

УДК 621.951.47

С. И. ПЛАНКОВСКИЙ, О. В. ШИПУЛЬ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОТДЕЛКИ КРОМОК
ПРИ ТЕРМОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ**

Рассматривается задача построения вычислительно эффективной математической модели термоимпульсной отделки кромок. На основе ранее выполненных работ сформулированы требования к такого рода модели. Предложенная математическая модель учитывает зависимость теплофизических характеристик материала от температуры и скрытую теплоту фазового перехода. Для учета изменения геометрии заусенца при оплавлении использована модель «смерти» элементов расчетной сетки после достижения температуры ликвидуса с изменением значения теплоемкости. На примере решения задачи оплавления заусенца, имеющего форму пластины, проведено сравнение результатов определения времени оплавления заусенца при использовании различных расчетных моделей.

Ключевые слова: термоимпульсная отделка кромок, математическая модель, оплавление заусенца.

Введение

Состояние кромок прецизионных деталей авиационных агрегатов существенно влияет на стабильность их технических характеристик, безотказность и ресурс работы. До настоящего времени задача автоматизации финишной отделки кромок прецизионных деталей, особенно имеющих сложную геометрическую форму, является нерешенной [1].

Многие из современных методов отделки кромок прецизионных деталей требуют применения специального инструмента и оснастки и хорошо вписываются в технологические цепочки узко специализированных производств.

Универсальность термоимпульсного оборудования, использующего в качестве инструмента обработки продукты сгорания детонирующих газовых смесей, делает его наиболее очевидным выбором для построения автоматизированных технологий финишной отделки и очистки прецизионных деталей [2].

Для этого необходимо создание методики автоматизированного назначения режимов термоимпульсной отделки кромок. С учетом сложности процессов, происходящих при термоимпульсной обработке, в качестве инструмента построения такой методики целесообразно использовать численное моделирование. Это со своей стороны требует применения адекватных, но вычислительно эффективных моделей термоимпульсной отделки кромки.

Математические модели, применявшиеся для этого в ранее выполненных работах, не в полной мере удовлетворяют требованиям адекватности и вычислительной эффективности. Разработка усовершенствованной модели термоимпульсной отделки кромок являлась целью настоящей работы.

Анализ известных публикаций

Оплавление заусенца при термоимпульсной обработке происходит в ходе теплообмена с продуктами сгорания топливной смеси в условиях действия ударных волн. При этом происходит нагрев материала заусенца до температуры плавления, отрыв капель металла с последующим их испарением в ядре потока.

Обрабатываться может деталь произвольной формы, поэтому картина волновых фронтов заранее установлена быть не может. Численную модель такого связанного и сложного процесса построить, безусловно, можно. Однако она потребует очень больших вычислительных затрат, а ее практическое использование для назначения режимов термоимпульсной обработки выглядит нереалистичным.

Для решения данной задачи в работе [3] был предложен метод, основанный на допущении о возможности назначения режимов термоимпульсной отделки кромок по результатам согласования решений двух задач: определения состояния заусенца под влиянием теплового потока известной величины и определения этой величины на основе моделирования горения газовой смеси в эквивалентной камере без того, чтобы решать задачи теплообмена для конкретной детали.

Решение первой из этих задач должно проводиться с использованием модели, которая учитывала особенности оплавления заусенца.

В известных работах использовано три различных подхода для моделирования отделки кромки оплавлением:

1) модели с постоянной геометрией заусенца и теплофизическими характеристиками материала, допускающие получение аналитического решения;

2) модель с постоянной геометрией заусенца с учетом температурной зависимости теплофизических характеристик материала;

3) модели с дискретно изменяющейся геометрией с учетом температурной зависимости теплофизических характеристик материала.

Первый подход был предложен в работах А. В. Лосева для задачи оплавления заусенца-пластины [4, 5]. Его преимуществом является аналитическая форма конечного решения. Однако пренебрежение температурной зависимостью теплофизических коэффициентов, по данным [6], может приводить к погрешностям более 30% (30X13) в определении времени оплавления заусенца, а при обработке термопластов – более 100% [8].

Во втором подходе (рис. 1 а) эта зависимость учитывалась, что привело к необходимости использовать численные методы для получения решения. В исходном варианте модели [6] не учитывалось изменение геометрии заусенца при оплавлении, из-за чего неточно задавался тепловой поток на границе оплавленной части.

Этот недостаток был устранен в модели с дискретно изменяющейся геометрией (рис. 1 б). При ее использовании расчет сводился к цепочке задач на заранее построенных сетках для заусенцев разной длины. Шаг дискретного изменения длины заусенца определялся из условия отрыва капли с учетом газодинамической силы и силы поверхностного натяжения [3, 8].

