

Моделирование механизма удаления свободнолежащих на поверхности микрочастиц детонирующими газовыми смесями

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»
ОАО «Мотор Сич»*

Разработана математическая модель уноса свободнолежащих микрочастиц с поверхности детали при термоимпульсной очистке. Моделирование проводилось с учетом шероховатости поверхности, характерной для прецизионных деталей. По результатам численного исследования показано существенное влияние шероховатости поверхности на механизм очистки. Проведено сравнение времени отрыва частиц со временем их оплавления. Показано, что основным механизмом удаления микрочастиц является отрыв аэродинамическими силами с последующим сгоранием или испарением при взаимодействии с продуктами сгорания. Проанализировано влияние термического расширения поверхности детали на эффективность удаления частиц.

Ключевые слова: термоимпульсная очистка, микрочастица, шероховатость, ударная волна, время отрыва, оплавление, термическое расширение поверхности.

Введение

Проблема технологической очистки высокоточных деталей и механизмов, имеющих пары трения, актуальна для всего машиностроения. При обеспечении чистоты поверхностей деталей и рабочих полостей их ресурс может быть увеличен в несколько раз. Термоимпульсной метод, в котором инструментом является детонирующая газовая смесь, является универсальным методом финишной очистки [1, 2], позволяет эффективно очищать детали произвольно сложной формы, в том числе их внутренние полости. За счет возможности дозирования тепловых потоков регулированием времени обработки, метод позволяет осуществлять очистку даже деталей из пластика [3].

Процессы, приводящие к удалению микрочастиц с поверхности при термоимпульсной очистке, сложны и мало изучены. До настоящего времени нет ни строгих аналитических решений и даже общей эмпирической теории очистки под действием ударных волн.

В известных работах, посвященных термоимпульсной очистке, в качестве основного механизма удаления микрочастиц принимается их оплавление на поверхности [4, 5]. Однако в данных работах действие детонационной волны рассматривается как импульсный тепловой поток, что не позволяет оценить влияние других факторов и может привести к неточностям при назначении технологических режимов очистки.

Поэтому целью настоящей работы являлось создание новой математической модели, позволяющей комплексно описывать поведение микрочастиц при термоимпульсной очистке. Для более точного учета особенностей термоимпульсной очистки в качестве одного из параметров при моделировании рассматривалась шероховатость поверхности обрабатываемой детали.

Допущения, принятые при построении математической модели

Микрочастицами будем считать частицы, для которых силы адгезии меньше их веса. Как правило, верхней границей размера таких частиц можно принимать величину 100 мкм. Микрочастицы, находящиеся на поверхности деталей после механообработки, имеют различное происхождение, отличаются по форме и материалу. Это могут быть металлические частицы, образовавшиеся при резании, частицы абразива и пыли. При термоэнергетическом удалении заусенцев, по технологии, использующейся фирмами ATL, KENNAMETAL, BOSCH [3], на поверхностях детали в виде шарообразного «бисера» оседают оксиды материала детали.

При построении математической модели ограничимся случаем шарообразных частиц, свободно лежащих на поверхности. На такие частицы могут действовать следующие силы: сила тяжести, силы адгезии, электростатические силы, капиллярные силы (в случае если на поверхности присутствует жидкость). При наличии на поверхности масляных загрязнений прилипание частиц может быть обусловлено липкостью подложки.

При термоимпульсной очистке в качестве предварительных операций применяются обезжиривание, промывка и сушка деталей. Поэтому, пренебрегая электростатическими силами, будем считать, что в исходном состоянии перед очисткой на частицы действуют силы адгезии, тяжести и трения.

При прохождении ударной волны на частицу будут дополнительно воздействовать две силы – аэродинамическая и сила, вызванная термоупругим расширением поверхности. Действие момента сил, возникающего, когда равнодействующая сила не проходит через центр тяжести, приводит к качению частиц по поверхности.

