

УДК 621.951.47

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ И ВЫБОР ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ АГРЕГАТОВ

А.В. Лосев, канд. техн. наук, А.А. Жданов, Е.Н. Сломинская, канд. техн. наук

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Выполнен анализ состояния проблем очистки сложнопрофильных поверхностей прецизионных деталей агрегатов летательных аппаратов и рассмотрены различные методы решения этих проблем.

* * *

Виконано аналіз стану проблеми очищення складних поверхонь прецизійних деталей літальних апаратів і розглянуто різні методи розв'язання цих проблем.

* * *

Problems of cleaning of precision parts intricate shape surfaces of aircraft assembly units are analyzed and different methods of its solution are examined.

Проблема повышения надежности и ресурса машин тесно связана с обеспечением чистоты поверхностей и кромок деталей, а также рабочих полостей узлов. По статистическим данным, до 50% всех отказов гидравлических систем самолетов, связанных с выходом из строя насосов, заклиниванием распределительных и регулирующих устройств, повышенным износом ответственных деталей, происходит по причине технологических загрязнений. При обеспечении чистоты поверхностей деталей и рабочих полостей машин ресурс может быть увеличен в два-три раза [2]. Поэтому интерес к отделочно-очистным технологиям (ООТ) в высокоразвитых в промышленном отношении странах не ослабевает на протяжении последних 30 лет. В США работают в данной области техники более 2000 тысяч фирм. За последние 10 лет количество отделочно-очистных методов увеличилось с 80 до 110 [12].

В СССР (1990—91 годы) была предпринята попытка перехода от разрозненных исследований и разработок отделочных технологий и оборудования к целостной технологической системе [9]. Но работы в этом направлении были прекращены с ликвидацией СССР.

В Национальном аэрокосмическом университете «ХАИ» работы по исследованию ООТ и оборудования на базе импульсных источников энергии были начаты в 1975 году, а с 1980 года исследова-

ния и разработки выполнялись по общесоюзным программам ГКНТ СССР.

Изучалась не только физика процессов очистки поверхностей и кромок деталей, но и область применения новых технологий. Были обследованы предприятия практически всех отраслей машиностроения, в результате чего установлена взаимосвязь работоспособности, эксплуатационной надежности, долговечности изделий и доли отделочно-очистных операций в общей трудоемкости изготовления ответственных деталей. Трудоемкость этих операций по мере убывания требований к надежности изделий следующая: при изготовлении отдельных видов боеприпасов – 70...80% ; в авиадвигателестроении – 30...55%; в авиаагрегатостроении – 30...50%; в станкостроении – 4...12%; в тракторостроении – 2...8%; в легпищемашиностроении – 2...4%. Низкое качество продукции последней отрасли послужило причиной расформирования и переподчинения ее предприятий оборонному комплексу.

При исследовании технологических загрязнений поверхностей деталей нами обнаружено, что все виды механической обработки, использующие режущий инструмент, сопровождаются образованием на поверхностях и кромках помимо микрозаусенцев еще микрочастиц и микрозаусенцев из обрабатываемого материала и инструмента, не от-

фильтровываемых бортовыми фильтрами [4]. По статистике основная доля отказов золотниковых агрегатов происходит из-за превышения норм по массовой концентрации частиц и эти микроскопические загрязнения необходимо удалять и предотвращать их массовое образование. Попадая в зазоры между движущимися частями прецизионных пар, частицы вызывают преждевременный их износ или заклинивания. Эти неисправности могут привести к авариям или к катастрофам летательных аппаратов. Установлено, что эффект от применения ООТ достигается при 100%-ной обработке деталей, входящих в замкнутую систему машины или автономного агрегата.

В таблице приведены основные методы отделки и очистки поверхностей и кромок деталей. Такое многообразие методов тем не менее не решает проблем не только авиационного агрегатостроения, но и нашего машиностроения в целом потому, что накопленный опыт использования многих технологий мало доступен и для эффективной обработки деталей даже среднего машиностроительного завода Украины необходимо применить около 10 – 15 методов [6].

