

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ И ПРОЧНОСТНО-ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕКОКСОВОЙ МАССЫ В ПРОЦЕССЕ СЛОЕВОГО НАГРЕВАНИЯ

Парфенюк А.С., Веретельник С.П., Топоров А.А., Кутняшенко И.В.
(ДонНТУ, Донецк, Украина)

Для обеспечения надежной работы коксовых батарей выполнен анализ структуры и прочностно-деформационных характеристик углекоксковой массы в процессе слоевого нагрева в зависимости от ряда факторов, таких как давление уплотнения, влажность, связующее, температура, а также исследовано взаимодействие рабочей массы с конструкционными материалами.

Процесс термических превращений углеродистых спекающихся масс в камерных печах периодического или непрерывного действия при двухстороннем обогреве является слоевым, определяется исходными свойствами перерабатываемого сырья, режимом обогрева и характером силовых воздействий на рабочую массу. Поэтому установленные закономерности изменения прочностно-деформационных характеристик рабочей массы при однотипных температурных режимах и соответствующих силовых воздействиях будут общими для разных печей камерного типа с двухсторонним обогревом.

Экспериментальные исследования физико-механических характеристик (ФМХ) структурных составляющих многослойной системы для различных углеродистых масс в процессе нагревания показали [1], что рабочая масса находится под воздействием большого числа взаимосвязанных, изменяющихся в пространстве и времени факторов различной природы и одновременный их учет и стремление установить закономерности изменения ФМХ для всего диапазона изменения этих факторов представляет значительные трудности.

Свойства перерабатываемого материала по сечению камеры прессования различны и зависят от температурного состояния и структуры. Однако в пределах каждого расчетного структурного элемента материал однородный и при малых перемещениях квазиупругий. В качестве предельных параметров, определяющих механическое поведение рабочей массы при проталкивании ее в камерной печи с двухсторонним обогревом, принимаем ее прочность на сжатие и растяжение и поперечную деформацию при сжимающих нагрузках.

Построение дискретной модели (рисунок 1, 2) осуществляем, используя локальные оценки прочностей и деформаций для элементов рабочей массы, на основе следующих положений:

1. Разделим пирог по длине сечениями $I_0, I_1, \dots, I_i, \dots, I_m$ а по высоте – сечениями $K_0, K_1, \dots, K_k, \dots, K_l$. Здесь I_0 – начальное сечение, соответствующее плоскости раздела зоны коксования и зоны загрузки, I_m – конечное сечение, соответствующее плоскости раздела зоны коксования и зоны выгрузки, K_0 – начальное сечение, соответствующее поверхности пода камеры коксования, K_l – конечное сечение, соответствующее верху пирога.

2. Пересечение сечений I_i и K_k дает конечное число узлов, которое равно $(L/h_1 + 1) \times (H/h_3 + 1)$. Узлы считаем центрами элементов. Шаги между узлами h_1 и h_3 соответствуют протяженности элементов по осям X и Z .

3. Каждый элемент находится в определенном структурном состоянии и имеет свои физико-механические характеристики. Считаем, что безразмерные толщины слоев, распределение температур по их сечению, прочностно-деформационные характеристики слоев, соответствующие этим температурам, и напряженное состояние в пределах элемента постоянны.

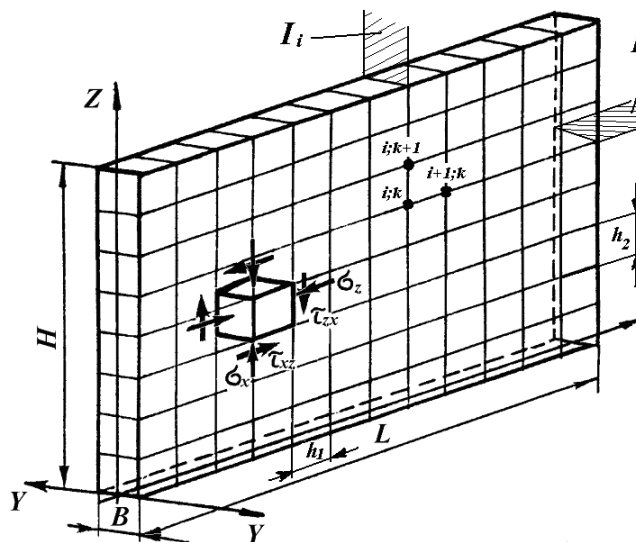


Рисунок 1 - Пирог рабочей массы в камерной печи как система элементов конечных размеров

