

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

СПАСИБОЖКО ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ
СПЕКАНИИ И ВСПУЧИВАНИИ ГРАВИЯ ИЗ ЗОЛЫ ТЭС

Специальность 05.23.05 - "Строительные материалы и изделия"

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

Челябинск, 1975

Работа выполнена на кафедре строительных материалов
Челябинского политехнического института имени Ленинского
комсомола.

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент
Ф.Г.Шумилин.

Научный консультант - кандидат технических наук, доцент
Г.А.Шербина.

Официальные оппоненты: заслуженный деятель науки и техники
РСФСР, доктор технических наук,
профессор И.А.Иванов,

кандидат технических наук Г.И.Залдат.

Ведущее предприятие - Челябинский ПромстройНИИпроект,
г.Челябинск.

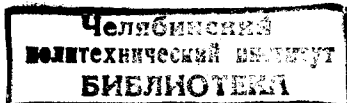
Автореферат разослан " " мая 1975 г.

Защита диссертации состоится 18 июня 1975 года, в 15 часов,
в ауд.428 на заседании Совета по присуждению ученых степеней
инженерно-строительного факультета Челябинского политехничес-
кого института имени Ленинского комсомола (454044, г.Челябинск,
44, пр.им.В.И.Ленина, 76, тел.39-39-64).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся
темой диссертации, принять участие в заседании Ученого Совета
или прислать отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверен-
ных печатью.

/ Ученый секретарь Совета
кандидат технических наук, доцент *В.В.Капранов* В.В.Капранов



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Важное направление технического прогресса - использование легких бетонов требует решения задач, связанных с обеспечением промышленности строительных конструкций эффективными пористыми заполнителями из местного сырья.

Побочный продукт тепловых электростанций - зола-унос является распространенным сырьем, ее пригодность для производства искусственных пористых заполнителей (в основном гравиеподобных) доказана исследованиями советских и зарубежных ученых, а актуальность утилизации подчеркивается Директивами XXIV съезда КПСС по пяти-летнему плану на 1971-1975 г.г.

В СССР проведена опытно-промышленная проверка и начат выпуск в промышленных масштабах зольного гравия и аглопоритового гравия. Вместе с тем механизм формирования структуры, спекание и вспучивание гравия при обжиге изучены недостаточно, что приводит к затруднениям при разработке промышленной технологии и назначении технологических параметров в каждом конкретном случае. В частности, требует дальнейшей разработки реологическая сторона этих процессов, принципы оценки технологической пригодности золы, методы назначения оптимальных технологических параметров производства на стадии лабораторных испытаний.

Цель работы. Исследовать реологические параметры спекания и вспучивания золы при термической обработке и закономерности их изменения с целью управления структурообразованием гравиеподобных пористых заполнителей из золы ТЭС.

Методы выполнения исследования. Выполненное исследование базируется на экспериментальных данных, полученных в результате комплексных испытаний лабораторных образцов для определения реологических параметров золы в температурном интервале спекания и вспучивания гравия и опытных партий гравия для оценки его физико-механических свойств.

В теоретической части исследования использованы современные разработки в области реологии и физико-химической механики дисперсных структур, жидкофазного спекания и вспучивания пористых заполнителей.

Научная новизна. В работе впервые детально исследован механизм вязко-яластичного течения размягченной золы при спекании и вспучивании.

Определены температурные интервалы размягчения и плавления стекловидных компонентов золы и показано, что зола в температурном интервале спекания и вспучивания гравия представляет собой структурированную дисперсную систему.

Получены новые экспериментальные данные о характере вязко-пластичного течения золы при обжиге, установлено, что оно подчиняется обобщенному реологическому закону.

Получена зависимость, связывающая скорость вспучивания зерен гравия с определяющими ее факторами: степенью структурированности пиропластичной золы, напряжениями сдвига в размягченных оболочках замкнутых пор, развивающимися за счет избыточного давления газов в порах и размерами этих пор.

Практическая ценность работы заключается в том, что предложенный метод комплексного исследования реологических параметров золы позволяет давать объективную оценку пригодности этого сырья в производстве пористых заполнителей и назначать оптимальные технологические параметры этого производства на стадии лабораторных испытаний. Показана возможность регулирования реологических параметров золы с целью управления структурообразованием заполнителя.

Реализация результатов работы. Результаты научных исследований использованы при разработке технологии производства зольного гравия на основе золы Магаданской ТЭС по заказу треста "Магадан-энергострой" и могут быть применены при разработке нормативных документов и инструкций по оценке технологической пригодности зольного сырья и назначению технологических параметров производства заполнителей из золы.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались:

1. На XXV, XXVI, XXVII, XXVIII научно-технических конференциях Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола, проходивших в 1972-1975 г.г.
2. На научно-технической конференции "Применение золы тепловых электростанций в производстве строительных материалов", организованной Новосибирским областным правлением НТО Стройиндустрии, трестом "Железобетон" и Новосибирским инженерно-строительным институтом им. В.В.Куйбышева в г.Новосибирске в мае 1973 г.