Как показано в работах [3, 8] результаты расчета температуры с учетом изменения геометрии для случая обработки термопластов могут более чем на 40% отличаться от значений при постоянной геометрии. Это делает очевидной необходимость учета изменения длины заусенца при его оплавлении при определении времени термоимпульсной зачистки.

Использование модели с дискретным изменением геометрии заусенца невозможно для моделирования трехмерной задачи отделки кромки, поскольку требует построения большого количества расчетных сеток при неочевидных условиях переключения задачи между расчетными конфигурациями.

Общей неточностью всех применявшихся для описания оплавления заусенцев и кромок модели является принимаемое допущение о равномерном распределении по поверхности удельного теплового потока.

Его значение, как отмечено выше, определяется на основании решения задачи о горении и затухании ударных волн в эквивалентной камере. С учетом того, что длина заусенцев на финишных операциях размерной обработки не превышает 0,1 мм, а границы зоны, в которой моделируется поле температуры, удалены от кромки на 1...2 мм, допущение о равномерности распределения удельного теплового потока в начальный момент является вполне обоснованным.

Однако при нагреве заусенца происходит уменьшение конвективного теплового потока, вклад которого в теплопередачу от продуктов сгорания при термоимпульсной обработке является основным [9]. Это уменьшение пропорционально разнице температур между продуктами сгорания и заусенцем. С учетом того, что температура заусенца меняется от комнатной (20°C) до температуры плавления (более 1500°C), удельный тепловой поток в ходе его оплавления будет меняться в несколько раз.

С учетом этих замечаний, расчетная модель оплавления заусенца должна быть откорректирована. Усовершенствованную модель будем строить на базе модели с постоянной геометрией расчетной сетки.

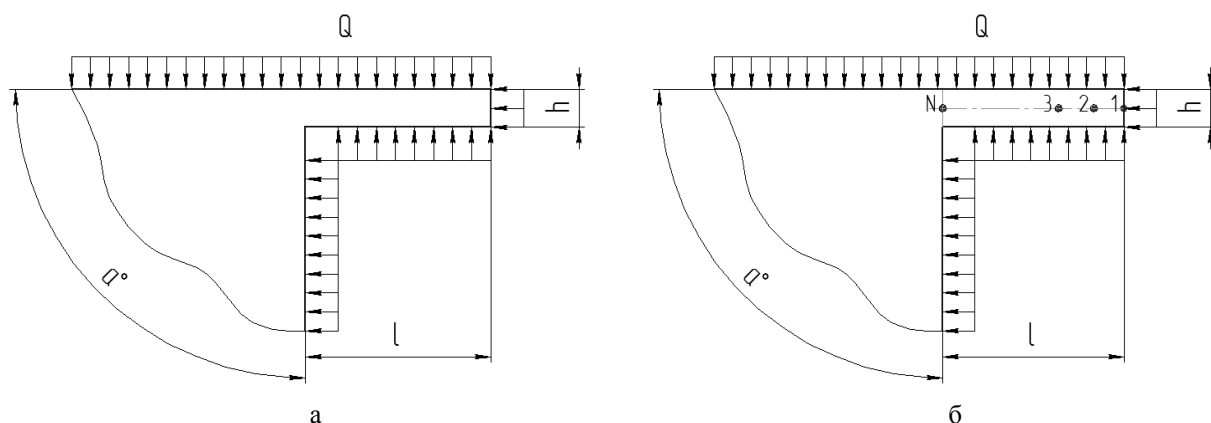


Рис. 1. Варианты расчетных схем термического состояния кромки с заусенцем:
а – с постоянной геометрией; б – с дискретно изменяющейся геометрией

Описание использованной математической модели

С учетом сделанных выше замечаний в качестве граничного условия на поверхности теплообмена будем задавать постоянный коэффициент теплоотдачи. При численной реализации это приведет к заданию теплового потока в виде:

$$q = q_0 (T_r - T) / (T_r - T_0), \quad (1)$$

где q_0 , T_0 – начальные значения теплового потока и детали; T_r – температура газа в камере на момент окончания сгорания (адиабатическая температура пламени).

Для учета оплавления используем модель «смерти» элемента – после достижения температуры ликвидуса теплоемкость материала уменьшается на несколько порядков (по умолчанию табличное значение умножается на 10^{-6}), параметры в узлах исключенных элементов расчетной сетки исключаются из дальнейшего рассмотрения, а граничные условия переносятся на новую границу.

