



УДК 669

Поступила 16.09.2021

ФУТЕРОВКА ИНДУКЦИОННЫХ ПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ МАТЕРИАЛАМИ НА ОСНОВЕ КВАРЦИТА

М. А. ДРУЖЕВСКИЙ, ООО «Родонит», г. Санкт-Петербург, Россия, Волго-Донской пр., 1.
E-mail: mail@rodonit.spb.ru

В статье описаны основные принципы футеровки индукционных печей, показано влияние различных факторов на стойкость футеровки. Приведены особенности полиморфных превращений в кварците в процессе эксплуатации печи, особенности взаимодействия футеровки с жидким металлом.

Ключевые слова. Индукционная печь, футеровка, кварцит, спекание.

LINING OF INDUCTION MELTING FURNACES WITH QUARTZITE-BASED MATERIALS

M. A. DRUZHEVSKY, LLC "Rodonit", St. Petersburg, Russia, 1, Volgo-Donskoy ave. E-mail: mail@rodonit.spb.ru

The article describes the basic principles of lining induction furnaces. The influence of various factors on the durability of the lining is described. The features of polymorphic transformations in quartzite during the operation of the furnace, the features of the interaction of the lining with liquid metal are given.

Keywords. Induction furnace, lining, quartzite, sintering.

При загрузке металла внутрь катушки, по которой протекает переменный ток, в нем образуются индуцированные токи, вызывающие перенос энергии от катушки индуктивности к металлу. Электрическая энергия переходит в тепловую, что вызывает нагрев и расплавление металла. Использование данного принципа заложено в основу работы индукционных плавильных печей.

Индуктор изготавливается из высокопроводящей меди. Сечение витка таково, чтобы держать тепловые потери на надлежащем уровне. Для того чтобы уменьшить потери давления охлаждающей воды и не дать ее температуре достигнуть точки кипения, индукторы делают многосекционными. Индуктор должен выдерживать механические нагрузки, возникающие вследствие следующих процессов: вибрации при работе печи; нагрузке при опрокидывании печи; воздействии при установке и спекании футеровки.

Большинство индукторов имеет изоляцию. Это делается для предотвращения короткого замыкания, так как напряжение достигает высокого значения. Изоляция при работе не должна разлагаться. Материалы изоляции: лакированная лента из стекловолокна, пластмассы, эпоксидной резины и др.

Для защиты индуктора и образования гладкой поверхности, как правило, наносится тонкий слой обмазки на основе мелкой фракции кварцитов со связующей составляющей или огнеупорных бетонов.

Для защиты от повреждения расплавленным металлом и с целью образования однородной поверхности, по которой тигель может скользить при циклическом нагревании и охлаждении, а также при выдавливании отработанной футеровки используется листовая миканит.

Основной защитой индуктора является монолитная футеровка из материала с высокой огнеупорностью и относительно низкой теплоемкостью. Футеровки состоят из зернистого материала со специально подобранным распределением зерен по размеру. Это обеспечивает относительно простую набивку до состояния сплошного тела с однородной плотностью в пространстве между стальным шаблоном и слоем миканита.

Футеровка подвергается воздействию ряда разрушающих факторов:

- Термические: высокая температура жидкого металла, резкие колебания температуры при нагреве и охлаждении, особенно при загрузке холодной шихты.

- Механические: высокое давление жидкого металла, воздействие твердой шихты при загрузке, эрозионное воздействие движущегося под воздействием электромагнитных сил металла, сжимающие и растягивающие усилия при повороте печи.

- Химические: происходят химические реакции между расплавленным металлом, шлаком и материалом футеровки.

Исходя из сказанного выше, надо стремиться подобрать такой огнеупорный материал для футеровки и уплотнить его таким образом, чтобы после спекания футеровка обеспечивала следующие характеристики: устойчивость к воздействию жидкого металла при его рабочей температуре и при случайной ее повышении; выдержку рабочих температурных циклов и повторное расплавление металла после затвердевания; достаточную механическую прочность в холодном состоянии и при рабочей температуре плавки без значительной потери механических свойств; удаляемость футеровки без повреждения индуктора после окончания срока службы; большой температурный градиент между расплавом и индуктором, так как металл в случае его проникновения в футеровку должен застыть раньше, чем будет поврежден индуктор; стабильность размеров в процессе эксплуатации печи; сопротивляемость эрозии и коррозии.

