



**СОСТОЯНИЕ И ПУТИ РАЗВИТИЯ
КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ
ОБРАБОТКИ НАУКОЕМКИХ
ИЗДЕЛИЙ**

**ANALYSIS OF FACTORS REFLECTING
DRIVERS' BEHAVIOR IN DIFFICULT
ROAD CONDITIONS**

✉¹ **Смоленцев Владислав Павлович**, профессор кафедры технологии машиностроения, доктор технических наук, профессор, лауреат премии Правительства РФ, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: ysmolen@inbox.ru

✉¹ **Smolentsev Vladislav Pavlovich**, professor of the department of mechanical engineering technology, doctor of tech. sc., professor, laureate of the Russian Federation Government prize, Voronezh state technical university, Voronezh, e-mail: ysmolen@inbox.ru

Извеков Александр Андреевич, ведущий специалист Воронежского центра жидкостных ракетных двигателей, аспирант Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж, e-mail: vmzizvekov@gmail.ru

Izvekov Alexander Andreevich, leading specialist of the Voronezh center for liquid rocket engines, postgraduate student of the Voronezh state technical university, Voronezh, e-mail: vmzizvekov@gmail.ru

Стародубцев Игорь Геннадьевич, заместитель директора Воронежского конструкторского бюро химавтоматики, научный консультант базовой кафедры Воронежского государственного технического университета, кандидат технических наук, г. Воронеж, e-mail: vmz056@yandex.ru

Starodubtsev Igor Gennadievich, deputy director of the Voronezh chemical automation design bureau, scientific consultant of the basic department of the Voronezh state technical university, candidate of technical sciences, Voronezh, e-mail: vmz056@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрено состояние научных технологических исследований и перспективные пути их применения в машиностроении страны. Приведены результаты изысканий отечественных учёных за последние годы и намечены направления работы на последующий период. Отмечено укрепление научных связей учёных и производителей с Российской академией наук в области развития и применения комбинированных методов обработки. Определено место искусственного интеллекта (ИИ) и цифровых технологий при их применении в процессе разработки и выпуска отечественного технологического оборудования. Показаны приоритетные направления использования комбинированных методов обработки в специальном станкостроении. Обос-

Annotation. The article considers the state of scientific technological research and promising ways of its application in the mechanical engineering of the country. The results of research by domestic scientists in recent years are presented and areas of work for the subsequent period are outlined. Strengthening of scientific ties between scientists and manufacturers with the Russian Academy of Sciences in the field of development and application of combined processing methods is noted. The place of artificial intelligence (AI) and digital technologies in their application in the process of development and production of domestic technological equipment is determined. Priority areas of using combined processing methods in special machine tool building are shown. Areas of successful development of mechanical engineering in the country are substantiated taking into account

нованы области успешного развития машиностроения в стране с учётом достижений авиакосмической отрасли. Приведены рекомендации по проектированию технологических режимов комбинированной обработки типовых деталей. Обоснована возможность повышения качества изделий за счёт нанесения покрытий с обоснованием использования новых рабочих сред и реализация результатов исследований с применением критериев теории производственной технологичности.

Ключевые слова: СОСТОЯНИЕ, РАЗВИТИЕ, КАЧЕСТВО, КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ, ПОКРЫТИЯ.

the achievements of the aerospace industry. Recommendations for the design of technological modes of combined processing of typical parts are given. The possibility of improving the quality of products by applying coatings with justification for the use of new working environments and the implementation of research results using the criteria of the theory of industrial manufacturability is substantiated.

