

На правах рукописи

Барабанщиков Юрий Германович

**ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ПРОЧНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ
МАТЕРИАЛОВ ПРИ ТРЕНИИ ВОДОСОДЕРЖАЩИХ СЫРЬЕВЫХ
СМЕСЕЙ**

Специальность 05.23.05 – Строительные материалы и изделия

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург

2006

Диссертационная работа выполнена на кафедре строительных конструкций и материалов ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет"

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Никольский Сергей Григорьевич.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Мещеряков Юрий Георгиевич;

доктор технических наук,
главный научный сотрудник

Судаков Вадим Борисович;

доктор технических наук, профессор
Шангина Нина Николаевна.

Ведущая организация: ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)".

Защита состоится 14 марта 2006 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.223.01 при ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет" по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, ауд. 206.

Телефакс: (812) 316-58-72

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет".

Автореферат разослан " ____ " февраля 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д. т. н., профессор

Г. М. Бадьин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Повышение прочности и надежности бетона, керамических изделий и других материалов считается актуальной задачей строительного производства. Известно, что прочность материалов, кроме физико-химической природы, определяется наличием дефектов, большая часть которых образуется в процессе их изготовления. Одним из способов снижения дефектообразования и получения оптимальной структуры материала является контроль и управление режимами внутреннего и внешнего трения при формовании исходных водосодержащих сырьевых смесей (ВСС). Однако вопросы, связанные с трением ВСС и его влиянием на структуру и прочность, изучены в недостаточной степени. Отсутствуют критерии для наиболее выгодного соответствия состава композиционных строительных материалов и технологических режимов их получения. Разработка таких критериев позволила бы использовать резерв повышения прочности строительных материалов на практике.

Целью работы является разработка концепции повышения прочности строительных материалов на основе оптимального соответствия их состава характеру механического воздействия на ВСС при получении строительных изделий, с учетом возможности управления внешним трением.

Задачи исследований: 1. Установить связь структуры и прочности строительных материалов с параметрами внешнего и внутреннего трения ВСС при формовании изделий. 2. Разработать критерий оптимального соответствия состава ВСС и режима ее обработки для снижения дефектообразования и повышения прочности материалов. 3. Установить влияние природы и состава ВСС на основные закономерности внешнего трения и его перехода во внутреннее трение с учетом особенностей механического воздействия на материал. 4. Установить влияние процессов (электрических и тепловых), протекающих в композиционных материалах при трении, на формирование структуры. 5. Разработать способы экспериментальных исследований материалов, позволяющие установить степень участия внешнего и внутреннего трения в диссипации механической работы и формировании прочности, исключить нестационарность

процесса, обусловленную изменением структуры поверхностного слоя пасты, оценить влияние напряженно-деформированного состояния ВСС на результаты испытаний. 6. Разработать концепцию повышения прочности строительных материалов на основе оптимального сочетания состава с режимом формования изделий и управления трением ВСС.

Научная новизна работы заключается в следующих положениях:

1. Разработаны новые трибометрические и калориметрические способы испытания строительных материалов, признанные изобретениями (а. с. №№ 1236370, 1352320, 1352324, 1397807). 2. Установлено влияние внутреннего и внешнего трения на формирование структуры и прочности бетона и керамических изделий, а также неизвестные ранее закономерности внешнего трения ВСС и явления, сопровождающие этот процесс, в частности, тепловой эффект самоорганизации структуры и анизотропия электрической проводимости. 3. Предложена математическая модель закона трения ВСС, учитывающая нелинейность процесса. 4. Разработана гипотеза механизма возникновения электрического поля в материалах при трении, вызывающего обогащение влагой пристенного слоя. 5. Предложена механическая модель реологической системы с переменной вязкостью и внешним трением, на основании которой разработан критерий оптимальной формуемости материалов, согласующий их диссипирующую способность с интенсивностью механического воздействия и учитывающий соотношение между внешним и внутренним трением.

Практическая ценность работы. Использование разработанных в диссертации положений позволяет повысить прочность строительных материалов и минимизировать энергетические и материальные затраты на их производство. Последнее обусловлено двумя причинами: 1) сокращением потребляемой мощности машин в результате приведения смеси в состояние с наименьшей вязкостью, что достигается путем согласования состава с мощностью обработки; 2) уменьшением износа рабочих органов машин на основе непрерывного контроля интенсивности изнашивания и снижения изнашивающей способности ВСС автоматическим регулированием влажности пристенного слоя. С этой целью раз-

работаны способы непрерывного контроля интенсивности изнашивания рабочих органов машин (а. с. № 1420459) и непрерывного контроля влажности потока керамической массы (КМ) (а. с. № 1264073). Повышение прочности материалов достигается при использовании в производстве рекомендуемых значений критерия оптимальной формуемости, что приводит к снижению дефектообразования при получении материалов.

Внедрение результатов работы. Основные результаты и выводы диссертации внедрены на следующих предприятиях. В ООО "Прагмастрой" (Санкт-Петербург) на строительстве монолитного жилого дома в Санкт-Петербурге с целью снижения износа оборудования и повышения прочности бетона подобраны и применены оптимальные условия механизированной подачи бетонной смеси в блоки бетонирования согласно рекомендациям автора. В ООО "Алгоритм" (Санкт-Петербург) использован критерий оптимальной формуемости асфальтобетонной смеси при разработке гидроизоляционной защиты подводного трубопровода. На производственной линии ООО "Высотник" (г. Кириши, Лен. области) при ленточном формовании кирпича применен способ регулирования трения КМ путем наложения электрического поля между рубашкой и лопастным винтом шнекового пресса. В ООО "Континент" (г. Никольское, Тосненского р-на, Лен. области) в производстве кислотоупорной футеровочной плитки использован способ контроля за интенсивностью изнашивания и установлена оптимальная скорости вращения шнека, что позволило, с одной стороны, снизить износ лопасти, а с другой повысить прочность изделий. При получении строительного кирпича в производственных цехах ЛПО "Победа" (г. Колпино, Лен. области) прошел испытания прибор для непрерывного контроля влажности движущейся керамической массы, основанный на измерении трибо-ЭДС и силы трения. Внедрение результатов работы на указанных предприятиях дало положительные результаты, что подтверждено соответствующими документами.

На защиту выносятся:

- новые трибометрические и калориметрические способы испытаний;

- результаты экспериментальных исследований процессов формирования структуры и прочности бетона и керамического черепка под влиянием внешнего и внутреннего трения исходных ВСС;
- концепция управления внешним трением с целью формирования оптимальной структуры материалов;
- критерий оптимальной формуемости и условия получения наибольшей прочности изделий.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на Всесоюзной научно-технической конференции "Научные проблемы современного энергетического машиностроения и их решение" (Ленинград, 1987); Российской научно-технической конференции "Инновационные наукоемкие технологии для России" (Санкт-Петербург, 1996); II международном симпозиуме по транспортной триботехнике "Транстрибо-2002" (Санкт-Петербург, 2002); Международной научно-практической конференции "Теоретические и практические проблемы развития электроэнергетики России" (Санкт-Петербург, 2002); VIII Всероссийском совещании "Высокотемпературная химия силикатов и оксидов" (Санкт-Петербург, 2002); Научно-практической конференции "Развитие инфраструктуры объектов туризма и спорта" (Санкт-Петербург, 2002); Международном конгрессе "Современные технологии в промышленности строительных материалов и стройиндустрии" (г. Белгород, 2003); V Международной конференции "Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения" (Санкт-Петербург, 2003); VI, VII, VIII и IX Всероссийских конференциях "Фундаментальные исследования в технических университетах" (Санкт-Петербург, 2002, 2003, 2004 и 2005 гг.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 48 научных работ, в том числе 10 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа, общим объемом 283 страницы, состоит из введения, 7 глав, заключения и 5 приложений, включает 85 рис. и 60 табл. Список литературы содержит 317 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы и цель исследования, сформулирована научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе описаны существующие представления о формировании свойств материалов, при формовании изделий.

Изучению структурных особенностей материалов, физико-химической сущности их поведения при механическом воздействии, возможных механизмов нарушения сплошности посвящено внимание многих исследователей. Хорошо известны работы С.В.Александровского, И.Н.Ахвердова, В.В.Бабкова, Ю.М.Баженова, О.Я.Берга, П.И.Боженова, В.В.Вознесенского, Г.И.Горчакова, И.М.Грушко, А.Е.Десова, Ю.В.Зайцева, П.Г.Комохова, В.С.Лесовика, Ю.Г.Мещерякова, В.П.Попова, П.А.Ребиндера, В.Я.Рутгерса, И.А.Рыбьева, А.В.Саталкина, Б.Г.Скрамтаева, В.И.Соломатова, М.М.Сычева, В.Б.Судакова, М.М.Холмянского, А.Е.Шейкина, А.Ф.Щурова, К.К.Якобсона и др., в которых показана непосредственная связь прочности материала с его структурой и физико-химическими особенностями. Согласно статистическим теориям Т.А.Конторовой, Я.И.Френкеля, В.Вейбулла прочность определяется распределением дефектов, присутствующих в материале.

По данным С.П.Ничипоренко при формовании КМ имеет место образование скрытых дефектов – поверхностей с ослабленными связями между частями. Такие нарушения являются зародышами разрывов, возникающих в материале при последующей обработке или в процессе эксплуатации (В.И. Морозов). Для предотвращения дефектообразования большое значение имеет выбор критерия для оценки вероятности возникновения пороков формования (Д. Хюльзенберг и др.). Такого критерия пока не установлено. Известное условие Генки-Мизеса, основанное на предположении об ограниченной способности материала накапливать упругую энергию, не учитывает фактор времени.

Основные свойства высококонцентрированных коагуляционных структур (бетонной смеси, КМ и др.) зависят от соотношения энергий взаимодействия

частиц и внешних механических воздействий (Н.Б.Урьев). Такие структуры отличаются резко выраженной зависимостью вязкости от скорости деформации (П.А.Ребиндер). Однако при разработке технологического оборудования эта зависимость не учитывается (А.В.Туренко).

При трении ВСС становится неоднородной. Бетонная смесь при течении по трубопроводу разделяется на тонкий (0,3-0,4 мм) пристенный слой цементного теста, слой раствора (до 10 мм), содержащий мельчайшие частицы песка и ядро, обедненное цементным тестом. (В.М.Васильев). При трении КМ увеличивается влажность пристенного слоя за счет перемещения воды к поверхности трения (В.С.Фадеева). При напряжениях внешнего трения, не превышающих предел текучести, структура скользит по подкладке, как единое целое. В противном случае происходит течение в слоях пасты. При этом градиент скорости уменьшается с расстоянием от поверхности скольжения (Д.М.Толстой).

При скольжении глиняной массы по твердой поверхности на микрофотографиях отчетливо проявляется ориентационный эффект в направлении трения (В.С.Фадеева). Уилкинсон объясняет псевдопластичность суспензий ориентированием частиц с возрастанием скорости сдвига. Ориентация частиц в градиентном слое обуславливает анизотропию керамических изделий, проявляющуюся в виде направленного вспучивания и неравномерной усадки при сушке и обжиге, приводящей к образованию трещин по границе слоев (В.В.Козлов, В.Ф.Павлов). Границы раздела слоев, являясь ослабленными участками, снижают прочность изделий (В.И.Морозов). По другим сведениям, прочность изделий из КМ, проходящей между валками, возрастает в результате ориентации частиц (А.Ф.Быхова, С.П.Ничипоренко, В.В.Хилько). Упорядочение структуры при трении (*самоорганизация*) обнаружено в металлах и в жидких смазочных прослойках (А.С.Кужаров, К.С.Ахвердиев, К.Кравчик, С.Б.Булгаревич и др.).