Кремнезем является материалом, который при определенных условиях может отвечать приведенным требованиям. Это обстоятельство определяется, прежде всего, его полиморфизмом, т.е. модификация и объем кремнезема изменяются в зависимости от температуры.

Полиморфные превращения приведены в таблице:

Т а б л и ц а

Модификация	Температура превращений, °С	Объемное изменение, %
β -кварц \rightarrow α -кварц	573	+0,82
α -кварц \rightarrow α -тридимит	870	+16,0
α -кварц \rightarrow α -кристобалит	1050	+15,4
α -тридимит \rightarrow α -кристобалит	1470	-0,6
α -кварц \rightarrow кремнеземистое стекло	1728	+15,6
γ -тридимит \rightarrow β -тридимит	95–40	+0,2
β -тридимит \rightarrow α -тридимит	130–100	+0,2
β -кристобалит \rightarrow α -кристобалит	270	+3,7

Диоксид кремния имеет несколько полиморфных модификаций. При нормальных условиях диоксид кремния чаще всего находится в полиморфной модификации α -кварца, которая при температуре выше 573 °С обратимо переходит в β -кварц. Переход β -кварца в α -кварц происходит с увеличением объема (рис. 1), что позволяет компенсировать усадку футеровки при спекании и создать в определенном слое футеровки расширяющуюся зону (рис. 2).

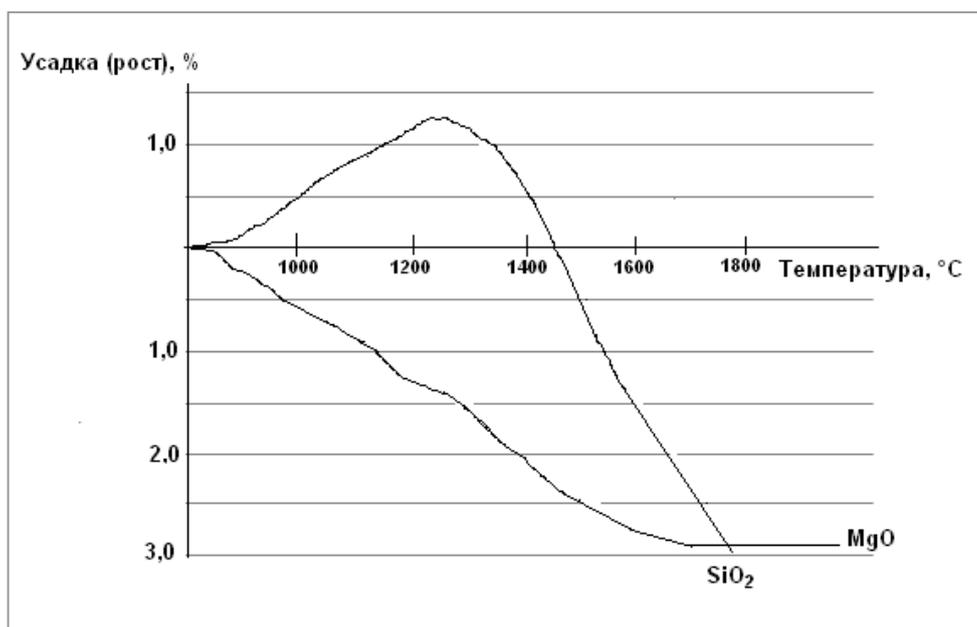


Рис. 1.

