

УДК 621.951.47

С.И. Планковский, д-р техн. наук,
О.В. Шипуль, канд. техн. наук,
Р.А. Ходак,
С.А. Красовский,
Г.С. Тевзадзе

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ПРЕЦИЗИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВРЕМЕНЕМ ТЕРМОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

Характеристики современных машин, агрегатов, приборов определяются во многих случаях свойствами поверхностей деталей. Ресурс, надежность, эффективность работы изделий, особенно имеющих прецизионные пары трения, целиком зависят от свойств поверхностного слоя. Необходимое качество поверхности достигается путем применения отделочно-зачистных операций, трудоемкость которых занимает значительную часть в общей трудоемкости всей обработки детали (около 35% в авиационной промышленности) из-за низкого уровня механизации и массового применения ручного труда [1].

Термоимпульсная обработка является одним из наиболее перспективных методов для выполнения отделочно-зачистных операций. Метод обработки основан на кратковременном направленном воздействии на деталь газовой среды высокой температуры и давления в герметично закрытой камере. Достоинствами этого метода являются высокая производительность, достигаемая за счет одновременной обработки всех поверхностей деталей и кратковременности цикла, а также высокое качество обработки и отсутствие вторичных загрязнений в виде оксидов, закатов, пленов и т.п. Стабильность результатов, надежность, а также экологическая чистота выводят термоимпульсный метод в ряд самых перспективных из всех отделочно-зачистных методов [2, 3].

В последнее время в области отделочно-зачистных операций возникают новые задачи, связанные с растущими требованиями к точности и миниатюризации деталей прецизионных механизмов [4]. Уменьшение съема материала на финишных операциях размерной обработки приводит к уменьшению размеров заусенцев на кромках деталей. Наряду с ужесточающимися требованиями к качеству кромок прецизионных деталей это требует высокой точности задания как энергии, так и времени термоимпульсной обработки. Однако в выполненных до настоящего времени исследованиях не рассматривались вопросы, касающиеся особенностей создания системы управления временем термоимпульсной обработки деталей.

Поэтому целями настоящей статьи являются формулировка требований к системе управления временем прецизионной термоимпульсной

обработки и определение возможных путей ее реализации на основе анализа современных достижений в области создания механизмов с высокими скоростями движения исполнительных органов.

Требования к системе управления временем прецизионной термоимпульсной обработки

Для определения требований к точности управления временем термоимпульсной обработки авторами проведено численное моделирование оплавления кромки с заусенцем, характерным для финишной обработки прецизионных деталей. Величина радиуса скругления кромки a выбиралась равной 0,2 мм, что является верхней границей для кромок типа Е2 (острых) согласно требованиям международного стандарта [5].

Варьированием величины теплового потока q была получена серия кривых зависимости радиуса скругления кромки a от времени обработки t . На основе этих кривых для исследуемого материала (алюминий) получена поверхность режимов термоимпульсной отделки в координатах a - t - q (рис.1).