Закон трения Кулона не выполняется в случае ВСС, для которых коэффициент трения μ зависит от нормальной нагрузки (В.С. Фадеева). Отмечается как снижение (Г.С.Гура, Н.П.Блещик и др.), так и повышение μ с ростом влажности (Е. Динглинжер, А.Ф. Вадюнина и др.).

При трении изменяются электропотенциалы контактирующих тел (Л. Леб, С.Н. Постников, А.И. Свириденко, О.В.Холодилов и др.). В условиях жидкой электролитической среды трение существенно ускоряет процесс анодного растворения металла в местах фрикционного контакта (Прейс Г.А., Дзюб А.Г., Лазарев Г.Е., Харламова Т.Л., Верейкин В.И. и др.). Возникновение разности потенциалов при трении дисперсных систем наблюдали многие авторы (Ю.Ф. Дейнега, Г.В. Виноградов, В.С. Фадеева, Е.Е. Бибик, О.М. Мазуренко), однако до сих пор нет удовлетворительного объяснения механизма этого явления. Отождествление трибопотенциала с потенциалом протекания, имеющим ортогональное направление градиента, не объясняет причин, заставляющих электроны или катионы пересекать границу с электродом. Роль трения в растворении металла многие авторы объясняют удалением защитных пленок, в результате чего активизируются электрохимические процессы. Однако пленочный механизм не дает объяснения ряду экспериментальных фактов.

Во второй главе описаны методы экспериментальных исследований по формированию прочности материалов под влиянием внутреннего и внешнего трения. Объектами испытаний являлись: 1. *Керамическая масса* (КМ) для строительного кирпича, состоящая из кембрийской глины месторождения «Красный Бор» (80 %) и песка (20 %). 2. *Керамический черепок*, полученный обжигом КМ в лабораторной печи при температуре 980-1000 °С. 3. *Бетон* двух составов: 1) $\rho = 280 \text{ кг/м}^3$; $V/\rho = 0,50-0,58$; $r = 0,45$ с $D_{\text{наиб}} = 10 \text{ мм}$; 2) $\rho = 255 \text{ кг/м}^3$; $V/\rho = 0,56$; $r = 0,35$ с $D_{\text{наиб}} = 20 \text{ мм}$. 4. *Цементный раствор* (ЦР) состава 1:3 с $V/\rho = 0,30-0,50$. Влияние внутреннего трения ВСС на прочность и структурные характеристики материалов исследовалось с помощью устройства, представленного на рис. 1. ВСС 2 помещалась в рамку 3 размерами $7 \times 7 \times 7 \text{ см}$ и уплотнялась вибропрессованием. Рамка с ВСС закреплялась на основании 1 между двумя вертикальными пластинами 4, предотвращающими оползание смеси. Деформирование ВСС производилось при вращении эксцентрикового колеса с частотой ω от 2 до 24 с^{-1} . Относительная деформация сдвига во всех случаях составляла $\gamma = 0,4$. После 100 сдвиговых циклов КМ, не вынимая из рамок, су-

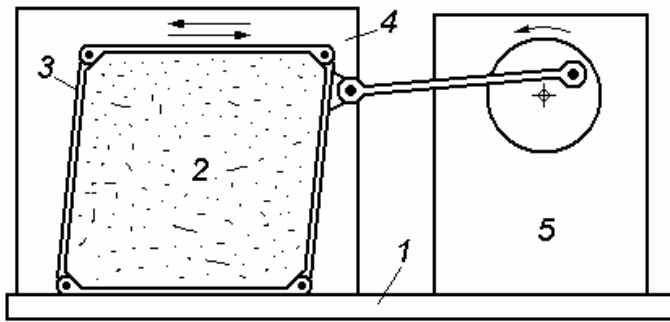


Рис. 1. Устройство для определения влияния скорости сдвига ВСС на прочность материалов: 1 – основание; 2 – КМ; 3 – шарнирная рамка; 4 – боковые ограничители; 5 - привод

шили, а бетонную смесь выдерживали сутки во влажной среде. Затем рамки 3 разбирали и образцы испытывали на сжатие нормально к боковой поверхности.

Влияние внешнего трения ВСС на структуру и прочность материалов исследова-

лось с помощью устройства, представленного на рис. 2.

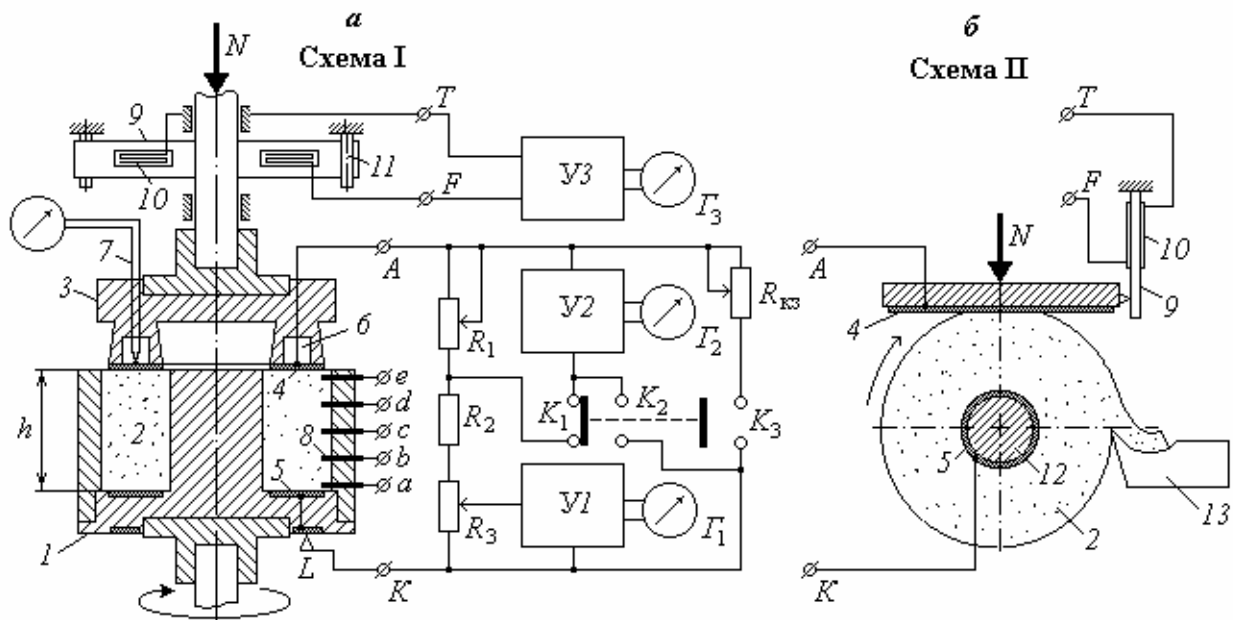


Рис. 2. Схемы испытания: 1 – вращающаяся форма; 2 – ВСС; 3 – ползун; 4 – контртело (скользящий электрод); 5 – электрод сравнения; 6 – канал для термостатирования; 7 – термопара; 8 – вспомогательные электроды; 9 – упругий элемент силоизмерителя; 10 – тензорезисторы; 11 – упоры; 12 – вал; 13 – резец; У – измерительные усилители; Г – гальванометры

Схема I. ВСС помещалась во вращающуюся пластмассовую форму 1. На поверхность пасты 2 устанавливался и прижимался сменным грузом N пластмассовый ползун 3 с приклеенным металлическим кольцом 4, служащим одновременно контртелом и рабочим электродом. Ползун 3 удерживается от вращения упругим элементом силоизмерителя 9. Нижний неподвижный относительно пасты электрод 5, полностью идентичный рабочему электроду 4, включен в

цепь через скользящий контакт L . Для поддержания постоянной температуры по кольцевому каналу b пропусклась термостатирующая жидкость. Температура измерялась с помощью медь-константановой термопары 7 , впаянной в контртело в непосредственной близости от поверхности трения. Через отверстия в боковой стенке формы 1 вводились вспомогательные электроды 8 площадью около $0,7 \text{ мм}^2$ из того же металла, что и основные электроды. Показания тензометрического силоизмерителя соответствовали крутящему моменту, создаваемому силой трения.

Схема II. В схеме II отработавший поверхностный слой ВСС удаляется с помощью резца 13 и во фрикционный контакт вступает вновь образованная поверхность. Скользящий электрод 4 (контртело), в виде пластинки шириной 20 мм, устанавливается сверху и прижимается грузом $N=2-40$ Н. Электродом сравнения (неподвижным относительно пасты) служит гильза 5 , надеваемая на вал 12 . Электроды 4 и 5 изготовлены из одного и того же металла. Все части устройства, контактирующие с образцом (кроме резца и электродов) выполнены из оргстекла. Резец электрически изолирован от корпуса.

Методика электрических измерений. Измерительная схема подключается по выбору к любой паре электродов и работает одинаковым образом, как в режиме генерации трибо-ЭДС, так и при поляризации электродов от внешнего источника, подключаемого к клеммам A и K .

При замкнутых контактах K_1 электромагнитного реле производится измерение напряжения U на нагрузке $R_1+R_2+R_3$. Калиброванный сигнал для этого снимается с магазина сопротивлений R_3 и подается на вход усилителя постоянного тока $U1$ типа Ф7024С/4 с входным сопротивлением (фактическим) около 30 МОм . Одновременно по падению напряжения на образцовом резисторе R_1 с помощью усилителя $U2$ (Ф8024С/1) измеряется сила тока I в цепи. При замыкании контактов K_2 и K_3 и, соответственно, размыкании контактов K_1 цепь ячейки трения закорачивается проводником $R_{кз}=0,04 \text{ Ом}$, вход усилителя $U2$ подключается параллельно резистору $R_{кз}$ и производится измерение тока короткого замыкания $I_{кз}$. Выходные сигналы усилителей $U1$ и $U2$ подаются на гальваномет-

ры светолучевого осциллографа Н145 и записываются на диаграммной ленте. Электрические параметры вычислялись по формулам: $\mathcal{E}ДС = U + I \cdot r = U \cdot I_{кз} / (I_{кз} - I)$ и $r = \mathcal{E}ДС / I_{кз} = U / (I_{кз} - I)$, где r – внутреннее сопротивление ячейки.