Для случая частицы на горизонтальной поверхности в горизонтальной плоскости на частицу действует сила давления и сила трения, а в вертикальной – сила веса, подъемная сила и сила адгезии.

$$F_x = F_{лоб} - F_{тр} = F_{лоб} - k(F_{ад} + G), \quad (1)$$

$$F_n = F_{нод} - F_{ад} - G. \quad (2)$$

Условия, при котором возможен перенос частицы в горизонтальной плоскости скольжением, волочением или перекачиванием выразится следующим неравенством:

$$F_{лоб} - k(F_{ад} + G) > 0, F_{лоб} > F_{тр}, F_x > 0, \quad (3)$$

где k – коэффициент трения;
 $F_{ад}$ – силы адгезии частиц к поверхности;
 $F_{лоб}$ – сила давления (лобовая сила);
 $F_{тр}$ – сила трения;
 G – вес частицы.

Условия, при котором возможен унос частиц с поверхности, выразятся неравенствами:

$$F_{нод} - P - F_{ад} > 0, F_{нод} > F_{ад}, F_y > 0 \quad (4)$$

При моделировании отрыва частицы от поверхности следует учитывать сильную зависимость сил адгезии от расстояния между частицей и поверхностью. Поэтому при моделировании движения частицы после начала отрыва, который фиксировался возникновением положительной компоненты скорости частицы по оси OY, сила адгезии считалась равной нулю.

Особенности моделирования отрыва частицы от поверхности

Численное моделирование производилось для случая воздействия ударных волн на свободнолежащую алюминиевую частицу. Рассматривался случай термоимпульсной обработки при сгорании метано-воздушной смеси с начальным давлением в камере сгорания 0,2 МПа. Для этого случая ранее были установлены параметры возникающей ударной волны – скачок давления 4,5 МПа и время затухания [6].

Решение поставленной задачи производилось в двух постановках - с использованием модели Эйлера и стационарной сетки конечных элементов на участке разгона и с использованием Лагранжевых перестраивающихся сеток для моделирования движения частицы после отрыва. Применение двух разных подходов вызвано особенностями моделирования разных этапов при движении частицы (качение, отрыв), а так же возможностью прикладывать к ней внешние нагрузки. При моделировании поведения частиц на участке разгона расчетная область представлялась в виде многофазного потока, где в качестве отдельных фаз выделены алюминиевая частица и газообразные продукты реакции горения метано-воздушной смеси.

Начальный перепад давления приводил к образованию ударной волны. При ее соударении с частицей происходит образование вторичной отраженной ударной волны (рис. 1).