Keywords: CONDITION, DEVELOPMENT, QUALITY, COMBINED PROCESSING METHODS, TECHNOLOGICAL COMPLEXES, COATINGS.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Темпы развития отечественной технологической науки во многом определяются состоянием и реализацией исследований в авиакосмической отрасли машиностроения, а также обоснованным распределением сил и средств при перспективном планировании дальнейших мероприятий. Эти действия выполняются вузами, отраслевыми институтами и организациями системы Российской академии наук через участие в использовании материальных, финансовых средств, выделяемых на такие цели из бюджета страны. В современных условиях для эффективного применения имеющихся весьма ограниченных ресурсов в качестве экспертов привлекаются учёные отраслевых академий и технических учебных заведений. Здесь значительную роль играет Ассоциация технологов машиностроителей России, ежегодно организующая мероприятия по подведению итогов предшествующего этапа и обосновывающая совместно с научным советом Российской академии наук наиболее востребованные направления государственного финансирования приоритетных направлений отечественного машиностроения. В качестве инструмента для оценки эффективности выполненных работ используются количественные показатели системы технологичности, способные убедительно доказывать результативность проводимых научных исследований.

1.1 Актуальные научные направления в наукоемком машиностроении

Анализ состояния отечественного машиностроения показывает, что в последний период в России сформировались актуальные научные направления, одним из которых является система управления качеством продукции в условиях импортозамещения, когда научные достижения и средства их реализации стали труднодоступными из-за ограничений, введённых рядом технически развитых держав.

Это сдерживает реализацию возможностей создаваемых комбинированных методов обработки в машиностроении и темпы развития наукоемких производств с использованием современного оборудования и средств технологического оснащения. Анализ состояния научных исследований в ведущих отраслях машиностроения страны показывает, что для преодоления сложившихся трудностей требуется:

1. В текущий период наряду с имеющимися государственными программами в области машиностроения создать, детализировать и конкретизировать систему развития отечественного станкостроения, в том числе ускорить производство специального оборудования и

средств технологического оснащения, включающего как серийно выпускаемые, так и специальные станки с использованием комбинированных методов обработки [1, 2], содержащих комплекс воздействий на объект изготовления в форме единой обрабатывающей системы. Для восстановления и развития отечественного станкостроения требуется не только целевое финансирование, но и научно обоснованная перспективная плановая подготовка специалистов и учёных через технические учебные заведения с использованием для этих целей средств из госбюджета.

2. Расширить исследования в области технологии аддитивного машиностроения, которое требуется развивать не только в направлении послойного наращивания материала, но и для управления качеством объектов производства, например путём перераспределения внутренних напряжений в материале и покрытиях. Эта проблема рассмотрена в работе [3] для баллонов с давлением до 45-50 МПа, используемых в перспективных ракетных двигателях многогоразового применения.

3. Создание и расширение области применения комбинированных методов обработки [1, 2] с комплексным использованием различных воздействий, включая электрические методы обработки, где научно обоснованное управление процессом позволяет технологам реализовать изготовление перспективных качественных объектов многих отраслей техники и сформировать научную базу для отработки технологичности [4] создаваемых, модернизированных и восстанавливаемых изделий.

4. В направлении научного обоснования целесообразности разработки комбинированных технологических процессов необходимо провести исследования по созданию специального технологического оборудования в виде технологических комплексов. В течение последних лет такие работы выполняются совместно с белорусскими коллегами, которые обобщили результаты в форме монографии «Теоретические основы проектирования технологических комплексов» [5], выпущенной в Минске. Предложенный подход позволяет более полно и эффективно загрузить современное очень сложное, дорогое, труднодоступное оборудование и создать научную базу для обоснованного выбора оборудования при переоснащении производства под новые изделия.

5. В условиях нарастающего дефицита специалистов по наукоемким технологиям, особенно в оборонных отраслях машиностроения, намечается высвобождение части исполнителей за счёт применения искусственного интеллекта (ИИ) и цифровизации производственного процесса. Этот подход через ИИ давно используется в машиностроении, хотя в большей степени нам известен как применяемый при шахматных и военных баталиях. Действительно, разве не ИИ применяется в разработанных в стране и зарубежными специалистами станках с управлением процессом обработки непрофилированным электродом-инструментом по методу обратного копирования. Имеются в виду болгарские и швейцарские станки типа ЭЛФА731 для комбинированной обработки и отечественные станки группы СЭХО с адаптивным управлением перемещения электродов и технологическим процессом по сигналам обратной связи [6]. Подобное оборудование десятки лет выпускали малыми сериями в Казани по патентам профессора Садыкова З. Б. До перестройки они поставлялись многим отечественным и зарубежным, в основном приборостроительным, предприятиям. Однако сейчас при возрождении отечественного станкостроения потребуется выполнить немало сложных исследований, в том числе с использованием ИИ, для совершенствования технологии и оборудования и достижения лидирующего положения в этой отрасли отечественной технологической науки. Наиболее весомые научные достижения в этой области машиностроения получены при разработке и совершенствовании комбинированных методов обработки для применения их в технологических комплексах.