Актуальность проблемы очистки кромок и поверхностей деталей агрегатов летательных аппаратов связана с обеспечением эксплуатационной надежности авиационной техники, а в рыночных условиях еще и необходимостью обеспечения конкурентной способности продукции.

Рассмотрим технологические особенности типовых отделочно-очистных методов. Исходя из физико-химического воздействия на материалы при обработке, существующие методы отделки и очистки деталей можно разделить на пять групп, каждую из которых подразделяют на подгруппы (см. таблицу).

Механические методы, при которых удаление ликвидов осуществляется путем механического воздействия на обрабатываемые детали твердых тел,

инструментов. К ним относятся: слесарные, лезвийные, абразивные методы, обработка давлением, ударные, галтовочные, центробежные, турбуляционные, вибрационные и робототехнические способы зачистки.

Химико-механические методы, при которых имеет место одновременное механическое воздействие инструмента и химическое воздействие внешней среды (жидкости). К этим методам относятся абразивная, гидродинамическая, галтовочная, центробежная, турбуляционная и вибрационная обработка с применением смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ).

Химические методы, при которых удаление ликвидов осуществляется путем воздействия химически активной жидкой или газовой среды. Их подразделяют на химические, галтовочно-химические, турбуляционно-химические и виброхимические способы.

Электрохимические методы, для которых характерно химическое воздействие жидкой среды и электрического тока, проходящего через электролит и материал детали. Их подразделяют на электрохимические с погружением, электрохимические локальные, галтовочно-электрические, виброэлектрические способы.

Физические методы, при которых обработка осуществляется путем счет физического воздействия на материал: ультразвуковых волн, электрических разрядов, электрогидравлических ударов и др. Их подразделяют на ультразвуковые, электроконтактные и импульсные (взрывной, электрогидравлический, термоимпульсный и др.) способы.

Рассмотрим сущность и технологические особенности всего многообразия известных методов зачистки деталей на типовых методах.

Удаление заусенцев лезвийным инструментом предусматривает снятие заусенцев и образование фасок с помощью стандартного или специального режущего инструмента.

Классификация методов отделки и зачистки деталей [1,2,3,4,5,6,7,8,9, 10,11,12]

Группа	Подгруппа	Метод	Производительность (приведенная к ручной)
1	2	3	4
Механические	Слесарные [⊗] , лезвийные [⊗]	Ручной, механизированный резцовый, фрезерный, дисковый, сверлильный, протяжной, щеточный, эластичными кругами	1
	Абразивные [⊗]	Эластичный без СОЖ, ленточный без СОЖ, абразивный без СОЖ, алмазный без СОЖ, магнитоабразивный без СОЖ, криогенно-абразивные	2-4
	Давление	Прокаткой, штамповочный	3-5
	Ударные [⊗]	Пескоструйный, дробеструйный, пневмодробеструйный, пневмошариковый, пневмобойковый, крайцовочный, пневмопластошариковый, криогенно-дробеструйный	3-5
	Галтовочные без СОЖ [⊗]	Галтовочно-абразивный, галтовочно-обкатной	8-10
	Центробежные без СОЖ [⊗]	Центробежно-абразивный центробежно-обкатной, центробежно-кордный	8-10
	Турбуляционные без СОЖ [⊗]	Турбуляционно-абразивный, турбуляционно-обкатной, орборезонантный	8-9
	Вибрационные без СОЖ [⊗]	Виброабразивный без СОЖ, виброобкатной без СОЖ, виброкордный без СОЖ	15-20
	Робототехнические [⊗]	Лезвийным инструментом, струей жидкости и абразива	3-5
Химико-механические	Абразивные с СОЖ [⊗]	Эластичный с СОЖ, ленточный с СОЖ, абразивный с СОЖ, алмазный с СОЖ, магнитоабразивный с СОЖ	3-5
	Гидродинамические [⊗]	Гидродробеструйный, гидропескоструйный, гидрокавитационный, гидрокавитационно-абразивный	3-5
	Галтовочные с СОЖ [⊗]	Галтовочно-абразивный, галтовочно-обкатной, галтовочно-кордный	9-10
	Центробежные с СОЖ [⊗]	Центробежно-абразивный с СОЖ, центробежно-обкатной с СОЖ, центробежно-кордный с СОЖ	9-10
	Вибрационные с СОЖ	Виброабразивный с СОЖ, виброобкатной с СОЖ, виброкордный с СОЖ	10-11