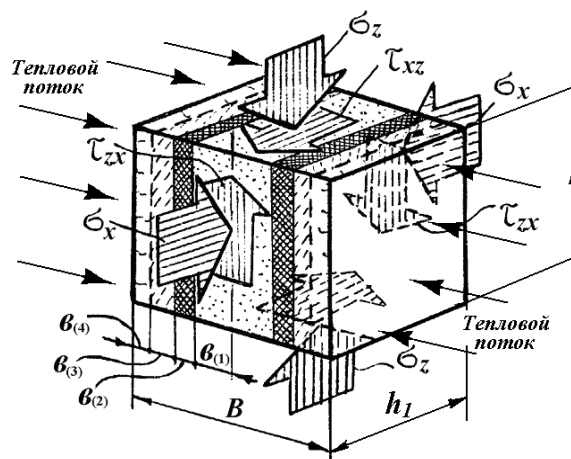


Рисунок 2 - Элемент пирога как слоистая структура рабочей массы в условиях двухстороннего нагрева

4. Процесс деформирования элемента обусловлен наличием нескольких слоев структуры, имеющих различную жесткость и разрушающихся не одновременно. В нашем случае процесс деформирования и разрушения элемента проходит по стадиям. Каждой стадии деформирования соответствует определенная стадия нарушения структуры каждого из слоев. Экспериментальные исследования позволили установить предельные деформации, до которых каждый слой деформируется линейно, а затем разрушается.

5. Обычное для теории слоистых сред допущение состоит в том, что разрушение одного слоя приводит к разрушению или потере несущей способности элемента в целом и следует ограничить величину деформации элемента меньшей из величин предельных деформаций слоев. Однако в реальном процессе, особенно при малых толщинах одного из слоев его разрушение еще не означает потерю несущей способности элемента, поскольку оставшийся слой продолжает сохранять способность воспринимать нагрузку при дальнейшем деформировании вплоть до окончательного разрушения и этого слоя, и, следовательно, всего слоистого элемента.

Приведенные выше положения, отражающие сущность модели процесса деформирования-разрушения элемента, позволяют применить его феноменологическое описание [2], условно разделив этот процесс на стадии, соответствующие характерным стадиям деформирования-разрушения несущих слоев, причем сопротивление каждого из слоев определяется его толщиной и модулем деформации.

Особый интерес представляет распределение температур в рабочей массе в начальный период ее нахождения в обогреваемой зоне печи [3].

При изучении физико-механических характеристик углешихтовых масс в интервале температур от 20 до 150 °С определяющее значение имеет степень их уплотнения и влажность.

Угольная шихта рассматривается как сплошная среда с внутренним трением и сцеплением частиц. Величина сил внутреннего трения и сцепления зависит от давления, исходного гранулометрического состава, вязкости и количества связующего. При этом связующей средой для сырой шихты может служить ее влага, для сухой - различные связующие добавки, для нагретых до пластического состояния частиц - собственные термопластические компоненты.

При прессовании влажных шихт решающим фактором, влияющим на прочность сцепления частиц, является давление. Влажность также оказывает большое влияние на прочностно-деформационные характеристики шихты (рисунок 3).