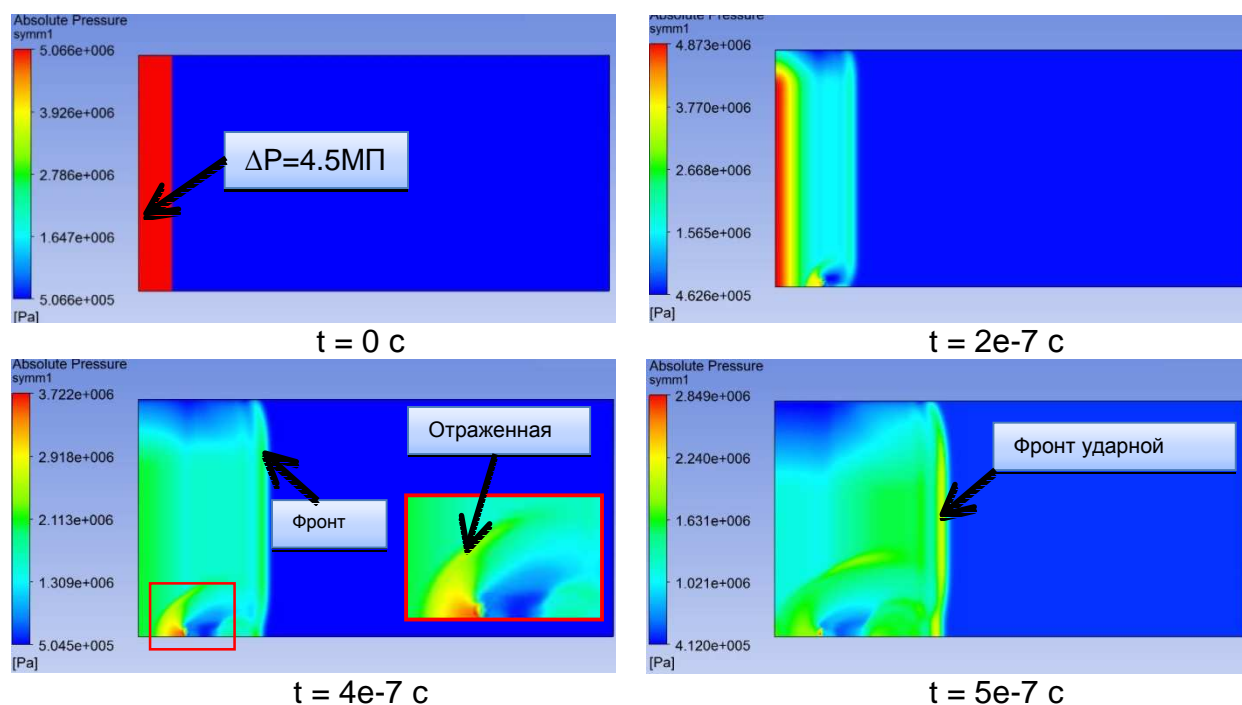


Рис. 1. Образование и распространение ударной волны

После ударе волны о поверхность частицы начинается ее качение. Движение частицы по поверхности определяет длину участка разгона, пройдя который она отрывается от поверхности детали. Об отрыве частицы от поверхности свидетельствует наличие положительной вертикальной составляющей скорости движения.

Задача решалась для частиц диаметром 10, 20, 30, 40 и 50 мкм. Для каждого случая определялось время отрыва и длина участка разгона. На первом этапе моделирование проводилось для случая частицы на гладкой поверхности (рис. 2).

Наличие шероховатости существенно влияет на отрыв частиц и на длину участка разгона. При моделировании рассматривались величины шероховатости соответствующие требованиям для внутренних каналов топливных агрегатов (Ra 2.5 и Ra 3.2).

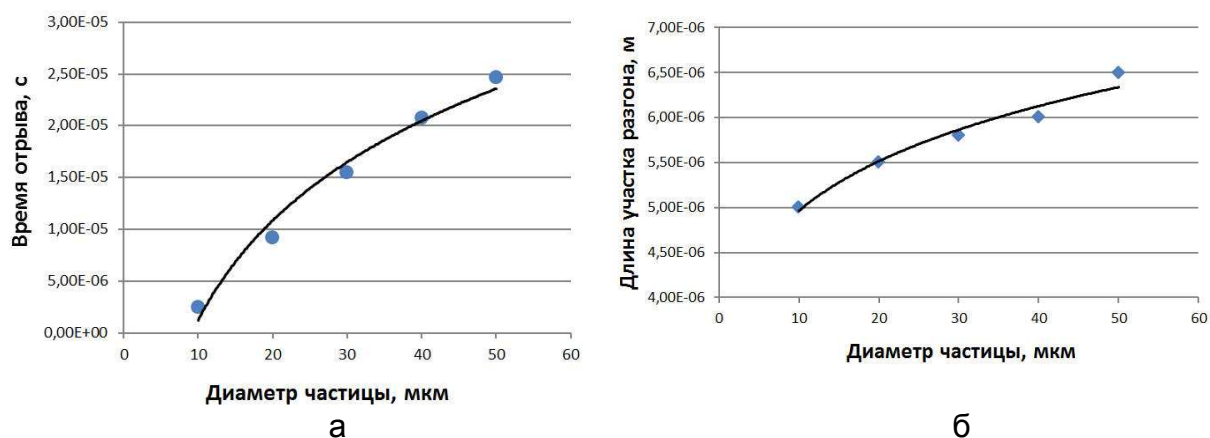


Рис. 2. Результаты моделирования для гладкой поверхности:
а – время отрыва; б – длина участка разгона