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
Химические	Химические	Химический с нагружением	10
	Термохимические	Термохлорный, термокислородный	15
	Галтовочно-химический	Галтовочно-химический	10-12
	Турбуляционно-химические	Турбуляционно-химический, турбуляционно-химико-механический	12-18
	Виброхимические	Виброхимический	17-20
Электрoхимические	Электрохимические с погружением	Анодный, катодный, реверсивный, электрогидратный	10-12
	Электрохимические локальные	Электро-химико-механический, электро-химико-гидравлический	5-6
	Галтовочно-электрохимические	Галтовочно-электрохимический, галтовочно-электро-химико-механический	9-12
	Виброэлектрохимические	Виброэлектрохимический, виброэлектро-химико-механический	15-20
	Электроимпульсное полирование	ЭИП (электролит- слабый раствор солей)	
Физические	Ультразвуковые	Ультразвукохимический, ультразвуковой, ультразвуко-локальный, криогенно-ультразвуковой	7-8
	Электроконтактные	Прерывный, с предварительным замораживанием	5-6
	Термические	плавление в высокотемпературной жидкой и газовой среде	10-15
	Импульсные	Взрывной, электрогидравлический, термоимпульсный газовый, термоимпульсный газовый с наложением электрического поля, термоимпульсный с наложением механических воздействий на детали, лазерный	20-40 и более

⊗ –методы, образующие вторичные загрязнения микрочастицами и микрозаусенцами

Снимаются заусенцы разных размеров на деталях из различных материалов. Длительность цикла колеблется от 10 до 30 секунд. Размеры детали не ограничены. По сравнению с ручной зачисткой производительность повышается в четыре раза. Метод не позволяет удалять заусенцы на внутренних поверхностях деталей сложной формы, образует вторичные микрозаусенцы [5,8].

Удаление заусенцев вращающимися щетками происходит путем абразивного или режущего воздействия щетки. Применяется сухая и влажная обработка при ручном, полуавтоматическом или автоматическом цикле. Удаляются заусенцы величиной до 0,075 мм. Удаление больших заусенцев возможно при использовании щеток с нанесенным абразивом, но при этом происходит шаржирование поверхности. К недостаткам следует отнести изменение размеров детали в местах обработки, увеличение высоты микронеровностей и образование вторичных заусенцев и микрочастиц [8,4].

Заусеницы могут удаляться абразивной лентой только на наружных поверхностях детали. У деталей сложной формы снятие заусенцев выполняется при ручной ориентации детали. Возможно удаление заусенцев толщиной около 0,3 мм. В процессе удаления заусенцев изменяется размер детали (до 0,05 мм), а также происходит шаржирование поверхностей деталей из мягких материалов, образуются микрозаусенцы и частицы, соизмеримые с величиной шероховатости.

