УДК 62 - 9

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗЕРЕН СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ЕЁ ОЧИСТКЕ

© 2016 А.В. Курненков, А.Ю. Шурыгин, В.В. Глебов

Арзамасский политехнический институт (филиал) Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Статья поступила в редакцию 06.12.2016

В работе представлены результаты моделирования методом конечных элементов процесса извлечения абразивных зерен из смазочно-охлаждающей жидкости при её очистке с применением программного продукта ANSYS Fluent. При этом получены: форма свободной поверхности тонкопленочного течения жидкости в поле центробежных сил, распределение скоростей потока, траектории движение твердых частиц в потоке жидкости и в воздушной среде при выходе из потока в зависимости от величины их диаметра от 1 до 100 мкм.

Ключевые слова: смазочно-охлаждающая жидкость, очистка, абразивные зерна, гидродинамика, метод конечных элементов, свободная поверхность.

Применение тонкопленочного течения и центробежного поля позволяет интенсифицировать совмещенные процессы непрерывной очистки смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ), рекуперации и классификации абразивных зерен, в частности сверхтвердых материалов (СТМ). Для реализации данных процессов разработана установка, составными элементами которой являются ротор с криволинейной образующей и приемник для сбора фракций [1, 2]. Данная установка обеспечивает:

 высокие показатели качества абразивной обработки за счет очистки СОЖ от шлама (мелкодисперсных продуктов обработки материала заготовки и износа шлифовального инструмента);

 извлечение из СОЖ при очистке вырванных из связки инструмента абразивных зерен, которые сохранили режущую способность, для повторного использования при изготовлении шлифовальных инструментов (при этом исключается переработка шлама и связанные с этим трудоемкие операции вне технологического оборудования);

- разделение извлекаемых зерен по размерным группам [3].

Основными технологическими параметрами работы установки являются угловая скорость вращения ротора и расход жидкости. Вращение ротора осуществляется с помощью электродвигателя переменного тока и частотного преобразователя для регулирования частоты вращения.

Шурыгин Алексей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, декан факультета.

E-mail: shurygin@ apingtu.edu.ru

Глебов Владимир Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии машиностроения. E-mail: glebov@apingtu.edu.ru Подача жидкости на ротор осуществляется через штуцер, внутренний диаметр которого зависит от расхода жидкости.

Процесс извлечения частиц примесей из СОЖ с применением разработанной установки является сложным, включающем в себя движение тонкого слоя жидкости по поверхности ротора в поле центробежных сил и движение частиц в жидкости и воздушной среде. Движение жидкости описывается системой уравнений Навье - Стокса и является по своей природе волновым течением, а движение частиц описывается отдельно уравнением движения в жидкости и в воздушной среде [4]. Эффективность очистки СОЖ и процессов рекуперации и классификации во многом зависят от устойчивого потока жидкости на поверхности вращающегося ротора, отсутствие которого создает волновое течение жидкости и, как следствие, переменную толщину потока [5].

В настоящее время существует большое количество систем инженерного анализа, которые позволяют эффективно проанализировать процессы на основе их моделирования и модернизировать существующие конструктивные решения. При этом анализ на основе двухмерного моделирования по сравнению с трёхмерным является менее затратным по времени и ресурсам, но не всегда позволяет адекватно отобразить исследуемые процессы.

Целью работы является исследование совмещённых процессов очистки СОЖ, рекуперации и классификации абразивных зерен с применением методов вычислительной гидродинамики.

Конструктивная схема узла очистки и размерной классификации показана на рис. 1. На рис. 2 показана соответствующая ей трёхмерная модель расчетной области, созданная в модуле ANSYS DesignModeler (половина лотков скрыта для более наглядного представления). Расчетная область состоит из двух основных зон:

Курненков Антон Валерьевич, ассистент кафедры технологии машиностроения. E-mail: asm061@list.ru



Рис. 1. Конструктивная схема

- зона тонкоплёночного течения жидкости по поверхности ротора с приграничным слоем 500 мкм, расположенным по всей поверхности ротора, и минимальным размером ячейки 5 мкм;

- зона движения частиц абразива в воздушной среде с минимальным размером ячейки 200 мкм.

Конечно-элементная модель, фрагмент которой представлен на рис. 3, содержит около 9 млн. элементов. Ортогональное качество сетки, особенно важное для задач гидрогазодинамики, составило в среднем 0,988.