1.2 Состояние и возможности использования в машиностроении комбинированных методов обработки для получения изделий с высоким качеством продукции

На рис. 1 приведены различные виды воздействий, которые используются для повышения качества изделий при разработке процессов и средств технологического оснащения. Рассмотренные на рис. 1 исходные методы физических воздействий включают механические, тепловые, химические, магнитные, лучевые, ядерные составляющие комбинированных систем, определяющих возможности повышения потребительского уровня изделий за счёт совершенствования известных и создания новых технологических приёмов, методов и средств управления качеством продукции с использованием системы отработки технологичности, искусственного интеллекта и основ цифровой технологии.



Рисунок 1 – Классификация методов воздействий и комбинированные методы обработки, применяемые в технологических комплексах

2 Материалы и методы

На рис. 2 раскрыто взаимодействие различных видов воздействий, приведённых на рис. 1, что служит основой для построения механизма системы управления качеством с использованием комбинированных методов обработки, в том числе при проектировании для этого технологических комплексов. В работах [1, 2] разработаны методы оптимизации расчётов, обоснования, закономерностей выбора видов воздействий в едином комбинированном процессе, способы применения законов совместимости предлагаемых воздействий в технологических комплексах. На рис. 2 рассмотрены те факторы, которые к настоящему времени достаточно полно изучены в авиакосмической отрасли наукоемкого машиностроения. Они могут служить основой при разработке технических заданий на специальное оборудование и технологические комплексы с использованием для автоматизации процессов теоретических положений искусственного интеллекта и управления с помощью цифровых технологий. К базовым технологическим воздействиям такого оборудования и технологических комплексов согласно схемы (рис. 2) относятся: исходные воздействия базовых положений теории и практики резания (Р), глубоко изученные и освоенные электрические методы обработки, куда входят электрохимическая размерная и безразмерная обработка (ЭХО), тепловое воздействие при элект-

троэрозионном виде обработки (ЭЭО), импульсное механическое действие инструмента в ультразвуковом диапазоне частот (УЗО), лучевые методы (ЛО). Из них можно комбинировать новые технологические операции, обеспечивающие высокое качество наукоемкой продукции, отвечающей требованиям производственной технологичности. При этом следует учитывать внешние воздействия на технологический процесс: механическое (1); химическое (2); тепловое (3); механическое импульсное (4), а также внутренние свойства объекта: физико-механические (в рассматриваемом случае, прежде всего, тепло- и электропроводимость, состав (2), структуру (3), температуру плавления (5), отражательную способность поверхности (6), внутренние изменения свойств обрабатываемых материалов (наклёп (1), хрупкость (4), совместимость для обработки материалов заготовки и инструмента (7)).

