4.3. Балки-стенки различных конструктивных решений.....	82
4.4. Горизонтальные стыки.....	96

4.5. Каменные и армокаменные кладки, в том числе усиленные разными способами.....	103
<b>5. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ СИЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ СЖАТИЮ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НОВЫХ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ, КОНСТРУКЦИЙ И ИХ АРМИРОВАНИЯ .....</b>	<b>106</b>
5.1. Бетонные и железобетонные элементы при действии местной нагрузки .....	106
5.2. Стеновые бетонные и железобетонные панели – балки-стенки различных конструктивных решений .....	118
5.3. Горизонтальные стыки.....	125
5.4. К расчету круглых трубобетонных колонн.....	144
5.5. Каменные и армокаменные конструкции .....	147
<b>6. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УСИЛЕНИЯ СЖАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И КОНСТРУКЦИЙ .....</b>	<b>150</b>
<b>7. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ФОРМ И АРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ И КОНСТРУКЦИЙ.....</b>	<b>154</b>
7.1. Панели – балки-стенки.....	154
7.2. Штепсельные стыки колонн .....	152
<b>Литература .....</b>	<b>159</b>

## ВВЕДЕНИЕ

В монографии рассматривается сопротивление сжатию трех близких по физико-механическим свойствам материалов – бетон, железобетон, каменная кладка, которые могут быть отнесены к анизотропным, так как обладают неодинаковыми механическими свойствами по разным направлениям.

Под силовым подразумевается сопротивление разрушению, образованию и раскрытию трещин материала конструкций при действии различных нагрузок и воздействий.

Анализ существующих отечественных и зарубежных исследований показал, что они направлены в основном на изучение прочности материала. Однако их результатом, как правило, является получение условий прочности в аналитической или графической форме для разных напряженных состояний, использование которых в практических расчетах достаточно сложно, в лучшем случае – в программных продуктах. По этой причине в нормативных документах полученные результаты пока используются не в полной мере. Более того, для их изучения требуется специальная подготовка. Поэтому они труднодоступны для изложения теоретических основ прочности материалов в учебном процессе в наиболее заинтересованных строительных вузах. В этом смысле предлагаемый в монографии материал является более простым для изучения, понимания физического смысла силового сопротивления материала и использования его в практических расчетах.

Созданная теория базируется на физической модели разрушения, отражающей действительную работу материала в сжимающем силовом потоке под нагрузкой в области сжатия-растяжения. В ней удалось отразить все возможные виды разрушения материала элементов – от отрыва, сдвига и раздавливания, характеризующие сопротивление материала при сжатии. Приведены геометрические, статические и физические характеристики, что позволило получить условия прочности в общем виде, расчетные выражения для оценки сопротивления образованию и раскрытию трещин армированных элементов и конструкций.

При передаче местной нагрузки, сосредоточенной на участках малых размеров, разрушение материала может происходить непосредственно под грузовой площадкой, т.е. в области «сжатия-сжатия» от «смятия». Для оценки прочности материала в этой области модель модифицирована в многоклинчатую. Это свидетельст-

вует о широком применении разработанного подхода к описанию сопротивления разрушению материала при сжатии для всех возможных случаев нагружения на единой основе – модели разрушения.

Теоретические основы силового сопротивления сжатию легли в основу методики расчета по прочности разных элементов и конструкций: элементов квадратного, прямоугольного и круглого поперечных сечений из бетона и сталефибробетона, балок-стенок многообразных конструктивных решений, горизонтальных стыков бетонных и железобетонных конструкций, трубобетонных конструкций каменных и армокаменных конструкций, в том числе при их усилении. Разработанные решения рекомендованы к использованию для расчетов по прочности коротких высоких элементов типа консолей, ростверков, опорных зон ферм, арок. Материал исследований излагается с 1990 г. в учебном процессе при обучении специалистов, бакалавров, магистров, используется в работе аспирантов и соискателей, при проектировании реальных объектов, реконструкции, докладывался на научных форумах разного уровня, на его основе защищены кандидатские диссертации. Поэтому автор посчитал возможным опубликовать его в виде монографии для ознакомления заинтересованного круга специалистов и более широкого применения в проектировании реальных объектов, в учебном процессе, при проведении научных исследований и внедрении в нормативные документы.