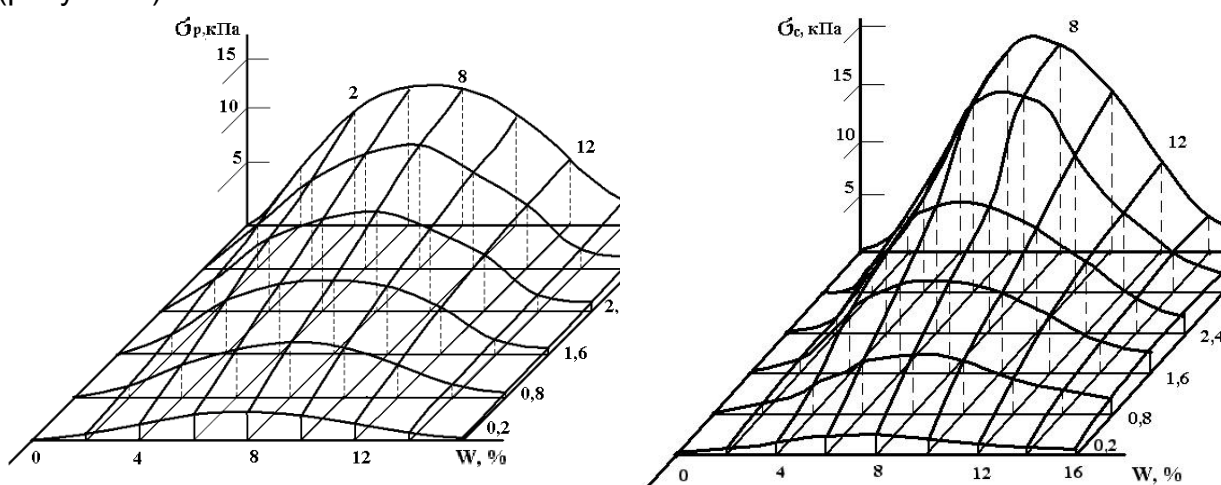


Рисунок 3 - Прочность растяжение σ_p (а) и на сжатие σ_c (б) угольной шихты при различной влажности W и давлении уплотнения P .

Установлено, что для любого состава и крупности шихты существует значение влажности, при котором прочностно-деформационные характеристики достигают максимальных величин. Для большинства угольных шихт при малых давлениях существует широкий интервал оптимальных значений влажности, который составляет 7-10 %, однако этот диапазон значительно расширяется в сторону увеличения при введении в шихту различных добавок, например, измельченных бытовых отходов.

Изучение связи между относительной продольной и поперечной деформацией, кроме определения коэффициента Пуассона μ и модуля деформации E , дает возможность проследить изменение плотности загрузки при действии на нее давления уплотнения.

Модуль деформации уплотненной шихты E_s является переменной величиной и связан с действующими напряжениями σ и показателем степени компрессионной кривой n зависимостью: $E_s = \sigma/n$.

Важны также форма и геометрические характеристики пластического слоя, в значительной степени определяющие характер механического поведения рабочей массы при проталкивании. Тепло в камеру прессования поступает двумя потоками, параллельными оси пирога. Вследствие этого пластический слой в плоском сечении камеры прессования имеет клиновидную форму и при проталкивании вероятно сдвиговое разрушение спрессованного пирога по плоскостям скольжения. Поэтому такие параметры "клина

пластической массы", как его высота и толщина слоя следует минимизировать. Эта область достаточно удалена от отопительных каналов и температура по оси пирога здесь повышается медленно (через 20 часов после начала коксования температура в зоне контакта камер прессования и коксования составляет лишь 240-320 °С).

Изучено изменение прочности полукокса различных углей и шихт при свободном вспучивании во времени при температуре 650 °С и определены dilatометрические показатели этих углей. Результаты исследования представлены графически на рисунках 4 – 5.

