УДК 678.7

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ОСАЖДЕНИИ НАПЫЛЯЕМЫХ ЧАСТИЦ ПОЛИМЕРНОГО ПОРОШКА

В.Л. Федяев1,2, Э.Р. Галимов2, М.С. Тахавиев3, А.Р. Сираев1

ИММ КазНЦ РАН1

КНИТУ им. А.Н. Туполева2

ООО «Газпром Трансгаз Казань»3

[morenko@imm.knc.ru](mailto:morenko@imm.knc.ru)

Ключевые слова: напыление полимерных материалов, осаждение частиц, ударные процессы

Аннотация. Рассматривается осаждение частиц полимерного порошка на поверхность обрабатываемого тела, слой осевших ранее частиц. Используются основные положения теории удара. Приводятся соотношения для оценки характерных параметров исследуемых процессов, представляются результаты их анализа, а также рекомендации по повышению эффективности осаждения.

При нанесении полимерных порошковых покрытий на их эксплуатационные показатели большое влияние оказывают технологии и применяемое оборудование; используемые расходные материалы; форма и состояние поверхности обрабатываемых тел; внешние условия, при которых реализуются соответствующие технологии, технологические режимы; другие обстоятельства [1,2]. В случае струйного напыления полимерных порошковых материалов (композиций) в процессе формирования покрытия выделяются три основные этапа: осаждение частиц порошка на обрабатываемой поверхности тела, образование пористого дисперсного слоя; пленкообразование, сопровождаемое слипанием, слиянием, спеканием, растеканием частиц; структуризация материла формируемого покрытия. В свою очередь, в уточнение этих этапов можно выделить следующие стадии: осаждение полимерного порошка на поверхности подложки; деформирование частиц при ударе, действии других факторов, слипание их; слияние, спекание частиц в напыленном слое; дегазация, выход газов из слоя трансформируемого слоя; смачивание поверхности подложки; пленкообразование, отверждение материала; молекулярная и надмолекулярная структуризация, полимеризация материала формируемого покрытия; адгезия покрытия к твердому телу.

Каждая из названных стадий формирования полимерного покрытия определенным образом влияет на его эксплуатационные показатели. Для того, чтобы оценить это влияние, необходимо, учитывая особенности предшествующих этим стадиям процессов [3], проанализировать их. В настоящей статье рассматривается первая стадия — осаждение частиц полимерного порошка на обрабатываемой поверхности твердого тела.

Отдельные частицы порошка, возможно, кластеры, двигаясь в струе воздуха, топочных газов вначале падают на поверхность тела, затем на слой уже осевших частиц. Поведение частиц в момент удара во многом зависит от размера частиц, их формы, состояния материала частиц (твердый, оплавленный, расплавленный), его механических характеристик; от состояния поверхности подложки, ее шероховатости, температуры; от угла падения частиц, скорости падения, силы удара и т.д. Обширные материалы о процессах, протекающих при ударе твердых, жидких частиц (капель) по преграде, приводятся в работах [4-9 и др.].

Для ударного взаимодействия материальных тел характерно то, что за малое время удара  скорость соударяющихся тел либо одного из них изменяется значительно.

Следуя [7-9] при анализе удара частиц полимерного порошка по поверхности обрабатываемого тела, слоя ранее осевших частиц выделим следующие группы основных параметров.

1. Показатели подлетающих к поверхности частиц: размеры, форма, объемная концентрация частиц в набегающей на обрабатываемое тело газовой струе.
2. Параметры удара: масса частиц при ударе, скорость удара, угол падения частиц.
3. Параметры, характеризующие материал частиц: плотность, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, скорость волн растяжения, сжатия; вязкость расплава, поверхностное натяжение.
4. Показатели обрабатываемого тела (преграды, подложки): толщина; кривизна, шероховатость поверхности, плотность материала, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, скорость волн сжатия, сдвига; скорость движения, вращения тела.
5. Параметры напыляемого слоя: толщина, кривизна и шероховатость внешней поверхности слоя; плотность, пористость, модуль Юнга, коэффициент Пуассона материала слоя, скорость волн сжатия, сдвига; вязкость расплава.

При обозначении показателей части порошка будем использовать нижний индекс «*р*», напыляемого слоя – «*н*», покрытия – «*с*», параметров тела – индекс «*т*». Для различия фазового состояния материалов: твердого, жидкого, газообразного воспользуемся, соответственно, индексами «*s*», «*l*», «*g*».

