

К. т. н. **И. И. Лапаев**<sup>1</sup> (✉), **В. В. Сорокин**<sup>2</sup>, **С. Е. Голоскин**<sup>1</sup>, **А. В. Орлов**<sup>3</sup><sup>1</sup> ООО «Объединенная Компания РУСАЛ

Инженерно-технологический центр», г. Красноярск, Россия

<sup>2</sup> ЗАО «РУСАЛ Глобал Менеджмент Б. В.», Москва, Россия<sup>3</sup> НПФ ООО «Алитер-Акси», Санкт-Петербург, Россия

УДК 666.76:66.041.57.043.1]:665.777.4

## О ФУТЕРОВКЕ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ПРОКАЛИВАНИЯ НЕФТЯНОГО КОКСА

Даны краткая характеристика технологического процесса и конструкции вращающихся печей для прокаливания нефтяного кокса при производстве прокаленного кокса марок КЭП-1 и КЭП-2, а также требования к футеровке отдельных зон этих печей. Показаны особенности и основные способы укладки огнеупоров в футеровке вращающихся печей, включая зарубежные. Описан рациональный вариант футеровки вращающихся печей диаметром 3 и длиной 45 м. Предложены конструкция и современные материалы для футеровки прокалочной печи при производстве нефтяного прокаленного кокса марки КЭП-2.

**Ключевые слова:** футеровка вращающихся прокалочных печей, нефтяной прокаленный кокс, огнеупоры, система подачи третичного воздуха.

**Р**аботоспособность и срок работы печей прокаливания кокса без замены футеровки является одной из важнейших характеристик установки прокаливания. Любое нарушение футеровки, приводящее к остановке вращающейся печи прокаливания нефтяного кокса для ее ремонта, приводит к значительным финансовым потерям [1]. Стоимость прокаленного нефтяного кокса на рынке до 290 \$/т, поэтому для футеровки прокалочных печей целесообразно выбирать более качественные и надежные огнеупорные материалы [2]. Кроме того, выбор футеровочных материалов и конструкции футеровки зависит от особенностей протекания технологического процесса прокаливания нефтяного кокса.

Цель процесса прокаливания нефтяного кокса для производства анодной массы и электродов — удаление из него влаги, летучих веществ и улучшение физико-химических свойств. Прокаливание осуществляется в трубчатых вращающихся печах разных типоразмеров: диаметром 3 и длиной 45 м, диаметром 3,5 и длиной 60 м и др. Прокалочная печь представляет собой сварной цилиндр из листовой стали. Корпус печи оснащен тремя несущими бандажами из стального литья и венцовой шестерней. Вращение корпуса печи осуществляется через зубчатую пару от главного и вспомогательного приводов. В раз-

грузочной (горячей) головке печи располагаются две воздухоохлаждаемые фурмы для подачи вторичного и первичного воздуха. В фурме первичного воздуха располагается также форсунка подачи топлива для розжига и поддержания температурного режима печи. Со стороны выгрузки материала во избежание сгорания конструкции обрез барабана печи снабжен внешним водяным охлаждением. Эвакуация отходящих газов из печи осуществляется через заднюю (холодную) головку печи. Охлаждение прокаленного кокса происходит в холодильнике барабанного типа, орошаемом водой. Производительность печи 14–17 т/ч по сырому коксу (для печей диаметром 3 и длиной 45 м) в зависимости от вида прокаливаемого кокса.

Термообработку кокса проводят в противотоке материала и газового потока, который образуется в результате сгорания топлива, части летучих компонентов (веществ), выделяющихся из прокаливаемого кокса ( $H_2$ , метан, CO и др.) и углерода самого кокса. Для обеспечения процесса сгорания топлива и части выделившихся из кокса летучих с помощью вентиляторов осуществляется организованная подача в печь первичного и вторичного воздуха. В последнее время получила распространение технология прокаливания нефтяного кокса с использованием системы подачи в печи и третичного воздуха.