Методика калориметрических измерений. Применялся калориметр типа Кальве. При определении, например, теплоты фазового перехода воды в ВСС обеспечивали постоянство температуры калориметрической среды θ (или линейное ее снижение) и коэффициента теплоотдачи ($\alpha = \text{const}$). Определяли изменение температуры образца t

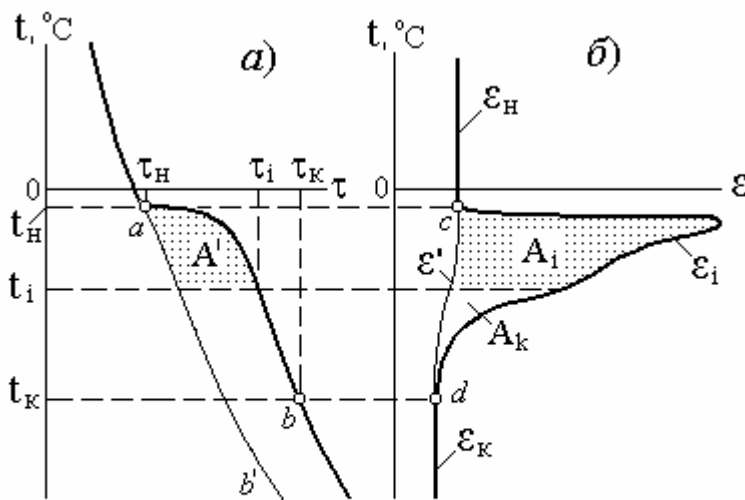


Рис. 3. Изменение температуры (а) и тепловой инерции образца (б) при испытании

переход воды в лед, а в точке d (при температуре t_k) он заканчивается. Теплота dQ_n , потерянная образцом в процессе теплообмена со средой за время $d\tau$, равна $dQ_n = \alpha S \cdot (t - \theta) d\tau$. Она складывается из теплоты фазового перехода dL и теплоты dQ_c , потеря которой вызывает понижение температуры тела на dt . Если бы $L=0$, температура тела t' падала бы по кривой ab' . Тогда $dQ_c = \alpha S \cdot (t' - \theta) d\tau$. Следовательно, $dL = \alpha S \cdot (t - t') d\tau$. Интеграл от dL в пределах от τ_n до τ_i пропорционален площади A' и, соответственно, площади A_i , то есть, скрытая теплота кристаллизации воды L_i при охлаждении образца от t_n до некоторой температуры t_i составляет $L_i = \alpha S \int_{t_n}^{t_i} (t - t') dt = \alpha S A_i$, где ϵ' – виртуальное значение термической инерции (которое наблюдалось бы, если бы фазовое превращение не сопровож-

дение температуры образца t во времени τ (рис. 3, кривая ab). Рассчитывали термическую инерцию образца $\epsilon = d\tau / d \ln(t - \theta)$ и получали кривую $\epsilon(t)$. Постоянство ϵ наблюдается выше точки c ($\epsilon = \epsilon_n$) и ниже точки d ($\epsilon = \epsilon_k$), когда тепловые эффекты отсутствуют. В точке c (при температуре t_n) начинается

переход воды в лед, а в точке d (при температуре t_k) он заканчивается. Теплота dQ_n , потерянная образцом в процессе теплообмена со средой за время $d\tau$, равна $dQ_n = \alpha S \cdot (t - \theta) d\tau$. Она складывается из теплоты фазового перехода dL и теплоты dQ_c , потеря которой вызывает понижение температуры тела на dt . Если бы $L=0$, температура тела t' падала бы по кривой ab' . Тогда $dQ_c = \alpha S \cdot (t' - \theta) d\tau$. Следовательно, $dL = \alpha S \cdot (t - t') d\tau$. Интеграл от dL в пределах от τ_n до τ_i пропорционален площади A' и, соответственно, площади A_i , то есть, скрытая теплота кристаллизации воды L_i при охлаждении образца от t_n до некоторой температуры t_i составляет $L_i = \alpha S \int_{t_n}^{t_i} (t - t') dt = \alpha S A_i$, где ϵ' – виртуальное значение термической инерции (которое наблюдалось бы, если бы фазовое превращение не сопровож-

далось тепловым эффектом). Если верхним пределом интеграла взята t_k , то получаемое L соответствует переходу в лед всей воды в образце. Значение L пропорционально полной площади ($A=A_i+A_k$), заключенной между кривыми ε и ε' . Доля льда от общего количества воды в образце, при любой температуре t_i , составит $i=L_i/L=A_i/A$. Теплоемкость образца равна $C=\varepsilon'\cdot\alpha S$. По мере перехода воды в лед, общая теплоемкость системы уменьшается. Поэтому $\varepsilon_H > \varepsilon_K$, и линия ε' есть кривая, форма которой определяется путем итерационного согласования величин ε' и i по формуле $\varepsilon'=(1-i)\varepsilon_H+i\varepsilon_K$.

В главе 3 приведены результаты исследований процессов формирования прочности и структурных характеристик материалов (керамического сырца и черепка, цементного камня и бетона) под влиянием внутреннего трения ВСС.

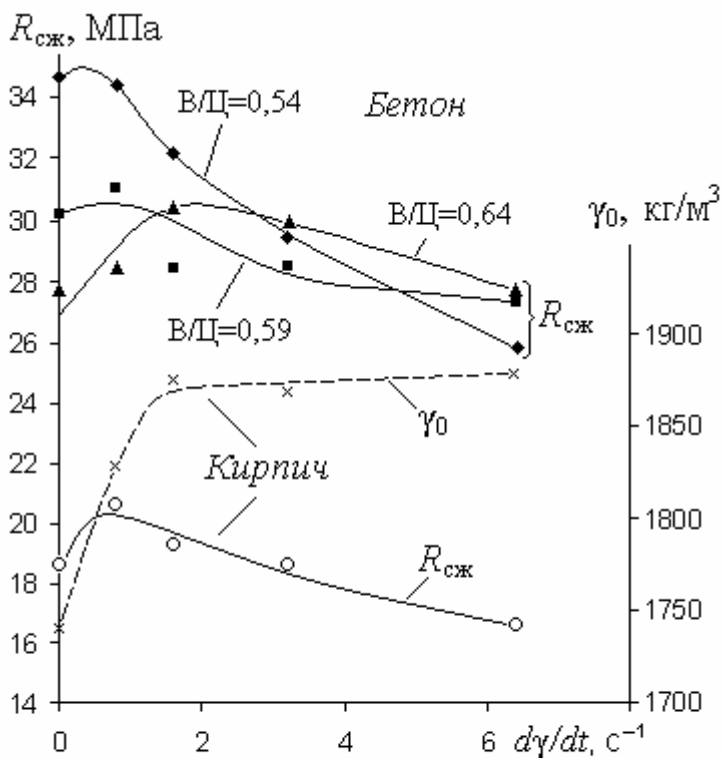


Рис. 4. Влияние скорости сдвига ВСС на прочность при сжатии и среднюю плотность материалов

с той, при которой КМ приобретает наименьшую вязкость.

Масштабный коэффициент (табл. 1) принимает максимальное значение при скорости сдвига, близкой к оптимальной. С увеличением скорости он уменьшается, что говорит о более резком падении прочности крупных образцов

С увеличением скорости деформации (dy/dt) предел прочности материалов при сжатии сначала возрастает, достигает максимума, а затем снижается (рис. 4). С повышением водосодержания в материалах (W или $В/Ц$) максимум прочности смещается в сторону увеличения скорости деформирования. Сопоставление данных прочностных испытаний КМ с реологическими кривыми показывает, что оптимальная по прочности скорость деформации совпадает

Таблица 1

Влияния скорости деформирования ВСС на прочность керамического черепка

Размеры образцов, см	Предел прочности при сжатии, МПа, при $d\gamma/dt, c^{-1}$					
	0	0,8	1,6	3,2	6,4	9,6
2×2×2	24,9	26,6	27,3	25,8	24,2	20,4
7×7×7	19,2	20,9	20,3	18,7	17,1	-
Масштабный коэффициент (R_7/R_2)	0,77	0,79	0,74	0,72	0,71	-
Расчетная марка кирпича (при $R_{кирп}/R_7=0,97$)	175	200	175	175	150	-

по сравнению с малыми. Прочность черепка падает быстрее, прочности сырца, но значения оптимальной скорости деформации у них совпадают. Расчетные значения прочности кирпича показывают, что в результате увеличения скорости формирования сверх оптимальной марка кирпича снижается с 200 до 150.

С ростом скорости сдвига возрастает средняя плотность материалов, особенно в интервале скоростей от 0 до оптимального значения $(d\gamma/dt)_{\text{опт}}$ (табл. 2). При этом коэффициент конструктивного качества ($R_{сж}/\gamma_0$) как бетона, так и керамических образцов, постоянен и даже несколько возрастает до значения $(d\gamma/dt)_{\text{опт}}$, а затем снижается.

Таблица 2

Влияния скорости деформирования ВСС на плотность цементного камня и бетона

Материал	Средняя плотность, кг/м ³ , при $d\gamma/dt, c^{-1}$				
	0	0,8	1,6	3,2	6,4
Цементный камень с В/Ц=0,24	1945	1963	1974	1981	1996
Бетон с В/Ц=0,50 (ОК=0)	2308	2330	2348	2364	2359
Бетон с В/Ц=0,54 (ОК=1 см)	2262	2298	2305	2318	2327
Бетон с В/Ц=0,58 (ОК=3 см)	2233	2255	2270	2273	2282

Водопоглощение образцов уменьшается с ростом скорости сдвига (табл. 3). При этом оно остается более 8 %, что удовлетворяет требованиям ГОСТ 530-95 к керамическому полнотелому кирпичу.

Таблица 3

Влияния скорости сдвига ВСС на водопоглощение керамических образцов

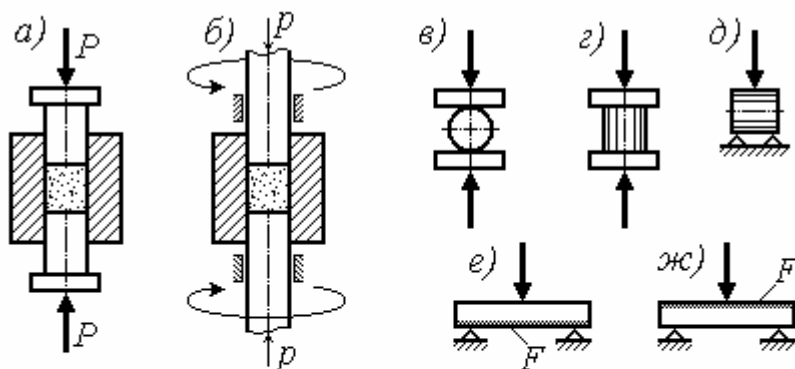
Размеры керамических образцов, см	Водопоглощение по массе, %, при $d\gamma/dt, c^{-1}$					
	0	0,8	1,6	3,2	6,4	9,6
2×2×2	13,8	11,9	11,1	12,1	11,4	10,1
7×7×7	12,6	10,9	10,3	9,7	9,8	-
Среднее	13,2	11,4	10,7	10,9	10,6	10,1

Повышение прочности материалов с увеличением скорости деформации в диапазоне от 0 до $(d\gamma/dt)_{\text{опт}}$, по-видимому, объясняется их уплотнением. Сниже-

ние же прочности при $dy/dt > (dy/dt)_{\text{опт}}$, в соответствии со статистическими теориями В. Вейбула, Т. А. Конторовой, Я. И. Френкеля, может быть объяснено образованием дефектов структуры.

В главе 4 приведены результаты исследования процессов формирования прочности и структуры материалов под влиянием внешнего трения.

Образцы-цилиндры из керамического сырца и черепка, цементного камня ($d=h=2,5$ см) и раствора ($d=h=5$ см) уплотняли прессованием при давлении 35 МПа (рис. 5-а). Контрольные образцы испытывали сразу после изготовления: керамические – после высушивания и после обжига, цементные – после 28 суток



нормального твердения. Основные образцы после уплотнения подвергали трению (трибообработке) по торцовым поверхностям стальными контртелами в течение 90 с при $n=0,5$ с⁻¹ (рис. 5-б) и при нормальном давлении 0,33 или 2,25

МПа, затем испытывали на растяжение при раскалывании (R_{pp}), сжатие ($R_{сж}$) и изгиб ($R_{изг}$) (схемы в, г и д). Результаты приведены в табл. 4-6.

