

УДК 519.63:533.9.07

С. И. Планковский, д-р. техн. наук

О. В. Шипуль, канд. техн. наук

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»
(г. Харьков, E-mail: s.plank@khai.edu; o.shipul@khai.edu)

ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ ФИНИШНОЙ ОТДЕЛКИ И ОЧИСТКИ ИНТЕНСИВНЫМИ ТЕПЛОВЫМИ ПОТОКАМИ

Проведен анализ перспектив применения термических методов финишной обработки. Обоснована необходимость развития термоимпульсных методов, сформулированы основные направления и задачи исследований для создания на их базе гибких автоматизированных технологий финишной обработки. Показано, что наиболее перспективными являются термоимпульсные методы финишной обработки с использованием детонирующих газовых смесей.

Проведено аналіз перспектив застосування термічних методів фінішної обробки. Обґрунтовано необхідність розвитку термоімпульсних методів, сформульовано основні напрямки та завдання досліджень для створення на їх базі гнучких автоматизованих технологій фінішної обробки. Показано, що найбільш перспективними є термоімпульсні методи фінішної обробки з використанням детонуючих газових сумішей.

Введение

Обеспечение конкурентоспособности продукции отечественного машиностроения требует повышения ее качественных показателей (ресурс, удельные эксплуатационные затраты и др.) до уровня, близкого к продукции ведущих мировых производителей. Этот уровень наряду с конструктивно-технологическими факторами определяется соблюдением требований промышленной чистоты выпускаемых изделий.

На этапе производства обеспечение требований промышленной чистоты главным образом связано с качественной финишной очисткой кромок и поверхностей от заусенцев, микрочастиц, загрязнений, которые определяют величину абразивного износа деталей, качество нанесения на них различного рода покрытий, а для высокоточных механизмов существенно влияют на надежность работы изделия в целом.

Постоянно повышающиеся требования к качеству финишной обработки требуют все большей гибкости и точности задания ее режимов. С этой точки зрения перспективным представляется развитие методов финишной обработки интенсивными тепловыми потоками, использование которых позволяет наиболее точно управлять процессами финишной отделки кромок и очистки поверхностей.

Целью настоящей работы является анализ перспектив таких методов, а также определение направлений их совершенствования с учетом тенденций развития требований к технологиям и качеству финишной обработки.

Тенденции развития требований к финишной отделке и очистке деталей

Интенсивные исследования в области финишной отделки начали проводиться с 70-х годов. Первоначально они были связаны с задачами удаления заусенцев после механообработки и во многом были вызваны повышением требований к точности изготовления деталей. Даже небольшие заусенцы, образовавшиеся в ходе изготовления, при ужесточении допусков создавали проблемы при сборке, а при эксплуатации вызывали повышенный износ или даже заклинивание прецизионных пар. До этого времени было известно только 17 из существующих на сегодня 120 методов удаления заусенцев. С тех пор интерес к исследованиям в этой



области не ослабевает – более 90% из всех публикаций в области финишной отделки кромок были написаны после 1989 года [1].

С течением времени исследования в области финишной отделки кромок приобрели системный характер (см. рис. 1). Кроме разработки различных технологий и оборудования для отделки кромок, построения моделей оценки стоимости финишной обработки исследовались причины и механизмы образования заусенцев на кромках, велась разработка обоснованных стандартов качества финишной отделки кромок, методов и средств метрологического контроля.

Исследования механизмов образования заусенцев и возможностей их минимизации были начаты в начале 70-х годов в США (Cillespie [2]), Германии (Schäfer [3]) и Японии (Takazawa [4]). Наибольшие результаты в области описания условий возникновения заусенцев на основе численного моделирования достигнуты в Университете Беркли (Dornfeld и группа CODEF).

При проведении 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 механообработки.

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 такие направления совершенствования процессов механообработки, как 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, оказались вполне успешными. Результаты исследований группы CODEF опубликованы в нескольких научно-технических отчетах [5].