Публикации. По результатам выполненного исследования опубликовано 4 работы.

Объем работы. Диссертационная работа объемом 152 страницы состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 153 наименований и содержит 94 страницы машинописного текста, 43 рисунка, 20 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

I. Состояние вопроса и задачи исследования

По данным литературных источников выполнен обзор и проведен анализ современных исследований проблемы использования золы ТЭС для производства пористых заполнителей.

Исследования по технологии производства гравия из золы, представленные работами А.С.Панина, М.П.Элинзона, И.А.Иванова, М.В.Балахнина, С.Г.Василькова, Г.А.Шербины и др., предполагают при выборе наиболее рациональной технологической схемы производства руководствоваться особенностями и свойствами исходного сырья.

Разработка классификации топливных зол по составу, проведенная Н.А.Поповым, Г.С.Бурлаковым, Г.Н.Сиверцевым, М.П.Элинзоном, положила начало научно обоснованного использования золы. Наиболее современной и пригодной для оценки топливных зол как сырья в производстве строительных материалов является классификация, предложенная И.А.Ивановым. Однако, существует необходимость дальнейшей ее разработки применительно к различным направлениям использования золы, в частности, в производстве обжиговых заполнителей.

Формирование структуры гравия обусловлено спеканием и вспучиванием исходного сырья при обжиге. Механизм жидкофазного спекания поршкообразных материалов детально разработан в исследованиях Я.И.Френкеля, П.П.Будникова, У.Д.Кингери, Я.Е.Регузина и др. Теоретические исследования С.П.Онацкого, Я.Н.Черняка, В.М.Попова, О.П.Мчедлова-Петросяна позволяют отметить, что кинетика вспучивания зерен заполнителя при обжиге определена развивающимися напряжениями и способностью размягченного материала к пластическим деформациям, которая зависит от реологических параметров.

Обзор исследований по реологии дисперсных структур позволяет заключить, что реологическая сторона спекания и вспучивания гравия из золы мало изучена.

По проведенному анализу литературных материалов в диссертации поставлены следующие задачи:

1. Исследовать процесс плавления золы с целью дополнения существующей классификации.
2. Разработать метод комплексной оценки золы по ее реологическим характеристикам в температурном интервале спекания и вспучивания гравия.
3. Изучить характер изменения реологических параметров золы по мере подъема температуры и определить значения этих параметров при

- спекании и вспучивании гравиеподобного заполнителя из золы.
4. Исследовать механизм вязко-пластичного течения золы при спекании и вспучивании зерен гравия и дать его описание.
 5. Обосновать способ регулирования пористости заполнителя из золы воздействием на ее реологические параметры при обжиге.
 6. Проверить результаты исследования при разработке технологии производства гравия применительно к золе одной из теплосиловых станций.

II. Исследование и характеристика исходных материалов

Для исследования выбраны золы от сжигания углей различных видов и месторождений, что предопределило разнообразие их составов и свойств. Объектами исследования послужили средние пробы зол из ствалов гидроудаления четырех ТЭС: Челябинской ТЭЦ-I и Кжноуральской ГРЭС - от сжигания бурых челябинских углей; Троицкой ГРЭС - от сжигания экибастузских каменных углей; Магаданской ТЭЦ - от сжигания каменных углей Ургальского и Сучанского месторождений.

Характеристика зол (табл. I) приведена по результатам определения плотности, насыпной массы, дисперсионного, химического и петрографического анализов.

Исследование процесса плавления золы проведено при помощи специально разработанной высокотемпературной приставки к микроскопу МБС-2, в основу которой положен принцип определения температуры плавления вещества в спале термомпары. Устанавливались три характерные температуры:

- t_1 - замерялась в момент начала плавления частиц на контактах;
- t_2 - замерялась в момент, когда частицы золы оплавливаясь приобретали шаровидную форму;
- t_3 - соответствовала моменту, полного плавления материала с растеканием расплава по чашечке спая.

С учетом того, что величина температурного интервала размягчения золы зависит, в основном, от плавления стекловидных компонентов и их содержания в золе, характерные температуры были определены для средних проб исследованных зол (табл. 2) и для всех классифицированных групп стекловидных частиц каждой золы в отдельности (табл. 3).

При решении первой задачи исследования установлено, что значения характерных температур плавления агрегатов неоднородных частиц зависят от состава пород, сопутствующих месторождению угля.

