

УДК 621.7.09

О. В. ШИПУЛЬ¹, И. Б. КУЗНЕЦОВ², Е. С. ПАЛАЗЮК¹¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "ХАИ"*² *Национальный университет обороны Украины им. И. Черняховского*

МЕТОДИКА НАЗНАЧЕНИЯ РЕЖИМОВ ТЕРМОИМПУЛЬСНОЙ ОТДЕЛКИ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ К КАЧЕСТВУ КРОМКИ

Проведен анализ факторов, значимых для определения требований к качеству кромок высокоточных деталей. Предложена методика назначения режимов термоимпульсной отделки кромок, основанная на требованиях к качеству кромок. Применяемая математическая модель нагрева кромок детали с заусенцем учитывает зависимость теплофизических характеристик материала от температуры, скрытую теплоту фазового перехода, удаление оплавленного материала в процессе обработки. На примере решения задачи для заусенца, имеющего форму пластины, показано влияние мощности теплового источника, геометрических параметров заусенца и кромок детали на значение квалитетического параметра кромок и время обработки.

Ключевые слова: термоимпульсная отделка кромок, методика назначения режимов, удаление заусенцев, квалитетический показатель, математическая модель, тепловой поток.

Введение

В аэрокосмической промышленности обработка кромок деталей является важным процессом производственного цикла и может включать в себя такие операции, как: притупление кромок произвольным радиусом, размерное скругление, очистку от заусенцев и технологических загрязнений [1].

Состояние кромок в золотниковых и плунжерных парах напрямую влияет на надежность работы и стабильность технических характеристик агрегатов гидротопливных систем. Обеспечение функционально необходимого качества обработки кромок прецизионных деталей во многом помогает решить проблему повышения безотказности и увеличения ресурса агрегатов и систем, что имеет принципиальное значение при производстве и эксплуатации авиационной техники [2]. Выполнение операций отделки и скругления кромок прецизионных деталей гидротопливных агрегатов с заданными геометрическими параметрами представляет собой актуальную задачу, а качество выполнения данных операций влияет на эксплуатационные характеристики изделий и требует эффективного решения.

Таким образом, финишная отделка кромок входящих деталей является обязательным условием при производстве современных высокоточных механизмов, а в ряде случаев должны выдвигаться требования профилирования кромок с указанием радиусов, углов наклона и т.д.

Несмотря на многообразие существующих отделочно-зачистных технологий, финишная отделка кромок термоимпульсным методом является наибо-

лее приемлемой, поскольку позволяет автоматизировать процессы удаления заусенцев и скругления кромок деталей независимо от сложности их конфигураций [3].

Однако при существующих методиках назначения режимов термоимпульсной обработки в качестве критерия выбора режима принималась минимизация затрат энергии, а не достигаемые квалитетические показатели кромок.

Разработка подхода, позволяющего создать такую методику, являлась *целью настоящей работы*.

Квалитетия кромок прецизионных деталей

Существуют различные международные, национальные, а также фирменные стандарты описания заусенцев и оценки качества кромок. В большинстве случаев заусенцы определяются как лишние выступы материала на кромках деталей, образованные в результате пластического течения материала детали при технологических операциях резания, имеющие незначительные размеры по сравнению с самой деталью и, как правило, лежащие вне её требуемой геометрии [4].

На технических чертежах или геометрических моделях деталей геометрическая форма представлена без каких-либо отклонений, а точнее без учета условий на кромках. Иногда в качестве состояния кромок указывается фаска. Однако в некоторых случаях, например при описании процесса функционирования детали или из соображений безопасности, указываются определенные положения,

включающие в себя информацию о наличии острых кромок, а также о наличии или отсутствии заусенцев на кромках детали [9]. Согласно стандарту ISO 13715:2000 наличие заусенца на кромке определяется положительным размером выступа (рис. 1).

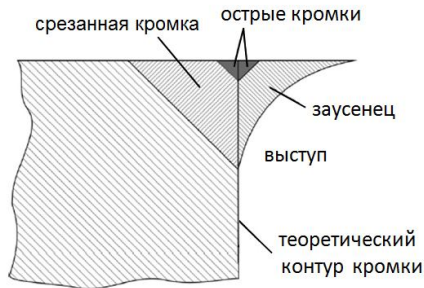


Рис. 1. Определение заусенца согласно стандарту ISO 13715:2000 [5]

Задача создания специализированных стандартов, связанных с качеством кромок, решалась совместными усилиями исследователей и промышленности. Эволюция требований к качеству кромок и дальнейшее расширение информации о квалитетических показателях, которые учитывались в стандартах качества кромок, были напрямую связаны с тенденциями повышения точности механической обработки.