Параллельно интенсивно развивались исследования в области влияния финишной отделки кромок деталей на их эксплуатационные характеристики. Существенные результаты в этом направлении были получены для различного рода режущих инструментов. На рис. 2 приведены семейства зависимостей стойкости резцов из быстрорежущей стали в функции от

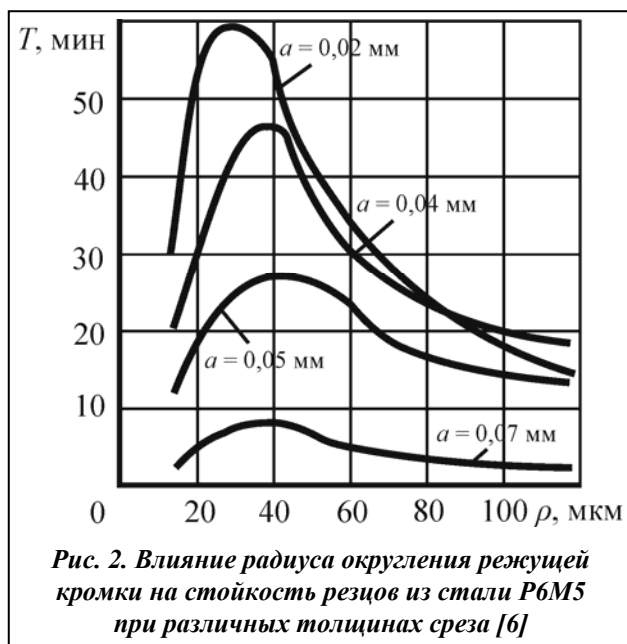


Рис. 2. Влияние радиуса округления режущей кромки на стойкость резцов из стали Р6М5 при различных толщинах среза [6]

радиуса округления кромки, полученные при точении стали 40ХН [6]. В исследованном диапазоне толщин среза a применение округления режущих кромок с оптимальным радиусом позволило повысить стойкость резцов в 1,5–3 раза. Аналогичный эффект наблюдается при округлении режущих кромок концевых фрез [7], метчиков [8] и другого инструмента для механообработки.

Состояние кромок существенно влияет на прочность износостойкого покрытия инструментов. Если перед нанесением покрытия режущая кромка не округлена, происходит его выкрашивание на кромке. Так, например, при обработке стали 40Х концевые фрезы из стали Р6М5 с режущей кромкой, округленной перед нанесением покрытия TiN, показали в 4 раза более высокую стойкость [9].

Комплексная обработка кромок существенно улучшает технические характеристики высокоточных механизмов. Так, например, внедрение рекомендаций исследовательской группы Takazawa по качеству кромок позволило поднять объемный КПД кондиционеров на 5...15% [10].

К сожалению, следует отметить, что вопросы обеспечения качества кромок, а тем более очистки поверхностей от микрочастиц, в отечественном машиностроении зачастую 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.

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 None (США). В проспектах фирмы приводятся результаты измерения коэффициентов расхода в топливных форсунках с отверстиями, полученными электроискровым методом без финишной обработки и с обработкой на экструзионно-абразивном оборудовании. Прецизионное профилирование отверстия повышает точность обеспечения массового расхода с ± 6 до $\pm 1\%$ [11], а с этой характеристикой непосредственно связана топливная эффективность двигателя.

Таким образом, на сегодняшний день установлена связь качества финишной отделки кромок с ресурсными и техническими характеристиками деталей и механизмов. Необходимость этих операций принята промышленностью высокоразвитых стран и подтверждена соответствующими стандартами [12, 13].

В связи с 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 (микрочастицы, микрозаусенцы, молекулярные загрязнения и т. п.).

С учетом опыта развития технологий финишной обработки кромок в настоящее время формулируются следующие направления исследований в этой области [14]:

- 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.

В качестве основного метода очистки поверхностей в настоящее время рассматривается воздействие потоком чистящей жидкости [15]. 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. Дополнительной сложностью является влияние физико-химических, морфологических и механических свойств поверхности обрабатываемой детали на возможность перемещения и прилипания загрязняющих веществ при воздействии чистящей среды.

Исследования в области изучения механизмов образования микрочастиц при механообработке находятся на самой ранней стадии. Образование микрочастиц неизбежно происходит при любых видах резания, включая обработку абразивными частицами [16]. С этой точки зрения к дополнительным загрязнениям при очистке не приводят электрохимические и термические методы финишной обработки.

На основе приведенных данных можно выделить следующие основные тенденции развития технологий финишной отделки:

- 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;
- 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;
- 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 обусловит создание 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).

Термические методы финишной отделки и очистки

Существующие методы финишной отделки и очистки деталей в зависимости от особенностей технологического воздействия могут быть разделены на группы. Некоторые авторы [16, 17] выделяют пять таких групп: механические, химико-механические, химические, электрохимические, физические методы. В других работах [18] предложена классификация с выделением четырех групп: механические, химические, электрические и термические методы. При этом отнесение того или иного метода при классификации к конкретной группе производится произвольно. Так, например, один и тот же метод – лезвийное удаление с нагревом материала – в одних случаях относят к механическим методам [16], а в других – к термическим [18].

