

кристаллических фаз кремнезема [8] при измельчении кварцевого песка.

Природа упорядочения структуры кварца в процессе нагревания весьма многообразна и зависит не только от химического и минералогического состава кварцевого песка, но и от степени измельчения и скорости его нагревания.

Причину возникновения отдельных метастабильных фаз кристаллического кремнезема при измельчении кварцевого песка и различный характер упорядочения структуры кварца в процессе нагревания можно объяснить с единой термодинамической точки зрения. Так как любая система стремится к минимуму свободной энергии, то термодинамически стабильно такое структурное состояние, которое в данных условиях соответствует более низкой свободной энергии.

#### Л и т е р а т у р а

1. Бабушкин В.И., Матвеев Г.М., Мчедлов-Петросян О.П. Термодинамика силикатов. М., 1965., 2. Киреев В.А. Курс физической химии. М., 1955., 3. Карапетьянц М.Х. Химическая термодинамика. М.-Л., 1953. 4. Ландау Л.Д. Ахиезер А.И., Лифшиц Е.М. Курс общей физики. Механика и молекулярная физика. М., 1969. 5. Третьяков Ю.Д. Точечные дефекты и свойства неорганических материалов. М., 1974. 6. Френкель Я.И. Теория твердых и жидких тел. Л.-М., 1934. 7. Свелин Р.А. Термодинамика твердого состояния (пер. с англ.). М., 1968. 8. Эйтель В. Физическая химия силикатов (пер. с англ.). М., 1962.

И.А. Конопелько, Л.В. Крюк

#### ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТЬЮ, СОСТАВОМ И ТЕМПЕРАТУРОЙ ОБЖИГА СТЕКЛОКРЕМНЕЗЕМИСТОЙ КЕРАМИКИ

Механическая прочность относится к числу важнейших свойств твердых материалов, определяющих надежность и долговечность в процессе эксплуатации. Для керамических материалов она тесно связана с монолитностью и однородностью, которые в свою очередь характеризуются степенью уплотнения и зависят от количественного фазового состава масс и температуры обжига изделий.

Табл. 1. Экспериментальные значения предела прочности при сжатии образцов ( $\times 10^5$  Н/м<sup>2</sup>)

Температура обжига, °С	Содержание стекла, в с. %											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70
650	7	10	12	14	15	17	18	20	25	30	45	60
675	28	32	40	45	50	55	60	65	70	85	100	115
700	40	60	74	95	105	120	130	135	145	155	170	190
725	70	100	130	160	185	200	225	235	245	250	270	280
750	105	160	190	240	260	300	340	357	370	381	400	412
775	140	210	255	315	360	410	459	491	520	540	565	580
800	150	230	285	345	400	450	503	538	568	585	610	625
850	160	240	310	360	420	470	535	572	585	615	630	650
825	170	250	320	380	445	510	561	598	620	635	655	670
875	180	260	325	395	455	520	577	605	625	640	665	680
900	180	255	330	400	460	520	585	622	625	650	685	690
925	175	250	300	395	455	510	570	610	620	650	680	700
950	170	225	280	355	430	500	560	600	625	655	685	705
975	155	205	270	345	410	480	540	610	630	655	690	710
1000	145	170	260	350	435	510	580	630	640	660	700	715

Знание характера зависимости механической прочности от состава и температуры обжига позволит установить условия получения высокопрочной керамики.

В данной работе изучение механической прочности стеклокремнеземистой керамики осуществлялось на образцах-цилиндриках размером  $d = h = 10$  мм, изготовленных методом полусухого прессования при давлении  $250 \cdot 10^5$  Н/см<sup>2</sup> из кварцевого песка и боя оконного стекла. Исходные материалы измельчались до удельной поверхности 3000 см<sup>2</sup>/г. Содержание стекла в массах составляло от 5 до 70%. Образцы обжигались при различной максимальной температуре (650–1000°С) в течение 30 мин. Скорость подъема температуры до максимальной составляла 5–6 град/мин.