Автор выражает глубокую признательность за поддержку и замечания при проведении исследований и подготовке монографии академикам РААСН В.М. Бондаренко, Н.И. Карпенко, профессорам П.И. Васильеву, С.М. Крылову, А.С. Залесову, А.Л. Шагину, Г.Н. Шоршневу, рецензентам академику РААСН В.И. Травушу, чл.-корр. РААСН Г.В. Мурашкину.

## 1. КРАТКО ОБ АКТУАЛЬНОСТИ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анизотропные материалы эффективно использовать в элементах и конструкциях, испытывающих сжимающие усилия. Поэтому важно при их проектировании иметь расчетный аппарат, позволяющий максимально достоверно оценить их фактическое силовое сопротивление и отражающий физическую сущность работы материала под нагрузкой.

Поведение элементов и конструкций при сжатии, их напряженно-деформированное состояние, трещиностойкость материала и его сопротивление разрушению зависят в основном от двух факторов:

- расположения нагрузки на поверхности;
- размеров грузовых и опорных площадок, их соотношения с размерами элементов и конструкций.

Перечисленные факторы определяют характер и механизм разрушения (*рис. 1.1*), которое может происходить от преодоления сопротивления материала:

- отрыву (растяжению);
- сдвигу;
- раздавливанию;
- «смятию» (компрессионному раздавливанию).

Учитывая это, для расчетов желательно иметь выражения, которые при представлении их в общем виде отражали бы все возможные механизмы разрушения, представляли бы этот процесс преодолением сопротивления отрыву, сдвигу и раздавливанию.

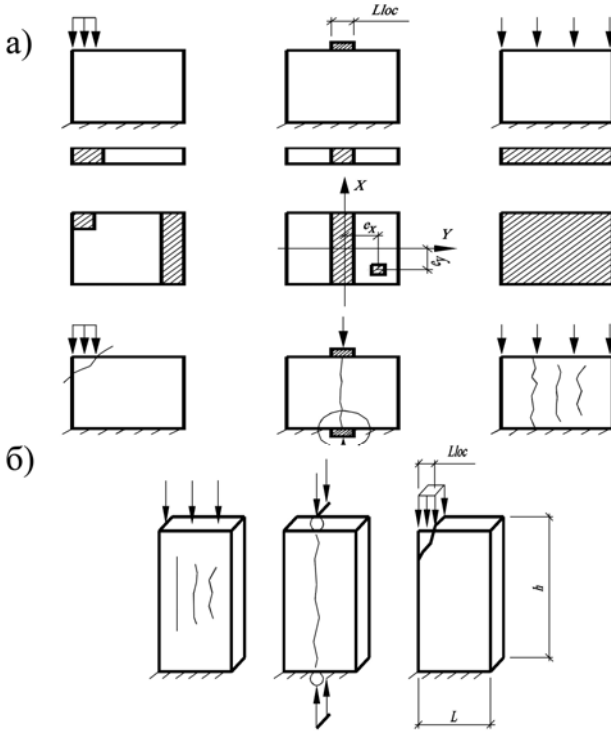
Однако в отечественных и зарубежных нормах, основанных на результатах многочисленных исследований, практически все случаи разрушения оцениваются прочностью материала на сжатие с введением увеличивающего несущую способность коэффициента, получаемого по отношению «расчетной» площади к грузовой. Трещиностойкость изучаемых элементов в нормах на проектирование не рассматривается.

Наиболее яркими и ответственными представителями элементов, испытывающих сжимающие усилия, являются узлы сопряжений панелей и их стыки:

- контактные – стержневых конструкций и панелей стен зданий;
- платформенные, контактно-платформенные.