Абразивно-струйная обработка осуществляется струей жидкости, насыщенной абразивными зернами, под давлением. Обрабатываются как наружные, так и внутренние поверхности. На деталях любых размеров и формы удаляются заусенцы толщиной до 0,25 мм. К недостаткам следует отнести: большой расход жидкости, необходимость очистки деталей от абразивной смеси после обработки, невозможность обработки глухих отверстий глубиной более 1,5 диаметра. Следует иметь в виду, что материалы,

деформируемые в холодном состоянии, могут претерпевать пластические деформации. В отдельных деталях может быть получено изменение шероховатости поверхности и размеров, образуются микрозаусенцы и частицы, соизмеримые с величиной шероховатости. Если заусенцы имеют большую длину, то в процессе обработки они могут деформироваться и остаться не удаленными [5,10].

Обработка заусенцев с помощью высокоскоростной струи жидкости ведется при давлении в диапазоне 6...210 МПа. Используется вода с примесью растворимого в воде масла (от 1 до 3%). Удаляются ликвиды, доступные воздействию струи воды толщиной менее 0,075 мм. Обрабатываются детали из алюминиевых сплавов, цинка, чугуна. Производительность обработки составляет в среднем 200...500 деталей в час. Серьезным фактором, ограничивающим применение этого метода, является низкая надежность механизмов, работающих под высоким давлением, обрабатываются только открытые поверхности. Детали малой жесткости могут быть деформированы. Давление струи на поверхности детали при ее торможении может превышать начальное в несколько раз [5,8,12].

Для удаления заусенцев галтовкой обрабатываемые детали помещаются в медленно вращающийся барабан, заполненный галтовочной абразивной смесью. Длительность обработки колеблется между 1,0 и 100 часами на партию деталей. Небольшие стальные детали обрабатываются за два часа при удалении заусенцев толщиной до 0,075 мм и скруглением кромок радиусом до 0,25 мм. Эффективнее лезвийного, абразивного, ударного, механизированного методов в 2 – 10 раз. Величина деталей ограничивается размерами галтовочного барабана. Недостатком метода является изменение размеров и форм деталей, возможны забоины, царапины; не обрабатываются заусенцы в глухих отверстиях; заусенцы, имеющие большую длину, могут загигаться и завальцовываться на детали; шаржируется по-

верхность деталей, образуются микрозаусенцы и частицы, соизмеримые с величиной шероховатости [5,10,11,12].

Вибрационные методы удаления заусенцев отличаются от галтовочных тем, что на систему действует несколько сил, векторы которых находятся в разных плоскостях. Технологические возможности считаются аналогичными галтовке, однако производительность в два-три раза выше. Длительность цикла обработки колеблется от 10 минут до 5 часов [5,12].

Удаление заусенцев методом давления заключается в воздействии на ликвиды сил давления с помощью штампов или валков. Метод обеспечивает более высокую производительность по сравнению со слесарным, приспособления для реализации метода отличаются простотой. Таким методом можно обрабатывать только плоские и штампованные детали, при этом качество обработки невысокое и требуется дополнительная зачистка и очистка [5].

Ударные методы основаны на ударном воздействии мелких твердых тел на заусенцы. Особенностью этих методов является образование наклепа на поверхностях деталей. Производительность несколько выше, чем для режущего и абразивного методов. Однако данными методами невозможно обрабатывать точные детали, внутренние поверхности, глухие отверстия. При обработке изменяется шероховатость и размеры, образуются микрозаусенцы [5,11,12].

Основой химических методов удаления заусенцев и частиц является погружение обрабатываемых деталей в резервуар с химикалиями, где благодаря химической реакции происходит зачистка. Эти методы используются при обработке деталей из различных металлов. Толщина удаляемых заусенцев - до 0,075 мм. Длительность обработки партии деталей - от 15 до 20 минут. При обработке понижается точность, наблюдается неравномерное травление металла с поверхности детали, применяются эколо-

гически опасные технологии с дорогостоящей утилизацией отходов [3,5,11].