Поскольку на практике во многих методах удаление ликвидов происходит за счет комплексного физико-химического воздействия, задача их классификации требует применения четких критериев. В настоящей работе для этого предлагается использовать критерий определяющего воздействия, основанный на выделении первичного механизма удаления материала обрабатываемой детали. С этой точки зрения методы, в которых нагрев используется как вспомогательное средство для ускорения химических реакций, следует отнести к химическим методам, а термоэнергетические методы обжига заусенцев, где термическое

воздействие служит для инициации реакций и определяет возможность обработки, или плазмохимические, в которых температура является основным фактором процесса – к термическим.

Для дальнейшего анализа воспользуемся методом морфологических таблиц. Выделим четыре функциональных признака, характерных для любых термических методов финишной отделки и очистки: вид теплового источника, характер изменения источника по времени, рабочая среда при проведении обработки и способ уноса удаленного с кромок и поверхностей детали материала. В столбцах морфологической таблицы (табл. 1) приведены альтернативные варианты реализации функциональных признаков. Путем произвольного сочетания функциональных признаков может быть получен тот или иной термический метод финишной обработки.

Несмотря на то что список вариантов реализации признаков является далеко не полным, по данным табл. 1 может быть образовано около 900 способов термической финишной обработки. Такое разнообразие возможных способов затрудняет анализ перспектив их применения на практике и требует выделения тех из них, в которых наиболее полно реализуются преимущества данной группы методов финишной отделки и очистки деталей.

Таблица 1. Морфологическая таблица для синтеза термических методов финишной обработки

Вид источника	Характер источника	Рабочая среда	Унос материала
лазерный электронно-лучевой плазменный плазменно-дуговой электродуговой пламенный электроискровой электроконтактный ТВЧ комбинированный	постоянный импульсный комбинированный	вакуум активный газ инертный газ активная жидкость инертная жидкость двухфазная	без уноса механический газодинамический электромагнитный комбинированный

Для этого рассмотрим основные механизмы удаления ликвидов и загрязнений, реализующиеся при термических методах финишной обработки. Будем рассматривать процессы отделки кромок (удаление заусенцев и округление) и очистки поверхности деталей от микрочастиц. Процессы очистки от других загрязнений на поверхности из дальнейшего рассмотрения исключены. Исходя из свойств материалов загрязнений и обрабатываемых деталей, механизмы очистки от микрочастиц и удаления заусенцев при воздействии интенсивных тепловых потоков классифицируем следующим образом (табл. 2).

Несмотря на быстрорастущие объемы применения пластмасс и композиционных материалов, в настоящее время по-прежнему с точки зрения практического применения наибольший интерес представляет обработка деталей из металлов. Как показано в [16, 17, 19], удаление заусенцев и микрочастиц испарением в этих случаях энергетически невыгодно. Поэтому для металлических деталей может использоваться два механизма очистки – обжиг в окислительной среде и оплавление с последующим уносом материала.

Наиболее сложной и актуальной является проблема технологической очистки высокоточных деталей и механизмов, имеющих пары трения. В этом случае для минимизации влияния термического воздействия естественным выглядит уменьшение времени действия теплового источника. Из уравнения теплопроводности можно приблизительно оценить время проникновения равномерно распределенного по поверхности теплового потока на глубину δ : $t_{пр} = \delta^2/4a$, где a – температуропроводность материала. Для металлов температуропроводность находится в пределах от 6×10^{-6} м²/с (титан) до $1,1 \times 10^{-4}$ м²/с (медь). Тогда для того

Таблица 2. Классификация механизмов очистки и отделки деталей при воздействии на них интенсивных тепловых источников

Группа	Механизм удаления	Обрабатываемые материалы		
		Пластмассы, композиты	Металлы	Стекло, керамика
Термохимические	сублимация			
	термическое разложение			
	химическое взаимодействие компонент материала с набегающим потоком			
	химическое взаимодействие с набегающим потоком			
Физико-механические	оплавление, отрыв оплавленного материала			
	высокоскоростное термическое расширение материала			
	растрескивание и откол материала под действием термических напряжений			

чтобы при обработке высокоточных деталей ограничить зону интенсивного воздействия теплового потока глубиной 0,1 мм, время действия теплового источника должно составлять порядка 4×10^{-4} с для титана и $2,3 \times 10^{-5}$ с для меди. Таким образом, при введенном ограничении на зону термического влияния термическая финишная обработка может осуществляться только в импульсном режиме.