Таблица 4

Влияние внешнего трения на прочность керамического сырца

Характеристика образцов	R_{pp} , МПа, при W , %			$R_{сж}$, МПа, при W , %		$R_{изг}$, МПа, при W , %	
	14,2	15,8	17,8	15,8	17,8	14,2	17,8
Контрольные	1,62	1,78	2,23	11,8	12,6	1,45	1,53
После трения при 0,33 МПа	2,11	1,98	1,88	12,5	13,3	1,62	1,70
То же при 2,25 МПа	2,40	1,94	-	13,0	-	1,67	-

Трение влияет на прочность материалов при всех видах испытаний. Следовательно, оно затрагивает не только структуру пристенного слоя, непосред

Таблица 5

Влияние трения на прочность керамического черепка и цементного камня

Характеристика образцов	Керамический черепок ($W=15,8\%$)		Цементный камень ($B/C=0,24$)	
	R_{pp} , МПа	$R_{сж}$, МПа	R_{pp} , МПа	$R_{сж}$, МПа
Контрольные	4,95	30,2	11,4	46,4
После трения при 2,25 МПа	5,48	33,6	10,1	55,7

Таблица 6

Влияние внешнего трения на прочность цементного раствора

Характеристика образцов	R_{pp} , МПа, при В/Ц			$R_{сж}$, МПа, при В/Ц			$R_{изг}$, МПа, при В/Ц		
	0,35	0,40	0,45	0,35	0,40	0,45	0,35	0,40	0,45
Контрольные	9,85	8,99	8,36	42,7	38,7	36,3	6,96	6,32	5,87
После трения при 0,33 МПа	8,74	7,75	6,89	45,9	41,1	37,9	7,75	6,68	6,12
То же при 2,25 МПа	8,93	8,04	7,38	46,2	41,6	38,3	7,88	6,95	6,56

ственно участвующего в процессе трения, но и структуру материала в объеме, т. к. при сжатии и изгибе сопротивление оказывают области образца, достаточно удаленные от поверхности трения.

В результате трения прочность на изгиб и сжатие керамического сырца повышается (на 5-15 %) и – тем больше, чем выше нормальное давление p при трении. При этом относительный прирост прочности практически не зависит от исходной влажности. Иные результаты получены для прочности на растяжение при раскалывании. Здесь влияние трения неоднозначно. При малой влажности (14,2 %) R_{pp} значительно возрастает после трения (на 30-48 %) и растет с повышением нормального давления p , при высокой влажности (17,8 %) трение снижает прочность при раскалывании. С повышением влажности КМ R_{pp} контрольных образцов возрастает, в то время, как прочность тех же составов, подвергнутых трению, с ростом W снижается.

В случае керамического черепка трибообработка оказала такое же влияние на прочность, как и в случае исходного сырца.

Для образцов цементного камня получено снижение прочности на растяжение при раскалывании на 11,5 % и повышение прочности при сжатии на 20 % после трения.

Трение так же отрицательно сказывается на прочности R_{pp} цементного раствора. Снижение R_{pp} тем больше, чем выше В/Ц. Увеличение нормального

давления p при трении ослабляет это отрицательное действие. Влияние же трения на прочность образцов при сжатии и изгибе оказалось, как и в случае КМ, положительным. Это положительное действие усиливается с повышением давления p и ослабляется с увеличением В/Ц.

Образцы-балочки из КМ ($2 \times 2 \times 10$ см) и ЦР ($4 \times 4 \times 16$ см) уплотняли вибрированием на лабораторной виброплощадке и подвергали трению по открытой поверхности с помощью ручной шлифовальной машинки. Испытания образцов-балочек полностью подтвердили результаты, полученные на образцах-цилиндрах. Различное влияние, оказываемое трением на прочность пристенного слоя керамических и портландцементных образцов, возможно, объясняется различием в форме частиц и способностью их к ориентации, а также различием реологических свойств, которые определяют условие перераспределения энергии между внешним и внутренним трением. Неоднозначное действие нормального давления p может быть связано с различным его влиянием на напряжения внутреннего и внешнего трения.

В работе установлено, что характер влияния нормального давления p на удельную силу трения τ_f зависит от влажности ВСС. При низкой влажности КМ ($W < 12\%$) отклонения от линейного закона трения незначительны. С ростом W коэффициент трения μ сначала несколько возрастает, достигает максимума при $W \approx 12\%$, а затем резко падает. При $W > 12\%$ зависимость $\tau_f = f(p)$ не является линейной. Коэффициент трения ($d\tau_f/dp$) уменьшается с ростом давления. При $p \rightarrow \infty$, $d\tau_f/dp \rightarrow 0$. Стремление $d\tau_f/dp$ к 0 происходит тем быстрее, чем выше влажность. Зависимость $d\tau_f/dp = f(p)$ хорошо описывается уравнением $d\tau_f/dp = \mu_0 \cdot \exp(-\beta p)$, где μ_0 – коэффициент трения при $p=0$. Интегрированием получаем уравнение, выражающее экспоненциальный закон трения:

$$\tau_f = C - (\mu_0/\beta) \cdot \exp(-\beta p). \quad (1)$$

Постоянная интегрирования C представляет собой предел, к которому стремится τ при $p \rightarrow \infty$. Смысл параметров μ_0 , β и C проиллюстрирован на рис. 6. Отрезок, отсекаемый кривой на отрицательной ветви оси абсцисс, равен давлению

нию адгезии p_a . Влияние влажности КМ на μ_0 и адгезию показано на рис. 7. Уравнение (1) отражает то обстоятельство, что трение ВСС включает два одновременно протекающих процесса – скольжение по контакту и течение в объеме.

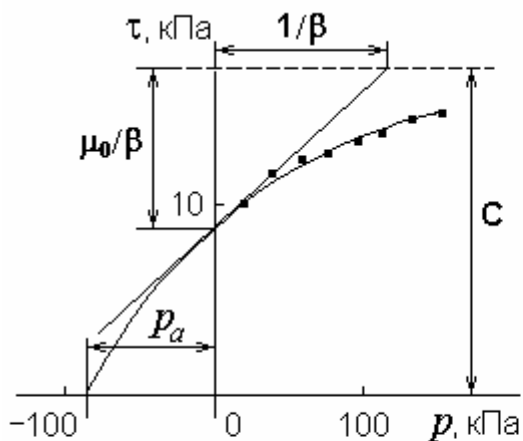


Рис. 6. Кривая $\tau=f(p)$ по уравнению (1)

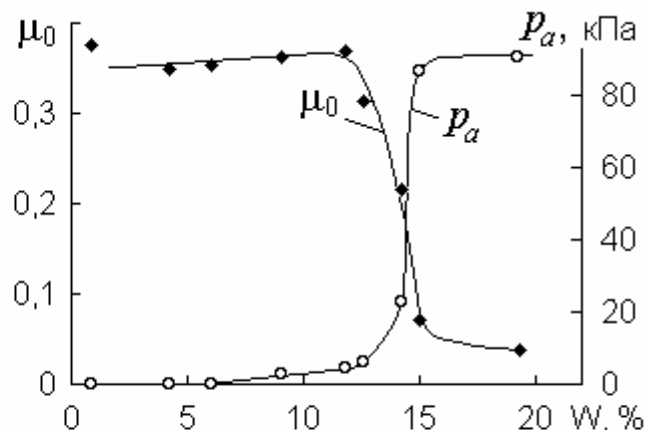


Рис. 7. Влияние влажности на адгезию и трение КМ

Соотношение между внешним и внутренним трением (λ) определяется по разработанной автором методике, основанной на регистрации процессов, происходящих на фрикционном контакте. К ним относятся: 1) изнашивание контртела, характеризуемое интенсивностью $J=\Delta m/vt$ – потерей массы Δm за единицу пути трения; 2) трибоионная эмиссия (см. ниже), характеризуемая трибо-ЭДС (E_f). Показано, что $\lambda=J/J_{\max}=E_f/E_f^{\max}$, где J_{\max} и E_f^{\max} – предельные значения J и E_f , имеющие место при отсутствии течения в объеме. Параметр λ может быть также представлен, как $\lambda=N_f/(N_f+N_\eta)$, где N_f и N_η – мощности, диссипированные, соответственно, при внешнем и внутреннем трении.

Установлено, что КМ характеризуется двумя пороговыми значениями влажности W_f и W_η . При влажности W_f и ниже система проявляет свойства твердого тела и скользит по контакту, как единое целое. Это состояние характеризуется значениями $J=J_{\max}$ и $\lambda=1$. При влажности W_η и выше система ведет себя подобно жидкости. Она прилипает к поверхности контртела и скольжение по контакту прекращается, заменяясь течением в объеме ВСС. При этом $J=0$ и $\lambda=0$. Участок зависимости $J=f(W)$ при $W>W_f$ может быть с достаточной для практики точностью аппроксимирован линейной функцией,

уравнение которой имеет вид: $J=j \cdot N(W_{\eta}-W)$, где j – коэффициент, представляющий собой интенсивность изнашивания при единичной нормальной силе, и разности $(W_{\eta}-W)$ в 1 %. Значение j зависит от свойств материалов пары трения, а значение W_{η} – только от свойств ВСС (табл. 7).

Таблица 7

Влияние характера материалов на параметры j и W_{η}

Материал контртела	Керамическая масса		Глина (фракция <0,1 мм)	
	j , мг/(м·кН·%)	W_{η} , %	j , мг/(м·кН·%)	W_{η} , %
Сталь Ст3	2,0	19,8	–	–
Никель	2,1	20,1	–	–
Латунь	6,9	20,0	0,13	32,8
Медь	7,8	18,9	0,14	29,7
Цинк	8,8	19,3	0,14	29,0

После удаления из КМ частиц песка с размером более 0,1 мм, порог влажности W_{η} увеличился более чем в 1,5 раза, а коэффициент изнашивания j уменьшился в 50–60 раз.

Напряженно-деформированное состояние образцов существенным образом сказывается на соотношении между внешним и внутренним трением (табл. 8).

Таблица 8

Влияние напряженно-деформированного состояния на поведение ВСС

Схема испытания	Параметр	Влажность КМ, %			
		13,0	15,0	16,6	17,4
I	μ_I	–	0,33	0,25	0,03
II	μ_{II}	0,47	0,52	0,66	0,84
I	λ_I	0,97	0,91	0,87	0,68
II	λ_{II}	1,00	0,80	0,44	0,15
I	$\lambda \cdot \mu_I$	–	0,30	0,22	0,02
II	$\lambda \cdot \mu_{II}$	0,47	0,42	0,29	0,13

Влияние влажности μ при использованных схемах испытания оказалось противоположным. Значения λ показывают, что в схеме II, в отличие от схемы I, доля внешнего трения резко сокращается с увеличением влажности, и основная работа затрачивается на преодоление вязкого сопротивления. Из значений силы и коэффициента смешанного трения умножением на λ получаем параметры F_{Π} и μ_{Π} внешнего трения, на которые влажность влияет одинаково при обеих схемах испытания. Параметр консистентности β в уравнении (1) по физическому смыслу представляет собой удельную площадь истинного контакта. Обрат-

ная величина ($1/\beta$) есть предел текучести пристенного слоя пасты. Сравнение полученных по схеме I значений пределов текучести в покое σ_m^s и при скольжении σ_m^d с $1/\beta$ показывает, что величина $1/\beta$ имеет весьма близкие значения с σ_m^d . При $W > 15\%$ значения $1/\beta$ и σ_m^d практически совпадают. В случае недеформируемых тел $\beta = 0$ и $d\tau/dp = \mu_0 = \text{const}$, что после интегрирования дает линейный закон трения Кулона. В случае идеальной жидкости $\beta = \infty$ и $d\tau/dp = 0$ – проскальзывания нет.