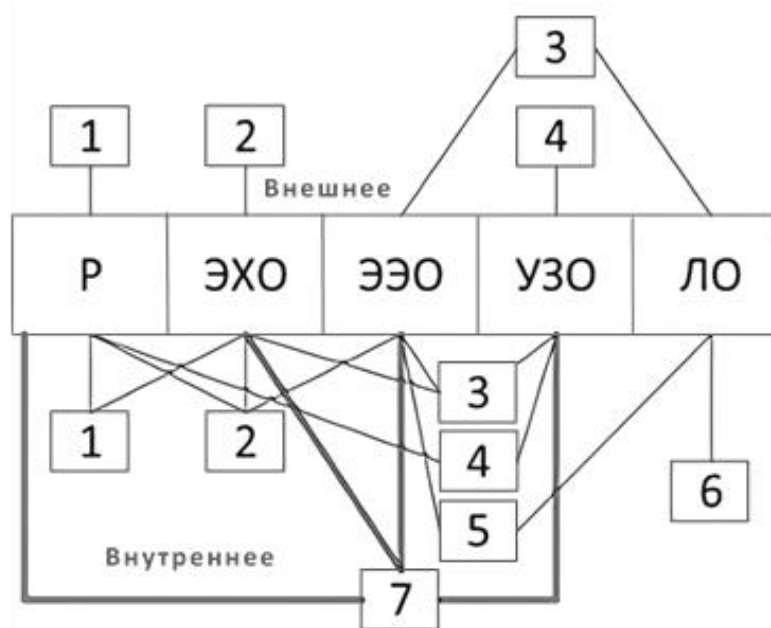


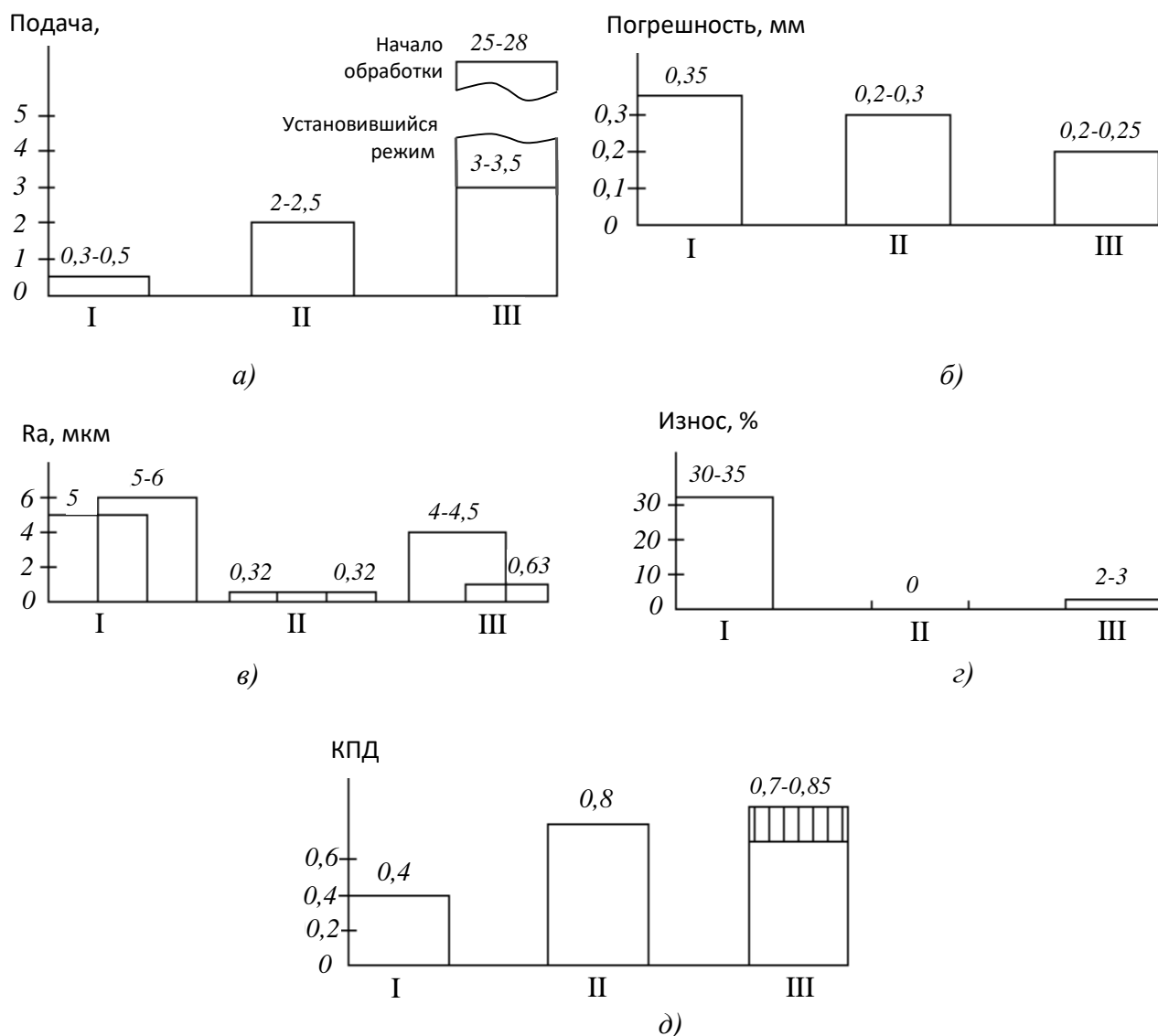
Рисунок 2 – Методология проектирования комбинированного размерного формообразования металлических деталей