Такая модель несколько отличается от принятой в работе [10] модели «суперпроводника». Модель «суперпроводника» также предполагает искусственное уменьшение теплоемкости и увеличение теплопроводности после достижения температуры ликвидуса. Благодаря этому тепло, полученное частью заусенца с температурой, большей температуры ликвидуса, практически без потерь передается на границу фазового перехода.

Следует заметить, что при увеличении расплавленной части это приводит к значительному завышению (до порядка) величины теплового потока на границе фазового перехода из-за того что тепло собирается с большой площади и передается на существенно меньшую.

Для того, чтобы устранить этот недостаток, в [10] в оплавленной части дополнительно вводился фиктивный отрицательный объемный источник тепла. Однако при численной реализации такого подхода возникала неустойчивость, связанная с тем, что

модель «суперпроводника» являлась двухсторонней, т.е. при незначительном охлаждении расплавленной части источник выключался, что приводило к появлению нефизичных колебаний температуры.

Эта неустойчивость может быть устранена уменьшением шага по времени, однако при этом резко возрастают вычислительные затраты и увеличивается время получения решения, делая применение упрощенной модели бессмысленным.

Удаление элементов, в которых превышена температура ликвидуса, несколько искажает картину процесса термоимпульсной зачистки. При реальном процессе расплавленный металл не может удаляться с детали полностью. Однако, с учетом того, что термоимпульсная зачистка происходит в условиях действия ударных волн, такое допущение выглядит достаточно обоснованным.

С учетом того, что время термоимпульсной обработки кромки составляет порядка 10^{-3} с, при расчете температур использовалось нелинейное уравнение теплопроводности Фурье. Описанная модель была протестирована на задаче оплавления заусенца в форме пластины. Результаты сравнивались с данными, полученными при использовании известных моделей.

Результаты численного моделирования и их обсуждение

В тестовой задаче рассматривалось оплавление заусенца различной длины (0,3, 0,5 мм) толщиной 0,1 мм. В качестве материала рассматривалось железо (Fe), для которого известны теплофизические характеристики до температуры ликвидуса и выше [11]. Как показывают графики, приведенные на рис. 2, в таком диапазоне температур они существенно зависят от температуры.

На рис. 3 приведены результаты моделирования нагрева заусенца при допущении о равномерном распределении теплового потока и при его вычислении по формуле (1). Показано изменение температуры в корне заусенца.

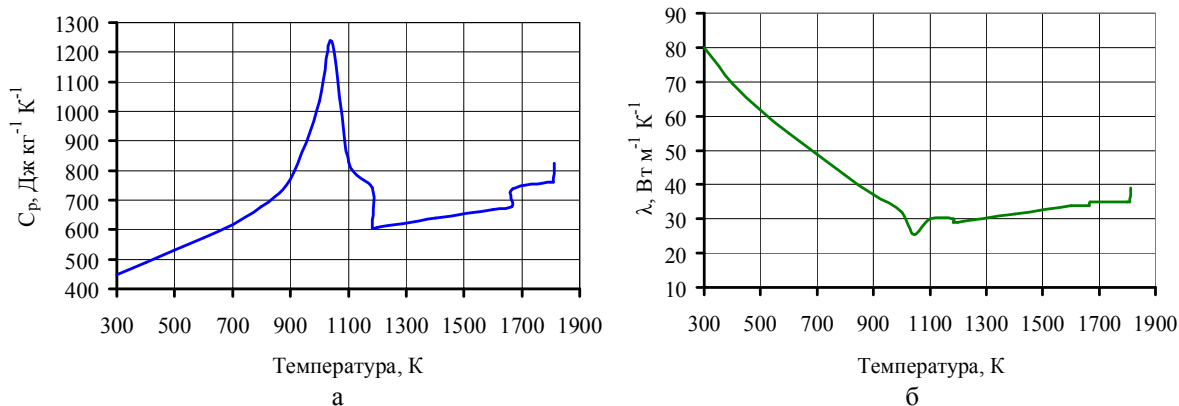


Рис. 2. Теплофизические свойства железа [11]: а – теплоемкость; б – теплопроводность

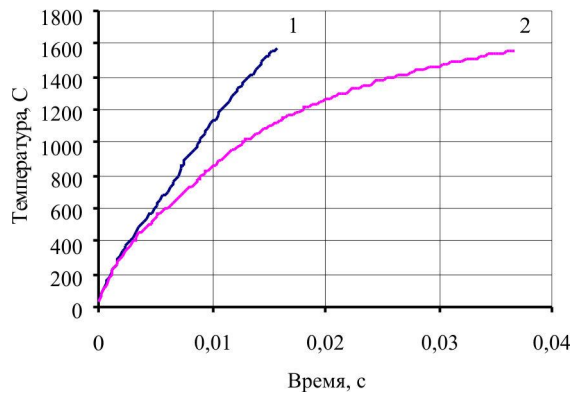


Рис. 3. Изменение температуры в корне заусенца $l=0,5$ мм, $h=0,1$ мм при различном способе задания величины теплового потока: 1 – равномерно распределенный поток; 2 – тепловой поток по формуле (1)