Изменение упруго-вязких свойств с влажностью КМ отражается на характере влияния скорости сдвига

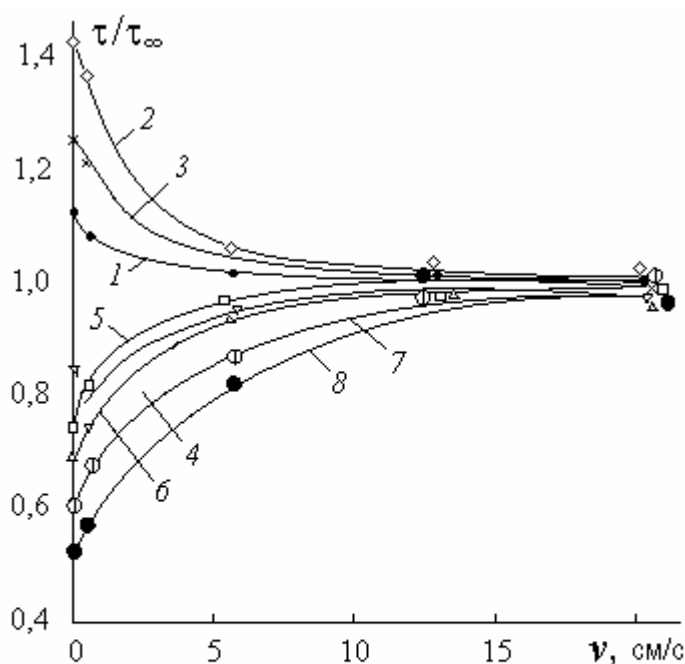


Рис. 8. Влияние скорости на относительное значение напряжений сдвига КМ: 1 – $W = 1,3\%$; 2 – 5,6; 3 – 7,8; 4 – 14,2; 5 – 15,0; 6 – 16,6; 7 – 17,4; 8 – 21,3 %

на напряжения (рис. 8). Если $W < W_f$, сила сопротивления падает с увеличением скорости ($\tau/\tau_\infty > 1$), как это происходит с твердыми телами, если же $W > W_f$, то сопротивление движению возрастает ($\tau/\tau_\infty < 1$) подобно тому, как это происходит в жидкости. Такое поведение хорошо согласуется с результатами остальных опытов.

Глава 5 посвящена исследованию вопросов, связанных с влиянием трения на структуру ВСС. Экспериментально установлено, что в течение первых 2-6 с трения теплоты Q выделяется больше, чем затрачивается работы A . Разность $\Delta U = Q - A$, соответствующая понижению внутренней энергии системы, составляет в опытах с КМ значение порядка $1,6 \text{ Дж/см}^2$. Наличие теплового эффекта, не связанного с диссипацией работы, указывает на переход системы в термодинамически более устойчивое состояние. Изменения силы трения в латентном периоде совпадают с характером таковых при самооргани-

зации. Экспериментально установлено, что в течение первых 2-6 с трения теплоты Q выделяется больше, чем затрачивается работы A . Разность $\Delta U = Q - A$, соответствующая понижению внутренней энергии системы, составляет в опытах с КМ значение порядка $1,6 \text{ Дж/см}^2$. Наличие теплового эффекта, не связанного с диссипацией работы, указывает на переход системы в термодинамически более устойчивое состояние. Изменения силы трения в латентном периоде совпадают с характером таковых при самооргани-

зации структуры, известной из работ по трению, что позволяет считать структурообразование в пристенном слое ВСС обусловленным не только ориентацией частиц, но и структурированием жидкой фазы в пристенном слое толщиной (по нашим данным для КМ) около 300 мкм.

Процесс структурирования пристенных слоев ВСС связан с возникновением при трении электрического поля, которое приводит к электроосмотическому перераспределению влаги в ВСС и, тем самым, нарушает однородность структуры. Между двумя электродами, один из которых находится в неподвижном контакте с ВСС, а другой скользит по ее поверхности, возникает разность потенциалов. При полной физической симметрии трибоячейки потенциалы электродов в состоянии покоя равны $\psi_a = \psi_k = \psi_0$. При скольжении одного из них по ВСС его потенциал смещается в отрицательную сторону и приобретает значение ψ_f . Потенциал неподвижного электрода ψ_0 остается без изменения. Разность потенциалов $E_f = \psi_f - \psi_0$ является электродвижущей силой (трибо-ЭДС).

Возникающая при трении ЭДС зависит от природы металла и ВСС. Замена воды другой жидкостью сказывается, как на максимальном значении трибо-ЭДС, так и на кинетике ее изменения в процессе трения. Полученные результаты согласуются с представлениями Л. Леба о том, что электризация достаточно интенсивна в случае высокого электрического сопротивления жидкости. При малом сопротивлении значительное разделение зарядов невозможно из-за обратной утечки.

При увеличении влажности КМ E_f сначала возрастает, достигает наибольшего значения при $W \approx 11-12\%$, а затем снижается. Уменьшение трибо-ЭДС с ростом влажности (при $W > 12\%$) объясняется переходом внешнего трения во внутреннее. В схеме II падение E_f с ростом W происходит быстрее, чем в схеме I, и при $W = 19\%$ трибо-ЭДС обращается в нуль. Это обусловлено полной заменой поверхностного скольжения течением в объеме ВСС и показывает, что электризация вызвана внешним трением.

В случае цементного раствора (ЦР) зависимость E_f от водоцементного отношения также проходит через максимум (при В/Ц=0,40). Портландцемент в

составе теста показал значения E_f не ниже, а в отдельных случаях – выше, чем ЦР. Кварцевый песок (фракции 0,05-2,5 мм, влажностью около 10 %) характеризуется низкими значениями E_f . Таким образом, величина трибо-ЭДС цементного раствора определяется тонкодисперсной составляющей – портландцементом, несмотря на втрое меньшее его содержание в смеси, чем песка.

С увеличением давления трибо-ЭДС возрастает. Однако это проявляется при малых нагрузках. С ростом нагрузки влияние давления на E_f прекращается.

Распространенная в литературе гипотеза о пленочном механизме возникновения трибо-ЭДС, не объясняет ряда экспериментальных фактов, например, влияния скорости или возрастания E_f при уменьшении изнашивающей способности КМ в результате удаления абразивной составляющей (песка).

Установлено, что с увеличением скорости скольжения v внутреннее электрическое сопротивление ВСС ($r=E_f/I_{кз}$) падает. Увеличение электропроводности ВСС с ростом скорости имеет место и при пропускании тока от внешнего источника. Обнаружено, что электропроводность во время трения зависит от направления тока, снижаясь при отрицательном потенциале на скользящем электроде и возрастая при обратной полярности. Эффект асимметричной проводимости исчезает при остановке движения. Это подтверждается также смещением синусоиды переменного тока относительно нулевого значения при пуске и остановке движения. При этом сумма амплитуд полувольт сохраняется неизменной. При изменении полярности приложенного напряжения в 1 В, скачок потенциала на скользящем электроде, в отличие от неподвижного, не изменяет своего знака, то есть действию внешнего электрического поля противопоставит противоположно направленное поле в двойном электрическом слое (ДЭС), который поддерживается на скользящем электроде процессом трения. Симметрию проводимости нарушает неизменная полярность ДЭС на фрикционном контакте, т. к. в одном из направлений тока носители заряда перемещаются по полю ДЭС, а в другом – против поля, преодолевая потенциальный барьер.

Механизм электризации ВСС при трении может быть представлен следующим образом. В состоянии покоя трибосистемы катион поверхности метал-

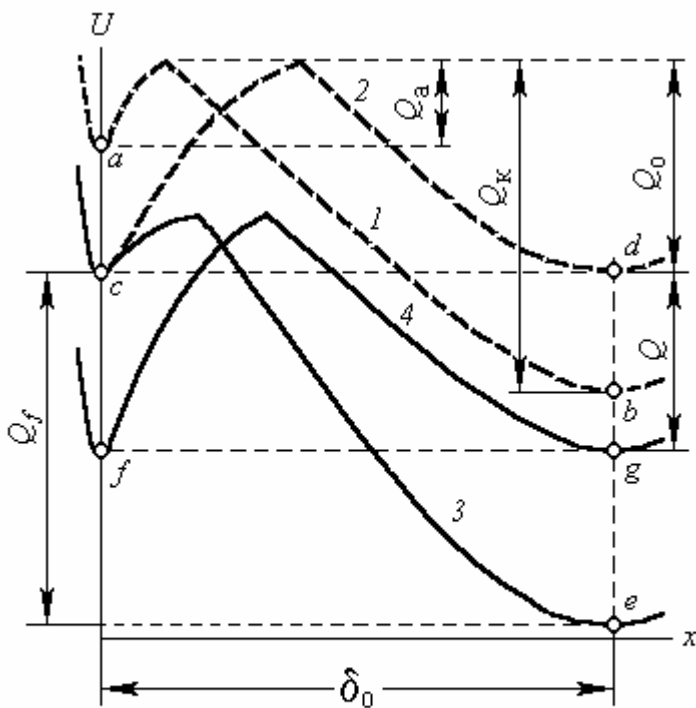


Рис. 9. Схема, поясняющая механизм разделения зарядов в ВСС при трении

ла, обладает потенциальной энергией, отвечающей в среднем точке a (рис. 9). Как известно, при переходе в раствор ион становится гидратированным и его уровень понижается до точки b (кривая 1). Гидратированный катион удерживается на некотором расстоянии δ_0 . Его перемещение влево или вправо связано с затратой энергии. Разность электростатических потенциалов в ДЭС равна $V=(\delta_0/\epsilon_a)\sigma$, где σ – поверхностная плотность заряда; $\epsilon_a=\epsilon_0\epsilon$

– абсолютная диэлектрическая проницаемость среды. Работа, требуемая для переноса заряда dq , в расчете на единицу площади, равна $dA=(\delta_0/\epsilon_a)q dq$, что после интегрирования от 0 до σ дает $A=(\delta_0/2\epsilon_a)\sigma^2$. В результате имеем $V^2=(2\delta_0/\epsilon_a)A$. Наибольшее количество работы A , которое может быть затрачено на разделение зарядов в результате электрохимического процесса, равно выигрышу в энергии Q_k-Q_a . При этом $V_{эx}=[(2\delta_0/\epsilon_a)(Q_k-Q_a)]^{1/2}$. По мере перехода катионов в раствор $V_{эx}$ растет, затрудняя процесс растворения и облегчая катодный процесс. В результате уровень потенциальной энергии иона на поверхности металла понижается (от точки a до точки c), а в растворе – повышается (от точки b до точки d). Через некоторое время устанавливается равновесие, при котором $Q_a=Q_k=Q_o$ (кривая 2). При включении процесса трения нарушается установившееся равновесие вследствие эффекта асимметрии проводимости. При этом облегчается переход катионов из решетки металла в ВСС и возникает потенциальный барьер обратному процессу. Облегчается также переход электронов из ВСС в металл в результате окислительно-восстановительных реакций на электроде, однако, известные факты анодного растворения металлов при трении говорят о преобла-

дании первого процесса. В результате энергетический уровень катиона в граничном слое снижается (от точки d до точки e). С этого момента начинает работать иной механизм перехода катионов из металла в раствор (из точки c в точку e), который дает выигрыш в энергии Q_f (кривая 3). Этот процесс продолжается до достижения нового равновесия (кривая 4). Разность потенциалов в ДЭС в результате трения увеличится на величину $V_f = E_f = [(2\delta_0/\epsilon_a)Q_f]^{1/2}$.