В качестве решателя использовался гидрогазодинамический модуль ANSYS Fluent, позволяющий исследовать гидродинамику многофазных потоков методом конечных элементов. При выборе алгоритма решения поставленной задачи выбран сопряженный решатель по давлению Pressure Based Coupled как более устойчивый для большого класса задач. Задача решалась в нестационарной постановке с шагом по времени 0.00002 с в абсолютной системе координат. В качестве схемы дискретизации использовалась схема локально третьего порядка точностей **QUICK**, рекомендованная для гексагональных сеток и закрученных потоков. В качестве алгоритма решения связки уравнения движения и неразрывности для корректного определения полей давления и скорости (Pressure-Velocity Coupling) выбран алгоритм Coupled.

При моделировании многофазных потоков со свободной поверхностью [6], в данном случае жидкость и воздух, выбрана модель свободной поверхности Volume of Fluid с числом фаз равным двум, а также явная схема дискретизации по времени (Explicit). В качестве модели вязкости выбрана основная двухпараметрическая модель турбулентности Realizable k-e с уравне-



Рис. 3. Конечно-элементная модель



Рис. 2. Модель расчетной области

ниями переноса для турбулентной кинетической энергии k и скорости турбулентной диссипации е. Преимущество Realizable k-е модели состоит в том, что она более точно предсказывает распределение диссипации плоских и круглых струй, что является актуальным при моделировании вращающихся потоков, пограничных слоев подверженных сильным градиентам давления, отрывных течений и рециркуляционных потоков [7]. В качестве рабочей жидкости была выбрана вода со следующими свойствами: поверхностное натяжение 0,072 H/м, плотность 1000 кг/м³.

Для моделирования динамики абразивных зерен в жидкой и воздушной средах использовалась модель Discrete Phase Model. Впрыск частиц задавался на расстоянии 3 мм от вершины ротора для частиц размерами 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50 и 100 мкм. Плотность частиц принималась равной 3500 кг/м³. Динамика абразивных зерен моделировалась в стационарной постановке, в основе которой лежит отображение траекторий частиц в заданный момент времени в соответствии с установившимися гидродинамическими условиями.

Важным этапом создания адекватной модели и успешного решения системы уравнений Навье-Стокса является корректное задание граничных условий. Задание граничных условий на поверхностях непроницаемых стенок не представляет собой значительных затруднений, поскольку задается условие равенства нулю всех компонентов вектора скорости. В отношении проницаемых границ (области входа и выхода) есть рекомендации по выбору согласованных условий, обеспечивающих устойчивое решение, например, скорость на входе и давление на выходе или наоборот. Схема задания граничных условий представлена на рис. 4. На входе задава-



Рис. 4. Схема задания граничных условий

лось значение скорости 5 м/с, что соответствует расходу жидкости 10 л/мин, а на выходе - статическое давление 0 Па. Угловая скорость вращения ротора задавалась равной 200 рад/с в абсолютной системе координат, шероховатость поверхности ротора была выбрана 3,2 мкм, контактный угол смачивания жидкости с поверхностью ротора -30°. Стенки лотков задавались неподвижными, коэффициент отражения от поверхности лотков принят равным 0,2.

Распределение осевой, радиальной, тангенциальной и результирующей скоростей потоков жидкости и воздуха, полученное в результате расчета поставленной задачи и отображённые в сечении расчетной области, представлены на рис. 5 а, б, в, г соответственно. Полученные распределения позволяют в большей степени оценить влияние на траектории движения абразивных зерен воздушного потока. Наибольшие значения результирующей скорости около 12 м/с наблюдаются на поверхности ротора в области четвёртого лотка, а у основания ротора скорости практически равны нулю, что свидетельствует об отрыве потока жидкости с поверхности ротора (рис.5г). Поле распределения осевой скорости, представленное на рис.5а, позволяет наблюдать обратный поток воздуха со скоростью около 2 м/с, что говорит о затягивании воздушного потока вращающимся ротором. Максимальные значения радиальной скорости около 6 м/с наблюдаются в области трех верхних приемных лотков (рис. 5б).

На рис. 6 представлена гидродинамика потока и траектории движения абразивных зерен в расчетный момент времени. Анализ гидродинамики потока позволяет выделить характерные области течения: волновое тонкопленочное течение жидкости ближе к вершине ротора, разрыв жидкости на струйки у основания ротора и попадание капель жидкости в лотки. При этом волновое течение создает неравномерность толщины потока тонкопленочного течения. Момент выхода частицы из потока жидкости отображается на траектории светлым тоном. При этом путь, пройденный абразивным зерном в потоке жидкости, находится в обратной зависимости от ее размера. На траекторию движения частиц размером менее



а – осевой скорости; б – радиальной скорости;
в – тангенциальной скорости; г – результирующей скорости



Рис. 6. Гидродинамическая картина потока жидкости и траектории движения зерен







Рис. 7. Траектории движения зерен разных размеров при их попадании в приемные лотки а – 100 мкм; б – 50 мкм; в – 40 мкм; г – 30 мкм; д – 20 мкм; е – 10 и 5 мкм

50 мкм оказывает влияние прилегающие к жидкости воздушные потоки.

Распределение абразивных зерен по размерным группам обеспечивается за счет попадания зерен заданного размера в соответствующие приемные лотки. Результаты моделирования, представленные на рис. 7, позволяют проследить динамику зерен различных размеров. Анализ рис. 7 показывает, что на траектории абразивных зерен кроме прилежащего воздушного потока может повлиять их отражение от поверхности приемных лотков. Зерно размером 100 мкм срывается практически сразу и по прямолинейной траектории попадает во второй сверху лоток, зёрна размерами 50-40 мкм попадают в третий сверху лоток, зёрна размерами 30-20 мкм - в четвёртый сверху лоток, частица размером 10 мкм оседает в самом нижнем лотке, а частицы размером менее 5 мкм, хотя они выходят из потока жидкости, за счет незначительной инерции не достигают приемных лотков и движутся в воздушном потоке.

Таким образом, проведенное моделирование гидродинамических процессов на основе метода конечных элементов позволило оценить тонкость очистки СОЖ и разделительную способность установки очистки СОЖ, рекуперации и классификации абразивных зерен. Дальнейшие исследования будут направлены на выявление резервов повышение тонкости очистки СОЖ с применением разработанной установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Глебов В.В., Шурыгин А.Ю., Сорокин В.М., Помелов Н.А. Установка для классификации зерен абразивного материала: Пат. 2513936 (РФ). 2014
- 2. Разработка конструкции установки для очистки СОЖ с применением программы Proengineer / В.В. Глебов, А.Ю.Шурыгин, Н.А. Помелов, А.В. Курненков, О.М.Колганова // Казанская наука. 2010. № 10. C. 106-108.
- 3. Исследование размерного распределения рекуперированных при очистке СОЖ абразивных зерен / В.В. Глебов, А.Ю.Шурыгин, А.В. Курненков, О.М.Колганова // Казанская наука. 2010. № 10. С. 204-207.
- Расчет основных технологических параметров 4. процесса отделения абразивной фракции из СОЖ центрифугированием / В.В. Глебов, В.П. Пучков, В.М. Сорокин, А.Ю. Шурыгин // Справочник. Инженерный журнал. 2006. № 1. С. 9-13.
- Курненков А.В., Глебов В.В., Шурыгин А.Ю. Исследо-5. вание влияния конструктивно-технологических параметров установки очистки СОЖ на гидродинамическую устойчивость потока на основе конечноэлементного моделирования // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 2. С. 104-107.
- 6. Characterizing liquid film thickness in spinning disc reactors / Tejas J. Bhatelia, Ranjeet P. Utikar, Vishnu K. Pareek, Moses O. Tade // Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia, 2009.
- 7. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. 618 c.

NUMERICAL SIMULATION OF SUPERHARD MATERIAL GRAINS SEPARATION PROCESS DURING COOLANT CLEANING

© 2016 A.V. Kurnenkov, A.Yu. Shurygin, V.V. Glebov

Arzamas Politechnical Institute (the Branch) of Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev

This paper presents the results of finite element modeling of abrasive grains separation process during coolant cleaning with software ANSYS Fluent. The simulation result obtained: form of the free surface of the thin liquid film flow in a centrifugal force field, distribution of flow velocities, tracks of solid particles in liquid film flow and air as a function of their diameter from 1 to 100 microns. Keywords: coolant, cleaning, abrasive grains, fluid dynamics, finite element method, free surface.

Anton Kurnenkov, Assistant Lecturer at the Mechanical Engineering Department. E-mail: asm061@list.ru Aleksey Shurygin, Candidate of Technics, Associate Professor, *Dean of Faculty. E-mail: shurygin@ apingtu.edu.ru* Vladimir Glebov, Candidate of Technics, Associate Professor, Head at the Mechanical Engineering Department. E-mail: glebov@apingtu.edu.ru