Для того чтобы за столь малое время оплавить заусенец объемом порядка 1 мм^3 , величина действующего теплового потока должна составлять порядка 10^9 Вт/м^2 для титана и 10^{10} Вт/м^2 для меди. Исходя из таких значений, можно сделать вывод, что по достигаемым величинам теплового потока для отделки кромок с оплавлением могут применяться следующие типы тепловых источников: лазерные, электронно-лучевые, плазменно-дуговые, электродуговые и комбинированные (лазерно-дуговые, лазерно-плазменные и др.). Из данного перечня исключим методы, основанные на применении электронно-лучевых источников, так как они требуют использования вакуумных установок и могут быть оправданы только для очень специфических случаев обработки.

При отделке кромок при помощи пламени величина передаваемого в деталь теплового потока определяется скоростью течения горючих газов. Исходя из приведенных выше оценочных данных, в качестве возможного метода финишной обработки можно рассматривать также применение импульсных пламенных источников, реализующихся при детонационном сгорании газовых смесей.

Проанализируем возможности создания технологий финишной отделки и очистки высокоточных деталей машиностроения на основе применения выделенных типов тепловых источников.

Направления развития термоимпульсных технологий финишной обработки

Для создания эффективных термоимпульсных технологий их развитие должно иметь системный характер и учитывать сформулированные выше тенденции развития методов финишной отделки и очистки. Задачи, которые необходимо для этого решить, можно сформулировать исходя из описанной общей схемы направлений исследований в данной области.

1. *Контроль качества обработки.* Интенсивное термическое воздействие может быть связано с изменениями структуры материала обрабатываемых деталей, искажением их геометрии из-за температурных деформаций, появлением дефектов, вызванных действием температурных напряжений (трещины, сколы, пригары). Поэтому применение термических видов финишной обработки требует проведения исследований для разработки обоснованных метрик качества кромок и поверхностей, связанных с воздействием интенсивных тепловых потоков. На этой основе должны быть доработаны нормативные документы и стандар-

ты. Требуется также создание средств метрологического обеспечения для проведения контроля качества финишной обработки с учетом введенных метрик.

2. *Характеристики обрабатываемой детали.* Для термоимпульсных методов задачи этого типа главным образом должны быть связаны с изучением влияния свойств материала детали на режимы обработки. В частности, для широкого применения данных методов необходимо включение в сертификаты материалов данных об их теплофизических свойствах (теплоемкость, теплопроводность и др.). В настоящее время даже для наиболее распространенных материалов получение таких данных затруднено. Кроме того, требует изучения влияние предварительной обработки (например, режимы резания, характеристики инструмента) на свойства поверхностей деталей, определяющее эффективность передачи теплового потока (коэффициенты отражения, излучения, теплоотдачи и т. п.).

3. *Разработка гибких автоматизированных комплексов термоимпульсной финишной обработки.* Одной из основных задач в данном направлении исследований является разработка моделей, достоверно описывающих механизмы отделки кромок и очистки поверхностей. Данные модели необходимы для создания методов научно обоснованного задания режимов обработки с учетом информации о состоянии детали перед обработкой, требований качества и характеристик материала по п. 1 и 2.

Для всех способов, использующих импульсные тепловые источники, факторами, определяющими качество финишной обработки, будут являться точность задания интенсивности источника тепла, его позиционирования и времени действия. С этой точки зрения наилучшие возможности имеют электродуговые и плазменно-дуговые источники. Это связано с невозможностью обеспечения стабильности привязки дуги на поверхности обрабатываемой детали. Хаотичные смещения пятна привязки снижают точность обработки, поэтому данные методы не применимы для финишной обработки высокоточных деталей.

Наибольшими возможностями с точки зрения точности обработки имеют методы с использованием лазерных источников. Из рассматриваемых типов источников лазерные обеспечивают наибольшую интенсивность теплового потока, причем их величина в целом ряде случаев оказывается избыточной. Это приводит к необходимости расфокусировки пучка в процессах лазерной очистки поверхностей от микрочастиц [20], которая может производиться на воздухе, под слоем жидкости или в воздушно-капельной среде. Удаление микрочастиц происходит за счет ударного термического расширения приповерхностного слоя детали и импульсного воздействия паров жидкости.

В процессах лазерного удаления микрозаусенцев используется обработка лазерным лучом, движущимся вдоль кромки с прецессией (рис. 3) [21]. 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.