Отношение δ_0/ϵ_a есть величина, обратная электрической емкости C на единицу площади ДЭС. Методом перезарядки ДЭС во время трения КМ по схеме I при $W=12,6\%$, $n=1\text{ с}^{-1}$ и $N=166\text{ Н}$ получено среднее значение C для электрода из стали 12Х18Н10Т, равное $25,4\text{ мкФ/см}^2$. При $E_f=325\text{ мВ}$ это дает работу, затраченную на перенос заряда Q_f , около $1,3\cdot 10^{-6}\text{ Дж/см}^2$.

Глава 6 посвящена разработке концепции управления структурообразованием в материалах в процессе формования.

Внешнее электрическое поле вызывает перемещение влаги в ВСС (электроосмос), что изменяет соотношение между внешним и внутренним трением и, соответственно, влияет на структуру получаемых изделий. При отрицательном потенциале на контртеле сила трения возрастает, если $W < W_f$ и убывает, если $W > W_f$. При положительном потенциале – наоборот. При выключении источника тока влага очень быстро перемещается в обратном направлении. Напряженность электрического поля H в наших опытах составляла 3-15 В/см. Полученная зависимость $\tau_f(W)$ позволяла по известной силе трения определять влажность пристенного слоя керамической массы W_h .

Расчеты по величине электрокинетического потенциала ζ , а также экспериментально полученное распределение влаги в образце при электроосмосе (рис. 10) показали, что под действием электрического поля происходит смещение объема воды, как единого тела, в сторону катода. При этом между анодом и водным телом образуется обедненная влагой зона, шириной x , а вблизи катода – зона шириной δ , обогащенная водой. Величина δ возрастает с продолжительностью электроосмоса. За 0,6 с от начала опыта δ составила от 120 до 320 мкм в зависимости от H . В средней части образца, длиной $L-(\delta+x)$, влажность оста-

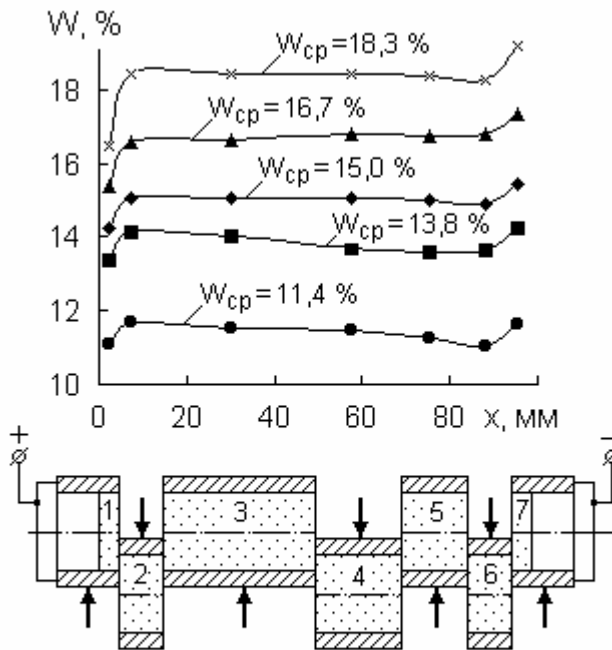


Рис. 10. Распределение влаги в КМ через 15 с электроосмоса при $H=15$ В/см

Если ВСС не набухает и влага не может выходить за пределы образца, то соотношение между δ и x зависит от изначальной степени насыщения пор водой $n=W_0/W_{\text{нас}}$ и от доли воды α , участвующей в движении: $x=\delta(1-n)/n\alpha=K_n\delta$. Поскольку α мало отличается от 1, коэффициент K_n почти целиком определяется величиной n . При n , близком к 1, $\delta \gg x$ ($K_n \approx 0$); при n , близком к 0, $\delta \ll x$ ($K_n \approx \infty$).

Имеется три характерных скачка потенциала, дающих в сумме напряжение U на электроосмотической ячейке: $U=\Delta\psi_K+\Delta\psi_A+\Delta\psi_{\text{Ом}}$, где $\Delta\psi_K$ и $\Delta\psi_A$ – падение потенциала на ДЭС катода и анода; $\Delta\psi_{\text{Ом}}$ – омическое падение потенциала на слое ВСС. Изменения в распределении потенциалов связаны, главным образом, с сильным ростом $\Delta\psi_A$, обусловленным снижением влажности в зоне x . Вольтамперная характеристика омического участка образца остается прямо пропорциональной в течение всего процесса, что указывает на постоянство во времени электропроводности, а, следовательно, и влажности данного участка ВСС. Вольтамперная характеристика катода практически горизонтальна. Сле-

ется неизменной и равной первоначальному среднему значению W_0 . Это означает, что электрическое поле, изменяя свойства поверхности (трение) не влияет на объемные свойства (вязкость).

Средняя линейная скорость переноса воды к поверхности трения равна

$$u=(dW_h/dt) \cdot (L/2-x)/(W_h+W_0).$$

Если влаги достаточно, то через некоторое время наступает полное водонасыщение поверхностного

довательно, процесс перераспределения влаги в ВСС лимитируется скоростью реакции на аноде.

Смещению влаги под действием силы электрического поля $q^{(+)}H$ (где $q^{(+)}$ – объемная плотность положительно заряженных противоионов диффузной части ДЭС) противодействуют: результирующая электростатическая сила, вызванная разделением зарядов на границах ВСС с электродами – $F_q=dE/dx$ (E – энергия взаимодействия зарядов), и сила, равная градиенту потенциала влаги $d\mu_t/dx$, возникающему между омической частью и слоями x и δ , примыкающими к электродам. Для состояния равновесия можно записать:

$$q^{(+)}H-d\mu_t/dx-F_q=0. \quad (2)$$

Смещение противоионов в сторону катода приводит к образованию поверхностной плотности заряда на катоде $\delta q^{(+)}$, а на аноде $xq^{(-)}$. Энергия взаимодействия зарядов равна

$$E=q\delta S(\Delta\psi_K+K_n\Delta\psi_A)/2, \quad (3)$$

где $|q^{(+)}|=|q^{(-)}|=q$; $S=S_K=S_A$ – площади катода и анода.

При $K_n=1$, $\Delta\psi_K+\Delta\psi_A=U-\Delta\psi_{ОМ}$, тогда, дифференцируя (3) по координате x , найдем

$$F_q=q(H-i/\chi)\cdot\delta/2LW_0, \quad (4)$$

где $H=dU/dx$; $i/\chi=d\psi_{ОМ}/dx$; χ – электропроводность керамической массы.

В работе показано, что в случае полного водонасыщения слоя δ , при $K_n=1$, $d\mu_t/dx\approx\mu_A/\delta$, где μ_A – потенциал влаги у анода. Подставляя (4) в (2) и, учитывая, что равновесие наступает, когда $i=0$, получаем

$$H=\mu_A/\delta(1-\delta/2LW_0)q, \quad (5)$$

Для определения потенциала μ_t автором разработаны два криоскопические способа (а. с. №№ 1105816 и 1236370), лишенные недостатков известных методов. Уравнение (5) связывает напряженность электрического поля с параметрами ВСС и может быть использовано в расчетах по регулированию соотношения между внешним и внутренним трением. Уравнение показывает, что необходимая напряженность электрического поля должна быть тем больше,

чем выше потенциал влаги, меньше объемная плотность зарядов диффузного слоя и влажность ВСС.

Глава 7 посвящена разработке критерия формуемости и оптимальных условий формирования прочностных свойств с учетом внешнего трения.

Критерий оптимальной формуемости ВСС (по наибольшей прочности изделий) получен на основе предложенной механической модели реологической системы с переменной вязкостью и трением (рис. 11). Модель включает n эле-

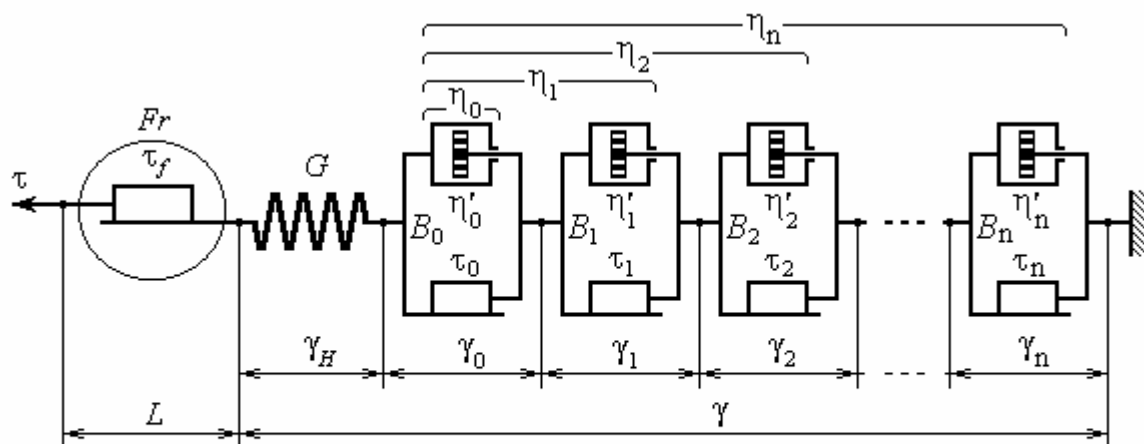


Рис. 11. Модель реологической системы с переменной вязкостью и внешним трением

ментов Шведова-Бингама (B) с вязкостью η'_i и пределом текучести τ_i ; элемент Гука G и элемент трения Fr . Если $\tau_0=0$ (в случае жидкости), то первый элемент Бингама (B_0) вырождается в тело Максвелла. Каждый элемент B_i , описываемый уравнением $\tau=\tau_i+\eta'_i(d\gamma_i/dt)$, начинает работать при достижении своего предела текучести (при $\tau=\tau_i$). При этом подвижность модели ϕ (величина обратная вязкости) возрастает с подключением каждого нового элемента B_i на величину $\phi'_i=1/\eta'_i$, т. е. $\phi_i=\phi_{i-1}+\phi'_i$. Общая подвижность ϕ цепочки из n элементов B_i равна

$$\phi_k = \sum_{i=0}^k \phi'_i. \text{ Для каждого элемента можно записать } d\gamma_0/dt=\phi'_0(\tau-\tau_0); d\gamma_1/dt=\phi'_1(\tau-\tau_1); \dots d\gamma_n/dt=\phi'_n(\tau-\tau_n), \text{ где } \phi'_0=\phi_0; \phi'_1=\phi_1-\phi_0; \phi'_2=\phi_2-\phi_1 \text{ и т.д. Легко показать, что}$$

$$\sum_{i=0}^k \phi'_i(\phi-\phi_i) = \sum_{i=0}^k \phi_i(\phi_{i+1}-\phi_i). \text{ Тогда, при } n \rightarrow \infty \text{ и } (\tau_{i+1}-\tau_i) \rightarrow 0 \text{ получаем}$$