Прокаливание сырого нефтяного кокса осуществляется при следующем режиме работы печи: температура прокаливания кокса от 1250–1280 (КЭП-1) до 1330 °С (КЭП-2), температура отходящих газов 800–950 °С (КЭП-2), разрежение в печи 40–80 Па. При этом выбранный



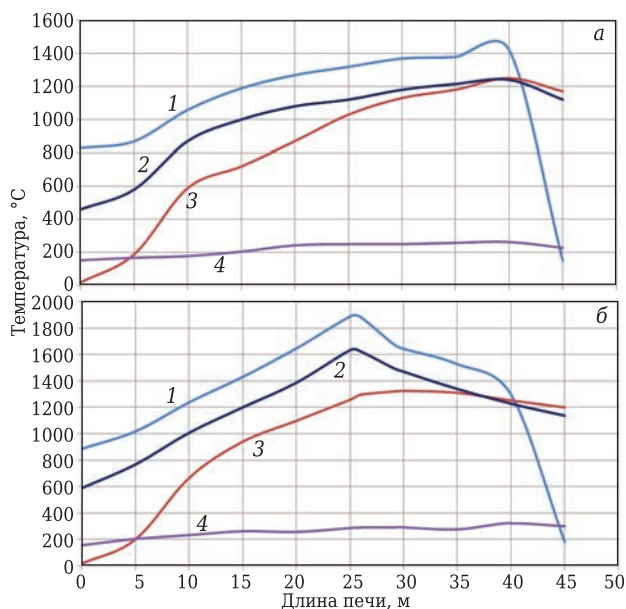
И. И. Лапаев

E-mail: Igor.Lapaev@rusal.com

режим должен обеспечить качество прокаленного кокса — истинную плотность 2,01–2,05 г/см<sup>3</sup> (КЭП-1) и 2,06–2,09 г/см<sup>3</sup> (КЭП-2).

Еще одним моментом, отличающим производство прокаленного кокса марок КЭП-1 и КЭП-2, как правило, является применение технологии с использованием подачи в печь третичного воздуха [3]. Для этого на барабане печи монтируется вентилятор(ы) и от него по воздуховоду воздух через воздушные фурмы подается в необходимую часть барабана печи. При этом большая часть летучих компонентов, выделившихся из нефтяного кокса при его прокаливании, сгорает внутри печи, повышая эффективность процесса. Таким образом, требования к огнеупорным материалам, из которых выполняется футеровка вращающихся печей для получения прокаленного кокса марок КЭП-1 и КЭП-2, и их номенклатура существенно различаются из-за разных температурных режимов протекания процесса прокаливания (рис. 1), а также конструкции барабана печи. Футеровка печи не только служит защитой металла корпуса от воздействия высоких температур (температура корпуса и других металлических несущих элементов печи не должна превышать 350 °С [2] — при более высокой температуре в металле возникают большие напряжения, а механическая прочность снижается), но и участвует в тепловой работе печи, а также снижает тепловые потери.

Печь с учетом требований к футеровке может быть условно разделена на отдельные тер-



**Рис. 1.** Распределение температур по длине вращающейся печи диаметром 3 и длиной 45 м при производстве нефтяного прокаленного кокса марок КЭП-1 (а) и КЭП-2 с использованием подачи в печь третичного воздуха (б, 4 воздушные фурмы располагаются на 29–33,5 м печи): 1 — температура газа; 2 — температура футеровки; 3 — температура кокса; 4 — температура корпуса печи

мические зоны. Практика эксплуатации футеровки прокалочных печей показывает, что основными причинами ее разрушения являются не химические факторы, а механические и термические. Разрушение футеровки происходит также вследствие динамических нагрузок, особенно в зоне холодного обреза печи, в которой наблюдаются влага непрерывно загружаемого сырого кокса и частые колебания температуры. На участке загрузки кокса износ футеровки усиливается вследствие ударно-истирающего воздействия кусков (до 75 мм) загружаемого кокса.

Особенно тяжелые условия эксплуатации печей прокаливания в зоне, приближенной к горелке [1]. В этой зоне огнеупор подвергается воздействию высоких температур в условиях меняющейся газовой среды. Весьма ответственным участком является также зона охлаждения кокса и «горячий порог». На этом участке огнеупор подвергается одновременному воздействию горячего кокса, излучения факела и холодного воздуха. Напряжение в футеровке возрастает с повышением ее температуры и снижением температуры корпуса. При пуске печи температура по толщине футеровки изменяется и в нагретой части огнеупора возникает большое напряжение. Если прочность огнеупора недостаточна, он скалывается слоями с внутренней поверхности футеровки. Скалывание продолжается до тех пор, пока в результате повышения температуры и теплового расширения кожуха напряжение в огнеупоре не придет в соответствие с его временным сопротивлением. Скалывание происходит преимущественно в горячих зонах печи.