Электрохимическое удаление ликвидов происходит в результате их растворения в электролите под действием электрического поля. Электролит находится в зазоре между ликвидами и электродами специальной формы. Наибольшая эффективность обеспечивается при снятии заусенцев толщиной менее 0,37 мм. Длительность процесса обработки составляет от 0,5 до 15 минут. Обрабатываются металлы и их сплавы. Метод позволяет удалять как наружные, так и внутренние заусенцы, но требует большого набора электродов, соответствующих контурам обрабатываемых поверхностей. Помимо удаления заусенцев происходит местное снятие материала детали (до 0,25 мм) и местное травление. Кроме того, вопреки рекомендациям, обрабатывать детали группами не всегда удается, так как без установочной базы невозможно выдержать оптимальные зазоры (около 0,2 мм) между электродами и обрабатываемой поверхностью у нескольких деталей одновременно. Оборудование (насосы, трубопроводы и т.д.) подвергается повышенной коррозии. Трудно подобрать раствор для каждого обрабатываемого металла, применяются экологически опасные технологии с дорогостоящей утилизацией отходов. Метод рекомендуется использовать для партии деталей не менее 5000 штук [5,6,11,12].

Снятие заусенцев под воздействием ультразвука объясняется кавитационно-абразивной теорией. Метод применим для мелких деталей с толщиной заусенцев не более 0,08 мм. Эффективно очищаются открытые поверхности деталей от микрочастиц. Время обработки - 10...15 мин. Повышается величина шероховатости поверхности на один-два класса. Время процесса по сравнению с галтовочным, по данным американских фирм, сокращается в 20 раз. К недостаткам следует отнести отсутствие серийного оборудования, неизученность процессов, ограниченные размеры снимаемых заусенцев, неэффектив-

ность при очистке сложнопрофильных деталей из-за наличия теневых зон [5,10,12].

При электроконтактных методах используют для обработки тепло, выделяющееся при протекании тока через соприкасающиеся поверхности, обладающие повышенным контактным электрическим сопротивлением. Достоинства метода: возможность качественно и производительно удалять заусенцы и окалину со средних и крупногабаритных деталей; возможность местной очистки поверхностей детали практически любых размеров. Недостатки: неизученность метода, отсутствие серийного оборудования, невозможность обработки мелких деталей, увеличение шероховатости обрабатываемой поверхности, изменение структуры поверхностного слоя, образование вторичных, более мелких, заусенцев [5,12].

Из физических методов в настоящее время наиболее интенсивно изучаются термохимический и термоимпульсный методы зачистки. В основе этих методов лежит нагрев заусенцев и детали, но поскольку отношение массы заусенцев к площади поверхности незначительна по сравнению с тем же показателем самой детали, то заусенцы прогреваются быстрее и могут либо плавиться, либо сгорать в среде окислителя. В качестве окислителя используют хлор и кислород. За рубежом в последние годы получил широкое распространение термохимический метод, в котором в качестве импульсного источника тепла применяют детонирующую газовую смесь с избытком кислорода. Этот метод позволяет удалять заусенцы и микрочастицы с деталей любой формы, т.е. там, куда есть доступ газовой смеси. В процессе обработки дополнительные заусенцы не образуются. К преимуществам также следует отнести высокую производительность, универсальность, возможность гибкой автоматизации процесса, стабильность результатов обработки, широкую номенклатуру обрабатываемых материалов.

Недостатками метода являются: ограничение

по наименьшей толщине элементов детали, которая должна быть в 10 раз больше толщины максимального удаляемого заусенца, а также отложение конденсированных оксидов на поверхностях деталей, которые удаляются химическим травлением. Кроме того, метод мало изучен, импортное оборудование отличается высокой стоимостью, отсутствует надежное оборудование отечественного производства [5,6,12].

