

## Пути повышения точности обработки кромок термоимпульсным методом

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского  
«Харьковский авиационный институт»*

Проведен анализ современного состояния вопроса в области финишной очистки высокоточных деталей ЛА. Проведен анализ существующих стандартов, связанных с качеством кромок деталей. Проанализированы существующие стандарты классификации дефектов и искажений кромок в зависимости от различных конструкторских и технологических факторов. Предложено введение в рассмотрение квалитетического показателя кромки с целью повышения точности установления режимов обработки. Сформулированы основные задачи повышения точности термоимпульсной обработки и обеспечения заданного качества кромок.

**Ключевые слова:** заусенец, качество кромки, термоимпульсный метод, режимы обработки, классификация дефектов кромок, квалитетический показатель кромки.

Основным методом формообразования деталей различной конфигурации, как в общем машиностроении, так и при производстве авиационной техники остается обработка резанием. Однако все виды механической обработки, основу которых составляют процессы резания, сопровождаются образованием различного рода дефектов – заусенцев на кромках и микрочастиц на поверхностях деталей [1]. Даже при использовании современных обрабатывающих центров и оптимизации режимов обработки избежать этих явлений невозможно, поскольку они являются проявлениями законов механики сплошных сред. Наличие дефектов на кромках и поверхностях деталей в процессе изготовления и эксплуатации изделий может стать причиной целого ряда функциональных, эргономических и эстетических проблем [2, 3].

При современном темпе роста требований к точности изготовления деталей, особенно при производстве объектов с повышенной степенью надежности и безотказности работы, каким является летательный аппарат, финишная очистка прецизионных деталей должна быть включена в общий технологический процесс и может представлять собой отдельную операцию чистовой обработки.

На сегодняшний день существует более 120 методов финишной очистки и отделки кромок деталей. Несмотря на такое разнообразие, общей целью всех технологий очистки является достижение требуемого качества поверхностей и кромок, необходимого для нормального функционирования детали. Выбор подходящей технологии очистки зависит от большого числа факторов, среди которых основными являются: материал, форма и размеры деталей, количественные и качественные характеристики удаляемых элементов, возможность обеспечения требуемого качества после обработки и отсутствие её побочных эффектов, программа выпуска и затраты на отделочно-зачистные работы.

С точки зрения обеспечения требуемого качества обработки поверхностей и кромок деталей наибольшие перспективы имеет развитие методов очистки интенсивными потоками энергии [4]. Однако практически все методы применимы только лишь для обработки внешних поверхностей и кромок деталей. Обработка деталей сложной формы с внутренними полостями возможна с помощью термоэнергетических методов, в основе которых лежит использование тепловой энер-

гии сгорания газообразных топливных смесей. Так как отношение массы заусенцев к их площади поверхности незначительно по сравнению с тем же показателем самой детали, то заусенцы прогреваются быстрее и либо оплавляются, либо сгорают в случае избытка окислителя. Также методам, которые используют в качестве источника энергии газообразные горючие смеси, присущ ряд других преимуществ, таких как универсальность, гибкость, высокая производительность, возможность групповой обработки, возможность автоматизации процесса, стабильность результатов обработки, широкая номенклатура обрабатываемых материалов, что делает эти методы широко распространенными и наиболее изучаемыми во многих развитых в промышленном отношении странах. Наиболее перспективным является термоимпульсный метод обработки детонирующими газовыми смесями, получивший развитие в работах Национального аэрокосмического университета «ХАИ». В отличие от термохимического в данном методе доминирующими являются теплофизические процессы. При термоимпульсной обработке заусенцы оплавляются и удаляются с последующим сбросом продуктов сгорания из рабочей камеры до начала их конденсации на поверхностях обрабатываемых деталей [5, 6, 7].

В последнее время наиболее актуальным направлением в развитии процесса финишной обработки кромок термоимпульсным способом является разработка методики определения основных параметров термоимпульсной обработки на основе активного использования современных средств численного моделирования [8, 9, 10]. Однако несмотря на большое количество работ, связанных с повышением точности дозирования энергии, высвобождаемой в ходе сгорания топливных смесей, комплексный подход к решению вопроса обеспечения заданного качества кромок согласно международным стандартам по-прежнему отсутствует.

Для решения данной проблемы начальным этапом прежде всего является создание стандартов, связанных с качеством кромок деталей. Несколько фирм выпустили корпоративные стандарты качества кромок. Также существует проект международного стандарта отделки кромок, в котором предусмотрены различные уровни качества по финишной отделке кромок [11]. В таблице 1 приведен обзор требований к качеству кромок, предъявляемых при производстве различных изделий [12].

Таблица 1

Требования к качеству кромок

Класс	Качество кромки	Допустимый размер радиуса (фаски), мкм	Типичное применение
E1	Высокое	0.3 – 5	Режущие кромки инструментов, края матриц штампов
E2	Острая кромка	8 – 30	Кромки отверстий гидравлических устройств
E3	Округленная кромка	80 – 300	Механические детали, осевые стержни гироскопов, поршневые кольца, гидравлические золотники
E4	Кромка с фаской (скруглением)	400 – 600	Механические детали

Независимо от применяемого метода удаления заусенцев ключевым параметром для настройки оборудования и определения требуемых режимов обработки является информация об удаляемых элементах. Поэтому создание универсальных методов описания заусенцев в последнее время становится еще одной актуальной задачей, решение которой позволит получить системный подход к решению проблемы обеспечения требуемого качества кромок деталей на различных технологических этапах производства.

Согласно стандарту ISO 13715:2000 наличие заусенца на кромке определяется положительным размером выступа [13]. Для технического описания основных параметров заусенца принято использовать его профиль. Каждый заусенец может быть охарактеризован продольным и поперечным сечением (рисунок 1). Продольный профиль позволяет оценить протяженность заусенца вдоль кромки, а также его конфигурацию в продольном направлении (равномерность, прерывистость и т.п.). Более информативным является поперечный профиль, при использовании которого для более детального описания заусенцев могут быть применены следующие параметры [14]:

- толщина корня заусенца  $b_r$  (толщина заусенца в области корня, измеряемая в поперечном сечении);
- высота заусенца  $h_0$  (расстояние между теоретической кромкой и крайней точкой заусенца);
- радиус корня заусенца  $r_r$  (радиус окружности, совпадающей с контуром корня заусенца);
- толщина заусенца  $b_g$  (толщина заусенца между его параллельными гранями).

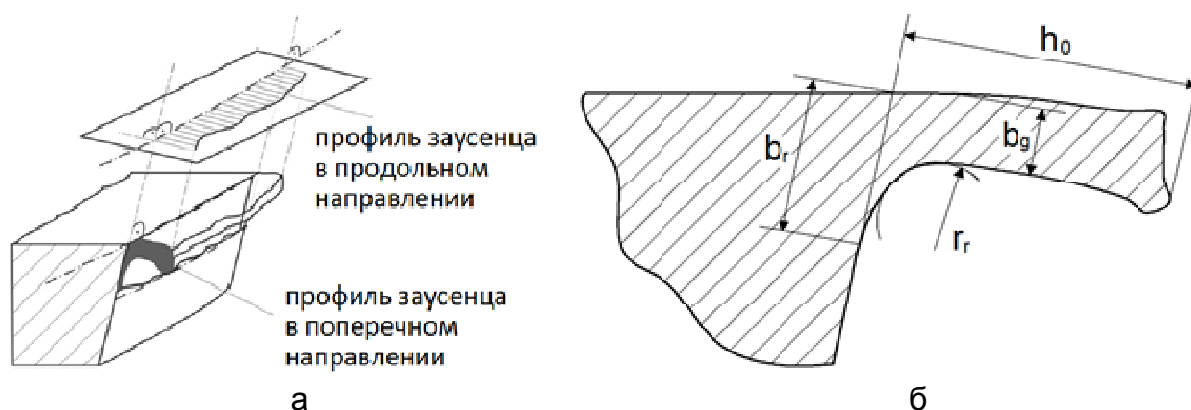


Рисунок 1 – Параметры заусенца:  
а – профили заусенца; б – параметры поперечного сечения заусенца

На сегодняшний день имеется несколько стандартов классификации дефектов и искажений кромок в зависимости от производственных процессов, механизма образования, расположения, формы, свойств материала. Однако, несмотря на большое количество исследовательских работ в данной области, общепринятая классификация по-прежнему отсутствует, поскольку процесс образования заусенцев зависит от большого числа факторов, а его детальное изучение представляет собой сложную научно-техническую задачу. На рисунках 2 и 3 представлены примеры классификации заусенцев, образующихся при различных операциях механической обработки, в зависимости от их формы.

Анализ существующих вариантов классификации показывает, что геометрические параметры заусенцев могут сильно отличаться в зависимости от вида механической обработки, ее параметров, свойств обрабатываемого материала. Форма и размеры заусенцев могут существенно влиять как на выбор метода финишной обработки кромок, так и на определение её требуемых энергетических параметров, поэтому учет геометрических особенностей удаляемых элементов крайне важен при решении данного вопроса.

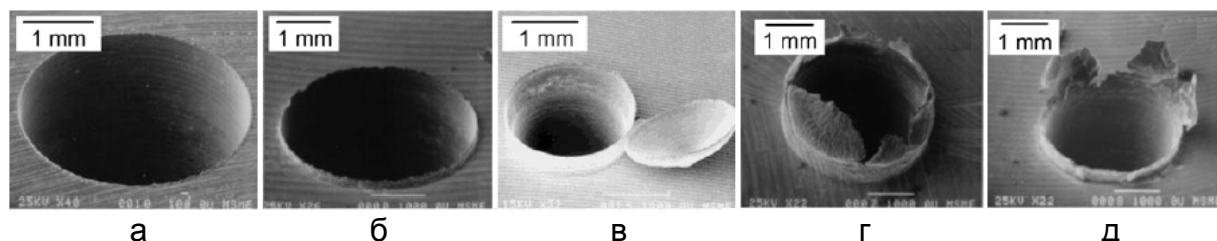


Рисунок 2 – Типичные формы заусенцев, образующихся при сверлении [15]:  
 а – равномерный заусенец 1-ого типа; б – равномерный заусенец 2-ого типа;  
 в – равномерный заусенец с крышкой; г – коронообразный заусенец;  
 д – переходной заусенец

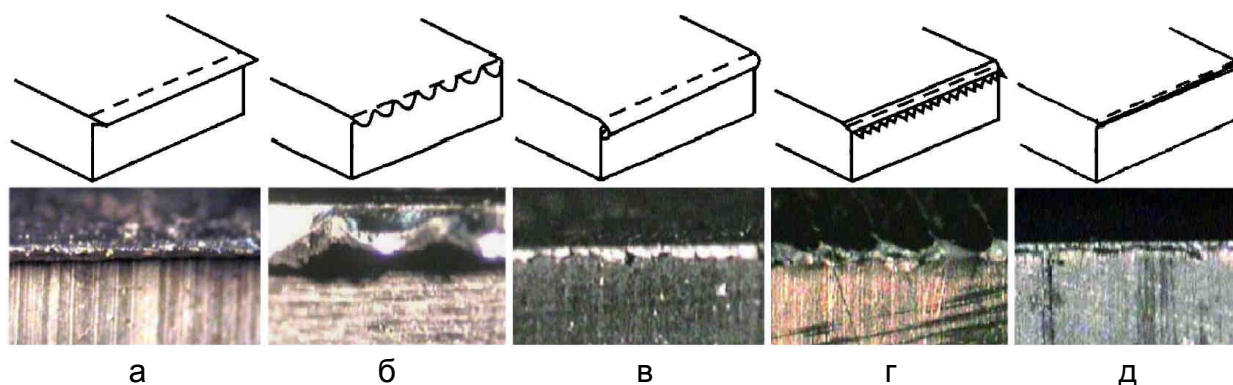


Рисунок 3 – Типичные формы заусенцев, образующихся при торцевом фрезеровании [16]:  
 а – ножевидный заусенец; б – волнообразный заусенец;  
 в – завивающийся заусенец; г – сколотый заусенец; д – вторичный заусенец

Наряду с проблемой создания общей терминологии и стандартизации параметров заусенцев еще одним важным направлением является детальное исследование механизма образования заусенцев с целью их минимизации или исключения за счет оптимизации режимов резания. Подобные исследования могут быть основаны как на статистической обработке экспериментальных данных, так и при помощи создания аналитических моделей [17], служащих базисом для более сложного конечно-элементного анализа [18, 19].

Для более точного установления режимов обработки может быть введен в рассмотрение квалиметрический показатель 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.

Квалиметрический показатель качества кромки в соответствии со стандартом ISO 13715:2000 может быть определён при помощи геометрического параметра  $a$  (рисунок 3.4) [13]. В случае, когда наличие заусенца на кромке допускается, данный параметр принимает положительное значение и обозначается „ $+a$ ”. При значении  $a = 0$  кромка считается идеальной. Если же наличие заусенца на кромке не допустимо, величина среза кромки обозначается как „ $-a$ ”.

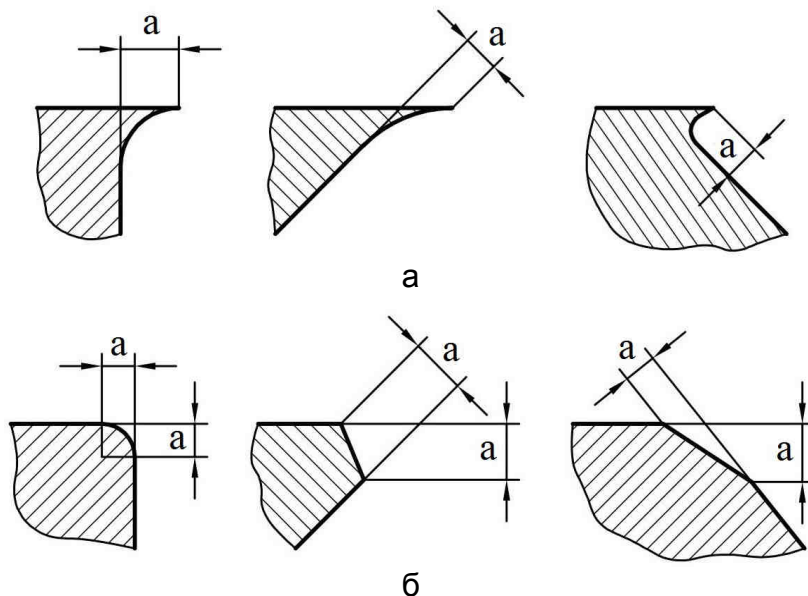


Рисунок 4 – Квалиметрический показатель кромки  $a$  [13]:  
а – кромка с заусенцем; б – срезанная кромка

Зачастую при обозначении требований к качеству кромок высокоточных деталей указывается диапазон допустимых значений квалиметрического показателя кромки  $a$  в виде предельных значений нижнего и верхнего отклонений, что в свою очередь определяет допуск при назначении требуемых режимов обработки.

Задача назначения режимов термоимпульсной отделки кромок в этом случае может быть решена за несколько этапов [20]. 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 моделирования и проверены экспериментально при изготовлении оборудования. 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.).

Применение всевозможных конструкторских и технологических приёмов позволяют уменьшать количество и размеры получаемых заусенцев или же переносить их на легкодоступные места изделий, поэтому вопрос об очистке может быть учтен на этапе проектирования и изготовления деталей. Поэтому для решения задачи повышения точности термоимпульсной обработки и обеспечения за-

данного качества кромок необходим комплексный подход, предусматривающий решение целого ряда задач:

1. Создание стандартов, связанных с качеством кромок деталей.
2. Создание универсальных методов описания, общей терминологии и стандартизации параметров заусенцев.
3. Детальное исследование механизма образования заусенцев с целью их минимизации или возможного исключения за счет оптимизации режимов резания, а также установление взаимосвязей основных параметров обработки с геометрическими характеристиками заусенцев, что сделает возможным получение их предпочтительной формы, облегчающей процесс удаления.
4. Активное использование современных CAD/CAE систем при разработке математических моделей процесса удаления заусенцев с целью сокращения материальных, временных и трудовых затрат.
5. Задание режимов обработки с учетом основных геометрических параметров кромки детали, самого заусенца и требований к качеству кромок.

### **Выводы**

1. Проанализировано современное состояние в области обеспечения заданного качества кромок высокоточных деталей. Также проведен анализ существующих стандартов, связанных с качеством кромок деталей, классификацией дефектов и искажений кромок в зависимости от различных конструкторских и технологических факторов.
2. Показана необходимость учета основных геометрических параметров заусенцев, которые могут сильно отличаться в зависимости от вида и параметров механической обработки, особенностей конструкции и физико-механических свойств материала детали, что впоследствии может влиять как на выбор метода финишной обработки кромок, так и на определение её требуемых энергетических параметров.
3. Предложено введение в рассмотрение квалиметрического показателя кромок, представляющего собой величину скругления (фаски) кромок детали, указанную в требованиях к её изготовлению, для более точного установления требуемых режимов обработки.

### **Список литературы**

1. Махнаев, В.А. Беззаводочная обработка высокоточных корпусных деталей из цветных сплавов на многооперационных станках с ЧПУ [Текст] / В.А. Махнаев, Я.А. Коган, В.П. Савиных // *Авиационная промышленность*. – 1981. – №1. – С. 30–31.
2. Лосев, А.В. Отделочно-зачистные технологии в производстве летательных аппаратов [Текст] / А.В. Лосев, В.А. Фадеев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – №4(40). – С. 6–12.
3. 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. – Х., 2010. – С. 122–128.

4. Планковский, С.И. Проблемы развития методов финишной отделки и очистки интенсивными тепловыми потоками [Текст] / С.И. Планковский, О.В. Шипуль // Проблемы машиностроения. – 2011. – Том 14, № 2. – С. 72–82.

5. Лосев, А.В. Повышение эффективности зачистки деталей пневматических и гидротопливных систем при использовании термоимпульсного метода [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08; защищена 27.06.1995; утв. 7.10.1995 / Лосев Алексей Васильевич. – Харьков, 1995. – 210 с.

6. Божко, В.П. Основы технологии зачистки деталей авиационного производства высокотемпературными газовыми импульсами [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.07.04; защищена 17.02.1993; утв. 21.06.1993 / Божко Валерий Павлович. – Х., 1993. – 314 с.

7. 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. 39–47.

8. Борисова, О.С. Совершенствование способов дозирования энергии при финишной термоимпульсной очистке прецизионных деталей ЛА [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.02; защищена 17.05.2011; утв. 21.10.2011 / Борисова Ольга Сергеевна – Х., 2011. – 154 с.

9. Трифонов, О.В. Метод назначения режимов термоимпульсной обработки детонирующими газовыми смесями в интегрированных CAD/CAE-системах [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.07; защищена 20.09.2013; утв. 6.12.2013 / Трифонов Олег Валерьевич. – Х., 2013. – 152 с.

10. Малашенко, В.Л. Совершенствование технологии зачистной обработки деталей из термопластов на базе термоимпульсного метода [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.07; защищена 20.10.2014; утв. 16.12.2014 / Малашенко Владимир Львович. – Х., 2014. – 163 с.

11. WBTC-STD 14/1997. An integrated international standard for burrs and edge conditions [Text] / Kansas City, MO: Deburring technology international. 1997. – 36 p.

12. Gillespie, L.K. Hand Deburring: Increasing Shop Productivity [Text] / L.K. Gillespie. – Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 2003. – 468p.

13. DIN ISO 13715. Technical drawings - Edges of undefined shape - Vocabulary and indication on drawings (ISO 13715:2000).

14. Schäfer, F. Entgraten: Theorie, Verfahren, Anlagen [Text] / F. Schäfer. – Mainz: Krausskopf, 1975. – 201 p.

15. Chern, G.-L. Study on mechanisms of burr formation and edge breakout near the exit of orthogonal cutting [Text] / G.-L. Chern // Journal of Materials Processing Technology. – 2006. – Vol. 176. – P. 152–157.

16. Ko, S.-L. Burr formation and fracture in oblique cutting [Text] / S.-L. Ko, D. Dornfeld // Journal of Materials Processing Technology. – 1996. – Vol. 62. – P. 24–36.

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

18. Park, I.W. A Study of Burr Formation Processes Using the Finite Element Method: Part I [Text] / I.W. Park, D.A. Dornfeld // Journal of Engineering Materials and Technology. – 2000. – Vol. 122. – P. 221–228.

19. Park, I.W. A Study of Burr Formation Processes Using the Finite Element Method: Part II – The Influences of Exit Angle, Rake Angle, and Backup Material on Burr Formation Processes [Text] / I.W. Park, D.A. Dornfeld // Journal of Engineering Materials and Technology. – 2000. – Vol. 122. – P. 229–237.

20. Шипуль, О.В. Методика назначения режимов термоимпульсной отделки кромок 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. 21–26.

Поступила в редакцию 16.03.2018

## **Шляхи підвищення точності обробки кромок термоімпульсним методом**

Проведено аналіз сучасного стану питання в області фінішної очистки високоточних деталей ЛА. Проведено аналіз існуючих стандартів, пов'язаних з якістю кромок деталей. Проаналізовані існуючі стандарти класифікації дефектів і спотворень кромок залежно від різних конструктивних і технологічних факторів. Запропоновано введення в розглядання кваліметричного показника кромки з метою підвищення точності встановлення режимів обробки. Сформульовані основні задачі підвищення точності термоімпульсної обробки та забезпечення заданої якості кромок.

**Ключові слова:** задирка, якість кромки, термоімпульсний метод, режими обробки, класифікація дефектів кромок, кваліметричний показник кромки.

## **Ways to Improve Accuracy of the Edges Treatment by Thermal-Pulse Method**

An analysis of the current state of matter in the field of final treatment of high-precision aircraft parts has been carried out. An analysis of existing standards related to the quality of parts edges has been carried out. Existing standards of the classification of defects and edge distortions depending on various design and technological factors have been analyzed. A consideration of the edge qualimetric index in order to improve the accuracy of treatment modes establishment has been proposed. The main tasks for increasing of thermal-pulse deburring accuracy and ensuring a given quality of edges have been formulated.

**Keywords:** burr, edge quality, thermal-pulse method, treatment modes, classification of edge defects, edge qualimetric index.

### **Сведения об авторах:**

**Палазюк Евгений Сергеевич** – инженер по моделированию, подразделение технологий силовых агрегатов, компания Роберт Бош, Ческе Будеёвице, Чешская Республика, e-mail: ievgen.palaziuk@cz.bosch.com.