3 Результаты исследований

На рис. 3 приведены достигнутые показатели качества при использовании различных видов воздействий на примерах прошивки каналов различной глубины и профиля в металлических деталях. Рассмотрена возможность получения индивидуальных и групповых форсунок, применяемых в жидкостных ракетных двигателях, где рабочие каналы могут иметь как постоянную, так и переменную по длине форму и величину сечения. В работе [7] приведён инструмент для изготовления глубоких каналов, где для этого применялись комбинированные методы прошивки, позволяющие получить в жаропрочных сплавах требуемый проточный тракт с сечением менее $0,7 \text{ мм}^2$.

Подобные операции выполняются различными методами, поэтому для оценки уровня производственной технологичности на рис. 3 рассмотрены технологические показатели электроэрозионной (I), электрохимической (II) и комбинированной эрозионнохимической (III) прошивки в жидкой рабочей среде, подаваемой под давлением в зону обработки. Показатели процессов, представленные на рис. 3, определяют качественные показатели изделий: на 3, а – скорость прошивки; 3, б – показатели различных методов по средней величине погрешности формы и размеров отверстий при их глубине 2-2,2 мм; 3, в – шероховатости торцевой и боковой поверхности (соответственно левые и правые участки столбиков обработок I, II, III); 3, г

– износ профильного инструмента по объёму в процентах от объёма удалённого с детали металла при работе в жидкой рабочей среде; ξ , δ – коэффициент полезного использования технологического тока относительно расхода энергии на весь процесс.



а – скорость прошивки; *б* – погрешности формы и размеров отверстий при их глубине 2-2,2 мм; *в* – шероховатость торцевой и боковой поверхности отверстий; *г* – относительный объёмный износ профильного инструмента в сравнении с объёмом удалённого металла; *д* – коэффициент полезного действия использования технологического тока; прошивка: I – электроэрозионная; II – электрохимическая; III – комбинированная эрозионно-химическая

Рисунок 3 – Технологические показатели и эффективность применения в авиакосмической отрасли машиностроения освоенных и новых процессов прошивки отверстий в типовых металлических деталях

Анализ рис. 3 показывает, что при обоснованном проектировании комбинированных процессов уровень технологичности можно повысить на порядок и более, сохранив при этом требуемые показатели качества. Замена освоенных тепловых и электрохимических методов обработки комбинированными процессами даёт весомые технико-экономические результаты, в том числе по повышению качества изделий и уровня производственной технологичности для

основных видов материалов, свойства которых приведены на рис. 3. Оценка выполнялась по изменению скорости продольной подачи инструмента (ЭИ) в жидкой рабочей среде под давлением в зависимости от глубины прошивки.

