



**Критерии выбора анкеров для  
монолитных футеровок**

**Глава 1  
МАТЕРИАЛ**





## Предисловие

Уважаемые дамы и господа,

Мы рады предложить вам настоящие рекомендации по критериям выбора анкеров для монолитных футеровок. Данный документ составлен рабочей группой компании по системам анкерования для монолитных конструктивных элементов.

В пяти главах мы рассматриваем отдельные критерии выбора анкеров, начиная с описания материалов, используемых для огнеупорных конструкций, типов анкеров и плотности анкерования. Далее описывается процесс производства анкеров их монтажа или фиксации.

Цель последующих рекомендаций - помочь нашим клиентам в выборе анкеров и одновременно дать возможность представить нашим заказчикам, насколько интенсивно конструктора нашей компании занимаются новыми разработками.

Основная причина основания рабочей группы  
и базовый критерий для разработки этого документа

**- снижение числа аварий вследствие выхода футеровок из строя -**

## ГЛАВА 1 - МАТЕРИАЛ

### 1. Материал

#### 1.1 Общие положения

#### 1.2 Термические нагрузки

#### 1.3 Механические нагрузки

#### 1.4 Коррозионные нагрузки



## 1. Материал

### 1.1 Общие положения

Для анкерки монолитных огнеупорных футеровок на стальном основании используются соответствующие элементы из жаропрочных сталей, при этом выбор материала должен соответствовать условиям эксплуатации. Различают хром-содержащие, ферритные, хром-никель-содержащие и аустенитные сплавы. Кроме того, при высоких требованиях применяются также сплавы на основе никеля, в которых железо содержится только в небольших количествах.

**Ферритная сталь** обладает следующими важными свойствами:

- нечувствительна к газам с содержанием серы
- условная пригодность к свариванию
- низкая устойчивость к высоким температурам

**Аустенитная сталь** обладает следующими основными свойствами:

- чувствительна к газам с содержанием серы
- хорошая свариваемость
- высокая устойчивость к высоким температурам

Условия эксплуатации характеризуются следующим:

- термические нагрузки
- механические нагрузки
- коррозионные нагрузки

Далее описываются эти условия эксплуатации и даются рекомендации по выбору материалов.

### 1.2 Термические нагрузки

Для производства анкеров обычно используются термостойкие материалы. Термостойкими, жаропрочными или огнеупорными, называются такие материалы, которые отличаются особо высокой стойкостью при воздействии горячих газов и продуктов сгорания с температурой выше 550 °С. При рабочей температуре выше 550 °С в этих марках стали образуется прочный слой оксидов, который защищает от последующего воздействия, например, горячих газов, расплавов солей и металлов или галогенов.

Важный параметр, определяющий температуру использования стали - это стойкость против образования окалины. Сталь считается стойкой против образования окалины при температуре  $t$ , если количество металла, образовавшее окалину при этой температуре, не превышает 1 г/м<sup>2</sup> - час, а при температуре  $t + 50$  °С - 2 г/м<sup>2</sup> в течение 120 часов с четырьмя промежуточными охлаждениями.



При использовании в воздушной атмосфере или в полностью выгоревших обезсерных топочных газах максимальная температура использования может быть равна температуре, при которой наблюдается указанная стойкость против образования окалины. На поверхности материала образуется прочно прилегающий слой оксидов (защитный слой), который предотвращает окисление глубже расположенных слоев. Здесь основными факторами, определяющими потерю металла в результате коррозии, являются исключительно скорость роста слоя оксидов и его сцепление с поверхностью материала.

Выше 1000 °С защитные слои оксида хрома начинают испаряться и откалываться, поэтому для более высоких температур, примерно до 1200 °С, к сплаву добавляется алюминий, для образования защитного слоя из оксида алюминия (например сплав Inconel 601 (2.4851)). Так как на практике обычно встречается комбинация механических, химических и термических нагрузок, стойкость против образования окалины не всегда определяет фактическую температуру использования.