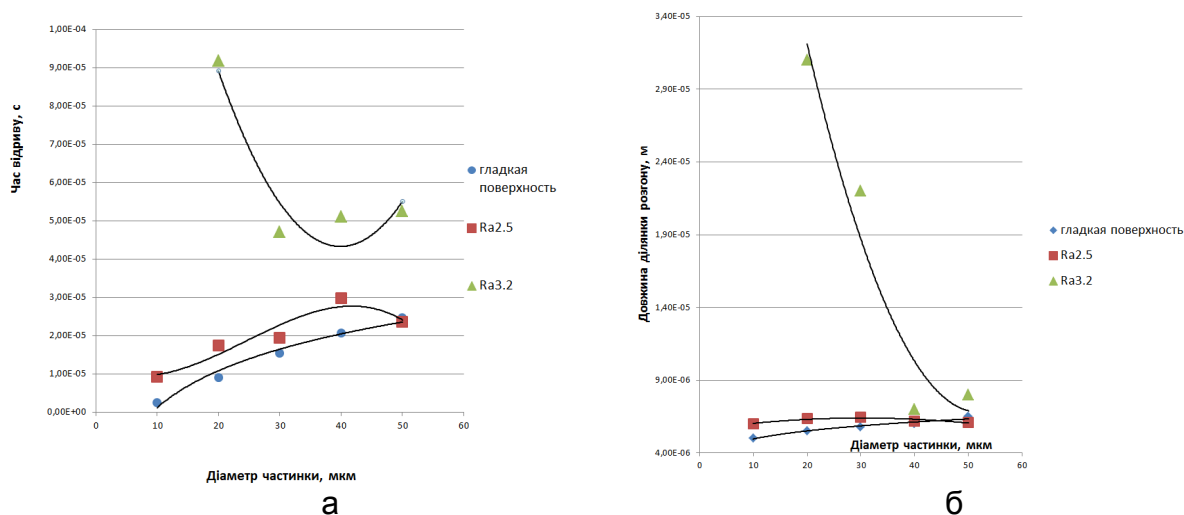


Рис. 3. Результаты моделирования для шероховатой поверхности:
а – время отрыва; б – длина участка разгона

Как показало моделирование, наиболее чувствительными к шероховатости оказались микрочастицы $\varnothing 10$ мкм (рис. 3). Уже при шероховатости Ra 2.5 время

отрыва увеличилось в 3,75 раза по сравнению с гладкой поверхностью. При шероховатости поверхности Ra 3.2 отрыва частицы \varnothing 10 мкм не произошло, а наблюдалось ее непрерывное качение.

По результатам моделирования для оценки способности частицы отрываться от поверхности под действием на нее нагрузки от набегающего потока предложено использовать зависимость:

$$\lambda = \frac{Ra}{d}, \quad (5)$$

где Ra – шероховатость поверхности; d – диаметр частицы. Уже при $\lambda > 0.25$ отрыв частицы от поверхности маловероятен.

Моделирование движения частиц в потоке

Эйлер-Эйлера модель при решении задач связанных с мультифазным течением требует достаточно малого шага по времени и очень чувствительна к размеру ячейки сетки конечных элементов. Поэтому для моделирования движения частицы в свободном потоке применяется другой подход, основан на применении деформируемых сеток с их последующей перестройкой.

Частица представлялась как абсолютно жесткое тело, движущееся в потоке под действием аэродинамических сил и моментов и гравитации. При моделировании использовался специальный решатель 6DOF (6 Degree of Freedom – 6 Степеней свободы), который вычисляет положение и ориентацию частицы, как жесткого тела, используя уравнения движения. Для оценки взаимодействия частиц различного диаметра друг с другом рассмотрен случай с несколькими свободнолежащими частицами разного размера. Для получения адекватного результата, необходима интеграция цикла перестройки сетки конечных элементов в общий цикл решения. Пример реализации применения цикла перестройки сетки показан на рис. 4.