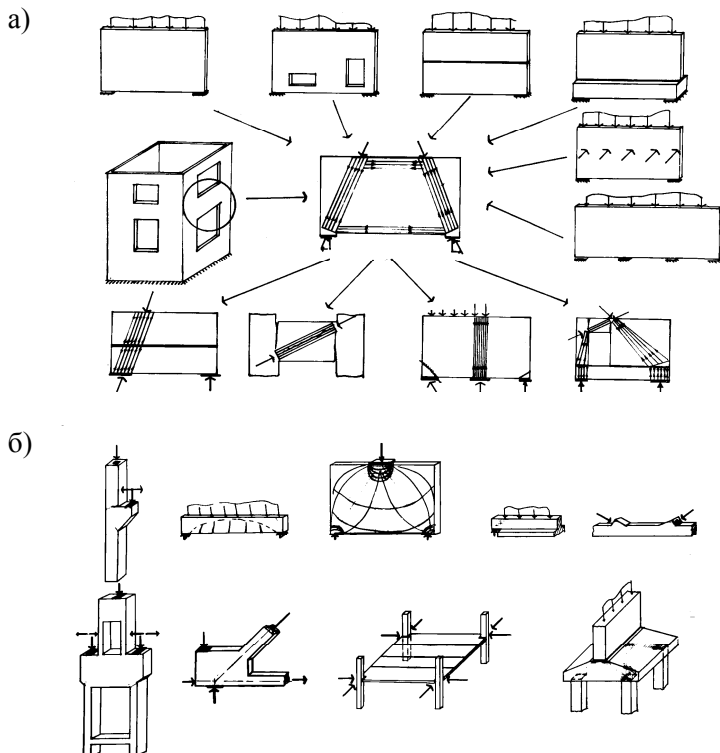
Стыки обеспечивают безопасность и эксплуатационную пригодность не только самих конструкций, но и зданий (сооружений) в целом.



**Рис. 1.1. Элементы, испытывающие сжатие и характер их разрушения:**  
а – плоских; б – объемных

В последнее время для расчетов сложных конструкций широко используются их аналоги. Одним из них является каркасно-стержневой аналог – модель напряженно-деформированного состояния конструкции в предельном состоянии, состоящая из растянутых и сжатых условно выделенных полос, внутренних и внешних узлов (рис. 1.2). Такой подход применяется при расчете конструкций, отнесенных к классу «коротких высоких» (балок-стенок (рис. 1.2, а), коротких консолей, ростверков и др. (рис. 1.2, б). Считается, что сжатые полосы испытывают осевое сжатие. Поэтому оценку их прочности производят по сопротивлению осевому сжатию с введением эмпирических коэффициентов, сближающих опытные и расчетные данные. При этом трещиностойкость полос, прочность уз-

лов, разрушение которых может происходить по схемам, представленным на *рис. 1.1*, не рассматриваются.



**Рис. 1.2. Конструкции и элементы, для расчета которых используются каркасно-стержневые аналоги**

Весьма краткий, но, на наш взгляд, убедительный обзор состояния изучаемой проблемы показывает отсутствие теоретически обоснованных подходов к оценкам прочности и трещиностойкости анизотропных материалов при сжатии и необходимости их разработки. Поэтому целью работы было создание теории силового сопротивления анизотропных материалов сжатию, отражающей действительную их работу в конструкциях под нагрузкой, для разработки на ее основе новых и совершенствования существующих методик расчета и конструирования бетонных, железобетонных, каменных и армокаменных конструкций, обеспечивающих не только их безопасность, эксплуатационную пригодность, но и зданий и сооружений в целом.