В ферритных и аустенитных марках стали с высоким содержанием хрома (более 13 %), в температурном диапазоне 550 - 900 °С может образовываться сигма-фаза. Это хрупкое соединение металлов железа и хрома, которое хотя и не создает при температуре эксплуатации недопустимого изменения вязкости, однако после охлаждения до комнатной температуры может привести к охрупчиванию материала. Кремний способствует образованию сигма-фаз, никель и алюминий препятствуют ему. Сигма-фаза может быть снова разрушена прокаливанием при температурах более 900 °С.

## 1.3 Механические нагрузки

Наряду с термическими нагрузками, на материал анкеров действуют также механические нагрузки под тяжестью закрепленного материала или вследствие стесненной деформации при расширении материалов

Так как жаропрочные марки стали используются, в основном, при высоких температурах, когда материал при нагрузке „ползет“, при расчетах необходимо учитывать значения долговременной прочности. Долговременная прочность описывает механическое напряжение, которое приводит к разрыву металлического материала при определенном времени воздействия и постоянной температуре. Долговременная прочность Rm 10000 часов / 600 °С, равная 120 МПа, означает следующее: в испытаниях на длительную прочность материал выдерживает при постоянной температуре 600 °С в течение 10000 часов постоянную нагрузку 120 МПа, прежде чем образец ломается.

При расчетах несущих конструкций необходимо рассчитать с учетом возникающих нагрузок, несущие сечения с учетом их долговременной прочности. С теми сечениями анкеров и плотностью анкеров, которые обычно применяются в строительстве огнеупорных конструкций, механическая нагрузка на анкер, отнесенная к исходному сечению, не является ограничивающим фактором.



Однако следует иметь в виду, что при коррозионном воздействии происходит сильное ослабление несущего сечения, что приводит к соответствующему нарастанию напряжений в элементе конструкции. Если деталь имеет в сечении угловатую форму (анкера из плоской стали), то из-за большей площади поверхности, отнесенной к площади сечения, деталь подвергается более сильному коррозионному разрушению, чем детали круглого сечения (анкера из круглой стали).

## 1.4 Коррозионные нагрузки

Наряду с высокотемпературной коррозией на воздухе, окислением, при строительстве промышленных печей, возникают следующие виды коррозии:

- восстановительная среда (например, водород)
- азотирующая среда (азот)
- карбонирующая среда (монооксид углерода)
- сульфидирующая, окисляющая среда (SO<sub>2</sub>)
- хлорирующая среда (Cl<sub>2</sub>/HCl)

В случае восстановительной среды ожидается образование карбидов. В атмосфере азота, смесей азота/водорода или аммиака с металлическими материалами может происходить азотирование или нитрирование. После того, как атомный азот проникает в вещество после разрушения защитного слоя оксидов, он приводит к образованию внутренних нитридов. Если нитрированный слой захватывает значительный участок сечения материала, это может приводить к охрупчиванию материала или снижению его прочности.

К охрупчиванию ведет также карбонирующая среда в результате образования карбида. Проблему представляет высокое содержание углерода в сочетании с низким содержанием кислорода. Снижается образование защитного покровного слоя оксидов, кроме того, происходит восстановление уже имеющегося слоя оксидов. Повреждение материала происходит вследствие образования внутренних карбидов, которые приводят к уменьшению ударной вязкости, снижению точки плавления до очень низких значений и, в особенности для аустенитной стали, к превращению аустенита в феррит из-за обеднения хрома.

В среде, содержащей серу, слой оксидов не обеспечивает полной защиты. Как слой оксида хрома, так и слой оксида алюминия не является полностью непроницаемым. В контакте с серой и соединениями серы, например, диоксидом серы и сероводородом, образуются сульфиды металлов, которые, как правило, приводят к тяжелым повреждениям материалов. Причиной этого является образование пористых слоев окалина, которые не обеспечивают защиту, так как сульфиды металлов, в отличие от соответствующих оксидов металлов, имеют в 2-3 раза больший объем, и связанные с этим напряжения приводят к сильному отслаиванию. Особенно вредной является восстановительная атмосфера с содержанием серы.