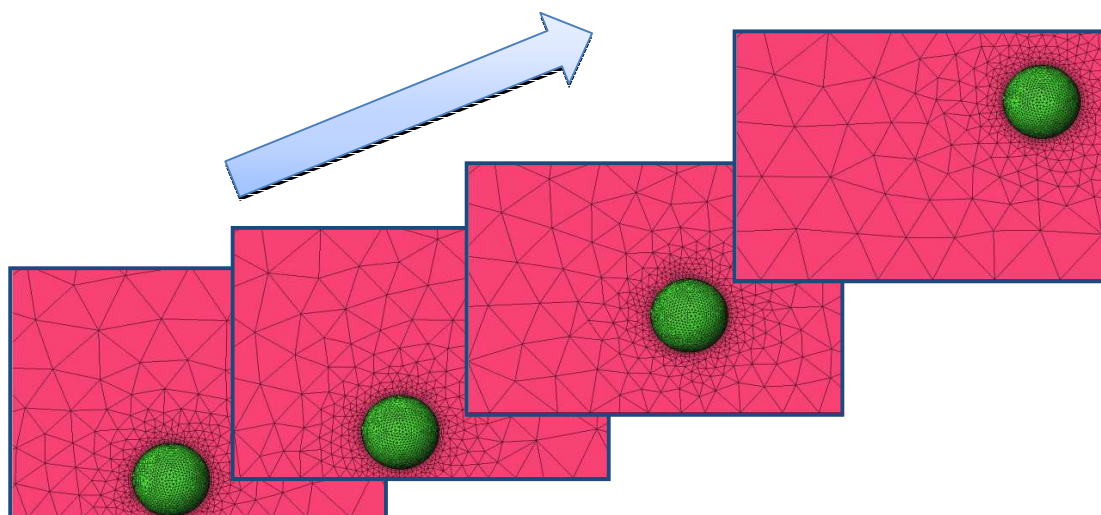


Рис. 4. Реализация цикла с перестроением сетки конечных элементов

При решении поставленной задачи в качестве контрольного параметра выступал минимальный угол элемента сетки по всей расчетной области. Подключение цикла перестройки сетки производилось при появлении в расчетной области элемента с углом при вершине менее 30° . После этого расчет продолжался на новой сетке, куда после интерполяции результатов с предыдущей сетки подгружались начальные условия для дальнейших вычислений. На рис. 5 показано распределение давления в расчетной области, а так же положение частиц при их перемещении.