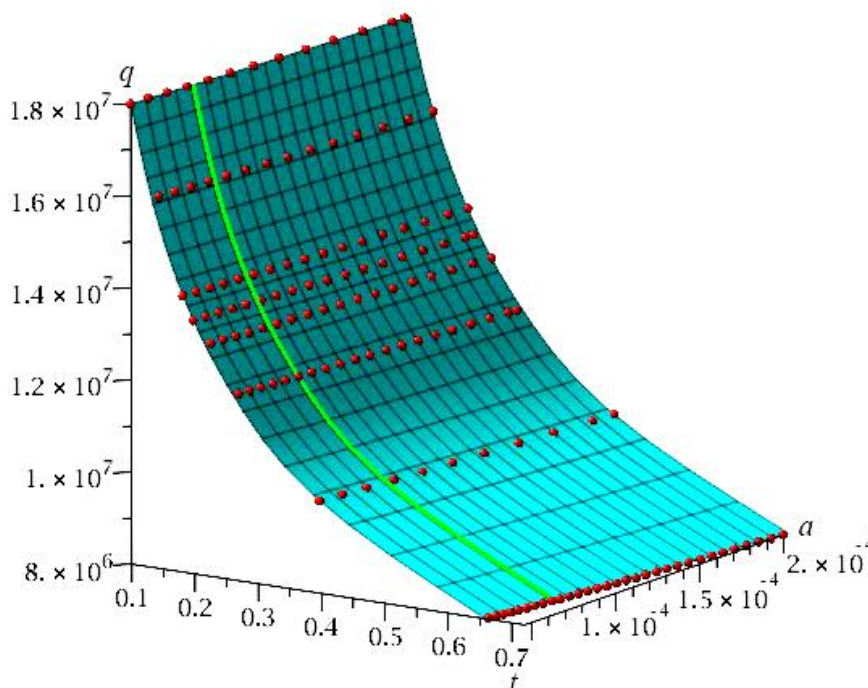


Рисунок 1 – Поверхность режимов термоимпульсной отделки кромки алюминиевой детали

Для постоянного значения теплового потока $q = \text{const}$ (в рассматриваемом случае равном $1,1 \cdot 10^7$ Вт/м²) получена зависимость влияния времени обработки t на величину скругления кромки a (рис. 2).

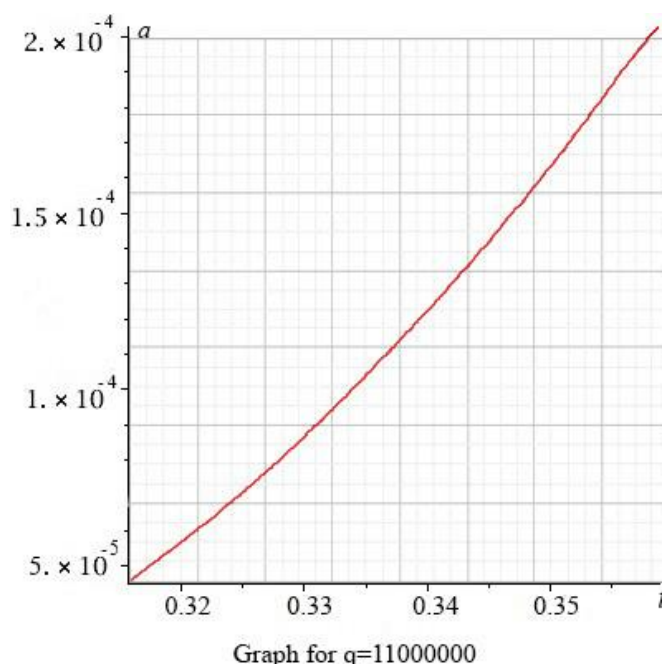


Рисунок 2 – График зависимости радиуса скругления кромки от времени обработки при постоянном тепловом потоке

В случае, показанном на рис. 2, при величине удельного теплового потока $q = 11000000$ в диапазоне изменения величины скругления кромки 0,1...0,2 мм соблюдение требований по допустимым отклонения кромки по классу А обеспечивается при погрешности обеспечения времени обработки не более 0,01 с. Рассмотренный случай относится к обработке алюминия. Для материалов с меньшей температуропроводностью при той же погрешности времени обработки граница зоны оплавления сместится на меньшую величину, что автоматически обеспечит выполнение требований по допустимому отклонению формы кромки по классу А стандарта [5].

С учетом возможности обработки деталей из меди, температуропроводность которой в 1,5 раза выше, чем у алюминия, для получения кромок по классу точности А стандарта [5] система управления термоимпульсной установки должна обеспечивать погрешность задания времени обработки порядка 0,006 с. Величина времени обработки согласно данным А.В Лосева [6] при этом составляет от $1 - 8 \cdot 10^{-3}$ с для высокоточной обработки до $1 - 5 \cdot 10^{-1}$ с для грубой. Таким образом, максимальные требования с точки зрения точности обработки и наиболее жесткие требования допустимого отклонения формы кромки по стандарту [5] приводят к необходимости обеспечения времени обработки с шагом порядка 10^{-3} с и погрешностью до $6 \cdot 10^{-3}$ с.