Одна из главных причин выхода футеровки из строя — частые кратковременные остановки прокалочных печей. Происходящие при этом остывания и местные перегревы футеровки приводят к ее деформации и разрушению. Поэтому очень важной характеристикой огнеупорного футеровочного изделия является термостойкость. Разрушение футеровки происходит также вследствие динамических нагрузок. Их воздействие особенно проявляется в зонах среднего бандажа и холодного обреза печи, в которых наибольшая вибрация. Таким образом, выбор огнеупорных материалов для футеровки отдельных зон печи определяет ее работоспособность и качество технологического процесса прокаливания нефтяного кокса [4]. В последнее время появилось достаточно много современных футеровочных материалов, соответствующих повышенным требованиям (см. таблицу).

Еще один вид разрушения футеровки — изнашивание и выкрашивание швов с последующим выпадением самого огнеупора. В этой связи требуется использовать соответствующий мертель и минимально возможную толщину его шва (в идеале 1–2 мм). Свойства связующих растворов,

## Основные технические характеристики некоторых огнеупорных изделий для футеровки вращающихся печей

Показатели	HALBOR-45 ALS	BOREX-65 ALS	ШЦУ (для сравнения)
Массовая доля, %:			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , не менее	45	65	32
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , не более	1,5	1,0	–
Температура начала размягчения, °С, не ниже	1400	1650	1370
Кажущаяся плотность, г/см <sup>3</sup>	2,38	2,62	2,15
Открытая пористость, %, не более	17	17	20
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее	35	50	25
Термостойкость (1300 °С – вода), теплосмены, не менее	25	20	4
Теплопроводность на горячей стороне, Вт/(м·К), при температуре, °С:			
400	1,49	1,88	–
700	1,55	1,76	–
1000	1,56	1,62	1,82

применяемых при кладке футеровки, должны быть близки к свойствам применяемых огнеупоров, но не вступать с ними в химическое взаимодействие при нагреве. Для кладки футеровки вращающихся печей преимущественно используют растворы — связующие при высыхании. Толщина швов определяется с учетом компенсации «плохой» геометрии огнеупора. Нормальной следует считать толщину шва 2–3 мм. Однако при увеличении толщины шва возрастает риск выпадения огнеупора при разрушении (выкрашивании) швов.

В последние годы в отечественной практике на прокалочных производствах нефтяного кокса получили распространение связующие, в состав которых входят термические порошки, при нагревании которых происходит интенсивный разогрев смесей. Эти смеси эффективно используют в горячих зонах печей, увеличивая в 2–3 раза срок службы футеровки. Так, на предприятии «Гамма-Спецогнеупор» разработана огнеупорная СВС-смесь (Гамма-ЗХП по ТУ 15 23-001-15052528–2008) для термитной сварки в монолит шамотных, высокоглиноземистых и других огнеупоров. При нагреве шва на основе этой смеси выше 920 °С в ней происходит самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) комплексных соединений с прямой оксидной связью, который благодаря экзотермическому эффекту локально достигает температуры 1800–2000 °С. Процесс длится несколько секунд, а появляющийся в это время расплав активно взаимодействует с огнеупором футеровки и прочно сплавляется с ним, сваривая фасонные огнеупоры в монолит. Огнеупорность смеси после спекания выше 1770 °С, прочность шва на сдвиг более 7 МПа, термостойкость более 50 воздушных теплосмен. Толщина шва должна быть не менее 3 мм (при меньшей толщине процесс горения смеси приостанавливается в нижних слоях шва), оптимальная 4–5 мм. Готовая кладка сохнет 24 ч, причем содержащийся в растворе сульфат магния обеспечивает первоначаль-

ную прочность кладки до обжига при поворотах барабана. При использовании этой смеси после «омоноличивания» футеровки печи значительно увеличивается срок ее службы [4, 5].