Одной из основных задач 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. При обработке используется расфокусированный лазерный луч. Величина теплового потока выбирается из условия недопущения оплавления материала вне обрабатываемой кромки. Удаление заусенца происходит за счет его сгорания в среде кислорода. Дополнительно используется газодинамический унос удаленного материала из зоны обработки.

Существенным недостатком лазерных методов финишной обработки является высокая стоимость оборудования, особенно для случаев обработки крупногабаритных деталей или кромок с заусенцами размерами порядка 1...5 мм. Для таких деталей с точки зрения стоимости обработки целесообразно использовать традиционные методы обработки кромок (лезвийные, абразивные и т.п.). Альтернативным решением может быть использование комбинированных лазерно-дуговых или лазерно-плазменных методов. Преимуществом этих методов является то, что при их использовании тепловложение в металл оказывается выше

суммы тепловых вкладов при лазерном и дуговом (плазменном) нагреве в отдельности [23]. Это позволяет существенно повысить КПД обработки при сохранении качества среза, характерного для лазерных процессов.

Еще одним преимуществом использования лазерного источника тепла в комбинированных методах является возможность решения проблемы неустойчивости дуги, свойственной электродуговому и плазменно-дуговому методам. Экспериментальные исследования показывают, что действие лазерного источника стабилизирует точку привязки пятна на обрабатываемой поверхности (рис. 4). Этот эффект особенно проявляется в случае, когда обрабатываемая деталь является анодом [23].

Описанные выше методы применимы для обработки внешних поверхностей деталей. Обработка деталей сложной формы с внутренними полостями возможна с помощью методов, использующих энергию сгорания газовых смесей. Один из таких методов – термоэнергетический – в настоящее время используется довольно широко. При его применении удаление заусенцев происходит за счет обгорания, а тепло, выделяемое при горении топливной смеси, служит для инициации горения удаляемого материала детали [18].

Как известно, коэффициент теплоотдачи при теплообмене между газом и твердым телом зависит от величины пограничного слоя, на которую существенно влияет скорость потока. При сгорании топливных смесей в замкнутых камерах скорости потока невелики. Поэтому при термоэнергетической обработке тяжело обеспечить эффективность теплопередачи, а необходимый для обгорания заусенцев уровень температур приходится обеспечивать за счет увеличения времени контакта деталей с продуктами сгорания. Это может приводить к перегреву тонкостенных конструктивных элементов обрабатываемых деталей и даже их разрушению из-за температурных напряжений. Кроме того, данный метод не позволяет об-

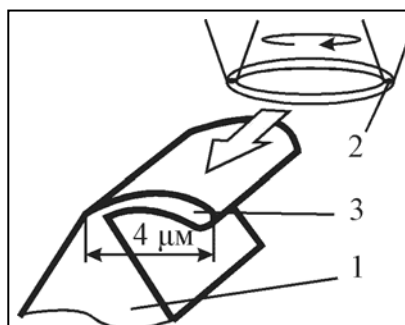


Рис. 3. Схема процесса лазерного удаления микрозаусенцев [21]:
 1 – обрабатываемая кромка;
 2 – сфокусированный луч лазера;
 3 – микрозаусенец