Рассмотрим возможности создания такого рода системы на базе модернизации существующих решений или на базе новых физических принципов, не использовавшихся ранее для управляемого выпуска в термоимпульсном оборудовании.

Пути создания системы управления временем прецизионной термоимпульсной обработки

В анализ не включались методы, связанные с разрушением запирающего элемента в результате взрыва с помощью электрического разряда или подрыва бризантного взрывчатого вещества. Такие способы не будут рассматриваться из-за сложности их реализации при циклической работе оборудования и очевидных проблем в обеспечении его безопасной эксплуатации.

Для определения направления создания системы управления временем прецизионной термоимпульсной обработки предложена классификация принципов действия клапанов управляемого выпуска продуктов сгорания (рис. 3).



Рисунок 3 – Принципы действия клапана управляемого выпуска

Увеличения скорости открытия клапана управляемого выпуска продуктов сгорания можно добиться либо за счет увеличения сил, действующих на замыкающий элемент, при максимальном снижении его массы, либо заранее, еще до начала инициации сгорания, разогнав его до нужной скорости. Второй вариант наиболее просто реализуется в

случае, когда замыкающий элемент при открытии и закрытии осуществляет вращательное движение.

При таком варианте исполнения клапана выпуска он должен иметь неподвижную и вращающуюся части. Для герметизации камеры может быть использован стандартный уплотнительный комплекс для торцевого уплотнения вращающихся валов из числа представленных на рынке изделий фирм Burgmann, John Crane, Roten, ASSEAL, Anga, Vulcan и др.

Замыкающий элемент в виде облегченной гильзы с окнами для выпуска продуктов сгорания в таком варианте клапана должен вращаться вместе с полым центральным валом, также имеющим выпускные окна. Гильза должна быть установлена на валу с возможностью поворота на 90° , причем в закрытом состоянии окна на валу и на гильзе не должны совпадать, благодаря чему обеспечивается герметизация по цилиндрической части вала.

На старте рабочего цикла вал вместе с установленной на нем затворной гильзой должен раскручиваться до заданной частоты вращения. При сигнале о произошедшем поджиге смеси в камере через заданный промежуток времени гильза тормозится механическим или электромагнитным тормозом. Время открытия клапана будет определяться частотой вращения вала и эффективностью тормоза и при скорости вращения вала 3600 об/мин с максимально эффективной остановкой составит $2,5 \cdot 10^{-3}$ с. Таким образом, клапан с вращающимся замыкающим элементом и электромагнитным торможением потенциально может обеспечить требуемые технические характеристики управления временем прецизионной термоимпульсной обработки.

Существенным недостатком такой системы является трудность обеспечения надежности уплотнений как по торцевой части вращающейся части клапана, так и по цилиндрической поверхности вращающегося полого вала и замыкающей поворотной гильзы.

В устройствах с линейным движением замыкающего элемента надежность уплотнений обеспечить гораздо легче. Для этого могут быть использованы современные уплотнительные комплексы фирм SKF, James Walker, Parker, Kastас и др. На сегодняшний день такие изделия широко представлены на рынке, их выбор очень разнообразен для самых различных применений. Подавляющее большинство таких уплотнений предназначено для применения при скоростях скольжения до 1,5...3 м/с. Однако среди них есть также образцы металлополимерных уплотнений, допускающих эксплуатацию при скоростях скольжения до 30 м/с, что полностью удовлетворяет требованиям к уплотнениям быстродействующего клапана выпуска продуктов сгорания.

Анализ возможностей применения вариантов привода скользящего замыкающего элемента (рис. 3) начнем с широко используемого в промышленности и апробированного в первом поколении термоимпульсного оборудования привода давлением. Электрогидравлический привод и

привод взрывом исключим из анализа из-за сложностей их практической реализации.