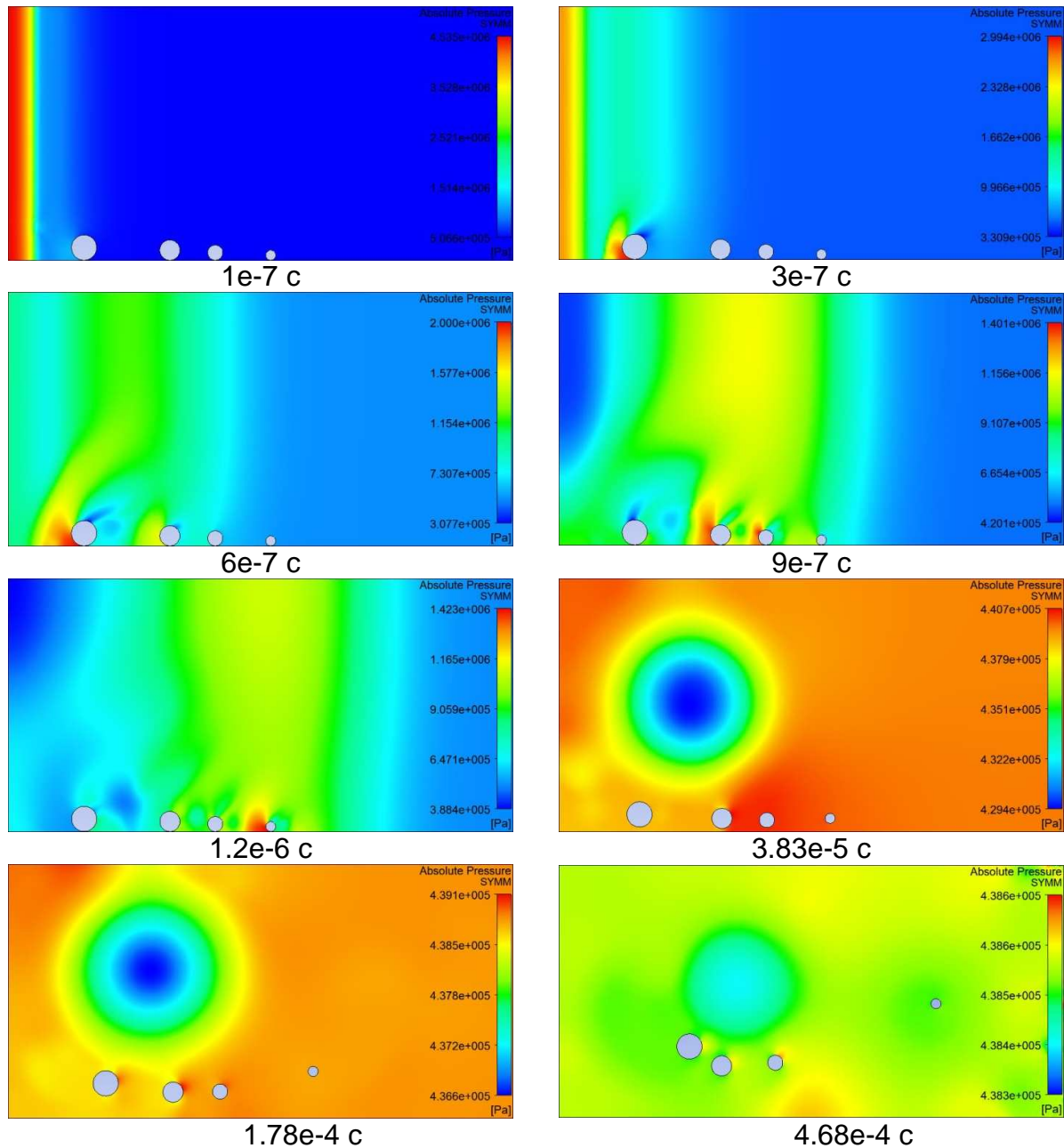


Рис. 5. Перемещение частиц в свободном потоке

Результаты моделирования показывают, что при прохождении ударной волны, образуется множество вторичных волн, отраженных как от частиц, так и

стенок. Для рассмотренного случая, начиная с 0.00026 с, воздействие отраженных волн на частицу диаметром 40 мкм превышает воздействие от основной ударной волны. После отражения основной волны от задней стенки, образуется мощный вихрь, который создает разрежение в центральной части канала, и способствует «затягиванию» частиц в эту зону. Таким образом, поведение частиц в потоке зависит от формы канала, количества частиц, их взаимного расположения.

Анализ температурного состояния частицы является одним из ключевых параметров для назначения режимов термоимпульсной обработки. Интенсивность нагрева частиц зависит от характера течения у поверхности. Поэтому задача решалась в постановке связанной с обтеканием частиц.

При моделировании не использовалась модель мультифазных превращений при плавлении частицы, поэтому считается, что микрочастица оплавляется по достижении температуры плавления. Зависимость времени оплавления от диаметра частицы показана на рис. 6. Зависимости изменения температуры частиц от времени приведены на рис. 7.

Сравнение результатов решения задачи теплообмена и движения частиц показало, что на момент отрыва ни одна из частиц не достигла температуры плавления и была унесена с поверхности в твердом состоянии. Исключением могут являться частицы, меньшие критического размера. Для рассмотренного случая при обработке поверхности с шероховатостью Ra3.2 отрыва частицы отрыва частицы $\varnothing 10$ мкм не произошло. Таким образом, можно утверждать, что ее оплавление произошло на поверхности обрабатываемой детали.