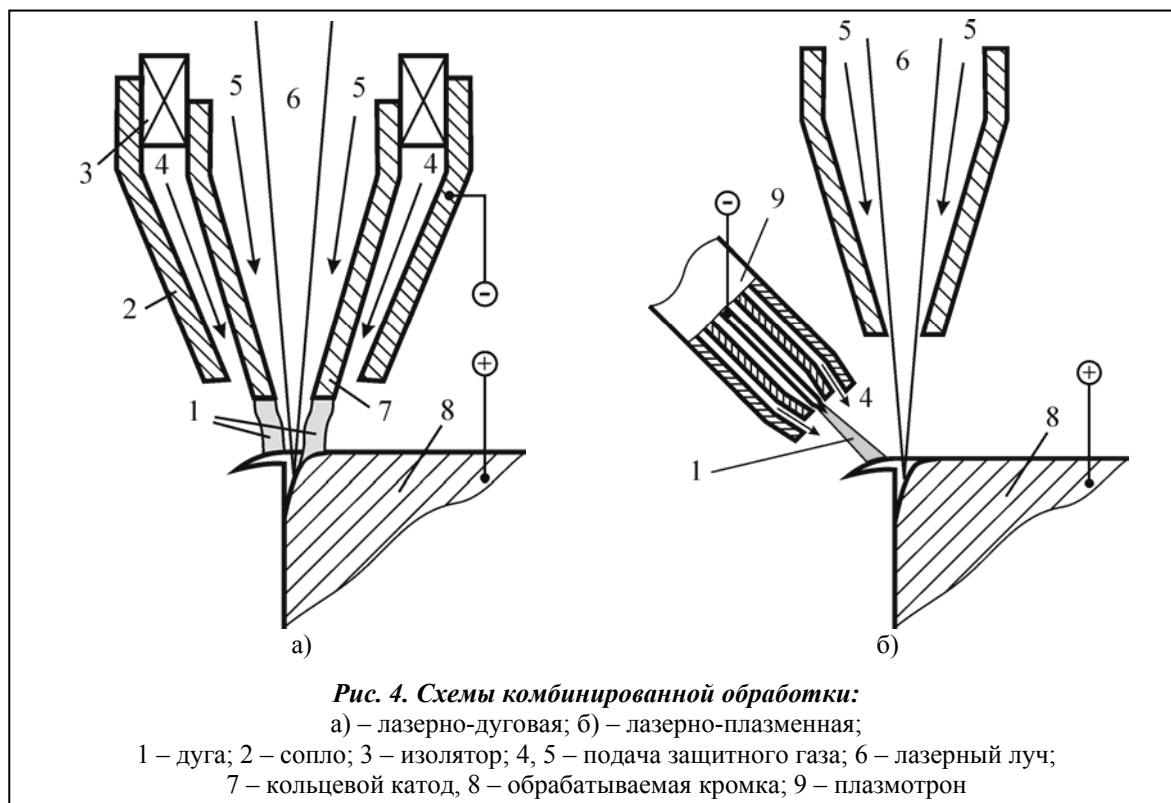


Рис. 4. Схемы комбинированной обработки:

- а) – лазерно-дуговая; б) – лазерно-плазменная;
 1 – дуга; 2 – сопло; 3 – изолятор; 4, 5 – подача защитного газа; 6 – лазерный луч;
 7 – кольцевой катод, 8 – обрабатываемая кромка; 9 – плазматрон

рабатывать кромки глубоких пересекающихся отверстий и производить очистку от микро-частиц.

Термоимпульсный режим очистки может быть обеспечен при сгорании части топливной смеси в детонационном режиме [24]. Скорости распространения ударных волн в камере могут составлять до 2000 м/с. При этом происходит срыв пограничного слоя у поверхности обрабатываемых деталей, и коэффициент теплоотдачи увеличивается на порядки. Удаление заусенцев и микрочастиц происходит за счет их оплавления и уноса с поверхности ударными волнами.

Принципиальную разницу в требованиях к системам дозирования этих способов очистки иллюстрируют графики, приведенные на рис. 5. При термоэнергетической очистке на графике изменения температуры в камере сгорания можно выделить три характерных участка (рис. 5, а). Участок 1-2 соответствует этапу сгорания смеси, участок 2-3 – выдержке, длительность которой определяется временем протекания реакций сгорания материала заусенцев, участок 3-4 – выпуску продуктов сгорания из камеры.

При термоимпульсном детонационном методе на графике изменения температуры (рис. 5, б) появляется характерный участок 2-3₁. Обработка происходит в промежутке между началом детонационного горения и затуханием ударных волн. Несмотря на небольшую