По одному из способов огнеупор укладывают кольцевыми панелями, не соединяя их между собой. Такая укладка облегчает и убыстряет ремонт футеровки, тем более что при такой укладке появляется возможность ее механизации. Так, за рубежом для этой цели достаточно широко используются укладочные машины [6]. Однако в отечественной промышленности практически повсеместно для увеличения прочности футеровки и плотности прилегания ее к корпусу печи огнеупоры каждой панели укладывают с перевязкой швов. Следует отметить также, что перед укладкой огнеупоров барабан вращающейся печи должен быть проверен на соответствие требованиям цилиндрической формы (овальность, наличие местных деформаций — выпуклостей, впадин и т. п.). По современным представлениям, овальность корпуса не должна быть более 10 мм.

Практическим путем найден рациональный вариант футеровки прокалочных печей диаметром 3 и длиной 45 м для получения нефтяного прокаленного кокса марки КЭП-1 [5]. Рабочее пространство печей разделено на 10 панелей (рис. 2) размерами от 2,5 до 5 м и зафутеровано огнеупорными изделиями марки ШЦУ. В качестве кладочного раствора, приготовленного по определенной технологии, в горячих зонах (панели 1–7) используется смесь Гамма-ЗХП, в холодных (панели 8–10) — смесь Гамма-ЗАК. Для снижения напряжения в футеровке при тепловом расширении в ее поперечном сечении закладывают термокомпенсационные швы. Такая футеровка служит до четырех лет (панели 2–9) и до полутора лет (остальные панели). На горячем обресе печи для увеличения срока службы пороговых футеровочных огнеупоров установлены подпорные плиты (рис. 3) из жаропрочной стали 20Х25Н19С2Л (40Х24Н12СЛ) со сроком службы

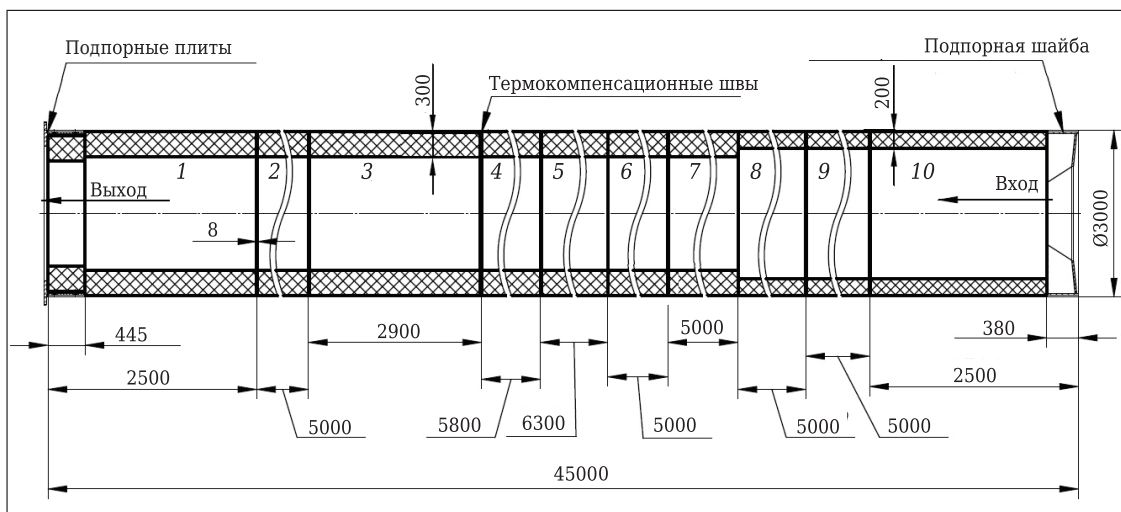


Рис. 2. Общий вид футеровки вращающейся прокалочной печи для получения нефтяного прокаленного кокса марки КЭП-1; 1–10 — футеровочные панели

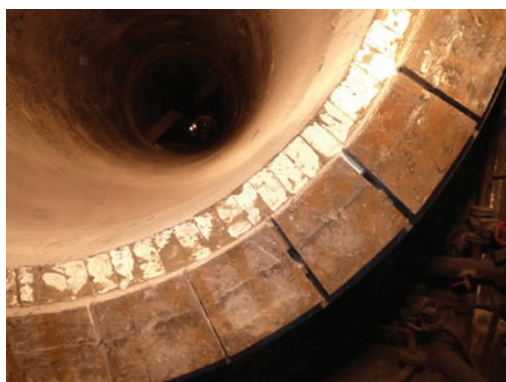


Рис. 3. Общий вид подпорных плит горячего обреза и футеровки вращающейся прокалочной печи

2–3 года. На холодном обрезе печи для исключения пересыпания загружаемого в печь сырого кокса установлена подпорная шайба из жаропрочной нержавеющей стали X23H18, которая обычно служит до пяти лет.