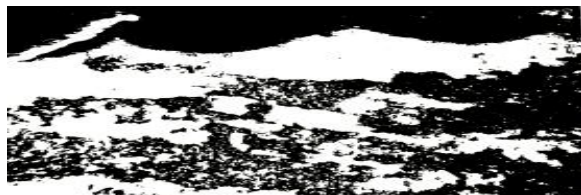
Термоимпульсный метод отличается от термохимического тем, что доминирующими являются теплофизические процессы, при этом ликвиды оплавляются и удаляются вместе с продуктами сгорания из рабочей камеры до начала конденсации оксидов. К достоинствам метода следует отнести гибкость, высокую производительность, совмещение операций отделки поверхностей и кромок с их очисткой, возможность обработки сложнопрофильных высокоточных деталей, включая детали топливной аппаратуры.

К недостаткам следует отнести ограничение размеров обрабатываемых деталей размерами рабочей камеры [4,6].

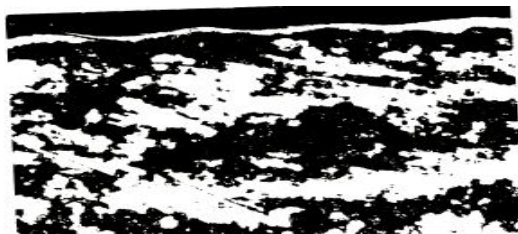
На рис. 1 и 2 показаны типовые поверхности деталей агрегатов летательных аппаратов после механической обработки и последующей термоимпульсной очистки.

Рассмотрим отделочно-очистные методы применительно к условиям агрегатного производства авиационной промышленности. Наименьшая величина удаляемых ликвидов косвенно установлена стандартами ГОСТ 17216-71, ОСТ 1.41144-80 и др. размером в 5 мкм, максимальная величина, по нашим исследованиям, не превышает 200 мкм при соблюдении технологической дисциплины. Исходя из требований, предъявляемых к деталям агрегатного производства по промышленной чистоте, ликвиды на них могут удаляться лезвийным, слесарным, химическим, электрохимическим методами, физическими методами без применения абразива, струями

воды под высоким давлением.

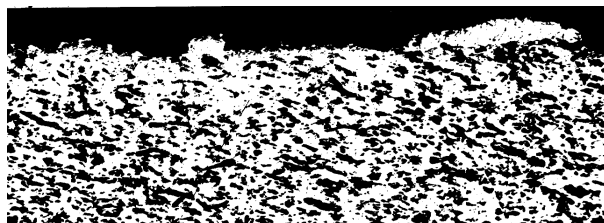


а

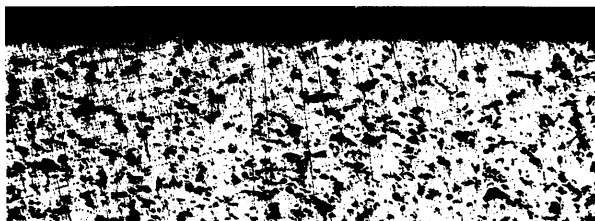


б

Рис.1. $\times 350$. Типовые поверхности после расточки(а) и термоимпульсной очистки(б)



а



б

Рис.2. $\times 350$. Типовые поверхности после шлифования (а) и термоимпульсной очистки(б)

Использование методов, использующих абразивную среду, принципиально возможно, но требуется последующая, более трудоемкая, чем удаление металлических частиц, очистка от абразивных частиц.

Мелкосерийность и многономенклатурность производства пневмогидравлических и топливных агрегатов, а также их непрерывное обновление делают применение электрохимического метода экономически нецелесообразным. Кроме того, с удалением ликвидов и острых кромок происходит травле-

ние поверхностей, что влечет за собой изменение размеров.

Слесарные, как правило, ручные, лезвийные и физические, методы без применения абразива ограниченно применимы для удаления заусенцев в местах, не влияющих на надежность и ресурс трущихся пар, не связанных с работой гидравлических и пневматических систем. Ручная слесарная обработка требует высокой квалификации, малопроизводительна, не исключает возможности брака на финишных операциях, образует микрозаусенцы и микрочастицы, удаляемые путем длительных операций прокачки рабочими жидкостями агрегатов на специальных стендах, быстро утомляет зрение и по этой причине не гарантирует качества, носит неустойчивый характер

Ультразвуковые методы эффективны при очистке поверхностей от органических и минеральных пленок масел. Можно выполнять качественное обезжиривание деталей перед и после термоимпульсной очистки.