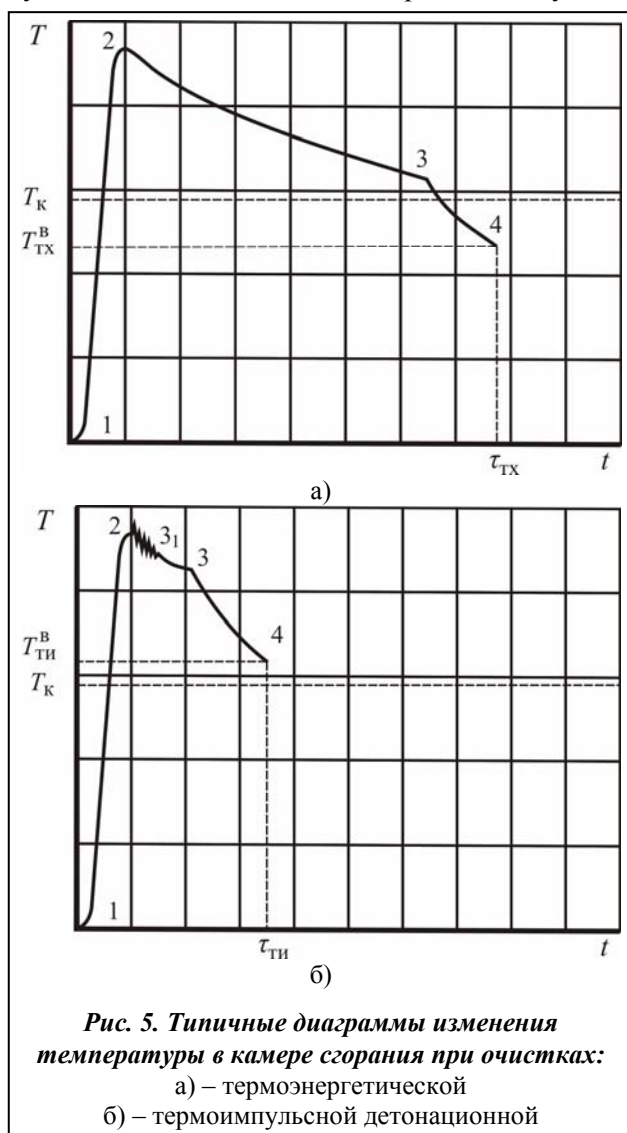


Рис. 5. Типичные диаграммы изменения температуры в камере сгорания при очистках:
а) – термоэнергетической
б) – термоимпульсной детонационной

длительность этого этапа (порядка от нескольких тысячных до сотых долей секунды), из-за высокой эффективности теплообмена кромки обрабатываемых деталей успевают нагреться до требуемых для обработки температур, как на внешних, так и на внутренних поверхностях.

Основными параметрами, определяющими величину тепловой энергии, переданной обрабатываемым деталям, в этом случае является интенсивность детонации и время затухания ударных волн в камере. Таким образом, для создания автоматизированных комплексов с использованием энергии детонирующих газовых смесей необходимо разработать способы управления процессами детонационного сгорания в рабочих камерах и научно обоснованные методы назначения режимов обработки, учитывающие информацию об обрабатываемых деталях, полученную из CAD/CAM-систем.

Решение этих задач требует развития методов численного моделирования горения газовых смесей, особенно процессов перехода дефлаграционного режима в детонационный. Сложность этих задач очевидна, но перспективы создания универсальных гибких автоматизированных технологий финишной очистки позволяют утверждать, что работы в данном направлении имеют большие перспективы.

Выводы

1. Для создания автоматизированных комплексов для финишной отделки, совместимых с наиболее распространенными CAD/CAM-системами, необходима разработка методов назначения режимов обработки на основе математического моделирования и данных специализированных экспертных систем. С точки зрения универсальности и гибкости технологии наибольшие перспективы имеет разработка на базе термоимпульсных методов, которые позволяют не только проводить отделку кромок деталей, но и обеспечивают очистку поверхностей от микрочастиц. С этой точки зрения данные методы соответствуют современным и вновь формирующимся требованиям по финишной отделке деталей машиностроения.

2. С точки зрения точности обработки перспективы имеет развитие методов, использующих лазерные источники. Преимущественной областью применения чисто лазерных методов может являться обработка прецизионных деталей оптических, электронных и электронно-механических устройств. Для обработки габаритных деталей следует развивать комбинированные лазерно-дуговые и лазерно-плазменные методы.

3. Из термоимпульсных методов финишной отделки наибольшие технологические возможности имеет метод, использующий детонирующие газовые смеси. Основными параметрами, определяющими эффективность обработки при его использовании, является интенсивность детонации и время затухания ударных волн в камере. Для обоснованного назначения режимов термоимпульсной детонационной обработки необходимо создание численных методов моделирования сгорания в замкнутых камерах, особенно перехода дефлаграционного режима горения в детонационный.