Схема футеровки вращающейся печи диаметром 3,0 и длиной 45 м для прокаливания нефтяного кокса марки КЭП-2 показана на рис. 4. Футеровку печи укладывают от горячего конца огнеупором с толщиной слоя 250 мм. Используют огнеупорный кирпич марки BOREX-65 ALS с содержанием  $Al_2O_3$  65 % и мертель ММК-72 + Фоскон-351. Таким высокотемпературным огнеупором футеруется около 70 % длины печи (см. рис. 4). На футеровочной панели 7 также из огнеупора

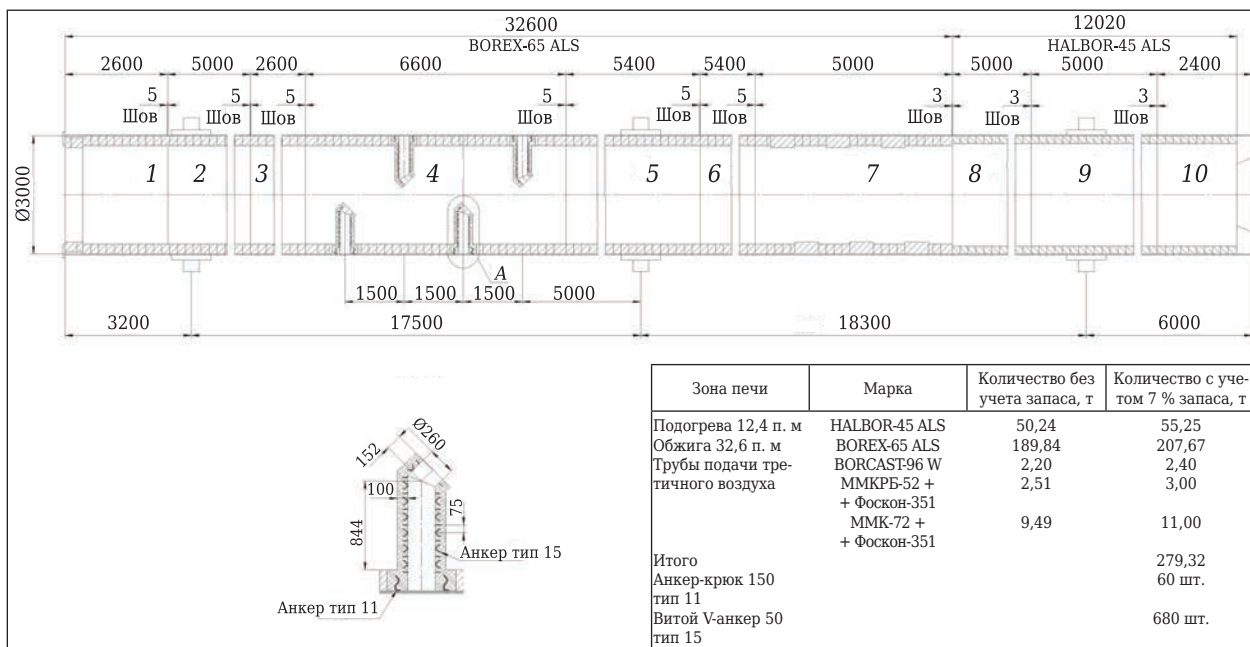


Рис. 4. Общий вид футеровки вращающейся прокалочной печи для получения нефтяного прокаленного кокса марки КЭП-2; 1–10 — футеровочные панели