$\frac{d\Gamma}{dt} = \frac{1}{G} \frac{d\Phi}{dt} + \int_0^{\Phi_k} \psi(\Phi) d\Phi$. В условиях стационарного течения (когда $d\tau/dt=0$) при оп-

тимальной скорости деформации имеем $\left(\frac{d\Gamma}{dt}\right)_{\text{опт}} = \int_0^{\Phi_k} \psi(\Phi) d\Phi$. Установленное

выше снижение прочности при $d\gamma/dt > (d\gamma/dt)_{\text{опт}}$ и неизменность плотности позволяют заключить, что скорость деформации начинает превышать скорость

релаксации напряжения, т. е. $\frac{d\Gamma}{dt} > \int_0^{\Phi_k} \psi(\Phi) d\Phi$, и рост напряжения приводит к воз-

никновению дефектов структуры. Мощность, которая необходима, чтобы поддерживать деформацию пасты с данной скоростью, составляет $N = \int_0^{\Phi_k} \frac{d\Gamma}{dt} d\Phi$. Ве-

личина N равна площади под кривой $d\gamma/dt=f(\tau)$ на соответствующем интервале напряжений (рис. 12). Аналогичный интеграл от правой части вышеприведенного неравенства представляет собой мощность, затраченную против сил внутреннего трения:

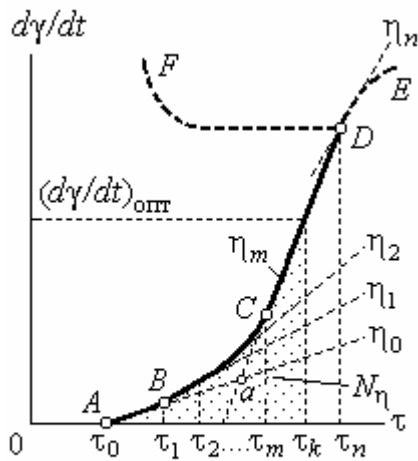


Рис. 12. Реологическая кривая ВСС

$$N_3 = \int_0^{\Phi_k} \left(\int_0^{\Phi_k} \psi(\Phi) d\Phi \right) d\Phi. \quad (6)$$

Из (6) следует, что подвижность пасты равна $\varphi(\tau) = d^2 N_\eta / d\tau^2$. Как известно, работа трения полностью диссипируется, и, следовательно, N_η равна скорости диссипации работы сил вязкого сопротивления. Это обстоятельство позволяет определять N_η , как скорость производства энтропии, по результатам измерения тепловыделения при внутреннем

трении. Поскольку верхним пределом интегрирования в (6) является напряжение τ_k , соответствующее оптимальной скорости деформации, то N_η характеризует предельную диссипирующую способность пасты. При отсутствии внешнего трения, условие оптимальной формоустойчивости пасты запишется в виде $N=N_\eta$. Это означает что полезная (затрачиваемая на формоизменение ВСС) мощность

обрабатывающей машины должна быть равна предельной диссипирующей способности пасты (скорости диссипации) при внутреннем трении.

Внешнее трение является вторым каналом диссипации работы. Оно обусловлено проскальзыванием пасты относительно рабочих органов машины. Потери энергии на скольжение можно охарактеризовать количеством диссипированной работы $A_f = \frac{1}{V} \int_0^L \phi S dL$, где S – площадь поверхности трения; L – путь трения; V – объем переработанной пасты. При наличии проскальзывания общая мощность диссипации равна $N_{\text{дис}} = N_{\eta} + dA_f/dt$ и условие оптимальной формуемости принимает вид $N = N_{\eta}/(1-\lambda)$. Если определение параметров внешнего трения в конкретном технологическом процессе затруднено, то по результатам измерения скорости тепловыделения может быть определена $N_{\text{дис}}$, как скорость производства энтропии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны лабораторные калориметрические и трибометрические способы испытания материалов, признанные изобретениями (а. с. №№ 1352320, 1352324, 1397807, 1105816, 1236370).

2. Установлено, что прочность бетона и керамических материалов зависит от скорости деформирования ВСС и для каждого материала существует оптимальная скорость деформации $(dy/dt)_{\text{опт}}$, при которой прочность получается наибольшей. Увеличение скорости сдвига сверх оптимальной приводит к снижению прочности материалов. Так, при увеличении скорости сдвига с 1,2 до 6,4 с⁻¹ марка керамического кирпича понизилась с 200 до 150.

3. Повышение прочности материалов с увеличением скорости деформации от 0 до оптимального значения объясняется дополнительным уплотнением образцов, которое не приводит, однако, к снижению коэффициента конструктивного качества. Последний сохраняется постоянным и даже в ряде случаев немного возрастает. Водопоглощение керамического черепка при этом несколько снижается, но остается в пределах, требуемых стандартом для полнотелого ке-

рамического кирпича. При увеличении скорости деформации сверх оптимального значения средняя плотность материалов растет незначительно, а прочность снижается достаточно резко, что приводит к снижению коэффициента конструктивного качества. Снижение прочности в этом диапазоне скоростей сдвига может быть объяснено возникновением дефектов в материале.

4. Значение оптимальной скорости $(d\gamma/dt)_{\text{опт}}$ зависит от вида и состава ВСС и связано со способностью ВСС, рассеивать энергию, сообщаемую механическим воздействием. При недостаточной диссипирующей способности керамической массы или бетонной смеси возникающие напряжения не успевают релаксировать и достигают критических значений, превышающих предел прочности коагуляционной структуры и вызывающих разрывы сплошности. Иными словами, если механическая работа не успевает полностью превратиться в теплоту, то ее избыточная часть переходит в поверхностную энергию разрывов.

5. Влияние влажности КМ, так же, как и В/Ц в случае бетона, сказывается как на прочности, так и на значении оптимальной скорости деформирования. С повышением количества воды максимум прочности смещается в сторону увеличения скорости деформирования. Оптимальная по прочности скорость деформации совпадает с той, при которой КМ приобретает наименьшую вязкость.

6. Установлено, что внешнее трение затрагивает не только структуру пристенного слоя, непосредственно участвующего в процессе трения, но и структуру материала в объеме. В результате трения предел прочности материалов при изгибе и сжатии повышается на 5-15 %. При этом, относительный прирост прочности у керамических материалов практически не зависит от исходной влажности, а у цементных растворов и бетонов – падает с увеличением В/Ц. Влияние же трения на прочность при раскалывании, когда в сопротивлении разрушению непосредственно участвуют пристенные слои, подвергнутые трению, неоднозначно. При малой влажности КМ прочность на растяжение при раскалывании значительно возрастает после трения (на 30-48 %) и растет с повышением нормального давления p . При высокой влажности R_{pp} снижается. В случае материалов на основе портландцемента предел прочности на растяжение

при раскалывании в результате трения снижается и тем больше, чем выше В/Ц. Увеличение p при трении ослабляет это отрицательное действие.

Различное влияние, оказываемое трением на прочность пристенного слоя керамических и портландцементных образцов, объясняется рядом причин, в том числе различием в форме частиц и способностью их к ориентации, различием реологических свойств материалов, определяющих условия перераспределения энергии между внешним и внутренним трением.

7. Установлено, что при формовочной влажности КМ скольжение по металлической поверхности сопровождается вязким течением в объеме ВСС. Соотношение между этими процессами, зависящее от вида и состава ВСС, напряженно-деформированного состояния, скорости скольжения и других факторов, учитывается с помощью параметра $\lambda = N_f / (N_f + N_n)$, где N_f и N_n – мощности, диссипированные, соответственно, при внешнем и внутреннем трении. Разработанная методика определения λ основана на экспериментальных данных по абразивному изнашиванию и трибоэлектризации. Значение λ изменяется в зависимости от влажности в пределах от 0 до 1. Этим пределам соответствуют два пороговых значения влажности W_f и W_n . При влажности W_f и ниже ВСС проявляет свойства твердого тела и скользит по контакту, как единое целое ($\lambda=1$). При влажности W_n и выше система ведет себя подобно жидкости. Она прилипает к поверхности контртела, и скольжение по контакту прекращается, заменяясь течением в объеме ($\lambda=0$).

8. Установлены закономерности внешнего трения ВСС, позволяющие дать обоснование процессам формирования структуры материалов. Предложено математическое выражение, учитывающее нелинейный характер закона трения ВСС и содержащее три параметра: коэффициент трения при нормальном давлении на контакте p , равном 0, предел, к которому стремиться сила трения с ростом p , и параметр консистентности β . В случае недеформируемых тел, $\beta=0$ и экспоненциальный закон трения переходит в линейный закон Кулона. В случае жидкости, $\beta=\infty$ – коэффициент трения обращается в нуль и в силу вступает закон вязкого течения. В работе показано, что по физическому смыслу величина

β представляет собой фактическую площадь контакта, устанавливающуюся под действием единичной силы.

9. Установлено, что анизотропия структуры материалов возникает не только в результате механической ориентации частиц, но и вследствие разделения электрических зарядов при трении с возникновением электрического поля, под действием которого происходит обогащение влагой пристенного слоя. В работе изучены основные закономерности электрических явлений при трении ВСС и предложена гипотеза, объясняющая механизм их возникновения.

Обнаружено два неизвестных ранее эффекта: тепловой эффект, не являющийся результатом диссипации работы трения и эффект анизотропии электрической проводимости пристенного слоя, позволившие рассчитать толщину пристенного слоя, на которую распространяется процесс упорядочения структуры.

10. Разработана концепция управления процессом формирования структуры материалов путем регулирования внешнего трения ВСС. Показано, что при электроосмосе в пределах ограниченного электродами объема ВСС происходит смещение воды как единого тела в сторону катода. При этом влажность ВСС у катода возрастает, а у анода снижается. Соответственно изменяется как сила внешнего трения, так и характер структуры получаемого материала. Скорость перемещения воды тем выше, чем выше напряженность электрического поля. Толщина обедненного и обогащенного влагой пристенных слоев материала, зависит от продолжительности электроосмоса. Влажность пасты между этими слоями остается неизменной и равной исходному значению, что является чрезвычайно важным с точки зрения сохранения вязкости материала. Установлены основные закономерности перемещения влаги в ВСС в зависимости от влажности, степени насыщения порового пространства водой, напряженности электрического поля. Получены уравнения, описывающие эти процессы.

11. Для получения оптимальной структуры и, соответственно, наибольшей прочности изделий предлагается характер (соотношение между внутренним и внешним трением) и режим трения (давление и скорость) согласовать с соста-

вом материала. С этой целью разработан критерий оптимальной формуемости ВСС, для чего предложена механическая модель системы с переменной вязкостью и внешним трением, отвечающая реологическому типу изучаемых материалов. Условие оптимальной формуемости имеет вид $N=N_{\eta}/(1-\lambda)$, где N – мощность, затрачиваемая на деформацию формоизменения ВСС (полезная мощность обрабатывающего механизма); N_{η} – предельная скорость диссипации энергии при вязком течении, на которую способна данная ВСС (определяется как площадь под реологической кривой, ограниченная значением напряжения, соответствующего оптимальной скорости деформации). При $N>N_{\eta}/(1-\lambda)$ снижается прочность изделий, т. к. подводимая работа не успевает диссипироваться полностью и избыточная ее часть расходуется на образование новых поверхностей (разрывов сплошности). При $N<N_{\eta}/(1-\lambda)$ падает производительность, возрастают энергозатраты (вязкость ВСС увеличивается с понижением скорости деформации) и, как показали эксперименты, прочность изделий получается ниже максимально возможной. Соблюдение оптимальных условий формования позволяет повысить прочность строительных материалов на 20-40 %.