**1. Падение частиц порошка на поверхность тела**

Рассмотрим предварительно единичный объем струи газа, содержащий определенное количество частиц порошка . Ради простоты предположим, что все частицы имеют форму, близкую к сферической, радиус их . При моделировании частиц, в частности, различают 50%-ный диаметр , который находится из условия, что 50% объема частиц приходится на частицы меньшего диаметра, оставшиеся 50% - на частицы большего диаметра, и доминирующий диаметр , определяемый как диаметр частиц, характерный для наибольшего объема материала частиц,

,  
где ,  - объем -ой частицы порошка.

Введем, кроме того, объемное распределение размера частиц

,

где  - объем тех частиц, диаметр которых равен  либо близок к нему. Отсюда число частиц с диаметром , находящихся в рассматриваемом единичном объеме струи, будет:

.

Общее число частиц .

Далее предположим, что обрабатываемая поверхность тела неподвижна, кривизна ее мала. Выделим на ней единичную площадку  с внешней нормалью . Если в прилегающем к этой площадке единичном объеме струи все частиц диаметром  летят к поверхности с одинаковой скоростью , то количество частиц, упавших на эту площадку за время 

,

где  – проекция вектора скорости  на нормаль ,  - длина, равная единице. Соответственно, количество ударов всех частиц за время  будет:

.

Определим интенсивность осаждения частиц на поверхность тела  как толщину материала частиц, осевших на ней за единицу времени. При условии, что количество ударов частиц по площадке  в единицу времени равно , найдем:

.

В случае, когда размеры всех частиц одинаковы (), скорость , получим:

.

**2. Оценка напряжений в материале тела при многократном ударе напыляемых частиц**

В дополнение к приведенным выше допущениям примем, что все частицы сферические, одинакового размера, при подлете к телу распределены равномерно, обладают одинаковой скоростью падения, величина которой сравнительно мала (напряжение в материале тела, обусловленное ударом частицы, успевает значительно уменьшиться до падения следующей частицы), все частицы порошка, находящиеся вблизи рассматриваемого участка тела, попадают на него.

Частицы порошка, падающие вначале на поверхность тела, затем на осевшие ранее частицы оказывают ударное воздействие на материал препятствия. В одномерном приближении давление удара соответствует давлению, возникающему при столкновении полубесконечного плоского тела с жесткой подложкой, и описывается зависимостью [7]:

,

где  - плотность материала частиц,  - скорость звука в этом материале (скорость ударной волны).

Учитывая механические характеристики материала препятствия, получим:  
при ударе по подложке

,

по осевшему слою частиц

.

Здесь ;  - соответственно, плотность, скорость звука в материале подложке, напыленном слое частиц.

В соответсвии с теорией Тайрувенгадама удельная интенсивность энергии, поглощаемой материалом обрабатываемого тела при многократном ударе частиц, определяется следующим образом:

,

где  - коэффициент пропорциональности, , параметр  зависит от свойств материала подложки и величины нагрузок,  - глубина слоя материала подложке,  - толщина слоя осевших частиц. При условии, что , интенсивность энергии

.

Поскольку при  , а при  функция , следует ожидать, что в данном интервале изменения параметров интенсивность энергии будет иметь максимум. В результате ряда упрощений и преобразований найдем время , при котором интенсивность энергии  достигнет максимума,

,

где , , ,  - время напыления, когда ; .

**3. Удар твердой деформируемой частицы по поверхности препятствия**

Предположим, как и ранее, что перед ударом падающая частица имеет форму сферы, является шаром. При прямом ударе деформируемого шара по поверхности твердого неподвижного тела выделяют две стадии. В течение начальной стадии скорость центра масс частицы  уменьшается до нуля, шар деформируется, вся начальная кинетическая энергия переход в его внутреннюю потенциальную энергию. Затем шар начинает двигаться в обратном направлении, достигая скорость . При этом часть механической энергии расходуется на сообщение материалу шара остаточных деформаций и на его нагрев. Вводя параметр , называемый коэффициентом восстановления при ударе, найдем среднюю силу реакции преграды, направленную вдоль внешней нормали к ней,



Здесь ,  -проекция на нормаль скорости падения тела ,  его масса.

В случае, когда во время удара на частицу действуют внешние силы, например, сила тяжести  ( -ускорение свободного падения), электростатическая сила  (если заряженная частица находится в электростатическом поле), сила сцепления частицы с материалом подложки , сила удара по частице следующей частицы , скорость отскока будет зависеть как от ее деформирования, описываемого коэффициентом восстановления , так и от действия внешней силы . Соответственно,

,

где ,  - коэффициент, характеризующий влияние на скорость  силы  (, если ). Учитывая данное обстоятельство, по аналогии с запишем:

.

Отсюда следует, что скорость отскока будет минимальной (), если проекция средней за время удара внешней силы

.

Таким образом, наиболее благоприятная ситуация по уменьшению скорости отскока частицы будет в случае, когда сила тяжести, электростатическая сила направлены по нормали в сторону подложки; поверхностный слой размягчен (подплавлен); поверхность подложки шероховатая, на ней имеется слой адгезива (клея); следующая за первой частица ударяет по ней в конце времени  (в начале обратного движения первой частицы).

Известно, что при ударе частицы по поверхности преграды в материале, как частиц, так и преграды распространяются ударные волны. Основные соотношения на ударной волне представляют собой уравнение сохранения массы и закон сохранения импульса. В результате анализа экспериментальных данных установлено, что скорость ударной волны  и скорость частицы при ударе  связаны соотношением [7]

.

Здесь  - эмпирический параметр (;  - скачок скорости частицы в момент удара. Отсюда для давления на ударной волне  можно получить зависимость (адиабата Гюгонио):

,

где  - начальная плотность материала, в котором распространяется волна. Если преграда покоится, то начальная скорость частиц преграды равна нулю, ударяющейся частицы . При соприкосновении частиц в момент удара их скорости и давление с обеих сторон, в соответствии с условием совместности, будут . Таким образом, в начальной стадии контакта скачок скорости падающей частицы , А в преграде .

Возникшее в частице и преграде в начале удара давление  (ударное напряжение) распространяется по материалу частицы, достигает ее противоположной поверхности, отражается. При подходе ударной волны к поверхности контакта скорость падающей частицы и давление в ней быстро уменьшаются. Если акустический импеданс частицы, характеризуемый произведением плотности ее материала на скорость, мал, то частица прекращает движение вовнутрь препятствия. При высоком импедансе (большая плотность, скорость частицы) она продолжает проникать вглубь преграды.

Подробное решение задачи об ударе сферического тела по упругой изотропной преграде представлено в работе Тимошенко С.П. [6,8]. Приведем, не останавливаясь на деталях, окончательные расчетные соотношения. При условии, что продолжительность контакта шара и препятствия велика, согласно закона Герца сила удара будет



Здесь , , ; - соответственно, модуль Юнга, коэффициент Пуассона материала частицы и препятствия; - сближение шара и препятствия , обусловленное локальным сжатием тела в точке контакта. Предполагая, что препятствие полубесконечно и неподвижно, найдем максимальное значение деформации (максимальное сближение частицы и препятствия)

.

Отсюда, согласно , максимальная сила удара

,

а максимальный радиус площадки контакта

.

Известно, что в рассматриваемой задаче распределение давления по площадке имеет вид

 ,

где  - поверхностное давление в центре площадки, ; ,  -декартовы координаты на площадке с центром в точке удара частицы. Нетрудно убедится, что

.

В момент прекращения деформаций, когда , радиус площадки контакта , сила  давление

.

Для того, чтобы оценить изменение функции , а также , ,  в зависимости от времени, необходимо проинтегрировать уравнение, следующее из второго закона Ньютона

.

Проведя ряд преобразований, интегрирование, получим

 ,

где .

В частности, при  из можно найти время удара:

.

Если , соответственно, переменная интегрирования , получим:

.

Следовательно,

,

или



Подставив  из зависимости , в найдем силу удара , радиус площадки контакта

 ,

по формуле , , соответственно, давление  и .

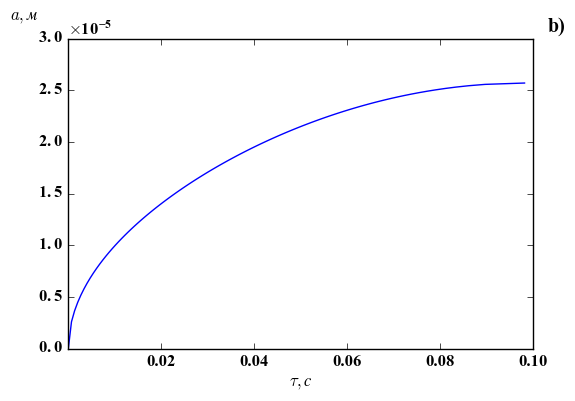
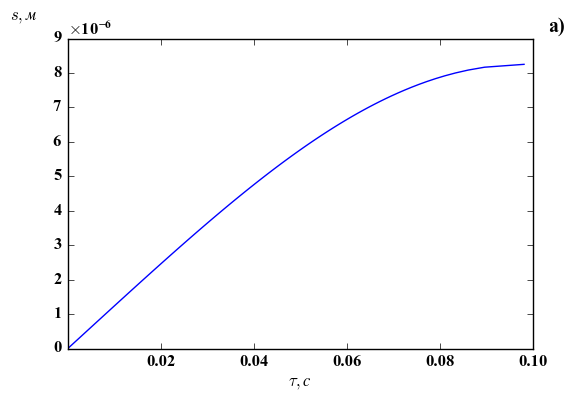


Рис. 1. Изменение с течением времени частицы и препятствия (а), радиуса площадки контакта  (b).

Характер изменения с течением времени  сближения частицы и препятствия , радиуса площадки контакта  при  м,  кг/м3,  м/с,  Па,  (полиэтилен высокого давления);  Па,  (сталь) иллюстрирует рис. 1. Видно, что в начале удара зависимость  близка к линейной, тогда как  существенно нелинейна. Однако, при c обе функции стремятся асимптотически к предельным значениям.

Необходимо также иметь в виду, что с высокой степенью точности [8]

.

При малых  приближенно

,

что, в общем, согласуется с .

Отметим, что соотношения -, записанные для случая удара частицы по поверхности обрабатываемого тела, можно, в принципе, распространить на удар частиц по ранее осевшим, заменяя параметры  на модуль Юнга , коэффициент Пуассона  напыленного слоя.

Таким образом, при ударном взаимодействии твердых частиц полимерного порошка с преградой получены аналитические зависимости для оценки интенсивности их осаждения, поглощения материалом энергии удара, в том числе, с учетом ранее осевших на обрабатываемое тело частиц порошка. Представлены соотношения для расчета времени контакта деформируемых частиц с препятствием, радиуса площадки контакта, распределения давления по ней, максимальной силы удара, других показателей.

Литература

1. Яковлев А.Д. Порошковые краски/ Яковлев А.Д. – Л.: Химия, 1987 – 216с.
2. Галимов Э.Р. Полимерные порошковые покрытия специального назначения/ Галимов Э.Р., Зверев Э.В., Тукбаев Э.Е., Галимова Н.Я., Курынцев С.В., Мухин А.М. – Казань: Изд-во «Офсет Сервис», 2012. – 164с.
3. Федяев В.Л. Математическое моделирование процессов, протекающих при струйном напылении полимерных порошковых покрытий/ Федяев В.Л., Галимов Э.Р., Сираев А.Р., Мартинес Маркес Л. - Актуальные проблемы механики сплошной среды. К 25-летию ИММ КазНЦ РАН. Сб. науч. трудов. – Казань: Изд-во «ФЭН» АН РТ, 2016. 452с.
4. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики/ Тарг С.М. – М.: Наука, 1966. – 450с.
5. Ландау Л.Д. Механика/ Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. – М.: Наука, 1965. – 204с.
6. Тимошенко С.П. Теория упругости/ Тимошенко С.П., Гудьир Дж.Н. – М.: Наука, 1975. – 576с.
7. Эрозия/ Под ред. К.Прис. – М. Мир, 1982. – 464с.
8. Зукас Дж.А. Динамика удара/ Зукас Дж.А., Николас Т., Свифт Х.Ф., Грещук Л.Б., Курран Д.Р. – М.: Мир, 1985. – 296с.
9. Батуев Г.С. Инженерные методы, исследования ударных процессов/ Батуев Г.С., Голубков Ю.В., Ефремов А.К., Федосов А.А. – М.: Машиностроение, 1977. – 240с.