ХАРАКТЕРИСТИКА ЗОЛ

Т а б л и ц а I

Состав и свойства зол	Зола Южноуральской ГРЭС	Зола Челябинской ГРЭС	Зола Магаданской ТЭЦ	Зола Троицкой ГРЭС
Плотность, кг/м ³	2070	2280	2290	2160
Насыпная масса, кг/м ³	836	787	543	752
Удельная поверхность, м ² /кг	131	359	499	295
Гранулометрический состав, содержание фракций в %:				
> 85 мкм	86	34	8	39
20-85 мкм	11	38	47	36
< 20 мкм	3	28	45	25
Потери при прокаливании, %	9,70	5,75	14,80	2,90
Модуль плавкости				
$\frac{\text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}$	0,19	0,10	0,05	0,04
Фазовый состав, % по объему:				
1. органическая фаза	17,0	8,0	35,2	3,5
2. стекловидные компоненты, в том числе:				
а) агрегированные	50,0	61,0	49,2	68,0
б) неагрегированные	29,0	28,0	15,5	21,0
3. кристаллические компоненты	4,0	3,0	0,1	7,5

Т а б л и ц а 2

ПЛАВКОСТЬ ЗОЛ

Наименование ТЭС	t ₁ , °C	t ₂ , °C	t ₃ , °C	(t ₁ -t ₂), °C
Южноуральская ГРЭС	1110	1230	1370	120
Челябинская ТЭЦ-I	1220	1330	> 1500	110
Магаданская ТЭЦ	1230	1410	> 1500	180
Троицкая ГРЭС	1350	1460	> 1500	110

Т а б л и ц а 3

ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАВЛЕНИЯ СТЕКЛОВЫХ КОМПОНЕНТОВ ТОПИЛЬНЫХ ЗОЛ

Стеклообразные компоненты газозольного состава зол	Зола Ежновральской ГЭС		Зола Челябинской ТЭЦ-1		Зола Карагандинской ТЭЦ		Зола Троицкой ГРЭС					
	$t_{1,0}^{\circ}$	$t_{1,0}^{\circ}$	$t_{1,0}^{\circ}$	$t_{2,0}^{\circ}$	$t_{1,0}^{\circ}$	$t_{2,0}^{\circ}$	$t_{1,0}^{\circ}$	$t_{2,0}^{\circ}$				
Агрегаты неоднородных частиц неправильной формы	1190	1290	1400	1220	1300	1390	1190	1360	>1500	1310	1450	>1500
Агрегаты неоднородных оплавленных шарообразных частиц	1010	1230	1400	1240	1310	1390	1200	1310	1480	1260	1360	1450
Агрегаты однородных стеклообразных частиц	1090	1180	1340	1060	1240	1330	1230	1330	1460	1350	1440	>1500
Стекло неагрегированное бесцветное прозрачное - А	>1500		>1500				>1500			>1500		
Стекло неагрегированное желтое - В	1110	1240	1320	980	1200	1400	1100	1230	1410	990	1280	1400
Стекло неагрегированное черное магнитное - Д	1180	1400	>1500	1200	1380	>1500	1230	>1500		1210	1360	1440

Неагрегированные частицы стекла при нагревании ведут себя неодинаково. Бесцветное прозрачное стекло является самым тугоплавким компонентом зола. Наиболее легкоплавким является стекло желтого цвета, характеризующееся низкими температурами начала плавления. Оплавление частичек этого стекла сопровождалось значительным их вспучиванием за счет выделяющихся газов при температурах 1200-1280°C. Шарообразные частицы черного стекла начинают плавиться при температурах 1180-1230°C и характеризуются большим температурным интервалом плавления.

Судя по тому, что количество окислов CaO и Fe_2O_3 в химическом составе зол увеличивается по мере повышения содержания стекла желтого цвета, в нашем исследовании подтвердилось предположение И.А.Иванова о химическом составе этого стекла. Количество окислов железа в золе также зависит от содержания черного магнитного стекла.

В результате исследований установлено, что в процессе формирования структуры гравия, наряду с прочими, могут принимать участие газы, выделяющиеся при плавлении стекловидных компонентов зола.

В зерне заполнителя при обжиге в микрообъемах вокруг отдельных частиц возникает различная по характеру газовая среда. Экспериментальное определение температур плавления частиц зола в среде воздуха (окислительная), аргона (нейтральная) и окиси углерода (восстановительная) показывает, что эти температуры существенно зависят от характера газовой среды. Нейтральная, а в большей мере восстановительная, среды способствуют раннему появлению расплава и увеличению температурного интервала размягчения зола, в частности, стекло желтого цвета становится еще более легкоплавким, существенно понижаются температуры плавления частиц черного стекла.

Таким образом, сложный процесс перехода зола в пиропластическое состояние представляется как последовательное постепенное плавление компонентов ее стекловидной части, за счет чего зола приобретает свойства структурированной дисперсной системы.

Ш. Исследование реологических свойств зола в температурном интервале спекания и вспучивания гравия

Механизм формирования структуры гравия из зола рассмотрен с позиций напряженно-деформированного состояния гранулы заполнителя при обжиге. Спекание и вспучивание гранул является сложным процессом объемной деформации пористого тела, осуществляющимся путем течения вещества. Изменение средней плотности гранулы связано с переносом массы вещества микропотоками, сложная совокупность которых имеет

макроскопически однородное поле векторов скоростей, направленных при спекании к центру гранулы, а при вспучивании к внешним слоям гранулы.