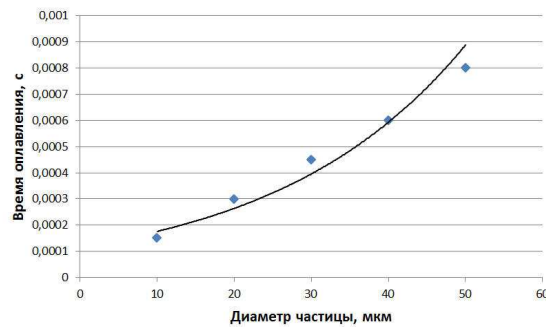


Рис. 6. Зависимость времени оплавления от диаметра частицы

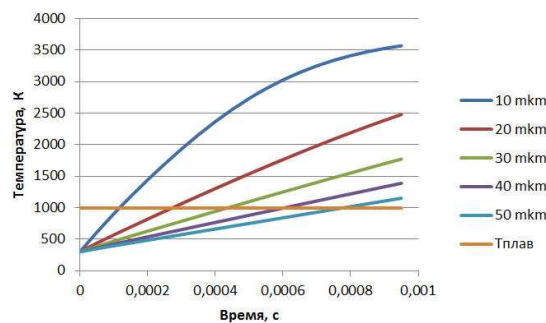


Рис. 7. Интенсивность нагрева частиц различного диаметра

При нагреве детали, ее поверхность подвергается температурному расширению. При прохождении ударной детонационной волны по поверхности проходит волна расширения, которая передает импульс всем частицам, находящимся на обрабатываемой детали. Такой механизм является основным при лазерной очистке от микрочастиц [7]. Однако он не является определяющим для термоимпульсной обработки. Результаты моделирования показали, что учет термоупругого расширения приводит к уменьшению времени отрыва не более чем на 10% (рис. 8).

Для случая удаления частицы диаметром 10 мкм с поверхности шероховатостью Ra 3.2 даже с учетом термического расширения, частица оплавляется до того, как произошёл ее отрыв от поверхности детали.

Сравнивая время затухания ударных волн (рис. 9) со временем оплавления можно сделать вывод, после затухания ударных волн в камере все частицы будут удалены. Поэтому, начального давления метано-воздушной топливной смеси 0,2 МПа в камере сгорания вполне достаточно, для удаления частиц диаметром от 10 до 50 мкм. Дальнейшее повышение давления смеси не даст положительного эффекта и может привести к перегреву детали или ее разрушению.

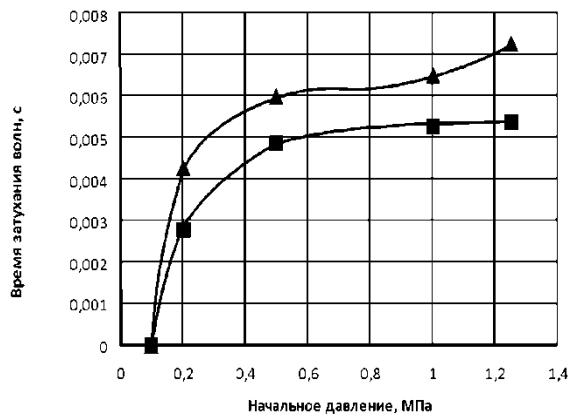


Рис. 8. Зависимость времени затухания ударных волн после детонации заряда от начального давления в камере: ■ – CH₄; ▲ – C₃H₈

Выводы

1. Показано, что отрыв частиц размером до 50 мкм с поверхности обрабатываемой детали происходит раньше их оплавления.
2. Показано существенное влияние шероховатости поверхности на отрыв частиц с поверхности детали. Наблюдается увеличение длины участка разгона и времени отрыва.
3. Показано, что при назначенном режиме обработки метано-воздушной смесью с начальным давлением в камере 0,2 МПа происходит оплавление всех микрочастиц размером до 50 мкм (кроме случая с частицами диаметром 10 мкм). Дальнейшее повышение начального давления в камере сгорания или применение более энергетического топлива (например, пропана) не даст положительного эффекта, а может привести к перегреву детали или ее разрушению.
4. Показано, что поведение частиц в потоке довольно не предсказуемо. Их перемещение зависит от формы канала, количества частиц, их взаимного расположения и т.д.