12. Основные положения и разработки диссертации реализованы в производственных условиях ряда предприятий Санкт-Петербурга (ООО "Прагмастрой", ООО "Алгоритм") и Ленинградской области (ООО "Высотник", г. Кириши; ООО "Континент", г. Никольское; ЛПО "Победа", г. Колпино) и дали положительные результаты. Получено повышение марки и улучшение внешнего вида керамического кирпича, повышение прочности бетона, плотности и водонепроницаемости асфальтобетона, снижение энергопотребления на транспортирование и формование строительных смесей. При формовании керамического полнотелого кирпича на ленточном прессе СМК-21 (ООО "Высотник") была повышена марка со 100 до 125 и сокращено количество брака на 45 %. В 2003 году этим предприятием получена экономия в 3,5 млн. руб. При получении кислотоупорной футеровочной плитки (ООО "Континент") установлена оптимальная частота вращения шнекового вала пресса К/STSV-200 (ГДР), позволившая повысить прочность изделий при изгибе на 16 %. Оптимизированы со-

ставы растворной и бетонной смесей для механизированной подачи при строительстве жилых домов (ООО "Прагмастрой"). Внедрен в производство способ непрерывного контроля интенсивности изнашивания металлических поверхностей под действием керамической массы (а. с. № 1420459) (который также дает информацию о соотношении между внешним и внутренним трением) и прошел испытания способ непрерывного контроля влажности керамической массы (а. с. № 1264073). Применение данных способов позволяет в процессе работы технологической линии корректировать состав смеси, поддерживая его оптимальным. Получена также экономия материальных и финансовых затрат. Разработанный критерий оптимальной формуемости использован научно-производственным объединением "Алгоритм" в проекте подводного трубопровода с целью повышения надежности асфальтобетонной гидроизоляции.

Работы автора по теме диссертации, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Изменение фазового состава воды и кинетика тепловыделения бетона, твердеющего при отрицательной температуре // «Гидротехническое строительство», 1981, № 4. С.18-22 (соавт. Миронов С.А., Парийский А.А.).
2. О внешнем и внутреннем трении дисперсных систем // Механика композиционных материалов и конструкций. 2003. Т. 9, № 3. – С. 307-320.
3. Трение и изнашивающая способность керамической массы // Трение и износ. 2003. Т. 24. № 4. – С. 452-457.
4. Изнашивание металлических поверхностей при трении керамической массы // Научно-технические ведомости. 2003, № 4. – СПб.: Изд-во СПбГПУ.– С. 47-51.
5. Тепловыделение при трении дисперсных систем // Научно-технические ведомости 2004, № 1. – СПб.: Изд-во СПбГПУ.– С. 221-226.
6. Электрические явления при трении дисперсных систем. Ч.І. Трибо-ЭДС // Трение и износ. 2004. Т. 25. № 2. – С. 155-160.
7. Электрические явления при трении дисперсных систем. Ч.ІІ. Односторонняя проводимость граничного слоя // Трение и износ. 2004. Т. 25. № 3. – С. 266-270.
8. Электрические явления при трении дисперсных систем. Ч.ІІІ. Трибоионная эмиссия // Трение и износ. 2004. Т. 25. № 5. – С. 481-485.
9. О влиянии нормальной нагрузки на коэффициент трения керамической массы // Механика композиционных материалов и конструкций. 2004. Т. 10, № 2. – С. 211-223.
10. Управление трением керамической массы // Строительные материалы. 2004. № 9. Приложение Наука, № 4. – С. 10-12.

Публикации в прочих изданиях

11. О внешнем трении керамической массы // Строительные материалы из попутных продуктов промышленности, Межвуз. сб. трудов ЛИСИ, 1988. С. 21-27 (соавт. А.В.Чурилло).
12. Электродвижущая сила при трении дисперсных систем // Фундаментальные исследования в технич. университетах. Материалы VII Всеросс. конф. по проблемам науки и высшей школы. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. – С. 99-100.

13. Роль миграции воды в процессах морозного разрушения бетона // «Укладка и уход за бетоном при строительстве гидротехнических сооружений». Материалы конференций и совещаний по гидротехнике, Л., «Энергия», 1979. С. 96-100.
14. Фазовые переходы воды при гидратации цемента в замороженном бетоне // «Строительные материалы из попутных продуктов промышленности». Межвуз. тематический сб. трудов Л., ЛИСИ, 1985 (соавт. Парийский А.А.).
15. Создание опытного образца устройства для контроля влажности движущейся рабочей массы // Отчет по теме 107503, Гос.рег.№ 0185.0001907, Инв.№ 02860112795, 1986. 65 с. (соавт. С.Г.Никольский).
16. Непрерывный контроль влажности сырьевой керамической массы // «Научные проблемы современного энергетического машиностроения и их решение». Тезисы докл. Всесоюзной НТК Л.: 1987. С. 49 (соавт. Никольский С.Г., Чурилло А.В.).
17. О роли адсорбции воды в тепловыделении цемента // «Бетоны для водопропускных сооружений». Материалы конференций и совещаний по гидротехнике, Л., «Энергия», 1980. С. 75-78 (соавт. Запорожец И.Д.).
18. Электрические явления при трении // Триботехника на железнодорожном транспорте. Сб. тр. II междунар. симп. по транспортной триботехнике «Транстрибо-2002». СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002. с. 23-31.
19. Трение дисперсных систем // Фундаментальные исследования в технических университетах. Материалы VI Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002. с. 183-184.
20. Определение содержания льда в бетоне с химическими добавками // «Строительные материалы из попутных продуктов промышленности». Межвуз. тематический сб. трудов Л., ЛИСИ, 1983. С. 52-56 (соавт. Парийский А.А.).
21. Бетон для высоконапорных массивных энергетических сооружений // «Научные проблемы современного энергетического машиностроения и их решение». Тезисы докл. Всесоюзной НТК. Л.: Изд-во ЛПИ, 1987. С. 47 (соавт. Парийский А.А., Суходолова С.М.).
22. Вопросы проектирования корпусов высокого давления // «Исследования и расчет строительных конструкций энергетических сооружений» Межвузовский сборник. Л.: Изд-во ЛПИ, 1987. С. 64-69 (соавт. Иванов Д.А.).
23. Контроль изнашивания при трении керамической массы // Фундаментальные исследования в технич. университетах. Материалы VII Всеросс. конф. по проблемам науки и высшей школы. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. – С. 198-199.
24. Влияние влажности на фрикционные параметры глинистых дисперсных систем // Межвузовский сборник научных трудов по гидротехническому и специальному строительству. М.: МГСУ, 2002. С. 188-193.
25. Роль трения в процессах обработки и формования керамической массы // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2003. № 5. Ч. II. – С. 22-24.
26. К вопросу о долговечности бетонных конструкций // Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения. Тр. V Междунар. конф. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. – С. 37-41.
27. Контроль износа рабочих поверхностей машин для производства строительных материалов // «Инновационные наукоемкие технологии для России». Тезисы докл. Российской НТК СПбГТУ, 1996.
28. Трение дисперсных систем как источник электрического тока // Теоретические и практические проблемы развития электроэнергетики России. Тр. Междунар. научно-практич. конф. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002. с. 197-198.
29. Свойства воды в дисперсных силикатных системах // Высокотемпературная химия силикатов и оксидов. Тезисы докл. VIII Всеросс. совещ. СПб.: Изд-во ИХС РАН, 2002. с. 185.
30. Влияние технологических факторов на свойства материалов в конструкциях // Развитие инфраструктуры объектов туризма и спорта. Труды научно-практич. конф. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002. С. 37-41.

31. Контроль изнашивания как фактор повышения надежности технологического оборудования // Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций. Тр. V Междунар. конф. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. – С. 41-45.

32. Особенности тепло-влажностного режима материалов в конструкциях ледовых полей // Развитие инфраструктуры объектов туризма и спорта. Труды научно-практич. конф. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002. С. 41-44.

33. К вопросу об особых свойствах граничных слоев воды // Межвуз. сборник научных трудов по гидротехническому и специальному строительству. М.: МГСУ, 2002. С. 27-32.

34. Электроосмос и потенциал влаги в дисперсной системе // Фундаментальные исследования в технич. университетах. Материалы VII Всеросс. конф. по проблемам науки и высшей школы. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. – С. 222-223.

35. Способ определения фазового состава воды в дисперсных структурах строительных материалов // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2003. № 5. Ч. I. – С. 224-227.

36. Строительные материалы и изделия. Основные свойства. Уч. пособие. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. – 112 с (соавт. Никольская Т.С., Никольский С.Г.).

37. Реологическая модель с переменной вязкостью // Фундаментальные исследования в технич. университетах. Материалы VIII Всеросс. конф. по проблемам науки и высшей школы. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. – С. 204-205.

38. Перераспределение влажности керамической массы при трении // Фундаментальные исследования в технич. университетах. Материалы VIII Всеросс. конф. по проблемам науки и высшей школы. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. – С. 222-223.

39. Трибоионная эмиссия // Фундаментальные исследования в технич. университетах. Материалы VIII Всеросс. конф. по проблемам науки и высшей школы. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. – С. 64-65.

40. Анизотропия проводимости дисперсных систем при трении // Фундаментальные исследования в технич. университетах. Материалы IX Всеросс. конф. по проблемам науки и высшей школы. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2005. – С. 115-116.

41. Электротрибоника дисперсных систем // Фундаментальные исследования в технич. университетах. Материалы IX Всеросс. конф. по проблемам науки и высшей школы. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2005. – С. 116-117.

Авторские свидетельства на изобретения

42. А.с. № 1352324, СССР, МКИ G 01 N 19/02. Способ определения коэффициента трения пасты / Оpubл. 15.11.87. Бюл. 42 (соавт. С.Г.Никольский, А.В.Чурилло, Л.Н.Игнатьев).

43. А.с. № 1397807, СССР, МКИ G 01 N 19/02. Устройство для определения коэффициента трения движущейся пасты / Оpubл. 23.05.88. Бюл. 19 (соавт. С.Г.Никольский, Л.Н.Игнатьев).

44. А.с. № 1420459, СССР, МКИ G 01 N 3/56. Способ контроля износа металлических поверхностей при контакте с влажной дисперсной системой. / Оpubл. 30.08.88. Бюл. 32.

45. А.с. 1352320 СССР, МКИ G 01 N 3/56. Устройство для испытания материалов на трение / Оpubл. 15.11.87. Бюл. 42 (соавт. С.Г.Никольский, Л.Н.Игнатьев).

46. А.с. № 1105816, СССР, МКИ G 01 N 33/38. Способ определения температуры замерзания воды в материале / Оpubл. 30.07.84. Бюл. 28 (соавт. С.Г.Никольский).

47. А.с. № 1236370, СССР, МКИ G 01 N 33/38. Способ определения криотермических характеристик бетона / Оpubл. 07.06.86. Бюл. 21.

48. А.с. № 1264073, СССР, МКИ G 01 N 33/38. Способ контроля влажности сырьевой керамической массы / Оpubл. 15.10.86. Бюл. 38 (соавт. С.Г.Никольский, А.В.Чурилло, Л.Н.Игнатьев).