На рис. 4 зависимость 1 отражает изменение скорости подачи электрода-инструмента при обработке деталей из нержавеющей стали на базе железа, никеля, хрома, титана и других составляющих, применяемых в авиакосмической отрасли, а зависимость 2 характеризует те же показатели для конструкционной стали типа Ст45. Комбинированная электроэрозионно-химическая прошивка образцов из данных материалов выполнялась на режимах, приведённых в табл. 1 и 2, для сравнения с показателями, приведёнными на рис. 4, при изменении глубины до 4,5-5 мм. При дальнейшем увеличении глубины прошивки скорость подачи стабилизировалась до предельной глубины 8-9 мм. Наблюдаемое изменение зависимостей на рис. 4 для всех рассмотренных видов металлических материалов позволяет утверждать, что комбинированные процессы перспективны для применения в технологических комплексах, т.к. не требуют глубокой перенастройки оборудования при различных сочетаниях используемых в изделиях материалов.

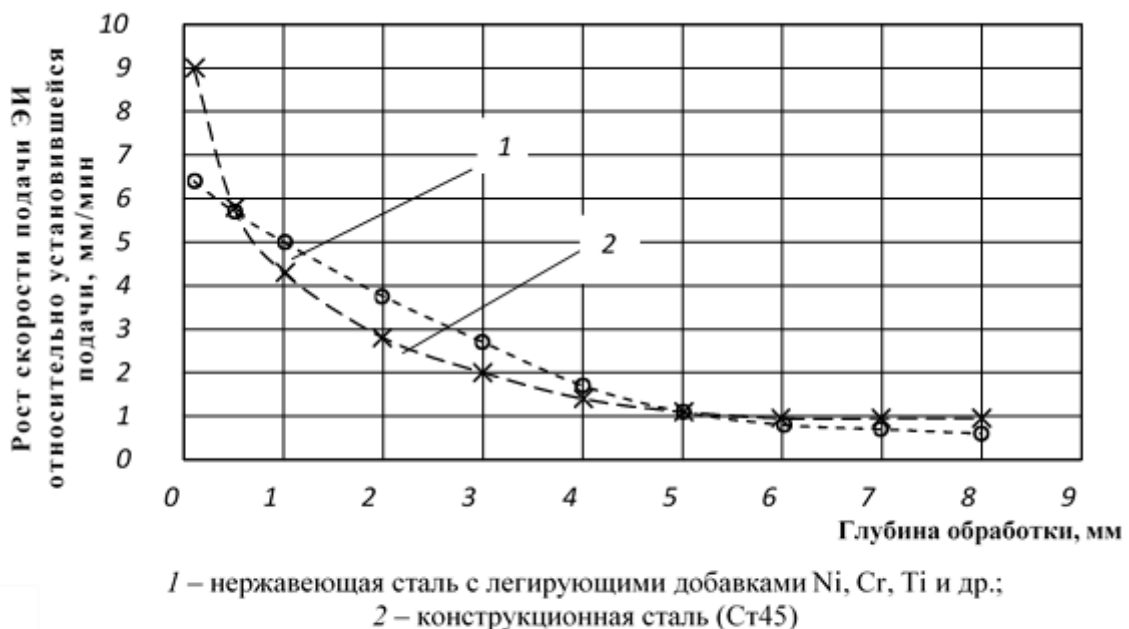


Рисунок 4 – Изменение скорости прошивки отверстий для различных металлов

В табл. 1 и 2 показаны рекомендуемые режимы прошивки отверстий малого сечения на примерах многоканальных форсунок огневого диска ракетных двигателей.

В табл. 1 приведены параметры технологических режимов метода комбинированной обработки при изготовлении каналов с наложением на инструмент вибраций различной частоты или совместно со световым облучением зоны обработки лазером. В расчётных зависимостях приняты следующие обозначения [1, 2]: α – электрохимический эквивалент материала заготовки, г/А·сек; γ – плотность материала заготовки; n – выход материала заготовки по току; X – удельная проводимость рабочей среды; U – напряжение на электродах, В; ΔU – потери напряжения, В; S – установившийся межэлектродный зазор, мм; S_0 – начальный межэлектродный зазор, мм.

В табл. 2 даны сводные сведения по выбору жидких рабочих сред для типовых марок обрабатываемых материалов и диапазоны изменения основных режимных параметров при комбинированной прошивке. Приведённые здесь сведения носят рекомендательный характер и могут быть конкретизированы по результатам опытных работ, что частично отражено в работе [1].