При использовании остальных вариантов привода давлением (пневматического, гидравлического и газогидравлического) увеличение быстродействия возможно только за счет увеличения скорости линейного движения замыкающего элемента. Элементарные оценки показывают, что для обеспечения длительности его полного хода при открытии меньшей, чем 0,01 с, потребуется увеличение давления открытия минимум до 2,0 МПа. В этом случае начиная разгон с нулевой скорости при ходе разгона 60 мм (до системы уплотнений) и ходе открытия 20 мм (высота окон выпуска) время перемещения замыкающего элемента составляет от $2,5 \cdot 10^{-3}$ с до $1,0 \cdot 10^{-2}$ с, т.е. будет находиться в пределах установленных требований.

Однако если учесть время срабатывания управляющих клапанов, которые должны обеспечить поступление газа или жидкости высокого давления в открывающую полость клапана, эти оценки изменятся. Лучшие из представленных на сегодняшний день на рынке клапанов, способных работать при давлении до 7,0 МПа, имеют полное время открытия от начала подачи электрического сигнала до завершения хода основного клапана от 0,01 до 0,03 с.

Увеличение быстродействия клапана с газогидравлическим приводом возможно за счет использования предварительного разгона так же, как для клапана с вращающимся замыкающим элементом. Однако для устранения возможных аварий при его использовании подача сигнала на открытие клапана должна проводиться не ранее сигнала, подтверждающего зажигание смеси. В противном случае возможно создание нештатной ситуации, связанной с несанкционированным выпуском взрывоопасной смеси из рабочей камеры.

Другим вариантом реализации принципа предварительного выполнения операций может быть использование устройств, удерживающих замыкающий элемент в закрытом состоянии при постоянно действующем на него давлении. Максимальное быстродействие в этом случае будет обеспечиваться при использовании электромагнитного удержания со временем срабатывания не больше, чем $1,0 \cdot 10^{-3}$ с. Оценки показывают, что такая система при соответствующем давлении открытия может обеспечить быстродействие клапана на уровне $1,0 \cdot 10^{-3}$ с. В этом случае нет необходимости в применении специальных быстродействующих клапанов. Стабильность времени открытия клапана выпуска продуктов сгорания может обеспечиваться автоматической коррекцией давления в ресивере подачей газа от емкости высокого давления.

Еще одним вариантом привода клапана выпуска продуктов сгорания с линейным движением замыкающего элемента является электромагнитный. Среди таких устройств наибольшие скорости и ускорения разгона обеспечивают импульсные электромагнитные ускорители.

Принцип их действия основан на взаимодействии магнитного поля, которое импульсно возбуждается индуктором от накопителя энергии и подвижным ферромагнитным якорем. Такие ускорители (например, пушка Гаусса) имеют низкие значения КПД и поэтому не могут рассматриваться в качестве базы для создания быстродействующего клапана выпуска термоимпульсного оборудования.

Рельсотронные ускорители представляют собой пару электродов, между которыми располагается электропроводный объект. При замыкании импульсного тока за счет действия силы Лоренца объект приходит в движение и разгоняется по направляющим. Скорость его разгона может составить несколько километров в секунду. Однако большие уровни тока в такой конструкции приводят к интенсивной эрозии как электродов, так и разгоняемого объекта. При эксплуатации клапана термоимпульсной установки (клапан частично погружен в воду) использование такого метода привода замыкающего элемента невозможно.

В индукционных ускорителях разгон подвижного якоря обеспечивается за счет взаимодействия магнитного поля, возбужденного импульсным током в обмотке индуктора с короткозамкнутой обмоткой якоря. Клапану термоимпульсной установки в наибольшей степени соответствует схема индукционного ускорителя с ферромагнитным сердечником. Замыкающий элемент будет выполнять роль якоря, а полая труба – сердечника. Удельные показатели индукционных ускорителей превышают показатели остальных импульсных ускорителей. Однако КПД их действия остается невысоким, так что для тока в десятки киловольт они разгоняют до скоростей в сотни метров в секунду объекты массой до 100 г, что явно недостаточно исходя из габаритов клапана термоимпульсной установки.

