

УДК 621.951.47

С.И. ПЛАНКОВСКИЙ, А.В. ЛОСЕВ, О.В. ШИПУЛЬ, О.С. БОРИСОВА

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ФИНИШНОЙ ОТДЕЛКИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Проведен обзор существующих методов и оборудования для финишных отделочно-зачистных операций при обработке прецизионных деталей ЛА. На основе анализа публикаций по теме установлено, что основным направлением развития этого класса технологий будет очистка поверхностей прецизионных деталей от корпускулярных загрязнений. С учетом этого выделены методы, в наибольшей степени удовлетворяющие требованиям финишной обработки деталей прецизионных механизмов ЛА. В качестве наиболее перспективного метода обоснован выбор термоимпульсного способа финишной очистки. Определены приоритетные задачи совершенствования термоимпульсного оборудования с учетом требований современного производства, использующего интегрированные CAD/CAE-системы.

Ключевые слова: прецизионные детали, финишная обработка, микрочастицы, термоимпульсная очистка, математическое моделирование CAD/CAE-системы.

Введение

В последние годы в авиационно-космической промышленности четко обозначилась тенденция повышения требований к качеству деталей, полученных путем механообработки. Это оказывает существенное влияние не только на совершенствование процессов изготовления деталей, но и на оптимизацию их финишной отделки и очистки.

В последнее время в связи с миниатюризацией узлов, внедрением высокоточных электронно-механических механизмов, увеличением количества входящих деталей и сложности сборки различного рода прецизионных агрегатов ЛА все большее значение приобретают технологии очистки поверхностей от микрочастиц.

Особый интерес вызывают исследования, направленные на разработку автоматизированного оборудования для финишной обработки, методов научно обоснованного назначения режимов его работы и его интеграции в современное производство, комплексно использующего CAD/CAE-системы.

Поэтому целью настоящей работы является определение тенденций развития технологий финишной обработки, а также путей совершенствования методов очистки прецизионных деталей ЛА с учетом требований современного производства.

Тенденции развития технологий финишной обработки

Исследования в области выяснения механизмов образования заусенцев при механообработке и раз-

работке оборудования для их удаления начали интенсивно проводиться с 1970-х годов. До этого времени было известно и применялось на практике только 17 из существующих на сегодня 120 методов удаления заусенцев, более 90% из всех публикаций в области механизмов образования и их удаления были написаны после 1989 года [1].

Факторами, оказавшими основное влияние на развитие технологий и оборудования для удаления заусенцев и финишной отделки кромок, являлись:

- улучшение инструментов механообработки;
- повышение точности деталей;
- причины формирования заусенцев;
- минимизация и предотвращение заусенцев;
- планирование обработки по качеству кромок;
- разработка стандартов качества кромок;
- улучшение процессов удаления заусенцев.

Первые два фактора показывают, насколько внедрение новых технологий может зависеть от субъективных обстоятельств. Дело в том, что довольно долго необходимость финишной обработки кромок отвергалась промышленностью. Необходимость замены инструмента по причине того, что он формирует все более крупные заусеницы, не была очевидной из-за кажущейся дороговизны. Ситуация радикально переменялась с массовым распространением инструмента со сменными твердосплавными пластинами, когда такая замена значительно удешевилась и уже не вызывала отторжения.

Повышение требований к точности деталей также привело к изменению отношения к проблеме очистки кромок – даже небольшие заусенцы при

ужесточении допусков могли создавать проблемы при сборке, а при эксплуатации приводить к повышенному износу или даже заклиниванию прецизионных пар.

Параллельно интенсивно развивались исследования в области влияния качества финишной отделки кромок на эксплуатационные характеристики механизмов. Так, например, внедрение рекомендаций исследовательской группы Takazawa по качеству кромок, позволили поднять объемный КПД кондиционеров на 5...15% [2]. Впоследствии была установлена связь качества финишной отделки кромок с ресурсными характеристиками и на сегодняшний день необходимость этих операций принята промышленностью и подтверждена соответствующими стандартами.

Исследования механизмов образования заусенцев и возможностей их минимизации были начаты в начале 70-х годов в США (Cillespie [3]), Германии (Schäfer [4]) и Японии (Takazawa [5]). Наибольших результатов в области описания условий возникновения заусенцев на основе численного моделирования добился исследовательский коллектив Университета Беркли (Dornfeld и группа CODEF).

На рис. 1 в качестве примера приведены результаты моделирования образования заусенца при сверлении, выполненного исследовательской группой CODEF [6].

В результате проведения численного моделирования и факторных экспериментов были установлены зависимости для оценки величины заусенцев с учетом материала детали, режимов обработки, характеристик инструмента. На основе этих результатов CODEF заявила о разработке экспертной WEB системы для прогнозирования места, типа и размеров заусенцев при различных видах обработки (следует заметить, что попытки авторов воспользоваться этой системой окончились безрезультатно – портал не работает, поэтому, вероятно, на сегодня можно говорить о попытке создания такого сервиса).

Выяснение механизмов образования заусенцев дало возможность управлять процессом их образования. Стратегия в этом направлении заключалась в лозунге: "Если у Вас нет заусенцев, Вам не нужно их удалять". Конечно, такая цель является идеализированной, так как полностью избавиться от заусенцев в процессах механообработки невозможно. Однако, принцип предотвращения образования заусенцев в труднодоступных местах, переноса их в процессе обработки на внешние кромки, с которых они могут быть легко удалены, минимизация величины заусенцев - эти направления совершенствования процессов изготовления механообработки оказались вполне успешными.

В качестве примера, на рис. 2 приведены результаты исследований, полученные для оптимизации траектории инструмента с целью уменьшения величины заусенцев на кромках при торцевом высокоскоростном фрезеровании, на основании алгоритма, предложенного в [7] (CODEF).

На рис. 3 приведены фотографии кромок обработанной детали для двух траекторий фрезы, представленных на рис. 2. Результаты были получены при одинаковых режимах резания одинаковыми фрезами. Из-за увеличения длины пути инструмента, время фрезерования в оптимизированном варианте увеличилось с 4,7 до 5,3 сек [8].

Такое увеличение времени обработки выглядит совершенно незначительным, особенно с учетом существенно сокращения длительности финишной отделки кромок из-за практически устраненных заусенцев на детали. Акцентируем внимание на том, что для рассматриваемого примера обработка кромок все еще необходима исходя из заданного их качества.

Создание стандартов, связанных с качеством кромок – еще одна задача, которая решалась совместными усилиями исследователей и промышленности. В этом направлении достигнуты определенные успехи, хотя введенные до настоящего времени стан-

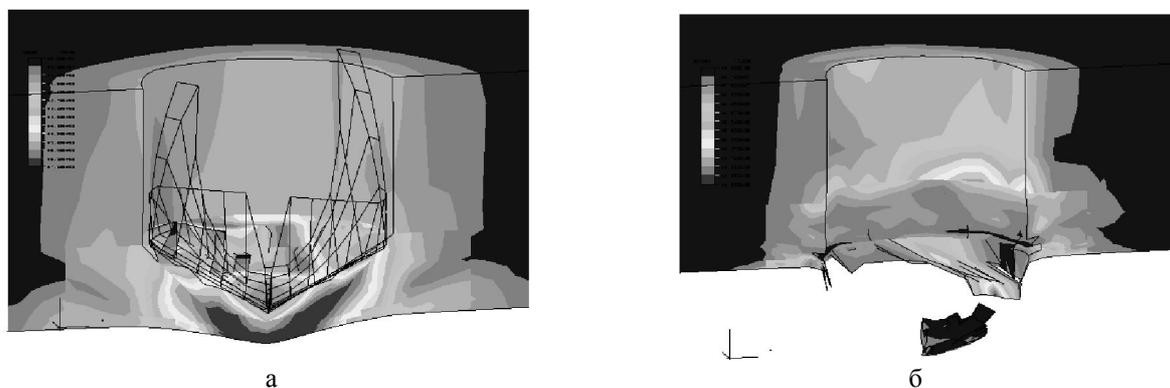


Рис. 1. Стадии формирования заусенца при сверлении (МКЭ моделирование): а – начало выхода сверла; б – окончательный вид заусенца

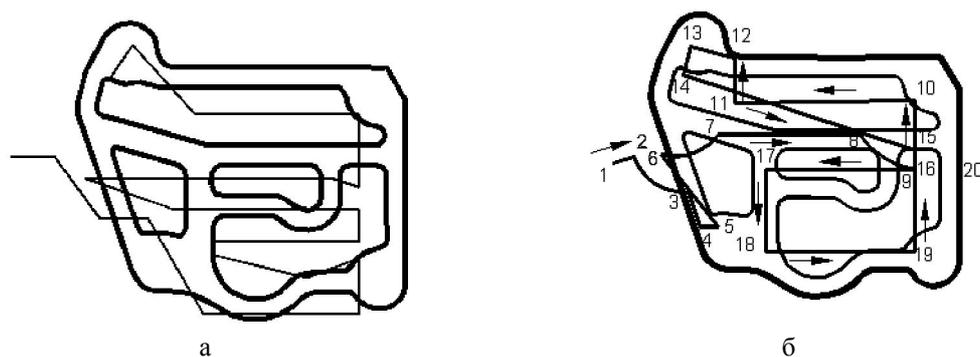


Рис. 2. Результаты оптимизации траектории инструмента по критерию размера заусенцев [8]:
а – исходная траектория фрезы; б – траектория после оптимизации

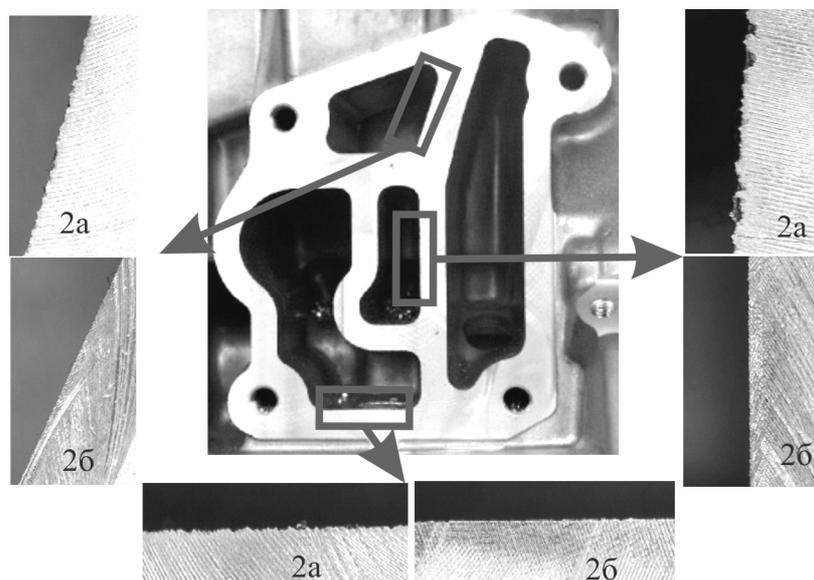


Рис. 3. Вид кромок детали после оптимизации траектории (согласно рис. 2) [8]

дарты касаются терминов, связанных с отделкой кромок [9]. Ряд фирм выпустили корпоративные стандарты качества кромок. Япония, КНР, Южная Корея и Германия готовят международный стандарт, который должен быть введен в ближайшее время.

Известно о работах по подготовке государственного стандарта, ведущихся в США. Эта работа осложняется тем, что как указывает Gillespie [10] из 42 недостатков детали, которых пользователь хотел бы избежать, 39 присутствуют на кромках и выбор метрик качества кромки не так прост.

К сожалению, следует отметить, что вопросы обеспечения качества кромок, а тем более очистки поверхностей от микрочастиц в отечественном машиностроении зачастую просто игнорируются, что оказывает непосредственное влияние на конкурентоспособность его продукции. Особенно это проявляется в моторостроении, производстве топливной аппаратуры, арматуры гидравлических и пневматических систем, продукции точного машиностроения.

Невнимание к вопросам обоснованного выбора и обеспечения качества кромок распространено и в авиационно-космической промышленности. Так, например, считается необязательной обработка поверхностей после электроискровой и лазерной обработки на современных станках с ЧПУ. Для того, чтобы показать ошибочность таких представлений, приведем данные одного из ведущих производителей оборудования для финишной обработки прецизионных деталей – фирмы Extrude Hone (США).

В рекламных материалах фирмы приводятся результаты измерения коэффициентов расхода в топливных форсунках с отверстиями, полученными электроискровым методом без финишной обработки и с обработкой на экструзионно-абразивном оборудовании, выпускаемом фирмой. Прецизионное профилирование отверстия после финишной обработки повышает точность обеспечения массового расхода с ± 6 до $\pm 1\%$, а с этой характеристикой непосредственно связана топливная эффективность двигателя.

Как уже отмечалось выше, на сегодняшний день известно около 120 методов удаления заусенцев и финишной обработки кромок. К 2000 году в мире существовало около 1000 фирм, производящих оборудование для этих целей или предлагающих услуги, связанные с финишной обработки.

Общей чертой современного оборудования для финишной обработки прецизионных деталей является наличие систем ЧПУ (рис. 4), гибкость, быстрая перенастраиваемость. В целом существующее оборудование позволяет проводить эффективную обработку кромок практически всей номенклатуры деталей машиностроения.

Для прецизионных деталей ЛА характерны глубокие отверстия малых диаметров (0,4...1,5 мм), пересекающиеся каналы с расточками и карманами. Дополнительные трудности при обработке вызывают высокие требования к точности их изготовления.

Типичными для таких деталей являются отклонения от геометрической формы прецизионных пар – 1...3 мкм; допуск на зазор в пределах 2...4 мкм; шероховатость от 3,2...0,8 мкм для соединительных каналов и до 0,04 мкм для плунжерных золотниковых пар и др. Для их изготовления используются высоколегированные сплавы и стали, алюминиевые сплавы, имеющие различную твердость. В конструкции прецизионных деталей все чаще применяются сразу несколько материалов (биметаллические детали, составные корпусные детали).

Из-за таких конструктивных особенностей для финишной обработки прецизионных деталей ЛА могут применяться только несколько из разработанных на сегодня методов. В табл. 1 приведены сравнительные возможности этих методов для выполне-

ния некоторых задач, характерных при изготовлении высокоточных деталей ЛА.

Анализ этих данных показывает, что выполнение полного комплекса операций по финишной отделке прецизионных деталей ЛА каким-либо одним из представленных методов, невозможно. Однако вряд ли можно представить себе деталь, для которой требуется выполнение всех операций, упомянутых в табл. 1.

Наибольшее количество операций (7 из 10) может быть выполнено термоимпульсным и экструзионно-абразивным методом. Их комбинация покрывает все перечисленные операции за исключением обработки сверхмалых отверстий, для которой необходимо специализированное оборудование.

В связи с уже упоминавшейся тенденцией к миниатюризации узлов высокоточных механизмов, повышения сложности сборок и требований к точности входящих деталей все больший интерес стало вызывать еще одно направление финишной отделки – очистка поверхностей от корпускулярных загрязнений (микрочастиц, микрозаусенцев, молекулярных загрязнений и т.п.).

С учетом опыта развития технологий финишной обработки кромок, в настоящее время формулируются следующие направления исследований в этой области [11]:

- источники и механизм образования корпускулярных загрязнений;
- производственные и организационные меры их минимизации и предотвращения;
- разработка стандартов чистоты поверхности и средств метрологического оснащения;
- создание процессов и оборудования для очистки до заданного стандартами качества.



а



б

Рис. 4. Современное автоматизированное оборудование установки для финишной обработки:
а – установка для электрохимической обработки фирмы Extrude None (США);
б – установка для термохимической обработки фирмы BOSH (ФРГ)

Таблица 1

Сравнительная характеристика методов финишной отделки прецизионных деталей ЛА

Типичные операции при финишной обработке прецизионных деталей ЛА	Экструзионно-абразивный	Магнитно-абразивный	Термо-химический	Электро-химический	Термо-импульсный
Очистка внутренних поверхностей (включая пересекающиеся отверстия)	•		•		•
Управление углом и радиусом кромки отверстий ($\varnothing > 1,5$ мм)	•		•	•	•
Управление углом и радиусом кромки отверстий ($\varnothing < 1,5$ мм)	•	•		•	•
Формирование профиля отверстий для управления расходом	•	•			
Финишная обработка отверстий ($\varnothing < 0,4$ мм)		•			
Очистка криволинейных и фасонных поверхностей	•		•	•	•
Очистка глухих отверстий					•
Финишная обработка сквозных отверстий ($l/\varnothing > 5$)	•				•
Удаление оплавленных слоев после лазерной и электроискровой обработки	•	•		•	
Финишная обработка прецизионных поверхностей		•		•	•

В качестве основного метода очистки поверхностей в настоящее время рассматривается воздействие потоком чистящей жидкости [12]. Такой метод весьма чувствителен к геометрии обрабатываемой детали, особенно для внутренних полостей и требует учета особенностей процесса очистки на самых ранних стадиях проектирования механизмов.

В настоящее время такие нормы проектирования существуют в виде самых общих рекомендаций, основанных на эмпирических данных. Группой CODEF планируется разработка инструментов автоматизированного проектирования процессов гидравлической очистки на основе моделирования процессов воздействия потока на загрязненную поверхность [11]. Дополнительной сложностью является влияние физико-химических, морфологических и механических свойств поверхности обрабатываемой детали на возможность перемещения и прилипания агрязняющих веществ при воздействии чистящей среды.

Исследования в области изучения механизмов образования микрочастиц при механообработке находятся на самой ранней стадии. Однако, по некоторым данным образование микрочастиц неизбежно происходит при любых видах резания, включая обработку абразивными частицами [13]. С этой точки зрения из всех методов, упомянутых в табл. 1 к образованию только два не приводят к дополнительным микрозагрязнением при обработке – электрохимический и термоимпульсный метод.

Воздействие на деталь абразивными частицами, особенно при повышенных давлениях и скоростях несущего их потока, при обработке мягких ма-

териалов (алюминиевых сплавов, латуней) может привести к шаржированию поверхности (внедрению в нее абразивных микрочастиц).

Электрохимическая обработка позволяет удалить металлические микрочастицы, а термоимпульсная – микрочастицы любых материалов [13, 14]. С этой точки зрения термоимпульсный метод в наибольшей степени соответствует современным и вновь формирующимся требованиям по финишной отделке прецизионных деталей ЛА.

На основе приведенных данных, в качестве основных тенденций развития технологий финишной отделки прецизионных деталей можно выделить следующие:

1) для разработки технологий финишной отделки характерен системный подход, учитывающий основные факторы, определяющие качество обработки – изучение механизмов формирования заусенцев и загрязнений, разработку методов проектирования и производства с учетом требований их минимизации, создание стандартов качества, средств метрологического контроля, совершенствование технологии и оборудования для финишной отделки;

2) развитие оборудования для финишной отделки идет в направлении создания автоматизированных комплексов, для которых режимы обработки задаются на основе математического моделирования процессов изготовления деталей и данных специализированных экспертных систем, среди которых в ближайшее время следует ожидать появления модулей, совместимых с наиболее распространенными CAD/CAM-системами;

3) в связи с ужесточением требований к точности деталей, входящих в прецизионные механизмы, к операциям финишной отделки будут выдвигаться все большие требования по управляемости процессов, установлению режимов обработки исходя из параметров качества кромок; следует ожидать появления требований, связанных с обеспечением разных параметров качества для различных кромок одной детали, что потребует создания более гибких процессов финишной отделки.

Дополнительные задачи, которые будут возникать в ближайшее время, могут быть связаны с разработкой технологий финишной обработки неметаллических деталей (из керамики, пластмасс, композиционных материалов).

Перспективы развития термоимпульсной обработки

Термоимпульсный метод финишной отделки был предложен в конце 1970-х годов в Харьковском авиационном институте и являлся развитием термохимического метода, разработанного фирмой BOSH (ФРГ). При термохимической обработке удаление заусенцев на кромках происходит за счет сгорания в газовой смеси с повышенным содержанием кислорода. Такой способ очистки не может применяться для обработки прецизионных деталей из-за

осаждения на их поверхности окислов металла, возникающих при сгорании заусенцев (рис. 5, а), что требует дополнительного травления.

При термоимпульсной обработке удаление заусенцев и технологических загрязнений производится за счет быстротечного теплового воздействия высокой плотности. Часть топливной смеси сгорает в детонационном режиме, что приводит к резкой интенсификации процессов теплообмена между деталью и продуктами сгорания. Выпуск продуктов сгорания производится в горячем состоянии, поэтому окислы и удаленные материалы не осаждаются на обрабатываемых поверхностях (рис. 5, б). Имеется положительный опыт использования этих технологий на серийных заводах, в том числе для очистки прецизионных деталей ЛА [14].

Широкое использование термоимпульсного оборудования для финишной отделки может существенно улучшить технические характеристики продукции отечественного машиностроения. Тем не менее, оно до сих пор не получило распространения. Не рассматривая различные организационные причины, связанные с этим, отметим некоторые недостатки существующего термоимпульсного оборудования, которые сдерживают его внедрение:

1) подбор режимов обработки для каждого из видов деталей основывается на аналитических зависимостях, полученных при существенных допу-

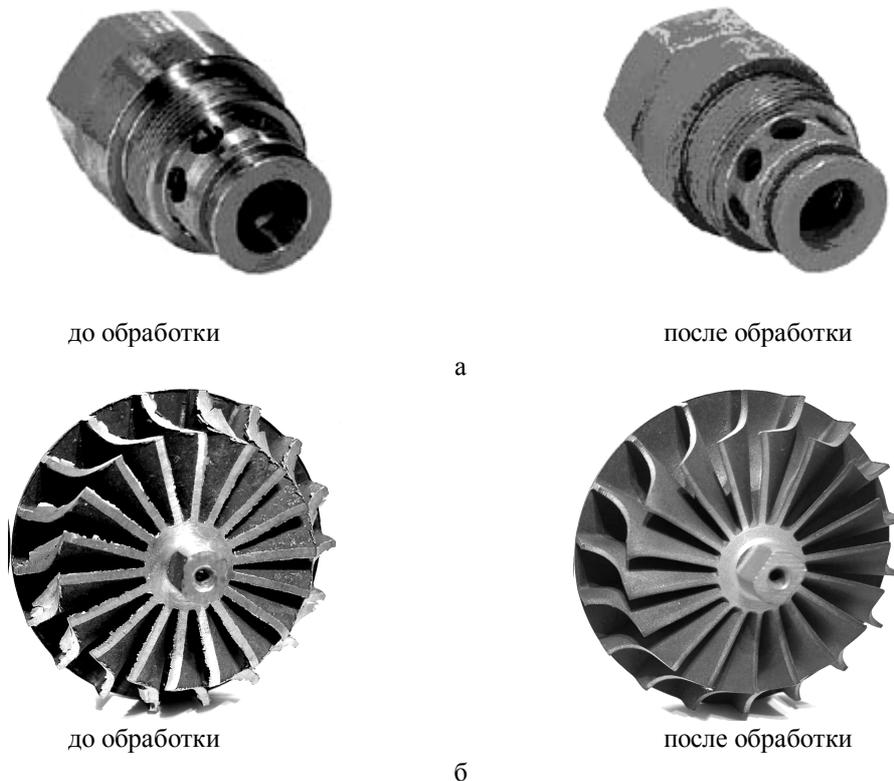


Рис. 5. Детали, обработанные термическими методами:
а – термохимическим; б – термоимпульсным

щениях, и требующих экспериментальной проверки; в условиях промышленного предприятия это требует больших затрат времени и ресурсов, что приводит к потере гибкости процесса;

2) применявшиеся в разработанных установках системы автоматики, исполнительные и измерительные устройства морально устарели, требуют настройки в ручном режиме, что не обеспечивает стабильности качества обработки.

Для того, чтобы быть конкурентоспособным, новое поколение термоимпульсного оборудования должно соответствовать тенденциям развития технологий финишной обработки, сформулированным выше. Таким образом, можно сформулировать следующие задачи для развития финишных термоимпульсных технологий.

Необходима разработка математических моделей рабочего цикла термоимпульсной обработки и создание на их основе метода автоматизированного проектирования технологических процессов в интегрированных CAD/CAE-системах. Соответствующее программное обеспечение должно быть совместимо по структуре данных с разрабатываемыми экспертными системами расчета величин заусенцев в зависимости от характеристик материала и режимов предшествующей обработки.

Необходимо радикально модернизировать системы дозирования энергии термоимпульсных установок, системы измерений и управления. Для повышения точности дозирования энергии необходимо создать математические модели работы исполнительных механизмов этих систем. На основе результатов моделирования и сравнения их с данными экспериментов разработать системы ЧПУ для термоимпульсного оборудования.

Разработать и реализовать программу экспериментальных исследований по изучению новых технологических процессов термоимпульсной обработки, включая обработку деталей из пластмасс, керамических и композиционных материалов. Исследовать возможности повышения точности и управляемости термоимпульсных процессов финишной отделки.

Выводы

1. Основной тенденцией развития оборудования финишной обработки прецизионных деталей является создание автоматизированных комплексов, интегрированных со специализированными экспертными базами по определению размеров и места расположения заусенцев.

2. В ближайшее время к операциям финишной отделки будут ужесточаться требования по управляемости процессов, в том числе для обеспечения

разных параметров качества для различных кромок одной детали, что потребует создания более гибких процессов финишной отделки.

3. В качестве наиболее перспективного метода финишной очистки обоснован выбор термоимпульсного метода. Определены приоритетные задачи его совершенствования с учетом требований современного производства, использующего интегрированные CAD/CAE-системы.

Литература

1. Gillespie L. *Your burr technology efforts changed the world / L. Gillespie – Deburring Technology International Inc, 2009. – 37 p.*

2. Takazawa K. *Design Principle and Manufacturing Technique for the Rotary Compressor of Room Air Conditioner / K. Takazawa // 5th International conference on deburring and surface finish: r.thesis – Kansas City, MO. – Deburring technology international, 1998. – P. 35.*

3. Gillespie L. *The Formation and properties of machining burrs: M.S. Thesis / LaRoux Gillespie. – Utah State University, Logan, Utah, 1973. – 140 p.*

4. *Product design influences on deburring: Society of Manufacturing Engineers (SME): Technical paper; F. Schäfer – Dearborn, 1975. – 117 p. – MR75-483.*

5. Takazawa K. *Burr Technology / K. Takazawa – Tokyo: Asakura Bookstore Company, 1980. – 230 p.*

6. *Burr prevention and minimization for the aerospace industry. Laboratory for manufacturing automation. Research reports 1999 – 2000. University of California, Berkeley. 2002. – P. 4-9.*

7. *Optimization of the face milling process: tool path and tool design. Issues, Part 1. Algorithm and tool path design. Laboratory for manufacturing automation. Research reports 2001–2002. University of California, Berkeley, 2002.- P. 61-68.*

8. *Tool path planning in conjunction with exit order sequence. Laboratory for manufacturing automation. Research reports 2001 – 2002. University of California, Berkeley. 2002. – P. 30-35.*

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

10. Gillespie L. *Mass Finishing Handbook / L. Gillespie – New York City: Industrial Press, 2006. – 276 p.*

11. Ávila M. *Strategies for burr minimization and cleanability in aerospace and automotive manufacturing / M. Avila, J. Gardner, C. Reich-Weiser // SAE Transactions J. of Aerospace. – 2005. – 114 (1). P. 1073-1082.*

12. Dornfeld D. *Cleanability of mechanical components / D. Dornfeld, S. McMains, D. Arbelaez // Job of University of California, Berkeley. – 2008. – 12 p.*

13. Лосев А.В. *Повышение эффективности зачистки деталей пневматических и гидротопливных систем при использовании термоимпульсного ме-*

тогда: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08; защищена 14.05.1995; утв. 07.10.1995 / Лосев Алексей Васильевич. – Х., 1995. – 210 с.

14. Жданов А.А. Термоимпульсные технологии

очистки поверхностных деталей агрегатов авиационных двигателей: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04; защищена 25.01.2003; утв. 12.03.2003 / Жданов Александр Андреевич – Х., 2003. – 120 с.

Поступила в редакцию 12.04.2010

Рецензент: д-р техн. наук, профессор Национального технического университета «ХПИ», главный инженер В.А. Фадеев, ГП ХМЗ «ФЭД», Харьков, Украина.

СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ ПРЕЦИЗІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

С.І. Планковський, О.В. Лосев, О.В. Шипуль, О.С. Борисова

Проведено огляд існуючих методів та обладнання для фінішних обробно-зачисних операцій при виготовленні прецизійних деталей ЛА. На основі аналізу публікацій за темою встановлено що основним напрямом розвитку цього класу технологій буде очищення поверхонь прецизійних деталей від корпускулярних забруднень. З урахуванням цього виділено методи, що найбільше задовольняють вимогам фінішної обробки деталей прецизійних механізмів ЛА. Обґрунтовано вибір термоімпульсного методу фінішного очищення як найбільш перспективного з існуючих. визначено пріоритетні задачі удосконалення термоімпульсного обладнання з урахуванням вимог сучасного виробництва, що використовує інтегровані CAD/CAE-системи.

Ключові слова: прецизійні деталі, фінішна обробка, мікрочастинки, термоімпульсне очищення, математичне моделювання, CAD/CAE-системи.

CURRENT STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT TECHNOLOGIES OF FINISHING OF PRECISION DETAILS AIRCRAFTS

S.I. Plankovskyy, O.V. Losev, O.V. Shypul, O.S. Borysova

The review of existing methods and the equipment for finishing operations at processing precision details of aircrafts is spent. On the basis of the analysis publications on a theme it is established that clearing surfaces precision details of corpuscular pollution will be the basic direction of development this class of technologies. Taking into account this methods to the greater requirements finishing details of precision mechanisms of aircrafts. As the most perspective method the choice of thermal-pulse way for finishing clearing is proved. Priority problems of perfection the thermal-pulse equipment taking into account requirements of the modern manufacture using integrated CAD/CAE-systems are defined.

Keywords: precision details, finishing processing, microparticles, thermo-pulse clearing, mathematical modeling of CAD/CAE-system

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

Лосев Алексей Васильевич – канд. техн. наук, с.н.с. кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: k104.d1@khai.edu

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

Борисова Ольга Сергеевна – соискатель кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: b-o-s@ukr.net