Литература

1. Gillespie L. Your burr technology efforts changed the world / L. Gillespie. – Deburring Technology International Inc, 2009. – 37 p.
2. Gillespie L. The Formation and properties of machining burrs: M. S. Thesis / L. Gillespie. – Utah State University, Logan, Utah, 1973. – 140 p.
3. Product design influences on deburring: Society of Manufacturing Engineers (SME): Technical paper; F. Schäfer. – Dearborn, 1975. – 117 p. – MR75-483.
4. Takazawa K. Burr Technology / K. Takazawa. – Tokyo: Asakura Bookstore Company, 1980. – 230 p.
5. University of California, Berkeley, Laboratory for manufacturing automation. Research reports 1998-1999, 1999-2000, 2000-2001, 2001-2002, 2002-2003. [электронный ресурс], режим доступа: <http://lmas.berkeley.edu/public/?p=418>.
6. Барон Ю. М. Влияние радиуса закругления режущей кромки инструментов из быстрорежущей стали на их стойкость / Ю. М. Барон, К. А. Халбаев // Повышение эффективности обработки конструкционных материалов: Докл. конф. – Улан-Уде: Вост.-Сибир. технолог. ин-т, 1985. – С. 87–88.
7. Фоминичева Н. М. Роль скругления режущих кромок на инструментах с износостойкими покрытиями / Н. М. Фоминичева, Ю. М. Барон, А. И. Мельников // Прогрессивные технологические процессы в машиностроении. – Л.: Ленингр. техн. ун-т, 1990. – С. 33–35.
8. Матвеев В. В. Нарезание точных резьб (машинными метчиками). – М.: Машиностроение, 1968. – 116 с.
9. Верещака А. С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями / А. С. Верещака, И. П. Третьяков. – М.: Машиностроение, 1986. – 192 с.
10. Takazawa K. Design Principle and Manufacturing Technique for the Rotary Compressor of Room Air Conditioner / K. Takazawa // 5th Intern. Conf. on Deburring and Surface Finishing: Thesis – Kansas City, MO. – Deburring Technol. Intern., 1998. – P. 35.
11. Extrude Hone – finishing technologies, finishing solutions. [электронный ресурс], режим доступа: <http://www.extrudehone.com/media/files/capabilities.pdf>.
12. DIN ISO 13715. Technical drawings – Edges of undefined shape – Vocabulary and indication on drawings (ISO 13715:2000).
13. WBTC-STD 14/1997. An integrated international standard for burrs and edge conditions. Kansas City, MO: Deburring Technology International. 1997. – 36 p.
14. Ávila M. Strategies for burr minimization and cleanability in aerospace and automotive manufacturing / M. Avila, J. Gardner, C. Reich-Weiser // SAE Trans. J. Aerospace. – 2005. – № 114 (1). – P. 1073–1082.
15. Dornfeld D. Cleanability of mechanical components / D. Dornfeld, S. McMains, D. Arbelaez // Job of University of California, Berkeley. – 2008. – 12 p.

16. *Жданов А. А.* Термоимпульсные технологии очистки поверхностных деталей агрегатов авиационных двигателей: Дис. ... канд. техн. наук. – Харьков, 2003. – 120 с.
17. *Лосев А. В.* Повышение эффективности зачистки деталей пневматических и гидротопливных систем при использовании термоимпульсного метода: Дис. ... канд. техн. наук. – Харьков, 1995. – 210 с.
18. *Gillespie L.* Deburring and edge finishing handbook / L. Gillespie – New York City: Industrial Press, 1999. – 404 p.
19. *Пак Н. И.* Численное моделирование процесса термического удаления заусенцев концентрированным потоком энергии / Н. И. Пак, С. А. Шикун // Обработка материалов импульсными нагрузками. – Новосибирск, 1990. – С. 168–175.
20. *Kane D.* Laser cleaning II / D. Kane – World Scientific, 2006. – 289 p.
21. *Pat. 2008173652 JP.* Int. Cl.⁵ B23K26/00; B23K26/08; B23K26/38. Deburring method/ A. Seiki. – Appl. No. JP20070007405 20070116; publ. 31.07.2008. – 13 p. [электронный ресурс] – Режим доступа к пат.: http://v3.espacenet.com/publication_Details/biblio?CC=JP&NR=2008173652A&KC=A&FT=D&date=20080731&DB=EPODOC&locale=en_EP.
22. *Pat. 0471179 EP.* Int. Cl.⁵ B23K26/03; B23K26/06; B23K26/36; B23K26/00; B23K26/02. Process for deburring metal workpiece edges/ H. Bergmann; H. Lindner. – Appl. No. EP19910111106 19910704; publ. 19.02.1992. – 5 p. [электронный ресурс] – Режим доступа к пат.: http://v3.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=19920219&CC=EP&NR=0471179A1&KC=A1.
23. *Кривцун И. В.* Гибридные лазерно-дуговые процессы сварки и обработки материалов (обзор) / И. В. Кривцун. – Ин-т электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины, 80 с. [электронный ресурс] – Режим доступа к документу: http://www.nas.gov.ua/pwj/books/lasarc_r.html.
24. *Современное состояние и перспективы развития технологий финишной отделки прецизионных деталей летательных аппаратов/ С. И. Планковский, А. В. Лосев, О. В. Шипуль, О. С. Борисова//* *Авиац.-косм. техника и технология.* – 2010. – № 2(69). – С. 39–47.

Поступила в редакцию
02.02.11