Задание конвективного теплового потока по формуле (1) существенно влияет на время оплавления заусенца. В рассматриваемом случае это привело к увеличению времени обработки в 2,34 раза. Таким образом, принимаемое в ранее выполненных работах [5, 7, 10] допущение о равномерности распределения теплового потока при термоимпульсной обработке требует коррекции.

Этот вывод иллюстрируют результаты расчета нагрева заусенца при использовании метано-воздушной смеси (рис. 4). В этом случае уменьшается как начальное значение теплового потока, так и адиабатическая температура пламени (1950°C против 2810°C для метано-кислородной смеси).

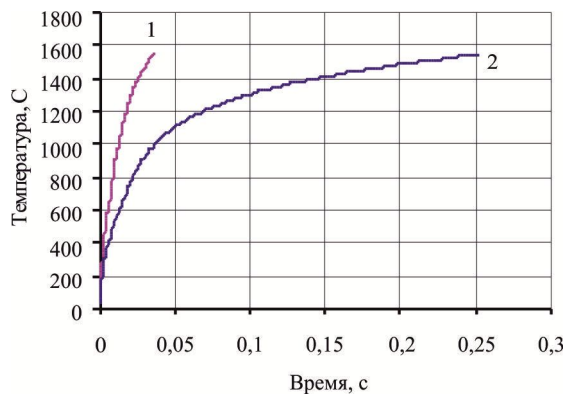


Рис. 4. Изменение температуры в корне заусенца $l=0,5$ мм, $h=0,1$ мм при различном составе топливной смеси: 1 – метан-кислород; 2 – метан-воздух

Время оплавления заусенца при использовании метано-воздушной смеси увеличилось по сравнению с обработкой на метано-кислородной смеси в 6,86 раза и составило 0,253 с. Однако такой результат был получен при условии неизменности температуры газа в ходе обработки. Учет же охлаждения продуктов сгорания в ходе теплообмена приводит к выводу о невозможности удаления заусенца при использовании метано-воздушной смеси.

На рис. 5 приведены результаты моделирования нагрева заусенца длиной 0,3 мм при использовании различных моделей. Приведенные результаты показывают, что игнорирование нелинейности и изменения геометрии заусенца при его оплавлении может привести к непрогнозируемой ошибке.

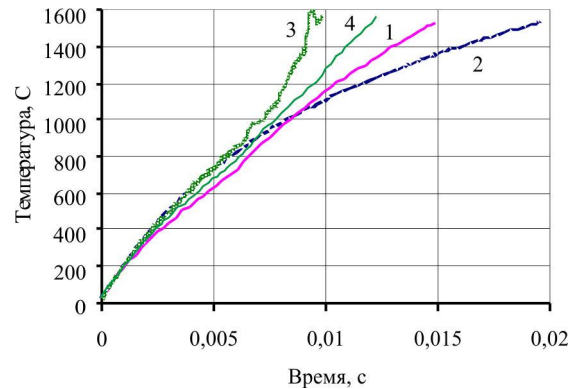


Рис. 5. Изменение температуры в корне заусенца: 1 – постоянные теплофизические характеристики; 2 – нелинейные теплофизические характеристики; 3 – модель "суперпроводника"; 4 – модель "смерти" элемента

Таким образом, рассмотренная модель, учитывающая уменьшение длины заусенца при оплавлении за счет удаления элементов, в которых превышена температура ликвидуса реалистично описывает проходящие при термоимпульсной отделке кромок процессы. Ее преимуществами являются применение постоянной сетки конечных элементов и вычислительная эффективность. Учет уменьшения конвективного теплового потока с ростом температуры заусенца обязателен при применении любой из рассмотренных моделей.

Заключение

1. Для применения в качестве инструмента для назначения режимов термоимпульсной отделки кромок предложена модель, использующая прием "смерти" конечного элемента по достижении температуры ликвидуса.

2. Использувавшееся в ранее выполненных работах допущение о равномерности распределения теплового потока при термоимпульсной обработке является неточным. Его применение может привести к существенным ошибкам при определении времени оплавления заусенца.