В мелкосерийном, многономенклатурном производстве необходимо применять универсальные методы и оборудование, позволяющие обрабатывать, при минимальных затратах на подготовку производства, обширную номенклатуру деталей из различных металлов и сплавов, в том числе высокопрочных. При этом должны обрабатываться как внешние, так и внутренние поверхности деталей независимо от сложности конфигурации поверхностей, размеров отверстий и т.д., должна обеспечиваться быстрая переналадка оборудования в зависимости от марки обрабатываемого материала, величины ликвидов и других факторов. Наиболее перспективными из всех рассмотренных способов является термоимпульсный.

Заключение

1. Выполненный сравнительный анализ технологических возможностей методов очистки кромок и поверхностей деталей с учетом специфики агрегатного производства и наличия технологических загрязнений, образующихся в процессе механической обработки, обоснованно выявил преимущество использования термоимпульсной технологии.

2. Впервые показана возможность автоматизации процессов отделки и очистки кромок и поверхностей сложнопрофильных деталей, включая прецизионные, в условиях многономенклатурного, мелкосерийного производства.

3. Применение термоимпульсного метода в сочетании с другими универсальными технологиями позволит резко повысить качество высокоточных изделий машиностроения в Украине.

Литература

1. Афонин В. Л. Технологические роботы для механической обработки. Механика и управление // Научно-технический прогресс в машиностроении. – М., 1989. Вып. 16.

2. Белянин П.Н., Данилов В.М. Промышленная чистота машин – М.: Машиностроение, 1982. – 224 с.

3. Геворкян Г. Г., Ландау Ю. И. Электрохимические станки и автоматы для снятия заусенцев // Технология автомобилестроения. 1982. №5. С 3-5.

4. Жданов А.А. Обеспечение качества гидротопливных агрегатов летательных аппаратов за счет новых технологий // Технологические системы. 2002. №5. С.9 – 13.

5. Кулаков Ю.М., Хрульков В.А. Отделочно-зачистная обработка деталей. - М.: Машиностроение, 1979. - 216 с.

6. Лосев А.В. Особенности применения и перспективы развития термоимпульсной зачистки // Механизация и автоматизация производства. 1991. №12. С. 28-30.

7. Матвеев А.П., Шпитанков Л.Н., Юденкова Г.Н. Высокоэффективные способы удаления заусенцев. // Авиационная промышленность. 1988. №3. С. 34-36.

8. Одинцов Л.Г. Методы отделочно-зачистной обработки изделий народного потребления // Металлургия машиностроения. 2002. №2. С. 37-47.

9. Рекомендации Всесоюзного научно-технического семинара "Механизация финишно-зачистных и отделочных работ в машиностроении". - Белгород, май 1990 г.

10. Такадзава Т. Способы удаления заусенцев: Пер. с япон. №13077/1. - Кикай-но кэнкю, 1978. Т. 30. №8. С. 996-1002.

11. Grindrod S. H. Deburring. A Review of Methods and Equipment. // Production Engineer. 1977. V. 56. N1-2. P. 19-25.

12. Gillespie LaRoux K. Worldwide Trends of Burr Technology & Present Status in the U.S.A.- 6th International Conference "Precision Surface Finishing and Deburring Technology-2000". P.6-57.

Поступила в редакцию 11.03.03

Рецензент: канд. техн. наук, главный инженер Фадеев В.А., ГП "Харьковский машиностроительный завод ФЭД, г. Харьков; д-р техн. наук, профессор Долматов А.И., Харьковский Национальный университет радиоэлектроники, г. Харьков.