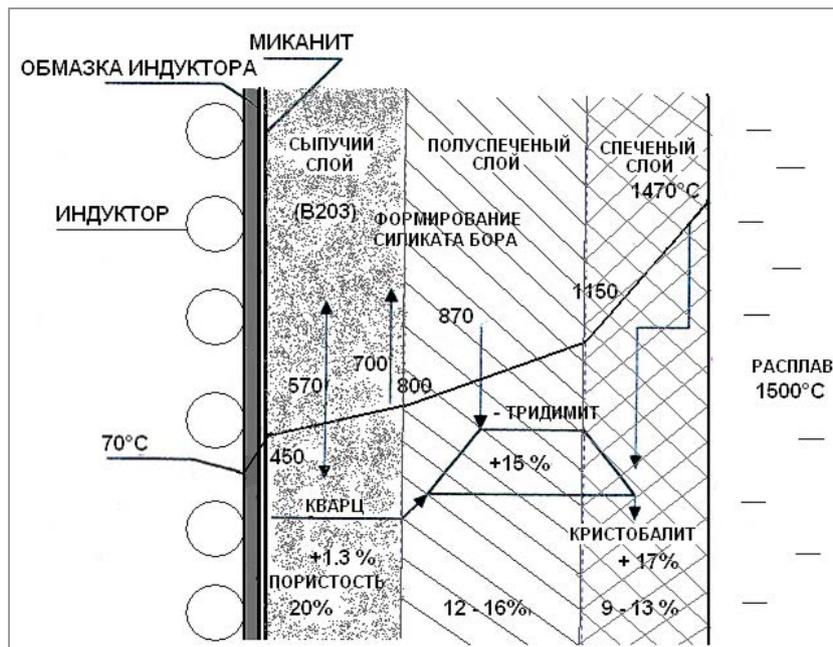


Рис. 2.

Обладая большим по сравнению с другими огнеупорами линейным расширением до температуры 600 °С, при дальнейшем нагревании кремнезем остается объемно-постоянным. Это обстоятельство уменьшает опасность образования трещин при резких колебаниях температуры в футеровке [1] (рис. 3).

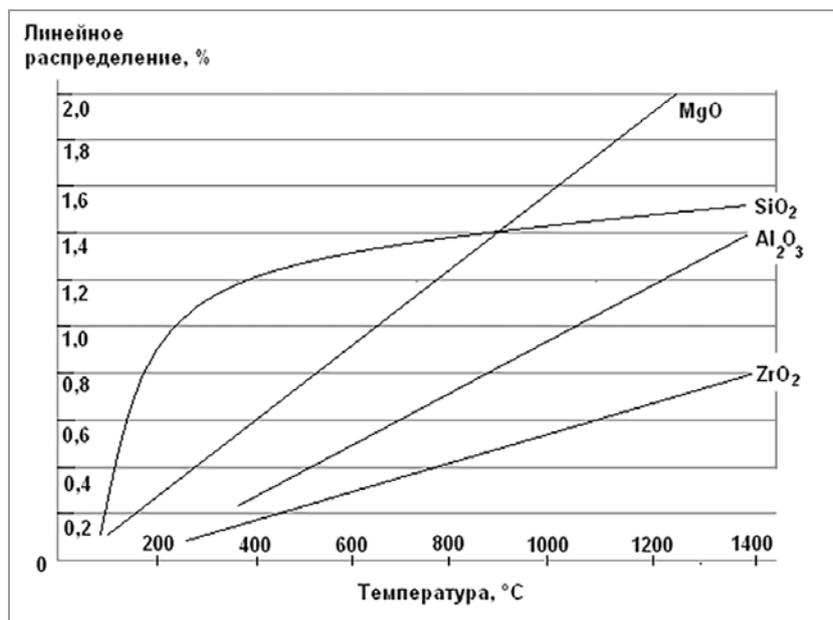


Рис. 3

При дальнейшем повышении температуры кварц переходит в тридимит и кристобалит. Эти полиморфные модификации устойчивы при высоких температурах и низких давлениях. Основной структурной единицей кристаллических модификаций кремнезема является кремнекислородный тетраэдр. У разных модификаций кремнезема взаимное расположение тетраэдров различное, что вызывает различия в объемных и прочностных характеристиках модификаций кремнезема. Наибольшей прочностью обладает решетка тридимита, поэтому его образование связано со значительным упрочнением кремнеземистой массы. Тридимит по сравнению с другими модификациями кремнезема обладает наименьшим расширением и наилучшей термостойкостью.

Для успешной работы футеровки необходимо обеспечить три зоны различных состояний одного и того же материала на расстоянии толщины футеровки между расплавленным металлом и индуктором:

1. Монолитная спеченная, расположенная в непосредственной близости от расплавленного металла, которая получается за счет спекания порошкообразного огнеупорного материала после необходимого температурного цикла. Порошок связывается и образуется стеклоподобный монолит, который состоит преимущественно из зерен кристобалита, соединенных стекловидной фазой – боросиликатом. Материал в этой зоне обладает высокой механической прочностью. Низкая пористость способствует противостоянию металлу и шлаку за счет малой величины площади контакта.

2. Промежуточная. В ней преимущественно кварцевые зерна связаны стекловидным телом.

3. Буферная зона, представляющая собой сыпучий материал, предотвращающий проникновение металла к индуктору. Находится на холодной стороне стенки футеровки. Состоит из несвязанных кварцевых зерен. Пористость этой зоны максимальная. Наличие порошкообразной зоны положительно с точки зрения возможности застывания и, следовательно, остановки металла, проникшего через трещину в двух предыдущих зонах. Также этот слой хорошо поглощает силы, возникающие при термических деформациях.

Необходимо заметить, что толщины этих зон не постоянны во времени. По мере естественного разъедания футеровки в процессе эксплуатации печи эти зоны должны пропорционально уменьшаться по толщине, избегая ситуации, при которой одна из зон исчезнет.

Температура спекания кварцевых футеровок может корректироваться путем добавки агента спекания. Его выбор и количество добавки очень важны для нормальной работы футеровки. В качестве агента спекания для сухих кварцевых смесей используются борный ангидрид B_2O_3 (безводный материал) с температурой плавления $450\text{ }^\circ\text{C}$; борная кислота H_3BO_3 с температурой начала плавления $171\text{ }^\circ\text{C}$.

При использовании борной кислоты сначала образуется расплав $HBO_2 + H_2O$, а дальнейшее нагревание ведет к образованию B_2O_3 . Теоретический состав: $56,3\%$ B_2O_3 (активное связующее); $43,7\%$ H_2O ($24,3$ моля воды испаряется после $171\text{ }^\circ\text{C}$).

Один моль воды эквивалентен $22,3$ л пара, это на практике означает, что из 1 кг H_3BO_3 образуется 544 л водяного пара, а из 1 т сухих кварцевых смесей, содержащей $1,4\%$ H_3BO_3 (это эквивалентно $0,8\%$ B_2O_3), выделяется $7,6$ м³ водяного пара, проходящего через вновь уложенную футеровку.

Следовательно, использование в качестве связующего борной кислоты создает большой риск растрескивания футеровки. Срок службы футеровки зависит от тщательности установки и условий эксплуатации.

Часто плохая работа футеровки обусловлена низким качеством работ по установке. При транспортировке материал, упакованный в мешки, распределяется по фракциям неравномерно.

В местах, где находится преимущественно крупный материал, футеровка имеет высокую пористость. Следовательно, возникает опасность проникновения металла и шлака.

Там, где футеровка состоит из мелких частиц, концентрация образует избыток боросиликатного стекла, которое легко диффундирует в металл и шлак.

Плохое качество уплотнения также является причиной плохой работы футеровки.

Из-за чрезмерной вибрации индуктора и плохой подготовки печи могут образовываться пустоты в области, прилегающей к индуктору за счет вытекания мелких частиц. Все возможные каналы утечки материала должны быть уплотнены минеральным волокном.

Можно выделить несколько характерных случаев проникновения металла в футеровку.

- Быстрый нагрев при спекании. Давление расплавленного металла начинает действовать до завершения образования связки.
- Недостаточное уплотнение при укладке футеровки.
- Неправильное фракционирование смеси, большое содержание крупных частиц.
- Недостаточно прочное связывание.
- Во время спекания футеровки температура металла мала.

Если футеровка уложена правильно, то необходимо поддерживать температуру металла на необходимом уровне.

Термодинамическую вероятность протекания химической реакции между кремнеземом SiO_2 и элементами, входящими в состав жидкого металла и шлака, можно оценить по величине термодинамического (изобарного) потенциала образования оксидов (средства к кислороду):

Ряд выглядит следующим образом:



Металлы, расположенные справа от SiO_2 способны отбирать кислород у оксида кремния, восстанавливая его по реакции:



При высоких температурах окисление кремния замедляется и идет реакция, при которой углерод из расплава восстанавливает кремний из кварца футеровки. При этом выделяется газообразный оксид углерода:



Такой эффект проявляется в образовании пузырьков около стенок. Реакция протекает со скоростью, возрастающей с ростом температуры. Следовательно, необходимо держать температуру как можно более низкой.

Вне зависимости от последней реакции существует вторая причина поддержания температуры на возможно низком уровне: вредное воздействие шлака усиливается с ростом температуры.

При отсутствии надлежащего контроля за работой печи металл может быть перегрет до температур, превышающих стойкость большинства футеровочных материалов. Особенно опасен перегрев при неполном заполнении печи, так как при равном потреблении энергии скорость подъема температуры выше в незаполненных печах.

Часто встречающаяся проблема – это не эрозия футеровки или преждевременный ее выход из строя, а отложение шлака. Отложения шлака значительно увеличивают толщину стенки, что проявляется в изменении электрических параметров, приводящих к снижению полезной мощности.

Легкость удаления шлака зависит от того, тугоплавкий он или легкоплавкий.

Отложение легкоплавкого шлака обычно образуется в верхней части тигля из-за низкой рабочей температуры. При низкой температуре существует тенденция окисления металлического кремния и образования высококремнистого шлака, который не может вызвать значительной эрозии футеровки:



В большинстве случаев легкоплавкий шлак содержит большое количество оксидов марганца и железа и легко удаляется при таком подъеме уровня металла, когда отложение находится под ним. Затем температура поднимается до 1530–1550 °С. Шлак постепенно расплавляется и всплывает на поверхность, откуда он может быть собран.

Тугоплавкие отложения не могут быть удалены этим же способом и некоторые предприятия используют флюсы: соду и плавиновый шпат. Флюсы для удаления отложений должны быть использованы с особой осторожностью, так как участок работоспособной футеровки может быть удален при попытке удаления отложения. Если есть намерение использования флюса, то желательно использовать его в малых количествах не для удаления отложения, а для предотвращения возможности его образования. Однако целесообразно выявить причину шлакообразования и устранять ее.

Наиболее часто встречающаяся причина появления кремния – это загрузка отходов литейного производства с остатками формовочного песка. Когда лом плавится, то зерна песка всплывают на поверхность металла и двигаются к стенкам за счет электромагнитных потоков в расплаве. Эти зерна имеют высокое содержание кварца и, следовательно, огнеупорность, близкую, но немного меньшую, чем материал футеровки. Снижение огнеупорности происходит за счет наличия некоторого количества печного шлака. Проблемы могут быть выявлены при исследовании работы печи. Если есть образец отложения, то при химическом анализе обнаружено высокое содержание кремния, а при наблюдении под микроскопом видны зерна кварца.

Шлак, образующийся при плавке лома с высоким содержанием кремния (трансформаторное железо, пружинная сталь), также имеет высокое содержание кремния, но отсутствуют включения кварца. Проблема может быть выявлена при анализе лома, загружаемого в печь.

Шлак также может отлагаться из-за образования в печи муллита. Муллит является огнеупорным материалом и имеет температуру плавления примерно на 100 °С выше, чем температура плавления кварцевой футеровки. Он образуется в соответствии с уравнением реакции:



Оксид алюминия может попадать в печь следующими путями: с ломом, содержащим алюминий, со стальным ломом или даже с ферросилицием, имеющим высокое содержание алюминия.

Основная причина отложения шлака обусловлена использованием сильно окисленных материалов, особенно стружки, которая окисляется при открытом хранении. При низких температурах около 1400 °С оксид железа восстанавливается кремнием до металлического железа и оксида кремния:



Это тот оксид кремния, который может накапливаться и образовывать отложения при плавке окисленных материалов при низкой температуре. При высокой температуре оксид железа будет реагировать с кварцем из шлака или футеровки с образованием фаялита, который имеет очень низкую температуру плавления и будет оказывать вредное воздействие на футеровку:



Также кварц больше не образуется в результате низкотемпературной реакции восстановления, так как имеющийся углерод восстанавливает оксид железа:



Однако даже с учетом вышесказанного кислая футеровка имеет ряд преимуществ. Прежде всего, материал в природе находится в относительно чистом виде и не требует больших затрат на переработку. Цена его более чем конкурентоспособная. Кварц имеет высокую стойкость к тепловому удару.

Материал для футеровки индукционных печей представляет собой смесь из огнеупорного кварцита и соединения бора. Гранулометрический состав кварцита обеспечивает максимизацию насыпной плотности и оптимизацию параметров процесса уплотнения. За счет высокой степени чистоты (Al_2O_3 –0,7%, Fe_2O_3 –0,07%), обеспечиваемой очисткой флотацией, достигается огнеупорность, близкая к теоретической величине кварца. Количество добавляемого оксида бора или борной кислоты соответствует рабочей температуре печи.