Значения предела прочности при сжатии образцов, рассчитанные как среднее арифметическое из 10 параллельных определений, приведены в табл. 1.

Изучение предела прочности при сжатии образцов от содержания стекла и температуры обжига показало, что изменение механической прочности материала подчиняется различным закономерностям, которые разграничены значениями температуры 750–775°С и количеством стекла 35–40%. Это позволило разделить всю таблицу на следующие четыре области: I – 5–35% стекла, 650–750°С; II – 5–35% стекла, 775–1000°С; III – 40–70% стекла, 650–750°С; IV – 40–70% стекла, 775–1000°С.

Для каждой области выведены формулы взаимосвязи между пределом прочности при сжатии образцов ( $\sigma$ , Н/м<sup>2</sup>), температурой обжига и содержанием стекла (вес.%), которые приведены в табл. 2.

Табл. 2. Функциональная зависимость механической прочности стеклокремнеземистой керамики

Область	Температура обжига, °С	Содержание стекла	Формула
I	650–750	5–35	$\sigma = 0,0275 (t - 620)^2 \sqrt{\frac{C}{100-C}}$
II	775–950	5–35	$\sigma = 0,0109 (t - 620) (1150 - t) \sqrt{\frac{C}{100-C}}$
III	650–750	40–70	$\sigma = (t - 620)^2 (0,00033 \sqrt{C(100-C)} + 0,006 \sqrt{\frac{C}{100-C}})$
IV	775–950	40–70	$\sigma = (t - 620) (1150 - t) (0,000135 \sqrt{C(100-C)} + 0,00225 \sqrt{\frac{C}{100-C}})$

Следует отметить, что приведенные формулы действительны в указанных интервалах температуры обжига и содержания стекла и не могут быть использованы для других случаев. Так, при температуре обжига выше  $950^{\circ}\text{C}$  изменение механической прочности подчиняется иной функциональной зависимости.

В соответствии с вышеуказанными формулами построена диаграмма, на которой нанесены изолинии предела прочности при сжатии в системе координат "температура обжига - содержание стекла" (рис. 1).

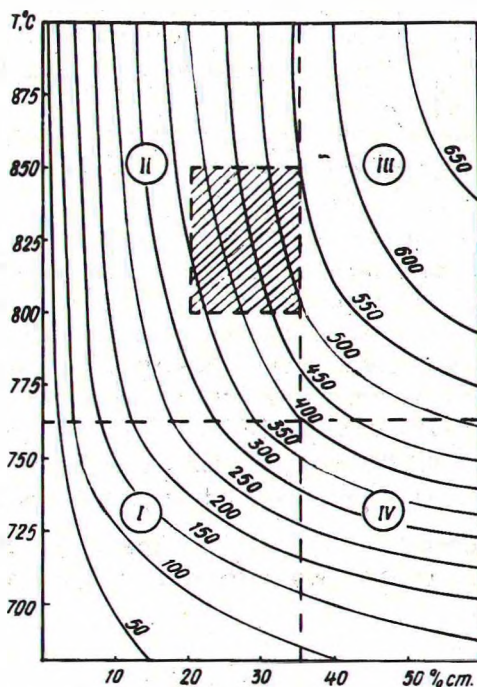


Рис. 1. Диаграмма механической прочности стеклокремнеземистой керамики в системе координат "содержание стекла-температура обжига".

Ход кривых указывает на неодинаковый характер взаимосвязи между тремя переменными величинами для разных областей диаграммы. Например, для области I характерно одинаковое влияние как содержания стекла, так и температуры обжига на прочность керамики. В области II механическая прочность стеклокремнеземистой керамики преимущественно зависит от содержания стекла, а в области IV, наоборот, наблюдается существ-

венное влияние температуры обжига. В области III влияние содержания стекла и температуры обжига на прочность керамики незначительно.