марки BOREX-65 ALS (6 шт.) выложены переме- шивающие прокаливаемый кокс пороги [7]. От применения в качестве кладочного раствора на основе смеси Гамма-3ХП в данном случае отказа- лись, поскольку, как показали лабораторные ис- пытания, прочность кладочных швов на сдвиг при их толщине 2 мм в таком случае ниже (5,1 МПа), чем при использовании BOREX-65 ALS с мертелем ММК-72 + Фоскон-351 (6,2 МПа). Остальные 30 % печи в холодной зоне футеруют менее термостой- ким огнеупором HALBOR-45 ALS с содержанием  $Al_2O_3$  45 % и мертелем ММКРБ-52 с добавкой Фо- скон-351. Толщина кирпичной кладки 200 мм. Для компенсации теплового расширения в попереч- ном сечении футеровки закладывают термоком- пенсационные швы толщиной 3–5 мм. Подпорные плиты в горячем обресе печи и подпорная шайба в холодной зоне те же, что и в первом случае (см. рис. 2). Фурмы подачи первичного, вторичного и третичного воздуха (рис. 5) покрыты огнеупор- ным бетоном BORCAST-96 W толщиной 100 мм на V-образных анкерах. Отсечные шиберы в газохо- дах дымовых газов изготовлены из огнеупорного бетона АЛАКС-1,2-1200 на анкерах.



Рис. 5. Общий вид фурмы подачи во вращающуюся про- калочную печь третичного воздуха и ее футеровки

#### Библиографический список

1. Янко, Э. А. Аноды алюминиевых электролизеров / Э. А. Янко. — М. : Изд. дом «Руда и металлы», 2001. — 672 с.
2. Санников, А. К. Производство электродной продук- ции / А. К. Санников, А. Б. Сомов, В. В. Ключников [и др.]. — М. : Metallurgy, 1985. — 280 с.
3. Пат. 648113 СССР, МПК F 27 D 19/00, С 10 В 49/02. Способ управления процессом обжига нефтя- ного кокса в наклонной вращающейся печи / Мерлин М. В. ; заявитель «Алкан Рисерч Дивелопмент Лими- тед» ; заявл. 11.04.75 ; опубл. 15.02.79, Бюл. № 6.
4. Юрков, А. Л. Огнеупоры и катодные материалы для алюминиевой промышленности / А. Л. Юрков. — Крас- ноярск : Бона компани, 2005. — 257 с.
5. Ягодинский, Ю. А. Футеровка для печей прокали- ки кокса. Материалы. Срок службы / Ю. А. Ягодинский //

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и выполнена футеровка на прока- лочной печи № 2 филиала ПАО «РУСАЛ Братск» (г. Шелехов) для прокаливания нефтяного кокса марки КЭП-2. Футеровка эксплуатируется в те- чение 10 мес. Каких-либо специфических нару- шений в ее целостности и работе не отмечено.

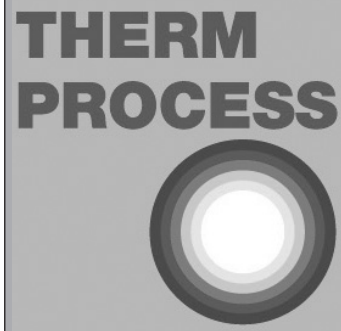
Технико-экономический вестник. — 2003. — № 4. — С. 45, 46.

6. The EZ Flexx Bricking Machine [Электронный ре- сурс] / Brickingsolutions, Inc. — Режим доступа: <http://www.brickingsolutions.com/>.

7. Пат. 2383836 Российская Федерация, МПК F 27 В 7/18. Внутреннее теплообменное устройство вра- щающихся печей / Лапаев И. И., Крак М. И., Арнаутов А. Д. ; заявитель и патентообладатель ООО «Русская инжиниринговая компания», г. Красноярск ; заявл. 26.12.2007 ; опубл. 10.03.10, Бюл. № 7. ■

Получено 20.06.18  
© И. И. Лапаев, В. В. Сорокин,  
С. Е. Головкин, А. В. Орлов, 2019 г.

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



**THERM  
PROCESS**

**Thermoprocess 2019 — международная выставка и симпозиум по оборудованию и технологиям термической обработки**

25–29 июня 2019 г. Messe Düsseldorf, г. Дюссельдорф, Германия

**Тематика**

- термическая обработка (обжиг, кальцинация, прокаливание, спекание, агломерация)
- плавка, литье (обработка в жидкой фазе)
- нагрев, термическая и поверхностная обработка
- покрытие, присоединение, соединение
- технологии термической переработки и обезвреживания отходов
- термические процессы под защитным и реакционным газом
- выработка тепла
- термическое оборудование для регенерации ценных веществ и термическое дожигание

[www.thermoprocess.de](http://www.thermoprocess.de)