Микрореологические процессы с определенным приближением могут быть представлены как простейший вид напряженно-деформированного состояния - течение под действием сдвигающих усилий. М.П. Юларовичем и другими исследователями показано, что золошлаковые материалы при температурах размягчения и плавления деформируются согласно дифференциальному закону Бингама:

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma}, \quad (I)$$

где τ - действующие напряжения сдвига;
 τ_0 - предельное напряжение сдвига, выдерживаемое материалом без пластических деформаций;
 $\dot{\gamma}$ - градиент скорости сдвига между слоями;
 η_p - коэффициент пластической вязкости.

Основными реологическими параметрами вязкопластичного течения золи является структурная вязкость и предельное напряжение сдвига, которые рассматривались в работе как обобщающие, включающие в себя и зависящие от значений частных: поверхностного натяжения, стягивающего капиллярного усилия, вязкости расплава, его смачивающей способности, концентрации отдельных фаз и др.

В качестве основного метода определения структурной вязкости золи в исследовании использовался метод измерения скорости неупругой деформации цилиндрической части образца при кручении. Для этого применялся вискозиметр ОРГЭС, оснащенный разработанной нами системой автоматической регистрации угловых деформаций образца во времени, которая обеспечивала высокую точность и объективность определения структурной вязкости.

Размеры и средняя плотность образцов соответствовали размерам и средней плотности сырьевых гранул заполнителя.

Предельное напряжение сдвига определялось методом конического пластометра Ребиндера, который является наиболее удобным для высокотемпературных исследований. Определения проводились на прессованных (до плотности сырьевых гранул заполнителя) образцах-цилиндрах ($d = 40$ мм, $h = 20$ мм), размеры которых подобраны таким образом, чтобы от них не зависели результаты определений.

Количество параллельных испытаний при определении реологических параметров устанавливали таким, чтобы коэффициент вариации не превышал 5%.

Результаты комплексного исследования реологических параметров исходных зол позволяют отметить, что по изменению этих параметров по мере подъема температуры можно судить о качественных изменениях структурированной дисперсной системы пиропластичной золы.

При относительно низких температурах: 770°C - для южноуральской золы, 780°C - для челябинской и магаданской золы и 950°C - для тугоплавкой троицкой золы, структурная вязкость резко падает с $(4+5) \cdot 10^9$ Па·с до $(4+5) \cdot 10^8$ Па·с (рис. 1 и 2). Это свидетельствует о переходе агрегатов золных частиц из хрупкого состояния в вязко-пластичное. После этого на графиках вязкости выделяются аномальные участки, где структурная вязкость уменьшается медленно или возрастает, например, у южноуральской и троицкой золы. В общепринятом толковании аномалии вязкости связываются с процессами растворения тугоплавких компонентов в образовавшемся расплаве и появления новых кристаллических фаз.

В температурных интервалах аномальных изменений вязкости начинается плавление легкоплавкой части стекловидных компонентов золы и, как было установлено dilatометрическими измерениями, развиваются деформации усадки золы за счет спекания. Высокие значения предельного напряжения сдвига, установленные в конце температурных интервалов аномалий вязкости, дают возможность предположить, что на этом этапе дисперсная зола приобретает свойства довольно прочной структурированной системы. Образование и качественные изменения этой системы, очевидно, и отражаются в аномальных изменениях структурной вязкости.

По мере дальнейшего подъема температуры структурная вязкость вновь начинает падать с большой скоростью, а предельное напряжение сдвига, плавно снижаясь, достигает малой величины, зола теряет свойство пластичности и переходит в вязко-текучее состояние.

Для оценки влияния реологических параметров на формирование структуры заполнителя были приготовлены опытные партии гравия из челябинской и магаданской золы. Гравий обжигали в лабораторной печи при температурах: 1050, 1100, 1150, 1200, 1250, 1300°C. Качество полученного заполнителя оценивали по двум показателям: средней плотности зерен и пределу прочности зерен при раскалывании.

Сопоставляя и анализируя данные по определению реологических параметров зол (рис. 1 и 2) и физико-механических свойств заполнителя (рис. 3 и 4) можно выделить три интервала:

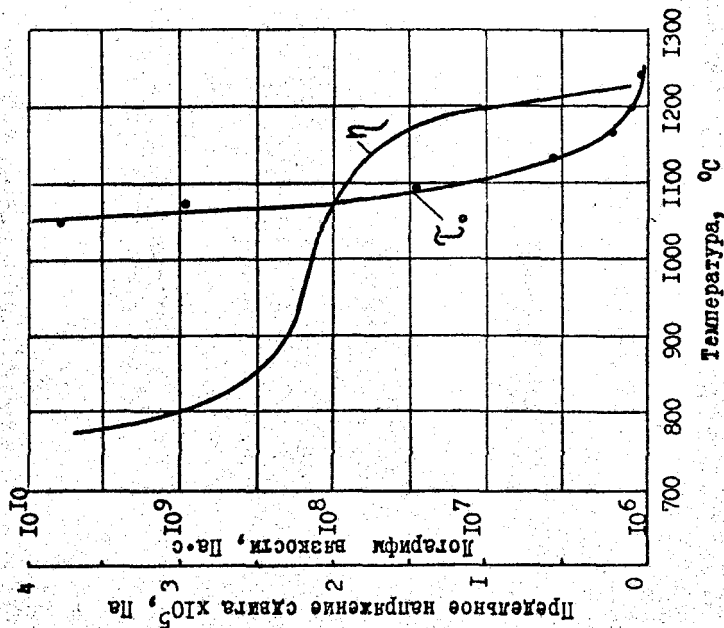


Рис.1. Зависимость реологических параметров золи Челябинской ТЭЦ-1 от температуры

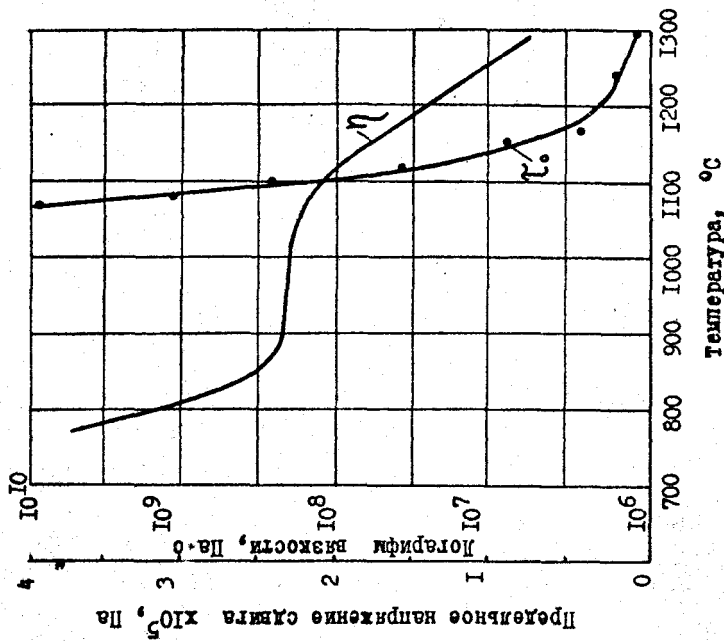


Рис.2. Зависимость реологических параметров золи Магаданской ТЭЦ от температуры

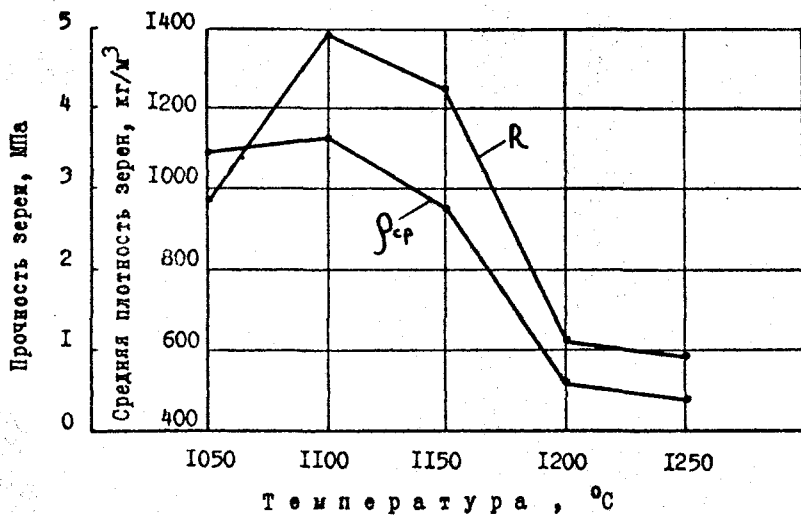


Рис.3. Зависимость физико-механических свойств гравия из золы Челябинско^м ТЭЦ-I от температуры обжига

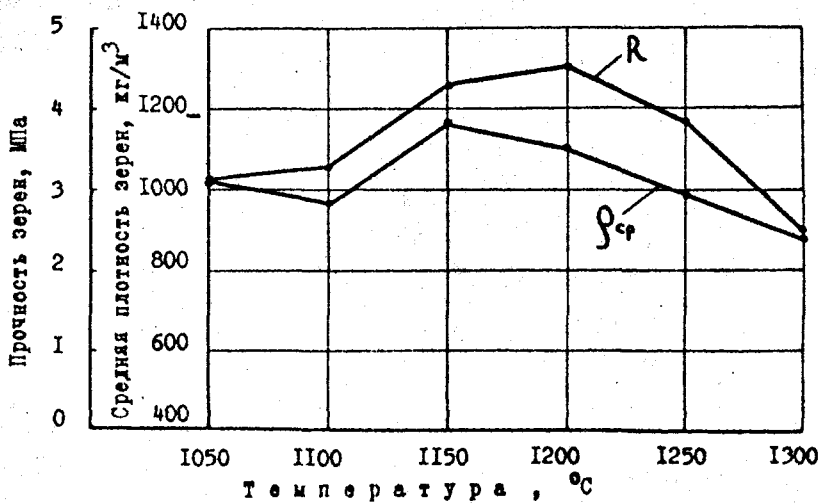


Рис.4. Зависимость физико-механических свойств гравия из золы Магаданской ТЭЦ от температуры обжига

1) оптимальные условия для спекания гравия создаются при температуре, когда значения структурной вязкости снижаются до $8 \cdot 10^7$ Па·с и предельного напряжения сдвига - до $0,8 \cdot 10^5$ Па;

2) гравий с наибольшим отношением прочности зерен к их средней плотности может быть получен при такой температуре, когда структурная вязкость меняется в пределах $(8 \pm 2,5) \cdot 10^7$ Па·с, а предельное напряжение сдвига снижается при этом до $0,4 \cdot 10^5$ Па;

3) оптимальные условия для вспучивания зерен гравия создаются при температуре, когда значения структурной вязкости становятся ниже $2,5 \cdot 10^7$ Па·с и предельное напряжение сдвига изменяется в интервале $(0,4 \pm 0,1) \cdot 10^5$ Па.

Таким образом, по результатам определения реологических параметров золы можно объективно и с достаточной степенью точности назначать температурный интервал обжига гравия и давать заключение о пригодности этого сырья для производства вспученного или спеченного гравия.

• IV. Реологический закон течения золы при спекании и вспучивании

Изучение реологических закономерностей вязко-пластичного течения золы проводили на образцах из золы Челябинской ТЭЦ-I при температуре 1170°C . Определялись значения градиента скорости сдвига, соответствующие различным постоянным значениям напряжения сдвига:

$$\dot{\gamma} = \frac{2\pi R \cdot \Delta\varphi}{360h \cdot \Delta t} \quad (2)$$

где $\dot{\gamma}$ - градиент скорости сдвига по высоте цилиндрической части образца, с^{-1} ;

R - радиус поперечного сечения цилиндрической части образца, м;

h - высота цилиндрической части образца, м;

$\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$ - угловая скорость деформации образца, град/с.

$$\tau_{\text{max}} = \frac{3M}{2\pi R^3} \quad (3)$$

где τ_{max} - максимальные касательные напряжения при кручении образца, Па;

R - радиус цилиндрической части образца, м;

M - скручивающий момент, приложенный к образцу, Н·м.

Результаты испытаний представлены в виде реологической диаграммы - рис.5. Экспериментальная кривая течения зола наиболее удачно описывается обобщенным степенным реологическим уравнением:

$$\tau^{1/n} = \tau_0^{1/n} + (\eta_p \cdot \dot{\gamma})^{1/m}, \quad (4)$$

где τ - действующие напряжения сдвига;
 τ_0 - предел текучести зола;
 η_p - коэффициент пластической вязкости;
 $\dot{\gamma}$ - градиент скорости сдвига;
 m и n - параметры нелинейности.

В нашем случае соотношение параметров нелинейности, величины которых определяются природой вещества и механизмом его течения, должно удовлетворять неравенству: $m > n$. Для определения их величин экспериментальные реометрические данные пересчитывались в терминах $\tau^{1/n}$ и $\dot{\gamma}^{1/m}$ с подбором наиболее вероятных комбинаций m и n и проверялась линеаризация кривой течения. Коэффициент корреляции имел максимальное значение ($r = 0,998$) при $n = 1$ и $m = 2$.

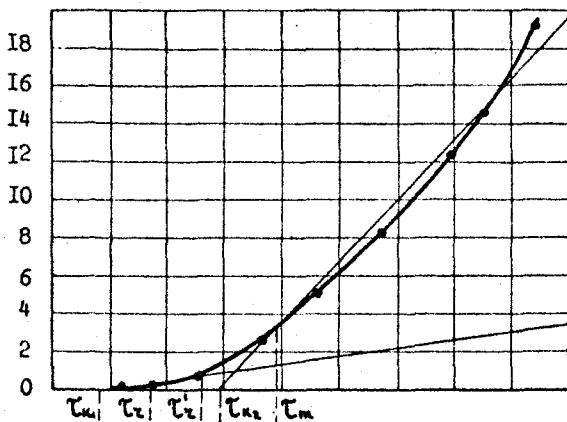
Значение τ_0 (τ_k на диаграмме) определили путем экстраполяции опытных данных, рассчитанных в координатах $\tau - \dot{\gamma}^{1/2}$, на ось напряжений: $\tau_0 = 0,88 \cdot 10^4$ Па.

В изученном интервале напряжений наблюдается падение структурной вязкости на порядок, носящее аномальный характер. При этом незначительное повышение напряжений сдвига может привести к довольно заметному снижению вязкости, вследствие чего скорость течения заметно возрастает. Анализируя существующие теории структурной вязкости мы пришли к выводу, что подобный тип неньютоновского течения может быть объяснен тиксотропным разрушением пространственной структуры размягченной зола.

На реологической диаграмме выделена область напряжений и скоростей сдвига характерных для спекания: $\tau_k - \tau'_2$, где τ_k - условный статический предел текучести; τ'_2 - граница условно постоянной вязкости. На этом участке наблюдается весьма замедленное (типа ползучести) течение с наибольшей пластической вязкостью неразрушенной структуры.

При вспучивании зерна заполнителя развиваются сдвигающие усилия, за счет возрастающего давления газов в замкнутых порах, которые способны разрушить созданную при спекании структуру. Максимуму производной $d\eta_p/d\dot{\tau}$ соответствует условный динамический предел те-

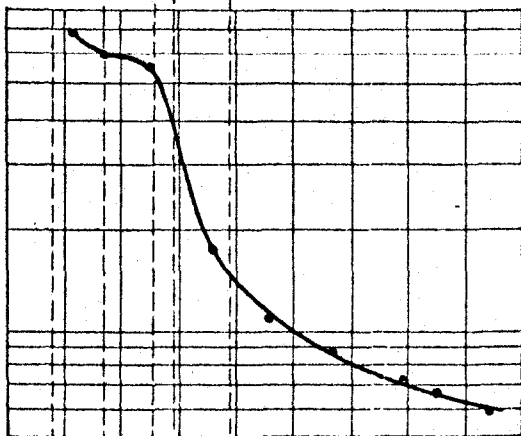
Градиент скорости сдвига $\times 10^{-3}$, с^{-1}



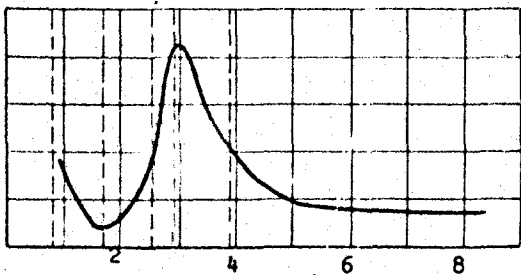
Вязкость, $\text{Па}\cdot\text{с}$

$1 \cdot 10^7$

$5 \cdot 10^6$



$\frac{d\sigma}{d\tau}$



Напряжение сдвига $\times 10^4$, Па

Рис.5. Реологическая диаграмма течения золь

кучести $\tau_{кк}$, который является критическим напряжением сдвига для данной структуры. После этого предела вязкость падает с приближением в пределе к наименьшей "бингамовской" пластической вязкости предельно разрушенной структуры.

Испытания образцов по динамическому методу, когда скручивающий момент непрерывно возрастал моделируя рост давления газов в зерне гравия при вспучивании, подтвердили установленную закономерность течения зола в значительном интервале напряжений сдвига.

На базе установленного закона в исследовании получена зависимость, определяющая кинетику вспучивания зерна заполнителя:

$$\frac{dR}{dt} = \frac{(R_2 - R_1)}{2\eta_p \cdot \eta_p} \cdot \left(\frac{P_{гз} \cdot R_1}{4h_1} \right)^{m/n} \quad \text{при } m/n > 1, (5)$$

- где $\frac{dR}{dt}$ - скорость изменения радиуса замкнутой полости;
- R_1 - радиус замкнутой полости до вспучивания;
- R_2 - радиус замкнутой полости после вспучивания;
- η_p - коэффициент пластической вязкости размягченной при обжиге зола;
- $P_{гз}$ - давление газов в замкнутой полости, совершающее работу вспучивания;
- h_1 - толщина оболочки, окружающей полость до вспучивания;
- m/n - параметры нелинейности течения, которые обусловлены степенью структурированности зола.

Итак, скорость вспучивания гравия зависит от степени структурированности пиропластичной зола, развивающегося давления газов в замкнутых порах и размеров этих пор.

У. Регулирование реологических параметров пиропластичной зола

На основании вышеизложенного выявляется возможность регулирования реологических параметров зола с целью управления структурообразованием заполнителя, которая исследована нами на примере зольного гравия из челябинской зола. В качестве добавки, корректирующей предельное напряжение сдвига и структурную вязкость при

температурах обжига, использовался легкоплавкий суглинок, содержание которого в составе шихты изменяли в широком диапазоне.

В качестве критерия, для сравнения между собой способности к пластическим деформациям различных глинозольных композиций, принят коэффициент пластичности - отношение величины предельного напряжения сдвига к соответствующему значению структурной вязкости, который характеризует способность размягченной золы сохранять форму.

Определение реологических параметров и обжиг гравия проводили при температурах: 1100, 1150, 1200°C. Для всех партий гравия определяли показатели средней плотности, прочности отдельных зерен и их общей пористости.

Значительное понижение коэффициента пластичности отмечено при температуре 1100°C и увеличении содержания суглинка в шихте до 60 в.ч. на 100 в.ч. золы, при температуре 1150°C - до 30 в.ч. на 100 в.ч. золы, а при температуре 1200°C, когда большая часть частиц золы начинает плавиться, добавка суглинка не улучшает ее способности к пластическим деформациям.

Существенное изменение свойств гравия наблюдали при невысокой температуре обжига - 1100°C при повышении содержания суглинка в золе до 60 в.ч. на 100 в.ч. золы. Возрастающее количество жидкой фазы интенсифицирует процесс вспучивания: на 150-200 кг/м³ снижается средняя плотность зерен гравия, на 10% возрастает их общая пористость. Однако, при повышенных дозировках суглинка наблюдается значительное снижение прочности заполнителя. Поэтому для конкретной, изученной нами шихты оптимальное количество легкоплавкой добавки должно быть ограничено 30-40 в.ч. на 100 в.ч. золы, что составляет в среднем 25% добавки по массе.

Исследование влияния дисперсности золы, как технологического приема управления поризацией гравия при обжиге, проводили на образцах, приготовленных из челябинской золы, измельченной до различной удельной поверхности: 360, 450, 540 и 630 м²/кг при температуре обжига равной 1170°C. В результате установлено, что с повышением дисперсности золы до 450 м²/кг наблюдается ошутимое снижение реологических параметров, которое способствует уменьшению средней плотности (вспучиванию) зерен гравия с 500 кг/м³ до 325 кг/м³. Дальнейшее измельчение золы неэффективно, т.к. наблюдается рост значений предельного напряжения сдвига и структурной вязкости, что сдерживает дальнейшее развитие вспучивания.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. В представленной работе предложен метод комплексного исследования реологических параметров зола в температурном интервале спекания и вспучивания гравия, который позволяет давать объективную оценку пригодности зола для производства гравия и назначать оптимальные технологические параметры этого производства на стадии лабораторных испытаний.

2. Для высокотемпературных реологических исследований пригоден метод погружения конического индентора для определения предельного напряжения сдвига и метод скручивания образца для определения структурной вязкости зола.

3. Классификация зола по составу дополнена некоторыми элементами, позволяющими использовать ее для оценки пригодности этого сырья в производстве обжиговых заполнителей. В частности, установлено, что температурный интервал размягчения зола в целом зависит от интервалов плавления ее стекловидных компонентов.

4. Показано, что пиропластичная зола при температурах обжига гравия представляет собой структурированную дисперсную систему, об образовании и качественных изменениях которой можно судить по характеру изменения ее реологических параметров.

5. Установлена нелинейная зависимость скорости вязко-пластичного течения зола от напряжений сдвига, развивающихся в грануле заполнителя при обжиге.

6. Кинетика процесса вспучивания зерен гравия определена степенью структурированности пиропластичной зола, напряжениями сдвига в размягченных оболочках замкнутых пор, развивающимися за счет избыточного давления газов в порах и размерами этих пор:

$$\frac{dR}{dt} = \frac{(R_2 - R_1)}{2\pi \cdot \eta_p} \cdot \left(\frac{P_{usb} \cdot R_1}{4 h_1} \right)^{m/n}$$

7. Структурообразование гравия и его физико-механические свойства определены значениями реологических параметров зола при обжиге.

8. Исследована возможность корректировки реологических параметров зола с целью регулирования процесса поризации гравия при обжиге: введением легкоплавкой добавки, оптимальное количество которой определяется температурой обжига и повышением дисперсности

зола до некоторого предела, выше которого измельчение золы технологически неэффективно.

9. Результаты исследования могут быть использованы при установлении технологических параметров производства искусственных пористых заполнителей и при разработке нормативных документов и инструкций по оценке технологической пригодности зольного сырья. Они проверены при разработке технологии производства зольного гравия на основе золы Магаданской ТЭЦ.

По материалам диссертации опубликованы следующие статьи:

1. О взаимосвязи температурно-вязкостных свойств зол ТЭС с их химико-минералогическим составом. Известия высших учебных заведений "Строительство и архитектура", 1974, № 6, (Соавторы: Шумилин Ф.Г., Щербина Г.А.)

2. Усовершенствование вискозиметра для определения структурной вязкости шлаков и зол в температурном интервале их размягчения. Сборник научных трудов ЧПИ "Исследования по бетону и железобетону", № 149, Челябинск, 1974 (Соавтор Щербина Г.А.).

3. Исследование реологических характеристик золы ТЭС при нагревании и их влияние на свойства зольного гравия. Сборник научных трудов ЧПИ "Исследования по бетону и железобетону", № 149, Челябинск, 1974, (Соавтор Щербина Г.А.)

4. О нелинейно вязкопластичном течении при вспучивании пористых заполнителей. Сборник научных трудов ЧПИ "Исследование по бетону и железобетону", № 149, Челябинск, 1974.