Данные различия объясняются особым характером процессов спекания исследуемой керамики, от которого зависит ее механическая прочность. Для стеклокремнеземистых материалов характерно жидкостное спекание. В отличие от традиционной керамики жидкая фаза вносится в стеклокремнеземистый материал заранее в виде тонкоизмельченного стеклянного порошка. Уплотнение и спекание черепка происходит при расплавлении стеклопорошка и зависит от таких физических свойств жидкой фазы, как вязкость и поверхностное натяжение. Содержание стеклопорошка должно быть таким, чтобы при его расплавлении обеспечивалось заполнение всех пустот между частицами кварцевого песка с образованием плотно спекшегося керамического тела.

При недостаточном количестве стеклосвязки (до 35%) кристаллические зерна кварцевого песка оказываются разобщенными, материал уплотняется и спекается недостаточно полно. Об этом говорят сравнительно невысокие значения механической прочности, особенно характерные для образцов, обожженных при пониженных температурах (до 750°С), при которых стекло проявляет слабую текучесть и недостаточную смачиваемость.

Материал уплотняется и спекается за счет непосредственного стягивания частиц под действием сил поверхностного натяжения стеклосвязки. Сближение и слияние частиц кварцевого песка возможно только при определенных значениях поверхностного натяжения и вязкости жидкой фазы. Высокая вязкость стеклосвязки тормозит процесс спекания. Однако вязкость является функцией температуры. Для исследованной температурной области обжига керамики характерно существенное изменение вязкости стекла от температуры. Этим и объясняется тот факт, что в I области механическая прочность керамики зависит как от содержания стекла, так и от температуры обжига образцов. Для области II снижение вязкости стекла при увеличении температуры обжига не приводит к заметному упрочнению образцов. В данном случае изменение прочности материала в большей степени зависит от содержания стеклосвязки. Необходимо отметить, что при значительном количестве стекла следует избегать чрезмерного снижения ее вязкости, так как это ведет к общему размягчению спекаемого материала и вызывает деформацию изделий под влиянием сил тяжести, что свойственно для III об-

ласти. В области IV, в которой также наблюдается большое содержание стекла (40–70%), деформация образцов при обжиге не наблюдается ввиду высокой вязкости стекла.

Таким образом, уплотнение образцов происходит в результате появления непосредственного контакта между частицами кварцевого песка. Этот контакт образуется за счет избыточного давления в прослойке смачивающей жидкости, вызванного силами поверхностного натяжения жидкой фазы, расположенной между твердыми частицами кварцевого песка и имеющей форму линзы. На определенном этапе процесса спекания линзы расплава с различных контактных участков постепенно смыкаются между собой, перекрывая свободные каналы системы. При этом вытеснение газовой среды (воздуха) из внутренних областей спекаемого тела к его наружной поверхности затрудняется. Одновременно появляются поры внутри участков, занятых жидкой фазой. Процесс уплотнения и упрочнения начинает лимитироваться удалением воздуха из системы и скоростью "заплыwania" образовавшихся пор. Заплывание происходит под влиянием действующего на границе воздушных пор поверхностного натяжения. Результирующая сила поверхностного натяжения направлена внутрь воздушных пор. Внутреннее давление в заплывающих порах растет в соответствии с уменьшением их объема и замедляет сжатие, сближение частиц. При наступлении равновесия между действием сил поверхностного натяжения и внутренним давлением воздуха объем воздушных пор стабилизируется). Практический интерес представляет заштрихованный участок на диаграмме, отвечающий содержанию стекла, при котором исключается деформация керамики. В этой области можно получить достаточно прочную стеклокремнеземистую керамику (до  $556 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ ) при сравнительно невысокой температуре (800–850°С) обжига и содержания стекла 20–35%.

Я.В. Шкляр

## СЛОЖНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ВАННЫХ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧАХ ПРЯМОГО НАГРЕВА

Одним из основных показателей эффективности работы ванн стекловаренных печей является тепловосприятие шихты и стекломассы. Повышение производительности печных агрегатов