3. Применение газо-воздушных смесей для термоимпульсной отделки кромок имеет ограничения. Использование воздуха в качестве окислителя возможно при добавлении в состав горючего компонент существенно повышающий адиабатическую температуру пламени.

Литература

1. Gillespie, L. K. *Deburring and edge finishing handbook [Text]* / L. K. Gillespie. – New York City : Industrial Press, 1999. – 404 p.
2. Технологические системы обеспечения качества изделий машиностроения [Текст] / В. С. Кривцов, С. И. Планковский, И. В. Бычков [и др.] // Технологические системы. – 2013. – № 1. – С. 60–70.
3. Методика назначения режимов термоимпульсной зачистки деталей из термoplastов [Текст] / С. И. Планковский, А. Н. Мецераков, О. В. Шипуль [и др.] // Вопросы проектирования и производства летательных аппаратов : сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Харьков, 2013. – Вып. 4 (76). – С. 94–105.
4. Лосев, А. В. Теоретический анализ термоимпульсного удаления заусенцев с деталей [Текст] / А. В. Лосев // Импульсная обработка металлов давлением : сб. науч. тр. / Харьк. авиац. ин-т. – Харьков, 1997. – С. 43–49.
5. Лосева, О. А. Обработка кромок деталей термоимпульсным методом [Текст] / О. А. Лосева, А. В. Лосев // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Харьков, 2009. – Вып. 42. – С. 120–126.
6. Моделирование процесса оплавления заусен-

цев при термоимпульсной обработке детонирующими смесями [Текст] / С. И. Планковский, А. В. Гайдачук, О. В. Шипуль [и др.] // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 3 (100). – С. 4–11.

7. Малащенко, В. Л. Совершенствование технологии зачистной обработки деталей из термoplastов на базе термоимпульсного метода [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.07 ; защищена 15.10.2014 ; утв. 11.12.2014 / Малащенко Владимир Львович. – Х., 2014. – 167 с.

8. Адонин, С. М. О теплопередаче продуктов детонации газовой смеси в камере [Текст] / С. М. Адонин, В. И. Манжалеи // Динамика сплошной среды : сб. науч. тр. / АН СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т гидродинамики им. М. А. Лаврентьева. – Новосибирск, 1986. – Вып. 74. – С. 3–10.

9. Шипуль, О. В. Методика назначения режимов термоимпульсной отделки с учетом требований к качеству кромки [Текст] / О. В. Шипуль, И. Б. Кузнецов, Е. С. Палазюк // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 5 (122). – С. 1–16.

10. Зиновьев, В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах [Текст] : справочник / В. Е. Зиновьев. – М. : Металлургия, 1989. – 384 с.

Поступила в редакцию 21.04.2015, рассмотрена ан редколлегии 22.06.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедры А. И. Долматов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОПОРЯДЖЕННЯ КРАЙОК ПРИ ТЕРМОІМПУЛЬСНІЙ ОБРОБЦІ

С. І. Планковський, О. В. Шипуль

Розглядається задача побудови ефективної математичної моделі термоімпульсної обробки крайок. На основі раніше виконаних робіт сформульовані вимоги до такого роду моделі. Запропонована математична модель враховує залежність теплофізичних характеристик матеріалу від температури і приховану теплоту фазового переходу. Для обліку зміни геометрії задирки при топленні використана модель «смерті» елементів розрахункової сітки після досягнення температури ліквідусу зі зміненою значення теплоємності. На прикладі рішення задачі оплавлення задирки, що має форму пластини, проведено порівняння результатів обчислення часу оплавлення задирки при використанні різних розрахункових моделей.

Ключові слова: термоімпульсна обробка крайок, математична модель, топлення задирки

MATHEMATICAL MODEL OF EDGE FINISHING WITH THERMAL-PULSE TREATMENT

S. I. Plankovsky, O. V. Shipul

The article considers the problem of constructing of computing efficiency a mathematical model for thermal pulse trim of edges. The mathematical model takes into account the dependence of the thermal characteristics of the material temperature and the latent heat of the phase transition. To account for changes in the geometry of burr at melting model is used the "death" of the elements of the computational grid after the liquidus temperature with a change in the heat capacity. For example, solving the problem of melting of burr-shaped plate, the comparison results determine the time of reflow burr using different computational models.

Keywords: thermal-pulse edge treatment, mathematical simulation, burr melting

Планковский Сергей Игоревич – д-р техн. наук, проф., проф. каф. технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: s.plank@khai.edu.

Шипуль Ольга Владимировна – канд. техн. наук, доц., доц. каф. технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: o.shipul@khai.edu.