Использование же линейных электродвигателей в качестве привода клапана выпуска представляется довольно перспективным. Такого рода приводы достаточно широко представлены на рынке. Они могут обеспечивать перемещение управляемых элементов со скоростью до 10 м/с и ускорениями порядка 10^2 м/с². Такие значения скоростей и ускорений недостаточны для применения в составе системы управления временем термоимпульсной обработки. Однако следует учесть, что они относятся к образцам, которые создавались для других целей: обеспечения высокой точности позиционирования в случае применения в качестве приводов прецизионного станочного оборудования или для обеспечения высоких скоростей перемещения при относительно малых ускорениях в случае применения в транспортных системах.

В то же время нет никаких ограничений, которые делали бы невозможным создание на основе линейных электродвигателей приводов со скоростями движения до 20...50 м/с и ускорениями порядка 10^3 м/с². С учетом особенностей конструкции клапана выпуска продуктов сгорания для его привода в наибольшей степени подходят цилиндрические ли-

нейные электрические двигатели постоянного тока. В качестве статора, к которому подключается электропитание, может быть использован неподвижный полый вал, а в качестве ротора – замыкающий скользящий элемент. В конструкции такой гильзы должны быть использованы постоянные магниты с большой коэрцитивной силой, например магниты из редкоземельных металлов.

Проблемами, связанными с использованием таких материалов, является плохая температурная стабильность (максимальные рабочие температуры в зависимости от состава – в пределах от 80 до 200°C), плохая коррозионная стойкость и чувствительность к ударам. Это затрудняет создание клапанов на основе линейных электродвигателей для термоимпульсного оборудования.

Выводы

1. Исходя из норм международных стандартов по качеству кромок сформулированы требования по точности задания времени прецизионной термоимпульсной обработки. Показано, что для обработки кромок типа E2 (острых) на всех классах материалов система управления должна обеспечивать время обработки с шагом порядка 10^{-3} с и погрешностью до $6 \cdot 10^{-3}$.

2. Клапаны с вращающимся замыкающим элементом и с линейным движением при использовании в качестве привода цилиндрического линейного электродвигателя имеют ряд преимуществ, среди которых высокая стабильность времени открытия, легкая управляемость и безопасность эксплуатации. Однако для их применения в промышленном оборудовании требуется проведение дополнительных исследований, связанных с поиском путей повышения надежности их работы.

3. В настоящее время требованиям промышленной эксплуатации термоимпульсного оборудования в наибольшей степени отвечают варианты исполнения клапана выпуска продуктов сгорания с газовым приводом высокого давления и электромагнитным удержанием. С учетом доступности всех элементов такие системы выглядят наиболее реализуемыми.

Список использованных источников

1. О.В. Шипуль, Е.В. Цегельник, А.О. Гарин и др./ Современные методы финишной очистки интенсивными потоками энергии: монография.– Х: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2013. – 189 с.

2. Планковский, С.И. Современное состояние и перспективы развития технологий финишной отделки прецизионных деталей летательных аппаратов [Текст] / С.И. Планковский, А.В. Лосев, О.В. Шипуль,

О.С. Борисова // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 2 (69). – С. 39 – 46.

3. Шипуль, О. В. Современные методы финишной отделки кромок прецизионных деталей [Текст] / О. В. Шипуль // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 4. – С. 16 – 25.

4. Шипуль, О. В. Тенденции развития прецизионного производства [Текст] / О.В. Шипуль // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – Вып. 1(81). – Х., 2015. – С. 77 – 90.

5. Kato, Y. The standardization for the edge quality of the precise machining products [Текст]/ Y.K.Ohmri, E. Hatano, K. Takazawa// *Advanced Materials Research, Volume 24, Proceedings 9th International symposium on precision surface finishing and deburring technology, 5 – 7 November, 2007, Suzhou, China*. P. 3 – 90.

6. Лосев, А.В. Повышение эффективности зачистки деталей пневматических и гидротопливных систем при использовании термоимпульсного метода: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08; защищена 14.05.1995; утв. 07.10.1995 / Лосев Алексей Васильевич. – Х., 1995. – 210 с.

Поступила в редакцию 04.02.2017.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Г. Гребеников,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков*