

УДК 621.7.09

**О. В. ШИПУЛЬ***Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "ХАИ", Украина*

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ФИНИШНОЙ ОТДЕЛКИ КРОМОК ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ

*В работе дан анализ современным интенсивно развивающимся методам финишной обработки кромок прецизионных деталей. Принимая во внимание особенности структуры отечественных предприятий, для которых характерно применение замкнутых производственных циклов с большой номенклатурой изготавливаемых деталей, обоснована целесообразность использования термических методов, позволяющих создавать универсальное оборудование с адаптацией в автоматизированные технологии финишной отделки и очистки прецизионных деталей. В соответствии с постоянно возрастающими требованиями прецизионной обработки обоснована перспективность использования методов воздействия интенсивными потоками энергии, в том числе продуктами сгорания детонирующих газовых смесей, как обладающих уникальными преимуществами с точки зрения производительности и технологических возможностей.*

**Ключевые слова:** финишная обработка, отделка, прецизионные детали, промышленная чистота.

### Введение

Важнейшие показатели качества прецизионных механизмов (ресурс, безотказность, функциональные характеристики) во многом определяются качеством финишной отделки кромок и очистки поверхностей [1]. Особенности прецизионных деталей определяют специфические требования к такого рода технологиям. Это касается, например, требований обеспечения стабильности размеров, связанной с необходимостью устранения остаточных напряжений в поверхностном слое прецизионных деталей. Такая задача лучшим образом может быть решена при переходе к бездеформационным методам формообразования [2].

Требования к точности обработки профиля кромок прецизионных деталей постоянно возрастают. Современные стандарты качества кромок включают их разделение по типам; количественные диапазоны по размерам и допускам для поперечного профиля кромок; целый ряд квалитетических показателей, которые ранее не рассматривались – допуски на отклонение формы, требования к продольному профилю и к поверхностному слою на кромках [3]. Ужесточаются требования к форме поперечного сечения кромок, для описания которой используется до 5 геометрических параметров [4].

Традиционные методы отделки не в состоянии обеспечивать постоянные требуемые характеристики обработки кромок прецизионных деталей. Даже если эти процессы и используются в некоторых случаях, они требуют применения дорогостоящего оборудования и больших трудовых затрат, что наконец делает их экономически невыгодными.

В последние десятилетия для преодоления ограничений традиционных отделочных процессов были разработаны новые передовые методы финишной обработки кромок, которые в значительной степени удовлетворяют требованиям производства 21-го века.

Однако принятие решения о выборе того или иного метода для использования требует проведения анализа их существующих и перспективных возможностей и учета особенностей структуры отечественных производств. Проведение такого анализа было задачей настоящей работы.

### 1. Классификация методов финишной отделки кромок прецизионных деталей

На рис. 1 приведена классификация технологических процессов, которые в настоящее время рассматриваются как наиболее перспективные для отделки кромок в производстве прецизионных и ультрапрецизионных деталей (по данным работ [4, 5]).

Традиционные процессы лезвийной обработки продолжают использоваться для изготовления прецизионных деталей. С учетом растущих требований по точности обработки развиваются комбинированные методы обработки с дополнительным воздействием потоков энергии (ультразвуковой, лазерной, плазменной и др.). Совершенствуется оборудование на основе параллельных и комбинированных кинематических схем с полным устранением изгибающих моментов от сил резания и адаптивной компенсации [4]. Для этого применяется специальный режущий инструмент на основе керамики, твердых сплавов и монокристаллических алмазов.

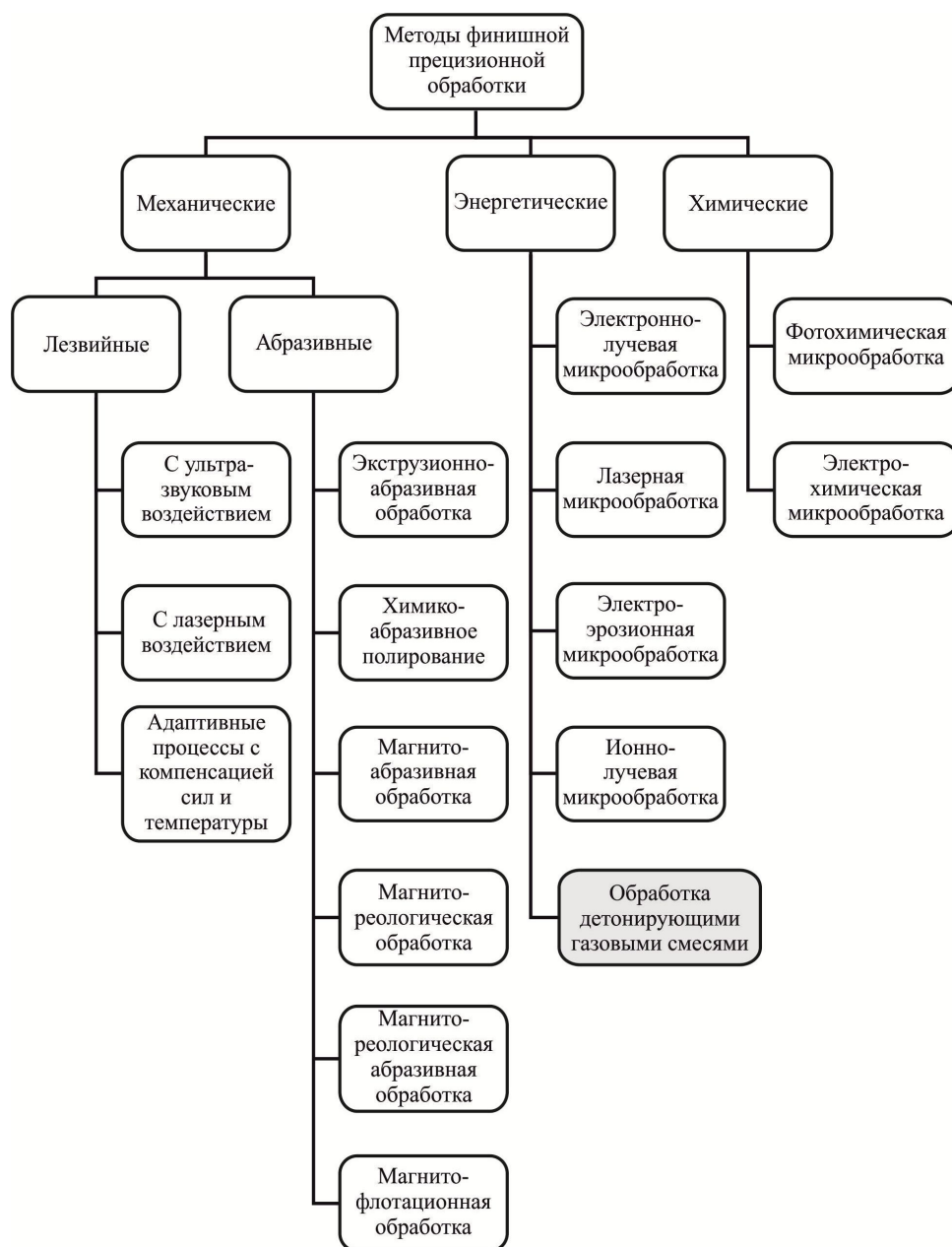


Рис. 1. Классификация перспективных методов финишной отделки прецизионных деталей [4, 5]

Однако лезвийные методы микрообработки обладают теми же недостатками, что и их аналоги в обычной обработке – их использование связано с образованием ликвидов на кромках и микрочастиц на поверхностях и требует дополнительных финишных операций.

Абразивные методы микрообработки с точки зрения обработки кромок имеют большие возможности. Такие методы разделяют по возможностям управления силами, действующими на обрабатываемую деталь [5]. Например, при экструзионно-абразивной (ЭАО), химико-абразивной (ХАО) и упруго-эмиссионной обработке (УЭО), действующие силы нельзя контролировать извне.

В процессах магнито-абразивной (МАО), магнито-реологической (МРО), магнито-реологической

абразивной (МРАО) и магнито-флотационной обработки (МФО) силы, действующие на заготовку, можно контролировать путем изменения внешнего магнитного поля.

Экструзионно-абразивный метод первоначально разрабатывался для снятия заусенцев и отделки прецизионных деталей гидравлической и топливной систем в аэрокосмической промышленности. Обработка производится принудительно формирующимся потоком вязкого полимера, наполненного абразивными частицами, материал и размер которых подбирается исходя из технических условий. Схема, приведенная на рис. 2, показывает, что рабочая среда в этом методе действует как своего рода адаптивно изменяющийся брусок абразива.

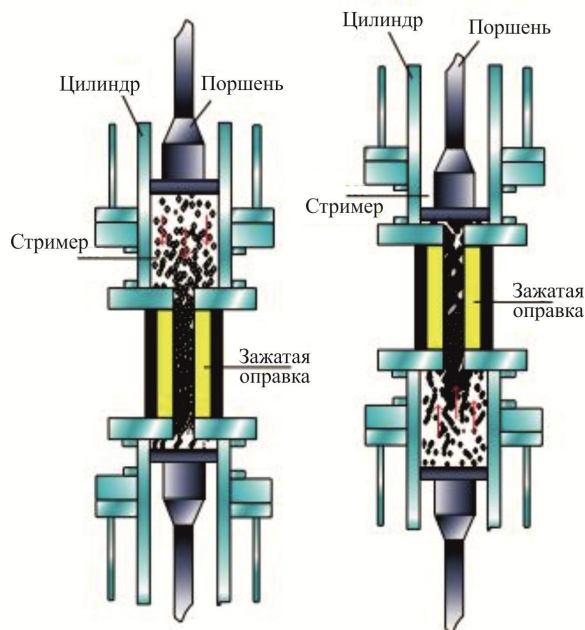


Рис. 2. Схема экструзионно-абразивной обработки

ЭАО имеет различные варианты (одноходовая, двухходовая, орбитальная), позволяет проводить одновременную обработку нескольких деталей, может использоваться для обработки как внешних, так и внутренних поверхностей [6], обеспечивает повторяемость качества обработки.

Экструзионно-абразивный метод позволяет снижать шероховатость поверхностей на 75...90%, профилировать кромки отверстий (рис. 3), удалять грат и "белый слой" после электроэрозионной обработки (рис. 4).

Экструзионно-абразивная обработка имеет ряд недостатков. С ее помощью невозможно получение сложного профиля кромки согласно последним стандартам качества [4]. Она требует специальной оснастки, поэтому наиболее эффективна при крупносерийном производстве.

Как и при любом виде абразивной обработки, этот метод может приводить к шаржированию частиц абразива в поверхность детали. После экструзионно-абразивной обработки промывка деталей явля-

ется обязательной. Однако в случае обработки деталей с внутренними полостями сложной формы она может оказаться неэффективной.

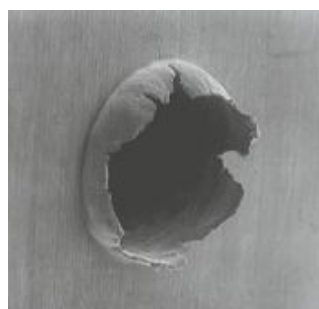
Текстура формирующейся в результате ЭАО поверхности представляет собой набор канавок, ориентированных вдоль потока среды. Такой микрорельеф функционален для деталей управления расходом (форсунки, жиклеры), однако не является лучшим для пар трения из-за низкой маслоёмкости.

При химико-абразивном полировании обработка происходит при сочетании химических и механических воздействий. Степень вклада в обработку каждого из них зависит от обрабатываемого материала. Химическая реакция происходит между заготовкой и жидкостью, а продукты реакции удаляются при механическом воздействии абразива [7]. Метод является узкоспециализированным и предназначен для обработки наружных плоских поверхностей и кромок (чаще всего изделий из керамики).

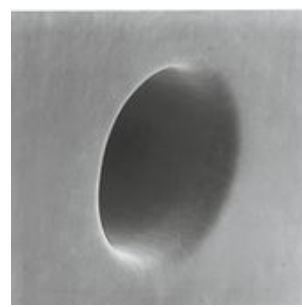
Такие же недостатки свойственны методу упруго-эмиссионной обработки. Этот процесс был предложен Могі еще в 70-х годах [8, 9], и выделяется благодаря способности удаления материала на атомном уровне, получения зеркальной, кристаллографически и физически чистой поверхности. Обработка ведется за счет столкновения с поверхностью заготовки ультрамелких частиц оксидов циркония или алюминия, находящихся в воде, подаваемой в зазор между деталью и вращающимся полиуретановым шаром. Отделка поверхности производится упругим отколом без пластической деформации.

В отличие от описанных процессов методы, использующие для управления процессом обработки магнитное поле, имеют большие технологические возможности с точки зрения формирования профиля кромки [11 - 13].

В магнито-абразивном методе в качестве инструмента используется "щетка" из ферромагнитных абразивных частиц, формирующаяся в зазоре между деталью и магнитным инструментом, в магнитореологическом – магнитная жидкость, твердеющая в магнитном поле.



до обработки



после обработки

Рис. 3. Профилирование кромок отверстий каналов охлаждения лопаток турбин ГТД экструзионно-абразивным методом

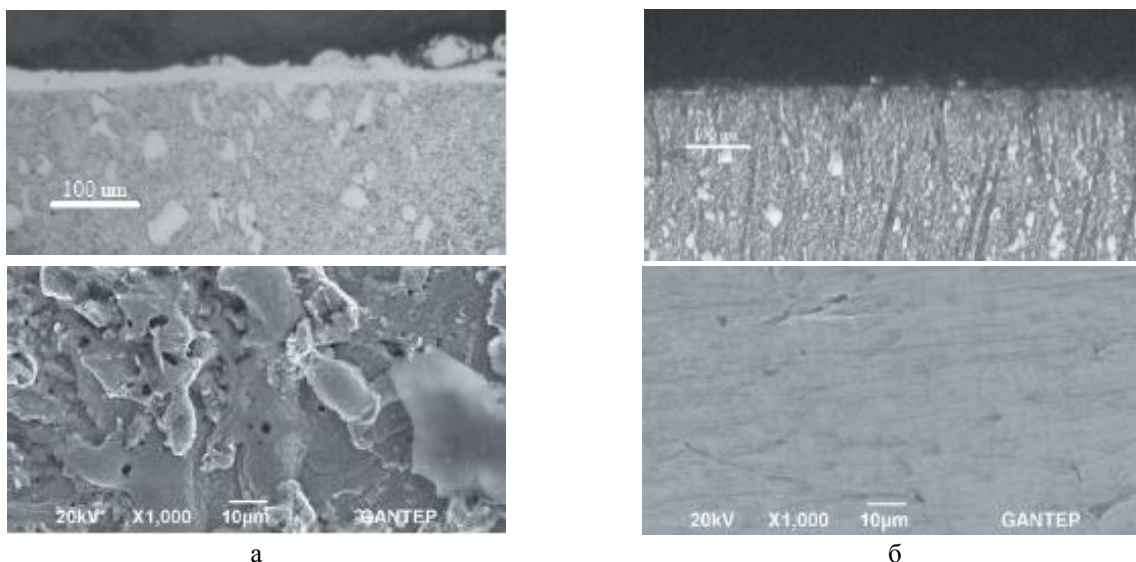


Рис. 4. Поверхность детали: а – после электроэрозионной обработки; б – после последующей экструзионно-абразивной обработки [10]

При магнитореологической абразивной обработке используются оба эти механизма.

Магнитные методы обеспечивают лучшие возможности управления скоростью удаления материала и позволяют производить самую качественную обработку кромок прецизионных деталей.

Химические методы отделки кромок также требуют изготовления специального инструмента. Однако они имеют ограничения по типу обрабатываемых материалов и, как правило, применяются для отделки внешних поверхностей и кромок. Дополнительные возможности по управлению процессом обработки возникают в случае электрохимической обработки за счет изменения величины тока и длительности его воздействия. Электрохимическая обработка наиболее эффективна в комбинации с электроэрозионной [14].

Сравнительные характеристики некоторых методов с точки зрения точности обработки приведены в таблице 1 [15]. Заметим, что для всех приведенных способов повышение точности обработки сопровождается снижением её производительности.

Рассмотренные методы могут обеспечить самые жесткие требования по точности профилирования кромок, они также могут решать задачи удаления быстро изнашиваемой части шероховатости, грата и плен. Однако удаление микрочастиц ими производиться не может, что требует дополнительных технологических операций промывки. В случае обработки деталей с внутренними полостями сложной формы качество такой операции может быть нестабильным.

Лезвийные и абразивные методы являются источниками появления микрочастиц на поверхности. Химическими методами можно удалить металлические микрочастицы с внешних поверхностей. Одна-

ко даже такой процесс может осложняться разнородностью материала частиц.

Таблица 1  
Сравнение возможностей процессов финишной обработки [15]

№ п/п	Метод обработки	Материал детали	Ra, нм
1	Шлифование	Сталь	25-6250
2	Хонингование	Сталь	25-1500
3	Притирка	Сталь	13-750
4	Экструзионно-абразивная обработка (абразив SiC)	Сталь	50
5	Магнито-абразивная обработка	Нержавеющая сталь	7,6
6	Магнито-флотационная обработка (абразив CeO <sub>2</sub> )	Керамика Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	4,0
7	Магнито-реологическая обработка (абразив CeO <sub>2</sub> )	Стекло	0,8
8	Упруго-эмиссионная обработка (абразив ZrO <sub>2</sub> )	Кремний	< 0,5

При выборе метода отделки кромок необходимо учитывать структуру технологической системы производства прецизионного изделия. Многие из методов, описанных выше, требуют применения специального инструмента и оснастки и хорошо

вписываются в технологические цепочки узкоспециализированных производств.

В то же время, для многономенклатурного мелкосерийного производства, такого, например, как производство прецизионных авиационных агрегатов, их применение затруднено, поскольку для решения комплекса задач финишной отделки и очистки может потребоваться большое количество такого специализированного оборудования.

В таких случаях целесообразно использовать термические методы финишной обработки, позволяющих создавать более универсальное оборудование.

## 2. Методы финишной отделки интенсивными тепловыми потоками

Требование минимизации влияния термического воздействия приводит к необходимости применения для финишной отделки импульсных источников тепла с интенсивностью до  $10^9$  Вт/м<sup>2</sup> [16]. Исходя из таких значений для отделки кромок с оплавлением могут применяться следующие типы тепловых источников: лазерные, электронно-лучевые, плазменно-дуговые, электродуговые и детонационные. Из данного перечня исключим методы, основанные на применении электронно-лучевых источников, так как их применение требует использования вакуум-

ных установок и может быть оправдано только для очень специфических случаев обработки.

Для всех остальных способов факторами, определяющими качество обработки, будут являться точность задания интенсивности источника тепла, его позиционирования и времени действия. С этой точки зрения наихудшие возможности имеют электродуговые и плазменно-дуговые источники. Это связано с невозможностью обеспечения стабильности привязки дуги на поверхности обрабатываемой детали.

Исключением является электроэрозионный метод, являющийся разновидностью электродугового. Известны его применения электроэрозионного метода для финишных процессов отделки кромок в три этапа с различными токовыми параметрами – предварительная зачистка; финишная зачистка; отделка (рис. 5). [17].

Структура поверхности кромки, получающаяся в результате электроэрозионной микрообработки, зависит как от технологических параметров процесса, так и от характеристик материала. При обработке материалов с меньшей теплопроводностью вводимое тепло концентрируется в поверхностном слое, что приводит к появлению выраженной оплавленной зоны. Так на рисунке 6 показано изменение текстуры кромки на различных этапах обработки пазов, полученных микрофрезерованием.

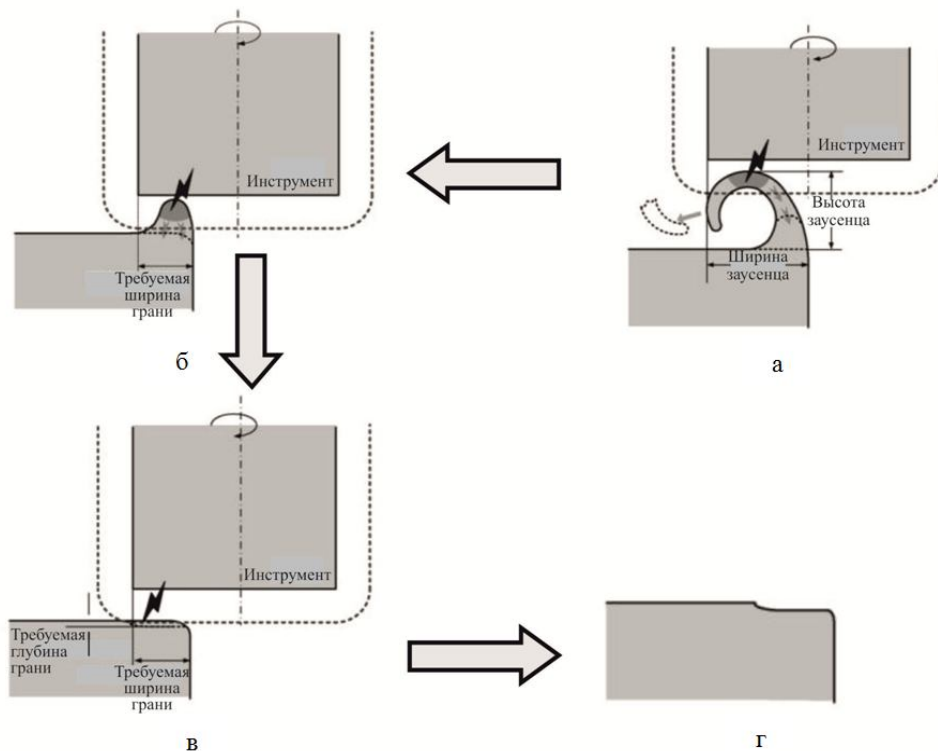


Рис. 5. Последовательность электроэрозионной микрообработки кромок: а – предварительная зачистка; б – финишная зачистка; в – финишная отделка; г – окончательный вид кромки [17]

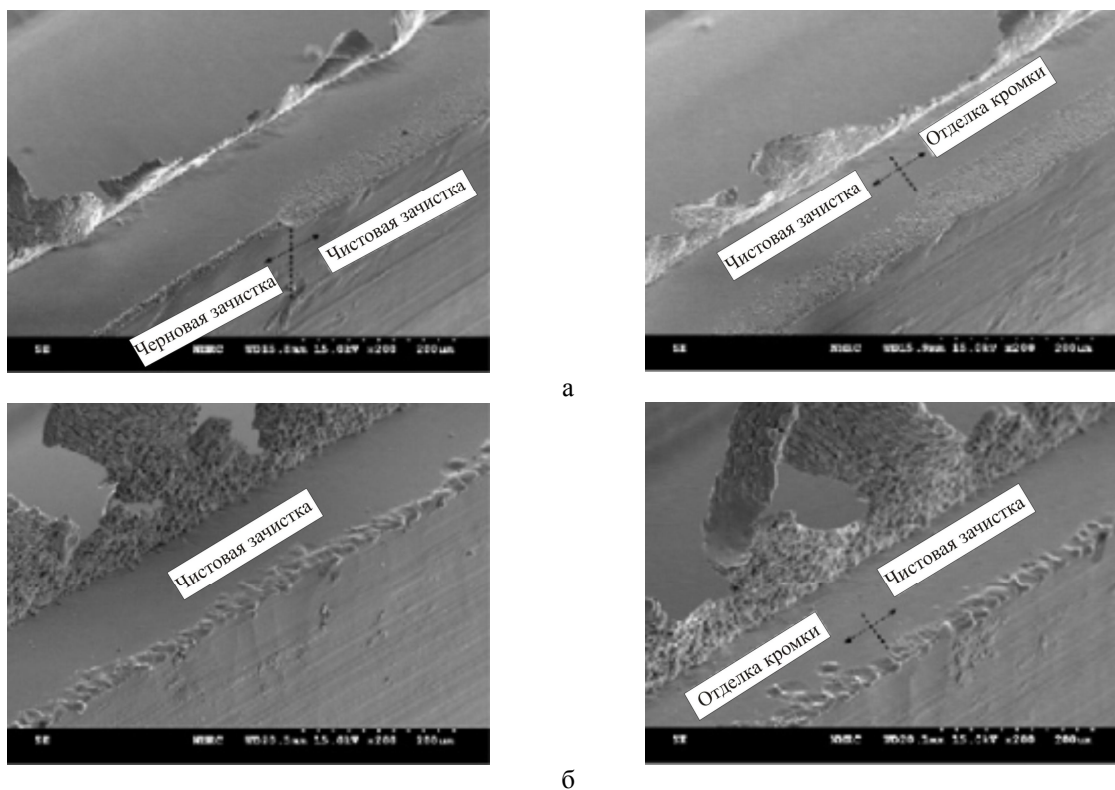


Рис. 6. Изменение текстуры кромки на этапах электроэрозионной микрообработки:  
а – деталь из меди; б – деталь из нержавеющей стали

Основными направлениями повышения качества электроэрозионной микрообработки являются: использование обработки с вращающимся электродом, с наложением ультразвуковых колебаний, обработка в электролите с наполнителем (порошок субмикронного размера), сухая обработка в газовой или двухфазной среде [14, 18, 19].

Таким образом, электроэрозионная обработка позволяет решить часть задач по удалению микроквудов с прецизионных деталей. С ее помощью можно удалить пленки и быстро изнашиваемую часть шероховатости. Задача профилирования кромок решается с некоторыми ограничениями по профилю.

Наибольшими возможностями с точки зрения точности дозирования энергии и времени обработки имеют методы с использованием лазерных источников. Лазерные технологии нашли широкое применение в процессах очистки. Лазерное оборудование для очистки широко представлено на рынке.

При очистке от микрочастиц, которая широко применяется при производстве компонентов микроэлектроники, требуется расфокусировка пучка [20]. Лазерная очистка может производиться на воздухе, под слоем жидкости или в воздушно-капельной среде [21]. Удаление микрочастиц происходит за счет ударного термического расширения приповерхностного слоя детали и импульсного воздействия паров жидкости [16, 21].

В процессах лазерного удаления микрозаусенцев используется обработка лазерным лучом, движущимся вдоль кромки с прецессией (рис. 7) [16]. Обработка производится в среде защитного газа. С точки зрения точности обработки данный метод в наибольшей степени подходит для обработки прецизионных миниатюрных деталей электронных и электронно-механических устройств.

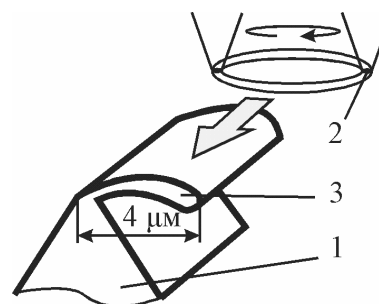


Рис. 7. Схема процесса лазерного удаления микрозаусенцев: 1 – обрабатываемая кромка; 2 – луч лазера; 3 – заусенец

Одной из основных при лазерной отделке кромок является точное позиционирование лазерного луча. При обработке деталей сложной формы это является сложной задачей даже при применении современных систем ЧПУ. Для решения этой задачи в [22] предложено использовать обработку с подачей кислорода в область обрабатываемой кромки. Удаление заусенца происходит за счет его сгорания

в среде кислорода. Дополнительно используется газодинамический унос удаленного материала из зоны обработки.

Следует заметить, что в отличие от процесса очистки, лазерной отделке кромок посвящено минимальное количество исследований. Среди этого небольшого количества можно выделить работы Lee и Dornfeld [23, 24], посвященные вопросам лазерной отделки кромок прецизионных деталей. Такое положение можно объяснить наличием конкурентных технологий, которые достаточно хорошо решают задачи отделки кромок для миниатюрных и ультрапрецизионных деталей. С лазерными процессами, как уже было отмечено, возникают определенные сложности, связанные со сложностью позиционирования лазерного луча при обработке кромок.

Есть еще один недостаток лазерной обработки (впрочем это относится ко всем видам обработки интенсивными потоками энергии) - образование зоны термического влияния. Вопросы моделирования ее образования при лазерном удалении заусенцев были рассмотрены в более поздней работе Lee [25]. На рис. 8 приведена картина распределения термических напряжений при лазерном удалении заусенца, взятая из этой работы. Она иллюстрирует трудности реализации лазерной зачистки сфокусированным лучом – по сути, заусенец в таком процессе обрезается, а высокая плотность энергии при малейшей ошибке позиционирования может привести к браку.



Рис. 8. Поля термических напряжений при лазерной зачистке [25]

Еще одной сложностью при использовании лазеров является очистка внутренних полостей, особенно каналов малого диаметра. Она частично может быть решена при использовании волоконных лазеров, однако в целом, лазеры в большей степени приспособлены для обработки наружных поверхностей прецизионных деталей.

С точки зрения возможностей обработки внутренних полостей практически произвольной слож-

ности уникальными преимуществами обладает еще один из термических методов, который достаточно широко применяется для зачистки заусенцев - обработка продуктами сгорания детонирующих газовых смесей, реализуемый в двух вариантах – термоэнергетическом (ТЕМ – thermal energy method) и термоимпульсном.

### 3. Технологии финишной обработки детонирующими газовыми смесями

Разница между двумя названными вариантами метода обработки продуктами сгорания детонирующих газовых смесей заключается в механизме удаления ликвидов. При ТЕМ варианте обработка ведется горючими смесями с избытком окислителя. Тепло, выделившееся при сгорании горючей смеси, используется для нагревания заусенцев до температуры, при которой инициируется реакция горения между материалом детали и кислородом (рис. 9 а) [27]. Продукты горения удаляются с кромки в газовой фазе.

При термоимпульсном методе обработка ведется смесями стехиометрического состава с образованием ударных волн, что обеспечивает большую величину тепловых потоков [26]. Продукты сгорания нагревают заусенец до плавления, а оплавленный материал удаляется с кромки газодинамическими силами потока продуктов сгорания (рис. 9 б).

Недостатком оборудования, реализующего ТЕМ метод, является образование на поверхностях обрабатываемых деталей оксидов удаленного материала. Для деталей из алюминиевых и цинковых сплавов такие оксиды выпадают в виде белого порошка, который в зависимости от требований к последующей обработке может даже не удаляться [27]. При обработке деталей из сталей образующаяся ржавчина требует удаления. Для этого применяются дополнительные операции травления и промывки.

ТЕМ имеет ряд ограничений по обрабатываемым материалам. Он практически не используется для материалов на основе никеля, хрома и кобальта (например, жаропрочных сплавов), поскольку при достигаемых при обработке температурах эти материалы при достаточно большой теплопроводности практически не реагируют с кислородом.

В ряде работ [27, 28, 29] отмечается, что стальные детали с твердостью более 40 HRC не рекомендуется обрабатывать термоэнергетическим методом, поскольку для таких материалов после ТЕМ обработки возможно появление поверхностных трещин. При обработке деталей из нержавеющей сталей углерод, находящийся в продуктах сгорания, при взаимодействии с материалом может образовывать карбиды по границам зерен и снижать коррозион-

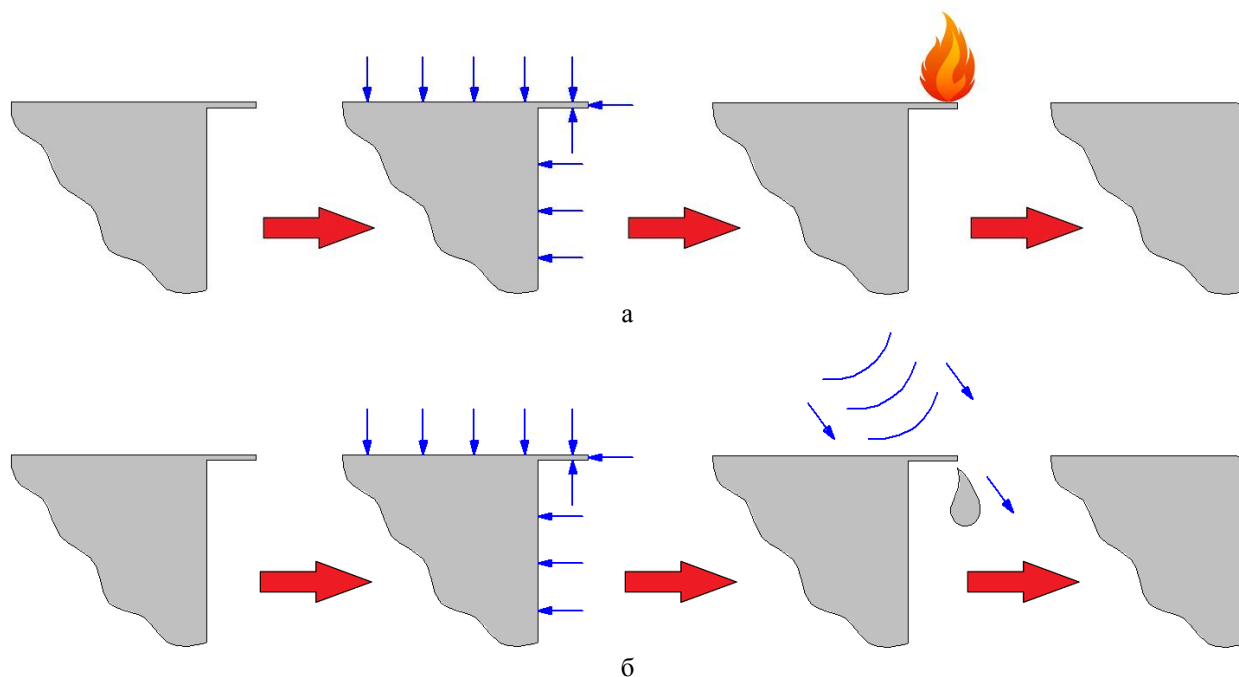


Рис. 9. Варианты реализации зачистки продуктами сгорания детонирующих смесей:  
а – термоэнергетический; б – термоимпульсный

ную стойкость материала [27, 29].

Во многом перечисленные проблемы связаны с некачественным решением задачи управляемого выпуска продуктов сгорания в ТЕМ оборудовании, что приводит к превышению времени контакта деталей с продуктами сгорания. Из-за этого возникают дополнительные ограничения по конструктивным особенностям обрабатываемых деталей – согласно рекомендациям работ [27, 28] минимальная толщина конструктивного элемента при ТЕМ обработке должна быть, по крайней мере, в 10 раз больше, чем размер удаляемого заусенца. В противном случае может возникнуть перегрев и структурные изменения в материале обрабатываемых деталей.

Тем не менее, именно такое оборудование, созданное на основе разработок фирмы BOSCH, получило достаточно широкое распространение. По состоянию на 1997 год в мире эксплуатировалось более 700 единиц таких установок, произведенных как самой фирмой BOSCH, так и ее лицензиатами – KENNAMETAL, ATL и др. Как отмечается в [27] это связано с тем, что ТЕМ обработка многократно превосходит альтернативные методы финишной зачистки по производительности и себестоимости обработки.

Термоимпульсный метод возник позже, чем термоэнергетический, и начиная с 1970-х годов развивался в СССР. Ключевыми инновациями, обеспечившими преимущества метода, стали:

- разработка методики назначения режимов обработки на основе аналитических решений задачи моделирования процесса импульсного нагрева лик-

видов;

- разработка технических решений по управляемому выпуску продуктов сгорания в горячем состоянии.

Выпуск продуктов сгорания при термоимпульсной обработке происходит при температуре, превышающей температуру конденсации окислов. Это позволяет избежать необходимости травления деталей после обработки и делает возможной обработку деталей с прецизионными поверхностями трения.

Термоимпульсное оборудование не имеет ограничений по видам обрабатываемых материалов и в гораздо меньшей степени чувствительно к конструктивным особенностям обрабатываемых деталей. В отличие от ТЕМ оборудования допускается превышение минимальной толщины конструктивного элемента по отношению к толщине удаляемых заусенцев в 3..4 раза [26].

Универсальность термоимпульсного оборудования делает его наиболее очевидным выбором для построения автоматизированных технологий финишной отделки и очистки прецизионных деталей. Однако такое оборудование до настоящего времени не получило широкого распространения, хотя в конце 1980-х годов рядом предприятий был освоен выпуск промышленных термоимпульсных технологий.

Это связано как с некоторыми недостатками оборудования, которые могут быть довольно просто устранены, так и с необходимостью решения ряда задач исследовательского характера для эффектив-



ного использования этого класса оборудования в условиях современного информационно-интегрированного производства.

### Выводы

1. Методы финишной обработки кромок прецизионных деталей интенсивно развиваются, однако, как правило, имеют специализированный характер. Это затрудняет построение технологических систем прецизионной обработки, особенно с учетом особенностей структуры отечественных предприятий, для которых характерно применение замкнутых производственных циклов с большой номенклатурой изготавливаемых деталей. В таких случаях целесообразно использовать термические методы финишной отделки, позволяющие создавать универсальное оборудование.

2. Требования прецизионной обработки приводят к необходимости применения интенсивных импульсных тепловых источников для финишной отделки и очистки. Для построения технологий финишной отделки и очистки наиболее перспективным является использование электроэрозионной и лазерной обработки, а также обработки продуктами сгорания детонирующих газовых смесей.

3. Обработка продуктами сгорания детонирующих газовых смесей обладает уникальными преимуществами с точки зрения производительности и технологических возможностей. Условиям обработки прецизионных деталей в наибольшей степени соответствует термоимпульсный вариант метода. Универсальность термоимпульсного оборудования делает его наиболее очевидным выбором для построения автоматизированных технологий финишной отделки и очистки прецизионных деталей.

### Литература

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

2. Яковлева, С. А. Исследование и разработка технологических методов повышения точности и размерной стабильности прецизионных деталей и узлов гироскопических приборов [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.14 : защищена 20.10.2012 ; утв. 16.12.2012 / Яковлева Светлана Анатольевна. – Санкт-Петербург, 2012. – 141 с.

3. 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, 2007. – P. 83-90.*

4. Byrne, G. Advancing cutting technology [Text] / G. Byrne, D. Dornfeld, B. Denkena // *CIRP Annals*. – 2003. – Vol. 52, Iss. 2. – P. 483-507.

5. Jain, V. K. Magnetic field assisted abrasive based micro-/nano-finishing [Text] / V. K. Jain // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – 2009. – P. 6022-6038.

6. Sankar, M. R. Abrasive flow machining (AFM): an overview [Electronic resource] / M. R. Sankar, V. K. Jain, J. Ramkumar. – Access mode: <http://www.sharepdf.com/59e54f9c29d14e0b9f3ecffaf97d7db/V.K.Jain.pdf>. – 02.08.2014.

7. Nanz, G. Modeling of chemical-mechanical polishing: a review [Text] / G. Nanz, L. E. Camilletti // *IEEE Trans. On Semiconductor Manufacturing*. – 1995. – № 8. – P. 382-389.

8. Numerically controlled elastic emission machining [Text] / Y. Mori, N. Ikawa, T. Okuda, K. Yamagata // *Technology reports of the Osaka University*. – 1976. – № 26. – P. 283-294.

9. Mori, Y. Elastic emission machining [Text] / Y. Mori, K. Yamauchi // *Precision Engineering*. – 1987. – Vol. 9. – P. 123-128.

10. Gov, K. Hardness effects on abrasive flow machining [Text] / K. Gov, O. Eyercioglu, M. V. Cakir // *Journal of Mechanical Engineering*. – 2013. – Vol. 59, Iss. 10. – P. 626-631.

11. Effect of working gap and circumferential speed on the performance of magnetic abrasive finishing process [Text] / V. K. Jain, P. Kumar, P. K. Behera, S. C. Jayswal // *Wear*. – 2001. – № 250. – P. 384-390.

12. Kordonski, W. I. Magnetorheological finishing [Text] / W. I. Kordonski // *International Journal of modern physics B*. – 1996. – Vol. 10, № 23&24. – P. 2837-2849.

13. Jha, S. Design and development of magnetorheological abrasive flow finishing process [Text] / S. Jha, V. K. Jain // *International Journal of machine tool and manufacture*. – 2004. – Vol. 44, Iss. 10. – P. 1019-1029.

14. Skoczypiec, S. A sequential electrochemical-electrodischarge process for micropart manufacturing [Electronic resource] / S. Skoczypiec, A. Ruszaj. – Access mode: <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2014.03.007>. – 11.08.2014.

15. Jha, S. Nano-finishing techniques [Electronic resource] / S. Jha, V. K. Jain. – Access mode: [web.iitd.ac.in/~suniljha/nanofinishing.pdf](http://web.iitd.ac.in/~suniljha/nanofinishing.pdf). – 21.08.2014.

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

17. *Deburring microfeatures using micro-EDM [Text] / H. J. Young, H.Y. Byung, U. L. Han and oth. // Journal of materials processing technology. – 2009. – Vol. 209. – P. 5399–5406.*
18. *Anand, P. Current research trends in variants of Electrical Discharge Machining: A review [Text] / P. Anand, S. Shankar // International Journal of Engineering Science and Technology. – 2010. – Vol. 2(6). – P. 2172-2191.*
19. *Ho, K. H. State of the art electrical discharge machining (EDM) [Text] / K. H. Ho, S. T. Newman // International Journal of Engineering Science and Technology. – 2003. – Vol. 43, Is. 13. – P. 1287–1300.*
20. *Kane, D. Laser cleaning II [Text] / D. Kane. – World Scientific, 2006. – 289 p.*
21. *Kruusing, A. Underwater and water-assisted laser processing: Part 1 -general features, steam cleaning and shock processing [Text] / A. Kruusing // Optics and Lasers in Engineering. – 2004. – Vol. 41. – P. 307–327.*
22. *Pat. 0471179 EP. Int. Cl.5 B23K26/03; B23K26/06; B23K26/36; B23K26/00; B23K26/02. Process for deburring metal workpiece edges [Electronic resource] / H. Bergmann, H. Lindner. – Appl. No. EP19910111106 19910704; publ. 19.02.1992. – 5 p. – Access mode: [http://v3.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&adjacent=true&locale=en\\_EP&FT=D&date=19920219&CC=EP&NR=0471179\\_A1](http://v3.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=19920219&CC=EP&NR=0471179_A1). – 21.08.2012.*
23. *Lee, S. H. Precision laser deburring [Text] / S. H. Lee, D. A. Dornfeld // J. Manuf. Sci. Eng. – 1999. – Vol. 123, Iss. 4. – P. 601-608.*
24. *Lee, S. H. Precision laser deburring and acoustic emission feedback [Text] / S. H. Lee, D. A. Dornfeld // J. Manuf. Sci. Eng. – 1999. – Vol. 123, Iss. 2. – P. 356-364.*
25. *Lee, S. H. Analysis of precision deburring using a laser – An experimental study and FEM simulation [Text] / S. H. Lee // KSME International Journal. – 2000. – Vol. 14, Iss. 2. – P. 141-151.*
26. *Лосев, А. В. Повышение эффективности зачистки деталей пневматических и гидротопливных систем при использовании термоимпульсного метода [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 ; защищена 14.05.1995 ; утв. 07.10.1995 / Лосев Алексей Васильевич. – Х., 1995. – 210 с.*
27. *Gillespie, L. Deburring and edge finishing handbook [Text] / L. Gillespie. – New York City : Industrial Press, 1999. – 404 p.*
28. *Kelley, D. G. Thermal Energy Deburring [Text] / D. G. Kelley, K. Schwarz. – Technical paper MR91-136, Dearborn : Society of Manufacturing Engineers, 1991. – 32 p.*
29. *Sonego, R. Advances in TEM Technology [Text] / R. Sonego. – Technical paper MR93-322, Dearborn : Society of Manufacturing Engineers (SME). – 1993. – 9 p.*

Поступила в редакцию 3.06.2015, рассмотрена на редколлегии 17.06.2015

## СУЧАСНІ МЕТОДИ ФІНІШНОГО УПОРЯДЖЕННЯ КРАЙОК ПРЕЦИЗІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ

*О. В. Шипуль*

У роботі дано аналіз сучасним методам фінішної обробки кромки прецизійних деталей, що інтенсивно розвиваються. Приймаючи до уваги особливості структури вітчизняних підприємств, для яких притаманно застосування замкнутих виробничих циклів з великою номенклатурою деталей, що виготовляються, обґрунтовано доцільність використання термічних методів, які дозволяють створювати універсальне устаткування з адаптацією в автоматизовані технології фінішної обробки і очищення прецизійних деталей. У відповідність з постійно зростаючими вимогами прецизійної обробки обґрунтовано перспективність використання методів впливу інтенсивними потоками енергії, у тому числі продуктами згоряння газових сумішей, що детонують, як таких, що володіють унікальними перевагами з точки зору продуктивності і технологічних можливостей.

**Ключові слова:** фінішна обробка, упорядження, прецизійні деталі, промислова чистота.

## MODERN METHODS OF EDGE FINISHING OF PRECISION PARTS

*O. V. Shipul*

The analyze of the rapidly developed modern methods of edges finishing of precision parts was done. Taking into account the structural features of domestic enterprises, which are characterized by using of closed production cycles to a wide range of manufactured parts, using thermal methods to create universal equipment with the adaptation of technology in automated finishing and cleaning of precision parts is justified. In accordance with the growing requirements of precision machining the promising of using intensive energy flows methods, including the combustion of detonating gas mixtures as having unique advantages in terms of productivity and technological capabilities is proved.

**Key words:** finishing treatment, finishing, precision parts, industrial purity.

**Шипуль Ольга Владимировна** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри технології виробництва летательних апаратів, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: o.shipul@khai.edu.