Сплавы с содержанием никеля могут разрушаться при температурах выше точки эвтектики никеля, сульфида никеля, которая соответствует примерно 640 °С. Поэтому в случае сульфидирующей среды следует выбирать материалы, по возможности, с низким содержанием никеля (макс. 13 %) и высоким содержанием хрома (мин. 20 %).

В хлорирующей среде происходит сильное разъедание с образованием соответствующих хлоридов металлов. В частности, железо очень быстро превращается в хлорид железа, который обладает очень высоким давлением пара. Там, где вероятна коррозия галогенами, используются материалы с высоким содержанием никеля, так как галогеновые соединения никеля обладают меньшим давлением пара по сравнению с галогеновыми соединениями других металлов. Устойчивость к коррозии в среде водорода или хлороводорода без содержания кислорода повышается при температурах 650 - 850 °С с возрастанием доли никеля, а также с возрастанием доли молибдена в сплавах.

Были проведены широкие исследования коррозии, широко распространенных марок стали: AISI 309 (1.4828), AISI 310 (1.4845), Сплав 330 (1.4862 и 1.4864), а также базового никелевого сплава Inconel 601(2.4851). По результатам испытаний сформулированы рекомендации по материалам для сульфидирующей и хлорирующей среды, которые приведены в таблицах 1.4.1 и 1.4.2.

В случае среды с содержанием водорода и нитрирующей среды на пробах не проявились изменения, вызванные внешними воздействиями. Опасения, что под действием водорода наступит охрупчивание материалов, в опытах не подтвердились. Точно так же не были подтверждены нитритные выделения после хранения в восстановительной нитрирующей среде при 700 и 1000 °С. В таблицах содержатся соответствующие рекомендации по материалам для использования жаропрочной стали в сульфидирующей и хлорирующей среде при 700 °С и 1000 °С. Вредные газы для сульфидирующей среды состояли из 2500 промилле от объема SO<sub>2</sub>, остаток - аргон.

Сплав	700 °С	1000 °С
AISI 309 (1.4828)	Рекомендуется с небольшими ограничениями	Условно рекомендуется
AISI 310 (1.4845)	Условно рекомендуется	Условно рекомендуется
Сплав 330 (1.4862)	Рекомендуется	Условно рекомендуется
Сплав 330 (1.4864)	Рекомендуется с небольшими ограничениями	Рекомендуется
Inconel 601(2.4851)	Не рекомендуется	Не рекомендуется

**Таблица 1.4.1:** оценка материалов в среде с содержанием SO<sub>2</sub>.



Вредные газы для хлорирующей среды состояли из 1000 промилле от объема Cl<sub>2</sub>, остаток - аргон.

Сплав	700 °С	1000 °С
AISI 309 (1.4828)	Рекомендуется с небольшими ограничениями	Условно рекомендуется
AISI 310 (1.4845)	Условно рекомендуется	Условно рекомендуется
Сплав 330 (1.4862)	Рекомендуется	Условно рекомендуется
Сплав 330 (1.4864)	Рекомендуется с небольшими ограничениями	Рекомендуется
Inconel 601(2.4851)	Не рекомендуется	Не рекомендуется

**Таблица 1.4.2:** оценка материалов в среде с содержанием Cl<sub>2</sub>.

В сульфидирующей среде очень неблагоприятны высокое содержания никеля, вследствие склонности к формированию эвтектики. Это подтверждают также результаты проведенных опытов на коррозию. Хром является тем элементом, который защищает материалы, он образует стабильные соединения, как с кислородом, так и с серой и может образовывать толстые слои. Базовый никелевый сплав Inconel 601(2.4851) показал себя при исследовании хуже всего. Образовался толстый покровный слой в результате коррозии, был обнаружен эвтектический сплав с низкой температурой плавления Ni-Ni<sub>3</sub>S.