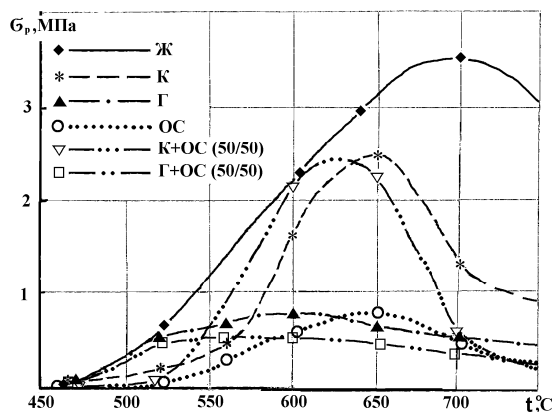


Рисунок 4 - Прочность спекающейся массы рабочей на разрыв σ_p при нагревании для различного углешихтового сырья

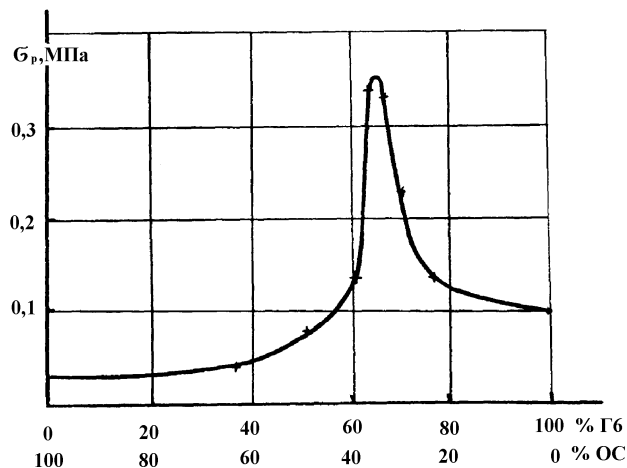


Рисунок 5 - Прочность на разрыв σ_p полукокса из бинарной смеси углей марок Г6 – ОС при различном соотношении компонентов

Установленные зависимости позволяют сделать следующие выводы:

- прочность полукокса существенно зависит от марки угля;
- изменение прочности на разрыв в зависимости от времени нагрева имеет выраженный максимум, который совпадает с моментом окончания вспучивания;
- после окончания вспучивания прочность нелетучего остатка с течением времени существенно снижается до 0,1 – 0,5 величины максимальной прочности.

Для этого на приборе определяли прочностные показатели некоторых шихт при наличии информации о полученных для них прочностных характеристиках кокса (M25). При прогнозировании прочностных свойств кокса на основании данных экспресс-метода следует учитывать, что качество кокса зависит не только от свойств шихты, но и от технологического режима коксовых печей. Поэтому для определения тесноты связи взяты данные по батареям, сходным по конструкции и технологическому режиму. Кроме того, эти данные определены за относительно небольшой промежуток времени (2 месяца), когда период коксования и связанные с ним показатели технологического режима батарей изменялись не существенно.

Результаты обработки данных позволили установить корреляцию в предположении линейной зависимости показателя прочности кокса M25 и показателя предела прочности материала нелетучего остатка исследуемой угольной шихты σ_p :

$$\sigma_p = -21,077 + 0,2583 M25,$$

$$M25 = 82,002 + 3,616 \sigma_p.$$

Для вышеприведенных зависимостей коэффициент парной корреляции 0,96 с уровнем значимости 98,9 %.

На основании анализа установлено что: предел прочности на разрыв материала полукокса в горячем состоянии σ_p коррелирует с прочностью на раскалывание для тех же углей, однако имеет по сравнению с ней меньший разброс измеренных значений; показатель M25 кокса, получаемого из шихты в промышленных печах, хорошо согласуется с показателем предела прочности материала полукокса для той же шихты, что позволяет использовать последний для прогнозирования качества кокса.

Обобщая результаты изложенных выше исследований можно утверждать, что рабочая масса в предпластическом и пластическом состоянии характеризуется низкими прочностными характеристиками, которые не менее чем на порядок меньше аналогичных показателей для исходной уплотненной массы. Особенности процесса деформирования слоя пластической массы в результате приложения внешних нагрузок описаны с учетом его реологических характеристик как тела, обладающего весьма малой прочностью, для которого величина предельного напряжения межслоевого сдвига в состоянии наибольшего размягчения близка нулю.

Значимое влияние на прочностные свойства полукокса-кокса оказывают следующие факторы: температура T , объемная плотность ρ_v , выход летучих V^r и пористость Π . Такие факторы, как ρ_v и Π находятся в сложной функциональной зависимости не только от температуры и давления уплотнения, но и от гранулометрического состава загрузки и влажности и т.д. Поэтому при составлении функциональных зависимостей в уравнения введены средние значения ρ_v и Π как функции от температуры. Полученные зависимости предельных растягивающих и сжимающих напряжений от выхода летучих и истинной плотности полукокса-кокса справедливы лишь для конкретного состава шихты и условий эксперимента. Они не являются общими и поэтому требуется исследование влияния расширения спектра составов сырья и режимов процесса. Деформационные характеристики полукокса-кокса крайне нестабильны и при их оценке необходимо учитывать их разброс. Получены зависимости для определения E и μ :

$$E = 1.81 \cdot 10^3 [V^r(T_{k1}) - V^r(T_{k2})] + 30.8 \cdot \text{Ln} \left[\frac{V^r(T_{n1})}{V^r(T_{k2})} \right],$$

где T_{k1}, T_{k2} - соответственно температура начала и конца образования соответствующих структур полукокса и кокса.

Эта зависимость также нуждается в уточнении, однако она может быть использована в математической модели с учетом того, что величина E для полукокса-кокса на 3-4 порядка превосходит E_s для уплотненной шихты.

Зависимости модуля деформации E и коэффициента Пуассона μ от выхода летучих V^r и плотности ρ , а, следовательно, и температуры T необходимы для анализа процесса деформирования-разрушения рабочей массы. Можно отметить быстрое увеличение модуля деформации E при уменьшении выхода летучих на конечной стадии коксования и с увеличением времени нахождения полукокса-кокса в стадии высоких температур.

В результате обработки получены аппроксимирующие уравнения зависимости указанных характеристик от безразмерной температуры Θ :

$$\sigma_p = \left((3.0 - 13.1 \cdot \Theta + 15.4 \cdot \Theta^2) / (1 - 3.4 \cdot \Theta + 3.1 \cdot \Theta^2) \right)^2$$

$$\sigma_{сж} = (23.3 - 184.4 \cdot \Theta + 540.6 \cdot \Theta^2 - 406.2 \cdot \Theta^3)^2$$

$$\tau_0 = (13.8 - 143.5 \cdot \Theta + 428.7 \cdot \Theta^2 - 317.8 \cdot \Theta^3)^2$$

$$tg(\varphi) = (0.8 - 2.4 \cdot \Theta + 6.9 \cdot \Theta^2 - 4.9 \cdot \Theta^3)^2$$

$$\sigma_a = \left((1.6 - 4.9 \cdot \Theta + 5.3 \cdot \Theta^2) / (1 - 3.4 \cdot \Theta + 3.8 \cdot \Theta^2) \right)^2$$

$$f_0 = (0.6 - 1.6 \cdot \Theta + 7.9 \cdot \Theta^2 - 13.1 \cdot \Theta^3 + 6.9 \cdot \Theta^4)^2$$

$$E_s = \left((2.9 - 18.9 \cdot \Theta + 31.1 \cdot \Theta^2) / (1 - 3.4 \cdot \Theta + 3.3 \cdot \Theta^2) \right)^2$$

$$\mu = (0.5 + 2.6 \cdot \Theta - 6.9 \cdot \Theta^2 + 5.1 \cdot \Theta^3)^2$$

$$q = \left((-1.2 + 12.7 \cdot \Theta - 17.5 \cdot \Theta^2) / (1 - 3.8 \cdot \Theta + 3.7 \cdot \Theta^2) \right)^2$$

Наиболее неблагоприятное сочетание прочностных свойств приходится на пластическую и предпластическую массу, где предельные сдвигающие напряжения τ^* не превышают 0,2 МПа. Полукоккс является наиболее прочной составляющей структуры для всех составов исходных шихт, наиболее эффективно воспринимающей механические нагрузки.

Анализ деформационных свойств позволяет отметить значительное увеличение эквивалентного коэффициента Пуассона на стадиях предпластической и пластической массы до величины порядка 0,7 и в целом для стадий А-Д нельзя применять коэффициент Пуассона в традиционном смысле, т.к. в процессе деформирования рабочая масса увеличивает свой объем, т.е. разрыхляется.

Особый интерес представляет взаимодействие рабочей массы, на различных стадиях ее структурных превращений, с конструкционными материалами, из которых изготовлен тепловой агрегат, с учетом того, что под действием высоких температур и механических воздействий поверхностные слои конструкционных материалов, контактирующих с сырьем, изменяют свои свойства, что приводит к изменению адгезионных свойств.

Установлено, что для всех исследованных конструкционных материалов в температурном поле напряжение адгезионного отрыва σ_a в начальный период выше, чем после длительного взаимодействия с сырьем. Это объясняется тем, что за первые 3 - 6 часов контакта конструкционных материалов с шихтой в температурном поле интенсивно протекает процесс науглероживания поверхности материала, приводящий к ослаблению адгезионного взаимодействия.

Коэффициент адгезионного взаимодействия сухой и влажной шихты не влияет на коэффициент трения, что объясняется отсутствием дополнительной силы адгезионного отрыва, возникающей в температурном поле. Установлены значения коэффициентов внешнего трения уплотненной угольной шихты по конструкционному материалу и коэффициентов внутреннего трения. С этой целью были проведены серии экспериментов на приборах для сдвиговых испытаний и определены усилия сдвига образца спрессованной угольной шихты по поверхности конструкционного материала или самого исследуемого материала при известной площади соприкосновения и различных усилиях прижатия в плоскости контакта. Установлено, что коэффициент трения уплотненной шихты влажностью 8% по стали марки 12Х18Н10Т равен 0,36 –

0,38 (образец стали в исходном состоянии имел аустенитную структуру с включениями карбидов, средняя исходная твердость HB 190, шероховатость Rz = 250).

Определены также усилия сдвига спрессованной угольной шихты и полукокса-кокса по поверхности динасокварцитового бетона. Установлено, в частности, что коэффициент трения шихты влажностью 8 % и уплотненной давлением 1,6 МПа по динасокварцитовому бетону равен 0,36, а полукокса-кокса - 0,78. Образец динасокварцитового бетона имел шероховатость, соответствующую реальной шероховатости крупноразмерных динасокварцитовых бетонных блоков (Rz = 1600).

Установлено, что напряжения адгезионного отрыва шихты от конструкционных материалов σ_a меньше, чем напряжения разрыва рабочей массы σ_p^* , и в стационарном температурном поле 620-670 °С наибольшие значения этих величин проявляются в интервале 200 – 800 °С от начала нагрева. Результаты приведены на рисунке 6.

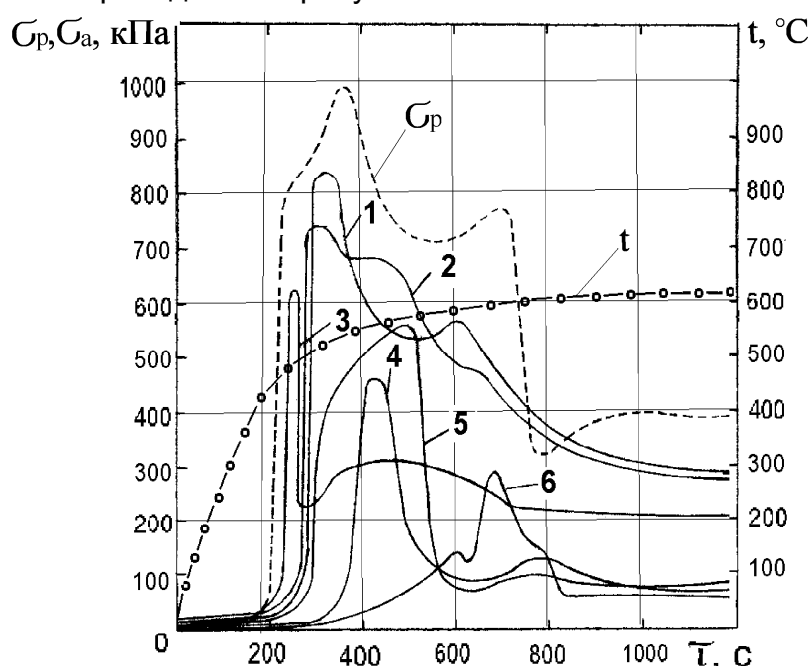


Рисунок 6 - Изменение прочности на разрыв σ_p и адгезии σ_a рабочей массы в температурном поле для различных материалов при различной продолжительности контакта: 1 – со сталью Ст 3; 2 – с серым чугуном; 3 – со сталью 12Х18Н10Т; 4 – с динасокварцитовым бетоном; 5 – с шамотным бетоном; 6 – с шамотным мертелем.

Исследования показали, что на время возникновения наиболее сильного адгезионного взаимодействия с конструкционными материалами в температурном поле определяющее влияние оказывают исходные характеристики сырья.

Наибольшее значение σ_a наблюдаются у серого чугуна СЧ15. Адгезионное взаимодействие со сталями Ст3 и 12Х18Н10Т несколько слабее.

Напряжения адгезионного отрыва σ_a для динасокварцитового и шамотного бетонов и мертелей всегда меньше, чем для металлов. Это можно объяснить макроструктурой поверхности огнеупорных материалов, способствующих образованию графитообразных отложений, которые накапливаются в макронеровностях поверхности и имеют рыхлую структуру.

Для шамотного мертеля напряжения адгезионного отрыва σ_a в начальный период малы. Через два часа циклических испытаний они несколько возрастают и затем постепенно снижаясь, остаются практически неизменными. Это объясняется тем, что поверхность мертеля представляет собой зернистую структуру и некоторые макрочастицы (зерна) очень слабо связаны с остальными. В самом начале эксплуатации такого материала происходит не отрыв рабочей массы от поверхности, а отрыв с поверхности "свободных" частиц мертеля. После того, как все "свободные" частицы удалены с поверхности, наблюдается адгезионное взаимодействие рабочей массы с более прочной структурой образца мертеля. В дальнейшем протекает процесс науглероживания поверхности, приводящий к снижению адгезионного взаимодействия.

Анализ экспериментальных исследований взаимодействия рабочей массы с различными материалами показал, что образующийся на поверхности раздела сред слой графитообразного материала по своим свойствам и влиянию на процесс продвижения пирога по поду камеры коксования аналогичен сервовитным пленкам и играет положительную роль. Поэтому при разработке новых конструкций коксовых агрегатов целесообразно предусмотреть мероприятия, обеспечивающие образование и сохранение графитообразных отложений в микро- и макронеровностях и тем самым способствующие снижению адгезионного взаимодействия и усилия проталкивания рабочей массы в печи.

Литература

1. **Парфенюк А.С., Веретельник С.П., Топоров А.А., Карпов В.С.** Физико-механические характеристики структурных составляющих углешихтовых материалов при нагревании. // "Кокс и химия", 2001, №1, С.13-16.
2. **Парфенюк А.С.** Исследование процесса деформирования и разрушения шихто-коксового пирога применительно к разработке агрегата непрерывного коксования / Автореф.дис...канд.техн.наук. - М., 1981.- 16 с.
3. **Парфенюк А.С., Топоров А.А., Кутняшенко И.В.** Распределение температур в зоне прессования загрузки коксовых агрегатов // "Кокс и химия", 1996, №4, С.25-27.