## **2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ СЖАТИЮ**

### **2.1. Рабочая гипотеза о механизме разрушения бетона при сжатии**

Изучение и анализ научной, технической и нормативной литературы, посвященной исследованиям сжатых элементов, показали, что в сжимающем силовом потоке между грузовыми и опорными площадками существуют две области напряженного состояния: область сжатия-сжатия непосредственно под площадками и сжатия-растяжения – между ними. Размеры областей зависят в основном от отношения длины площадок к высоте элемента. Разрушение материала в силовом потоке может происходить в обеих областях. Однако, поскольку прочность материала в области сжатия-растяжения меньше, чем в области сжатия-сжатия, разрушение в большинстве случаев начинается с области сжатия-растяжения. При этом под грузовыми и опорными площадками формируются уплотнения в виде клиньев, повторяющих в основании форму площадок (пирамиду, конус и др.), под действием которых, по мере увеличения внешних усилий от нуля до разрушающих, происходит изменение напряженно-деформированного состояния в области сжатия-растяжения, характеризующееся тремя стадиями – упругой, стадией образования и раскрытия трещин, стадией разрушения.

Это позволяет выдвинуть рабочую гипотезу, которая заключается в следующем. В области сжатия-сжатия образуются уплотнения в виде клиньев, под действием которых при увеличении нагрузок происходит разрушение бетона в области сжатия-растяжения сжимающего силового потока от преодоления сопротивления материала отрыву, сдвигу и раздавливанию.

На основании этой гипотезы разработана физическая модель, описывающая процесс разрушения бетона при сжатии сопротивлением отрыву, сдвигу и раздавливанию, обоснованы стадии изменения напряженного состояния, определены ее геометрические, физические и статические характеристики, позволившие получить условия для оценки прочности и трещиностойкости элементов и конструкций.

## 2.2. Физическая модель для оценки прочности бетона в условиях плоского напряженного состояния

Для получения условия прочности в общем виде рассмотрен [1] плоский элемент с соотношением сторон  $L/h=1$  при нагружении локальной нагрузкой в средней части его длины, образующей вертикальный сжимающий силовой поток. В нем, в соответствии с рабочей гипотезой, между грузовой и опорной площадками образуются две области напряженного состояния: область сжатия-сжатия непосредственно под площадками и сжатия-растяжения – между ними. Размеры областей зависят в основном от длины площадок и их отношения к высоте элемента.

Под грузовыми и опорными площадками формируются уплотнения в виде клиньев, повторяющих в основании форму площадок. По мере увеличения внешних усилий в области сжатия-растяжения происходит изменение напряженного состояния, которое характеризуется тремя стадиями (рис. 2.1).

**Стадии 1 и 1а** – соответственно упругая стадия и стадия перед образованием вертикальных трещин при достижении главными растягивающими напряжениями предельного сопротивления бетона растяжению. Характер распределения главных напряжений в обеих зонах показан на рис. 2.1, а. В областях под площадками возникает двухосное сжатие, а эпюра распределения главных растягивающих напряжений в области сжатия-растяжения близка по форме к прямоугольной. С достижением значений этими напряжениями сопротивления материала отрыву (растяжению) наступает стадия 1а – стадия перед образованием трещин. Она может быть положена в основу расчета по образованию вертикальных трещин. При этом, учитывая характер распределения главных растягивающих напряжений, их эпюру по высоте сжато-растянутой области  $L_{bt}$  можно принять прямоугольной.

**Стадия 2** (рис. 2.1, б) – стадия развития вертикальной трещины между вершинами клиньев. Характер эпюры главных растягивающих напряжений предопределяет ее динамичное развитие до области сжатия-сжатия. Для железобетонных элементов эту стадию можно принять за основу при расчете по раскрытию трещин. Дальнейшее очевидное распространение трещины заключается в обходе зоны двухосного сжатия вдоль граней клиньев, что приводит к третьей стадии – стадии разрушения.

**Научное издание**

**Борис Сергеевич Соколов**

**ТЕОРИЯ СИЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ  
АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ СЖАТИЮ  
И ЕЕ ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ**

Редактор: **В.Ш. Мерзлякова**  
Компьютерная правка и верстка: **Е.М. Лютова**

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98. Формат 60х90/16.  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Усл. 10 п.л. Заказ №

Издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ)  
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, отдел реализации – оф. 511  
тел., факс: (499)183-56-83, e-mail: [iasv@mgsu.ru](mailto:iasv@mgsu.ru), <http://www.iasv.ru/>