Международным стандартом, разработанным в конце 90-х годов [6], предусматривалось семь различных уровней качества кромок. В дальнейшем вводились требования по качеству для остроугольной, сглаженной, наклонной и скошенной кромок (рис. 2) [7].

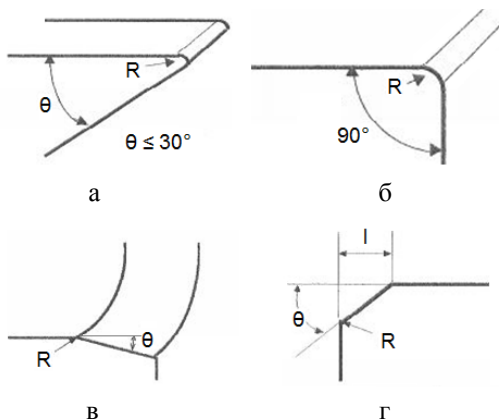


Рис. 2. Типы кромок прецизионных деталей согласно [7]:

- а – остроугольная; б – сглаженная;
в – наклонная; г – скошенная

В упомянутых стандартах форма поперечного сечения задается двумя параметрами – линейным размером (радиусом) и углом. Для поперечных про-

филей внешних и внутренних кромок устанавливаются количественные диапазоны, а также ряд дополнительных квалитетических показателей – допуски на отклонения формы, требования к текстуре и к поверхностному слою материала на кромках.

Анализ существующих методик назначения режимов отделки кромок

В работе [3] приведен теоретический анализ процесса термоимпульсного скругления модели кромки детали, из которого следует принципиальная возможность управляемого получения заданного радиуса кромок деталей из металлов и сплавов. Исследование влияния толщины и длины удаляемых элементов на параметры процесса обработки проводилось с учетом таких дополнительных условий:

- процесс обработки должен выполняться при минимальных затратах энергии;
- в качестве модели заусенца принята неограниченная пластина, а в качестве модели кромки – набор пластин различной толщины;
- нагрев осуществлялся импульсным источником тепла, равномерно распределённым на ограниченном участке; время стабилизации одномерного температурного поля пластины считалось оптимальным временем процесса обработки.

Для расчетов использовалась аналитическая зависимость. Нагрев осуществлялся суперпозицией импульсного источника тепла, при котором тепло мгновенно выделялось на поверхности и постоянно по времени источника тепла.

Применяемая аналитическая модель дискретного нагрева кромок при термоимпульсной обработке с учетом отвода тепла в тело детали и дискретного увеличения толщины кромки позволяет решить задачу автоматизации процесса скругления кромок заданным радиусом путем регулирования значений таких параметров обработки, как мощности источника тепла и времени нагрева.

Однако стоит отметить, что решение, полученное при помощи данной математической модели, обладает рядом недостатков аналогично математической модели оплавления заусенца, использованной в работах А. В. Лосева [8, 9]:

- аналитическое решение в данном случае получено при помощи метода мгновенных источников, что влечет за собой невозможность определения температуры поверхности в начальный момент времени, а также сохранение погрешности определения температуры в моменты времени, близкие к нулю;
- использование постоянных значений теплофизических характеристик обрабатываемого ма-

териала без учета их зависимости от температуры влияет на достоверность полученных результатов [10];

- отсутствие учёта скрытой теплоты плавления при фазовом переходе;
- основанием при выборе технологических режимов обработки является условие минимальных затрат тепловой энергии без учёта особенностей теплонапряженного состояния и квалитметрических показателей обрабатываемых кромок.

Описание применяемой модели

В работе [11] предложена модель дискретного изменения геометрии облоя при его оплавлении для случая обработки деталей из термопластов. Данная модель основана на уже существующей расчетной схеме подвода тепла (рис. 3, а) [14] и позволяет в первом приближении учесть влияние постепенного изменения геометрии облоя (заусенца) в процессе его оплавления. Дискретный характер изменения геометрии удаляемого элемента моделируется при помощи последовательного переключения между конфигурациями при достижении в контрольной точке (1, 2, 3, ...N) температуры плавления материала (рис. 3, б).

Однако, несмотря на преимущество данной модели с точки зрения более детального описания физики процесса, существенным её недостатком является сложность численной реализации для геометрии заусенца, отличной от формы пластины, особенно при наличии зон контакта с поверхностью детали в случае его прилегания.

Для определения температур в заусенце и на кромке детали в данной работе использована математическая модель процесса оплавления заусенцев, основанная на расчетной схеме подвода тепла с постоянной геометрией, использованной в работе [10] и показанной на рис. 3, а.

Основным недостатком постоянной геометрии расчетной области является отсутствие возможно-

сти учесть дискретный характер процесса оплавления заусенца, что приводит к завышенным температурам в области, где она уже превысила температуру плавления. В математической модели, применяемой в рамках текущей работы, данная проблема была решена путём изменения теплофизических свойств материала после смены его агрегатного состояния.

Учет скрытой теплоты фазового перехода при достижении температуры плавления материала задавался скачком теплоёмкости при её задании как функции от температуры. После отметки температуры плавления теплоёмкость материала принималась равной нулю, а значение теплопроводности увеличивалось на несколько порядков, что позволяло исключить затраты тепла на нагрев оплавленного участка заусенца. На части заусенца, для которой была достигнута температура плавления, тепловой поток задавался только по торцу заусенца, для того чтобы учесть его оплавление.

Совершенствование методики назначения режимов отделки кромок

Квалитметрический показатель качества кромки в соответствии со стандартом ISO 13715:2000 может быть определён при помощи геометрического параметра a (рис. 4) [5]. В случае, когда наличие заусенца на кромке допускается, данный параметр принимает положительное значение и обозначается „+а”. При значении $a = 0$ кромка считается идеальной. Если же наличие заусенца на кромке не допустимо, величина среза кромки обозначается как „-а”.

Задача назначения режимов термоимпульсной отделки кромок может быть решена за несколько этапов в следующей последовательности. На первом этапе должны быть определены зависимости энергетических характеристик оборудования от состава и начального давления топливной смеси.

Эти характеристики могут быть получены расчетным путём при помощи средств математического

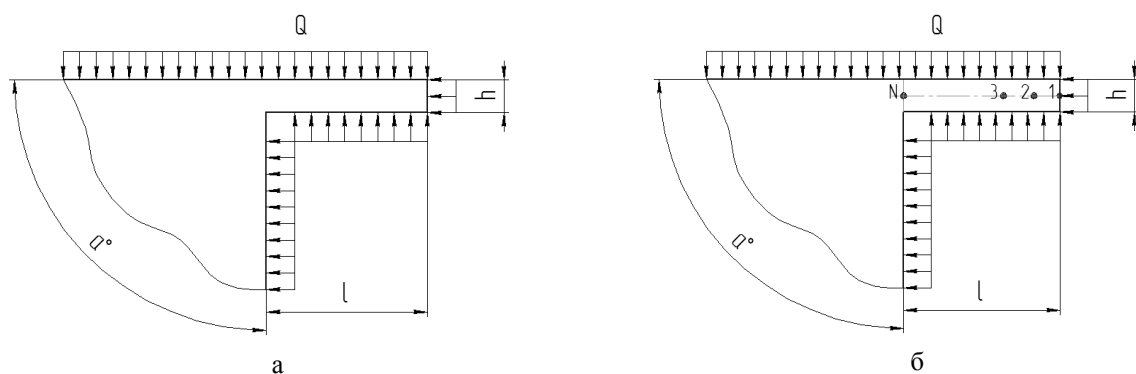


Рис. 3. Варианты расчетных схем термического состояния кромки с заусенцем: а – с постоянной геометрией; б – с дискретно изменяющейся геометрией

моделирования и проверены экспериментально при изготовлении оборудования.

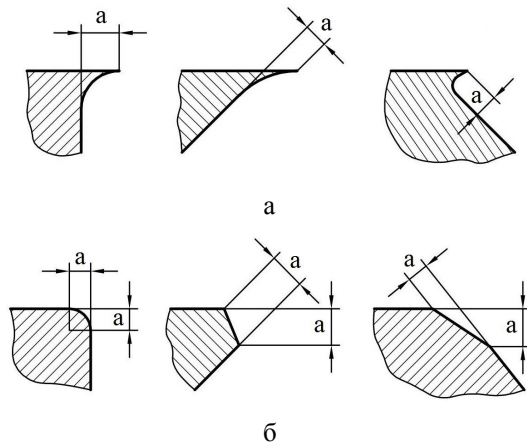


Рис. 4. Квалиметрический показатель кромки a [9]:
а – кромка с заусенцем; б – срезанная кромка

Способом такой проверки является сравнение расчетной и экспериментальной зависимости изменения давления газов в камере сгорания по времени. Конечной целью данного этапа является определение значений тепловых потоков, действующих на поверхности обрабатываемых деталей.

Далее для материалов, из которых изготовлены подлежащие обработке детали, расчетным путём строятся временные зависимости изменения температуры на кромке в области корня заусенца с учетом энергетических характеристик оборудования, реальных зависимостей теплофизических свойств материала от температуры и ожидаемого диапазона геометрических характеристик кромок (угол кромки, длина и толщина заусенцев, их форма и др.).

Для более точного установления режимов обработки предлагается введение в рассмотрение квалиметрического показателя кромки a в момент оплавления заусенца. В этом случае требуемым временем обработки будет считаться время, за которое достигается необходимая величина скругления (фаски) кромки детали, указанная в требованиях к её изготовлению.

Влияние квалиметрического параметра кромки a на требуемое время обработки при различных показателях мощности теплового источника показано на примере обработки кромки детали с заусенцем пластинчатой формы толщиной $h = 10$ мкм и длиной $L = 50$ мкм. В качестве материала детали был выбран жаропрочный коррозионноустойчивый сплав на никелевой основе ЖС26ВИ, широко применяемый в производстве авиационных газотурбинных двигателей [12, 13].

Результаты моделирования показывают, что уменьшение времени обработки при увеличении мощности источника тепла имеет ярко выраженный

гиперболический характер (рис. 5). При этом значение квалиметрического показателя a прямо пропорционально времени действия теплового потока.

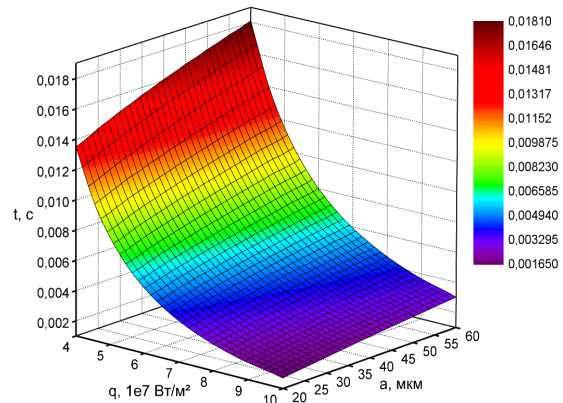


Рис. 5. Влияние мощности теплового источника и квалиметрического параметра кромки на требуемое время обработки

Зависимость увеличения значения квалиметрического показателя кромки a в момент полного оплавления заусенца, когда температура в корне заусенца достигает температуры плавления, с возрастанием толщины удаляемого элемента носит линейный характер (рис. 6, а). Для удобства анализа влияния длины заусенца при различных значениях его толщины использовался безразмерный параметр L/h , показывающий во сколько раз длина заусенца превышает толщину. Результаты численного исследования показывают, что длина заусенца не оказывает существенного влияния на размер фаски (скругления) кромки после обработки. В случае удаления заусенца, имеющего толщину $h = 50$ мкм, при увеличении значения относительной длины L/h в 4 раза квалиметрический показатель a уменьшается менее чем на 9 %. Таким образом, режимы отделки кромок могут быть predetermined требованиями к допустимой толщине заусенцев после механической обработки в том случае, если представляется возможным заранее спрогнозировать их геометрические параметры в зависимости от режимов резания [14].

Для анализа влияния конструктивных особенностей детали на процесс обработки, брался во внимание угол раствора кромки, как её основной геометрический параметр. В силу незначительного влияния длины заусенца на характер кромки после процесса отделки исследовался процесс оплавления пластинчатых заусенцев различной толщины при показателе относительной длины $L/h = 5$. Угол кромки α при этом варьировался от 45° до 135° , что характерно для большинства деталей ЛА.

Результаты численного исследования показы-

вают существенное влияние угла кромки на значение квалиметрического показателя a в момент полного оплавления заусенца (рис. 6, б). Это напрямую связано с повышением оттока тепла в массив детали с ростом угла кромки и, как следствие, различием между характерами распределения температурных полей на кромке, что делает данный параметр крайне важным при расчёте режимов обработки.

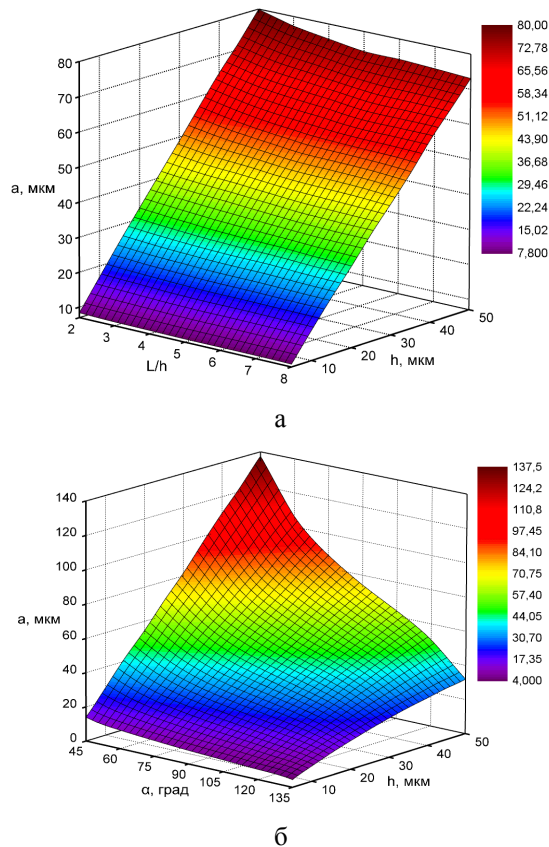


Рис. 6. Влияние геометрических параметров заусенца и кромки детали на значение размера a в момент полного оплавления заусенца:
а – влияние длины и толщины заусенца;
б – влияние угла кромки и толщины заусенца

Исходя из полученных результатов, можно сделать заключение, что требуемые режимы термоимпульсной отделки кромок должны определяться с учетом следующих факторов:

- требований к качеству кромки;
- реальных значений теплофизических свойств обрабатываемого материала;
- геометрических параметров заусенца;
- геометрических параметров кромки детали.

Выводы

1. Для повышения вычислительной эффективности предложена математическая модель нагрева

кромки детали с заусенцем на неизменной сетке, в которой для учета оплавления заусенца после достижения температуры плавления теплопроводность материала увеличивается на несколько порядков, а теплоемкость принимается равной нулю. При этом на оплавленной части заусенца учитывается теплоподвод только по его торцу.

2. Предложен подход для определения режимов отделки кромок термоимпульсным методом на основе квалиметрических показателей кромок, принятых в современных международных стандартах. В качестве примера рассмотрено применение данного подхода для задания режимов обработки деталей из жаропрочных сплавов.

Литература

1. Лосева, О. А. Проблема скругления кромок [Текст] / О. А. Лосева // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. научных трудов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 45. – X., 2010. – С. 122 – 128.
2. Лозовский, В. Н. Надежность гидравлических агрегатов [Текст] / В. Н. Лозовский. – М. : Машиностроение, 1974. – 319 с.
3. Лосева, О. А. Обработка кромок деталей термоимпульсным методом [Текст] / О. А. Лосева, А.В. Лосев // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. научных трудов Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 42. – X., 2009. – С. 120 – 126.
4. Gillespie, L. Deburring and edge finishing handbook [Text] / L. Gillespie. – New York City : Industrial Press, 1999. – 404 p.
5. DIN ISO 13715. Technical drawings – Edges of undefined shape – Vocabulary and indication on drawings [Electronic resource]. – Access mode: ftp://112.133.195.171/Product%20Information%20Center/GCUM/GCUM06/3.0%20Customer%20Standard%20Specification/13715_ISO_0600.pdf. – 2.06.2015.
6. An integrated international standard for burrs and edge conditions [Text] // WBTC-STD 14/1997. – Kansas City, US-MO : Deburring technology international, 1997. – 36 p.
7. Kato, Y. The standardization for the edge quality of the precise machining products [Text] / 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. 83-90.
8. Лосев, А. В. Расчет температурного поля пластины при её местном нагреве [Текст] / А. В. Лосев, Б. А. Колоколов, С. Ф. Меццераков // Обработка металлов давлением в машиностроении : сб. научных трудов Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 17. – X., 1981. – С. 49 – 54.

9. Лосев, А. В. Теоретический анализ термоимпульсного удаления заусенцев с деталей [Текст] / А. В. Лосев // Импульсная обработка металлов давлением : сб. научных трудов Государственного аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 1997. – С. 43-49.

10. Моделирование процесса оплавления заусенцев 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.

11. Малащенко, В. Л. Совершенствование технологии зачистной обработки деталей из термопластов на базе термоимпульсного метода [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.07 ; защищена 17.10.2014 ; утв. 11.12.2014 / Малащенко Владимир Львович. – Х., 2014. – 167 с.

12. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов [Текст] / Р. Е. Шалин, И. Л. Светлов, Е. Б. Качанов и др. – М. : Машиностроение, 1997. – 319 с.

13. Андриенко, А. Г. Механические свойства и технологические особенности получения деталей ГТУ с направленной (моно) структурой из жаропрочного коррозионностойкого никелевого сплава [Текст] / А. Г. Андриенко, С. В. Гайдук, В. В. Кононов // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении : сб. научных трудов Запорожского национального технического университета. – З., 2012. – № 3 – С. 82 – 86.

14. Торопов, А. А. Прогнозирование и минимизация заусенцев при обработке резанием моделированием процессов их образования [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Торопов Андрей Анатольевич. – СПб., 1999. – 235 с.

Поступила в редакцию 26.08.2015, рассмотрена на редколлегии 14.10.2015

МЕТОДИКА ПРИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМІВ ТЕРМОІМПУЛЬСНОГО ОПОРЯДЖЕННЯ З УРАХУВАННЯМ ВИМОГ ДО ЯКОСТІ КРОМКИ

О. В. Шипуль, І. Б. Кузнецов, Є. С. Палазюк

Проведено аналіз факторів, значущих для визначення вимог до якості кромки високоточних деталей. Запропоновано методику призначення режимів термоімпульсного оброблення кромки, засновану на вимогах до якості кромки. Застосована математична модель нагріву кромки деталі та задири враховує залежність теплофізичних характеристик матеріалу від температури, приховану теплоту фазового переходу, видалення оплавленого матеріалу в процесі оброблення. На прикладі рішення задачі для задири, що має форму пластини, показано вплив потужності теплового джерела, геометричних параметрів задири і кромки деталі на значення кваліметричного параметра кромки і час оброблення.

Ключові слова: термоімпульсне оброблення кромки, методика призначення режимів, видалення задири, кваліметричний показник, математична модель, тепловий потік.

METHOD OF THE MODE SETTING DURING THERMAL-PULSE TREATMENT WITH THE REQUIREMENTS FOR EDGE QUALITY

O. V. Shipul, I. B. Kuznetsov, E. S. Palazjuk

The analysis of the factors that are important to determine the quality requirements of the edges of precision parts was carried out. The method of mode setting of thermal pulse edges finishing based on requirements of the edges quality was proposed. The proposed mathematical model takes into account the dependence of the thermal physical characteristics of the material via temperature, the latent heat of the phase transition, the removal of the molten material being processed. The solution of problem for burr-shaped plate shows the influence of heat power source, the geometric parameters of the burr and the part edge on the value of the qualimetric edge parameter and processing time.

Keywords: thermal pulse edge treatment, method of the mode setting, burr removing, qualimetric factor, mathematical simulation, heat flux.

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

Кузнецов Игорь Борисович – канд. техн. наук, доцент, заместитель начальника института оперативного обеспечения и логистики, Национальный университет обороны Украины им. Ивана Черняховского, Киев, Украина, e-mail: elisova@ukr.net

Палазюк Евгений Сергеевич – аспирант кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: e.palaz@mail.ru.