5. Показано, что механизм удаления за счет термического расширения не является определяющим для термоимпульсной обработки ввиду его малой эффективности для данных целей.

Список литературы

1. Burr prevention and minimization for the aerospace industry. Laboratory for manufacturing automation. Research reports 1999–2000. University of California, Berkeley. 2002. – P.4-9.

2. Elaine, S. Oran, Vadim N. Gamezo Origins of the deflagration-to-detonation transition in gas-phase combustion [Электронный ресурс] . – Режим доступа до журн: <http://www.sciencedirect.com/science>

3. Gillespie, L. Deburring and edge finishing handbook / L. Gillespie – New York City: Industrial Press, 1999. – 404p.

4. Paik, J.K. CFD simulations of gas explosion and fire actions [Электронный ресурс] / Paik J.K. // Ships and Offshore Structures – 2010. – № 5. – С.3-12. – Режим доступа до журн.: http://www.informaworld.com/smpp/content~content=a91698872_8&db=all

5. Мазниченко, С.А. Об особенностях смесеобразования в тепловых приводах импульсного оборудования [Текст]/ С.А. Мазниченко, С.И. Планковский, О.С. Борисова // Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» – Вып. №7(44). – Х.,2007. – С.45-52.

6. Планковский, С.И Моделирование термоимпульсной обработки с учетом неоднородности топливной смеси/ С.И. Планковский, О.В. Шипуль, О.В.Трифонов, О.С. Борисова // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 46. – Х.,2010. – С. 75-87.

7. Мануйлович, И.С. Взрывные и детонационные процессы в каналах и открытом пространстве. [Текст]: автореф. дис. к.ф.м. н.: 01.02.05/ И.С. Мануйлович. – М.: МГУ, 2010 . – 27 с.

8. Дерягин, Б.В., Коротова П.А. Адгезия. - АН СССР, 1949.

9. Зимон, А.Д. Адгезия пыли и порошков. - М.: Химия, 1967. – 372 с.

Рецензент: д-р техн. наук, профессор Долматов А.И., зав. кафедрой технологии авиадвигателестроения, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Поступила в редакцию 10.05.2012

Моделювання механізму видалення мікрочастинок, що вільно лежать на поверхні, за допомогою детонуючих газових сумішей

Розроблено математичну модель віднесення мікрочастинок, що вільно лежать, з поверхні деталі при термоімпульсному очищенні. Моделювання проводилося з урахуванням шорсткості поверхні, характерної для прецизійних деталей. Згідно з результатами числового дослідження показано суттєвий вплив шорсткості поверхні на механізм очищення. Проведено порівняння часу відриву частинок з часом їх оплавлення. Показано, що основним механізмом видалення мікрочастинок є відрив аеродинамічними силами з подальшим згорянням або випаровуванням при взаємодії з продуктами згоряння. Проаналізовано вплив термічного розширення поверхні деталі на ефективність видалення частинок.

Ключові слова: термоімпульсне очищення, мікрочастинка, шорсткість, ударна хвиля, час відриву, оплавлення, термічне розширення поверхні.

Simulation of removing mechanism of free particles from surface by detonable gaseous mixtures

The mathematical model of removing free particle from surface at thermal pulse deburring was developed. Simulation takes into account roughness that is typical for precision parts. According to the simulation results, significant influence of roughness on the removing mechanism was shown. Comparison of the detachment time of the particles over melting time was carried out. It is shown, that the main mechanism is the removing particles by aerodynamic forces, with following combustion or evaporation during the interaction with the products of combustion. Influence of thermal expansion on the efficiency of particle removing was analyzed.

Keywords: thermal pulse deburring, microparticle, roughness, shock wave, the detachment time, melting, thermal expansion