В атмосфере с содержанием хлора материал должен содержать как можно меньше железа, так как хлориды железа начинают испаряться уже при температуре чуть выше 100 °С. В отличие от них, хлориды никеля и хрома испаряются при гораздо более высоких температурах.

В соответствии с этим наиболее стойкими в потоке газа с содержанием хлора являются материалы, начиная с базового никелевого сплава и до наименее легированных базовых сплавов.

Далее, проводились долговременные испытания высокотемпературной коррозии в хлорирующей и сульфидирующей среде (смешанная среда). Наряду с приведенными ранее материалами AISI 309 (1.4828), AISI 310 (1.4845), Сплав 330 (1.4862 и 1.4864) и Inconel 601(2.4851) - исследовались также сплавы 253MA (1.4893) и базовые никелевые сплавы Inconel 602 (2.4633) и Inconel 625 (2.4856) в течение 9000 часов с циклическим профилем температуры. В таблице 1.4.3 приведены и обобщены результаты этих долговременных испытаний жаропрочных железных и никелевых базовых сплавов в сульфидирующей и хлорирующей среде.

Вредный газ для этих долговременных испытаний имел следующий состав:

хлороводород: 2,5 г/Нм<sup>3</sup>

диоксид серы: 1,3 г/Нм<sup>3</sup>

кислород: 9%

азот: остаток



Сплав	Результат / рекомендации
AISI 309 (1.4828)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Через 9000 часов нет явлений обеднения по краям</li> <li>• Выделения, равномерно распределенные по всей структуре</li> <li>• Максимальная наблюдавшаяся твердость через 6000 часов при 700 °С</li> <li>• <b>Рекомендуется для обеих температур</b></li> </ul>
AISI 310 (1.4845)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Сильное выделение сигма-фазы</li> <li>• При 1000 °С возникает внутренняя зона обеднения</li> <li>• Сильное охрупчивание при обеих температурах выдерживания</li> <li>• <b>Рекомендуется для обеих температур</b></li> </ul>
Сплав 330 (1.4862)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Выделения сигма-фаз при 1000 °С</li> <li>• Большая зона внутренней коррозии при 1000 °С</li> <li>• <b>Рекомендуется с ограничениями для обеих температур</b></li> </ul>
253MA (1.4893)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Самые плохие значения для исследованных сортов стали</li> <li>• Значительно больше выделений, чем для сплава AISI 309 (1.4828)</li> <li>• <b>Рекомендуется для 700 °С, для 1000 °С рекомендуется с большими ограничениями</b></li> </ul>
Inconel 601(2.4851)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• При 1000 °С уже через 3000 часов полное покрытие коррозией</li> <li>• При 700 °С равномерно распределенные выделения по всей структуре</li> <li>• <b>Рекомендуется для 700 °С, для 1000 °С не рекомендуется</b></li> </ul>
Inconel 602 (2.4633)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Через 9000 часов образование явлений обеднения по краям</li> <li>• Равномерно распределенные выделения по всей структуре через 9000 часов при 1000 °С</li> <li>• <b>Очень хорошие показатели коррозии среди базовых никелевых сплавов, Рекомендуется для обеих температур</b></li> </ul>
Inconel 625 (2.4856)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Через 6000 часов при 1000 °С сильная внутренняя коррозия и выделения вторичных фаз по всему сечению</li> <li>• Из-за высокого содержания огнеупорных металлов сильная склонность к образованию внутриметаллических фаз</li> <li>• <b>Рекомендуется с ограничениями для обеих температур</b></li> </ul>

**Таблица 1.4.3:** результаты долговременных испытаний.

Результаты таблицы 1.4.3 следует трактовать исключительно в связи с лабораторными условиями и на их основе. Поэтому следует предварительно проверять возможность переноса на практические условия использования в каждом отдельном случае. Результаты испытаний подтвердили, что устойчивость материала к высокотемпературной коррозии очень сильно зависит от основного вида среды.