Таблица 1 – Режимы и расчётные технологические показатели электроэрозионнохимической прошивки

Наименование метода	Режимы и расчётные технологические показатели [4]	Достигнутые показатели
1	2	3
Электрохимическая размерная обработка с наложением ультразвуковых колебаний	Напряжение – 10 ÷ 15 В; Частота колебаний 18 ÷ 22 кГц; Амплитуда колебаний – до 40 мкм; Скорость подачи инструмента: $V_k = V_{\text{эхо}} + V_{\text{узо}}$, где $V_{\text{узо}}$ – скорость съёма за счёт ультразвуковой обработки и интенсификации процесса анодного растворения	Скорость прошивки – 2,5 ÷ 3 мм/мин; Шероховатость – 2,5 ÷ 3 мкм; Погрешность – 0,35 ÷ 0,4 мм; Удельный расход энергии – 100 ÷ 120 кВт·час/кг
Электрохимическая размерная обработка с наложением низкочастотных колебаний	Напряжение – 10 ÷ 15 В, Частота колебаний – 10 ÷ 100 Гц, Амплитуда (0,3 ÷ 0,5) S_0 , Скорость прокачки рабочей среды $V_{\text{ж}} > 2$ м/с, Скорость подачи инструмента: $V_k = \frac{\alpha}{\gamma} \eta \frac{\beta \chi (U - \Delta U)}{S},$ где $\beta = (1,2 \div 1,3)$ – показатель степени, учитывает воздействие колебаний	Скорость прошивки возрастает на 20 %; Остальные показатели соответствуют электрохимической размерной обработке
Электрохимическая размерная обработка с облучением лазером	Напряжение – 6 ÷ 8 В, Скорость подачи инструмента: $V_L = \frac{\alpha}{\gamma} \eta \frac{\bar{\beta} \chi (U - \Delta U)}{S},$ где $\bar{\beta} = 1,5 \div 3,0$	Скорость прошивки в начале обработки возрастает до 20 раз

Таблица 2 – Состав рабочей среды и отличительные режимы электроэрозионнохимической прошивки для различных металлических сплавов

Обрабатываемый материал	Состав рабочей среды	Напряжение, В	Скорость прокачки рабочей среды, м/с
1	2	3	4
Сталь конструкционная	Токопроводящие эмульсии (СОЖ); Слабые растворы: NaNO_3 (6 ÷ 8 %) с 0,5 ÷ 1% NaNO_2	45 ÷ 65	более 4
Нержавеющие и жаропрочные сплавы	Те же	30 ÷ 40	4 ÷ 6
Титановые сплавы	Слабые растворы NaCl (6 ÷ 10 %)	40 ÷ 60	5 ÷ 8
Алюминиевые сплавы	Слабые растворы NaNO_3	45 ÷ 55	3 ÷ 5

В работе [8] были проведены исследования по разработке комбинированных технологий для повышения качества изделий за счёт использования различных сочетаний и комбинаций покрытий с целью повышения эксплуатационных характеристик изделий. Эти работы можно рассматривать, как одно из главных направлений перспективных технологиче-

ских исследований в области повышения качества продукции машиностроения. Так, для деталей горячей зоны ракетных двигателей в работах [8] и [9] предложено применять многокомпонентные, многослойные покрытия с использованием керамических гранул, что совместно с охлаждением топлива позволило достичь многократного повышения термостойкости камеры сгорания жидкостных ракетных двигателей и обеспечить многократные успешные пуски космических аппаратов. В настоящее время уже достигнуто 4-5-кратное повышение ресурса современных жидкостных ракетных двигателей и изучается возможность увеличения количества пусков до 45-50 раз, что значительно снижает затраты на изделия, их эксплуатацию и подготовку к очередным пускам.

Табл. 3 отражает результаты исследований работы [10] по повышению термостойкости деталей из алюминиевых сплавов путём нанесения защитных покрытий из чугуна в рабочих средах предложенного состава с различным агрегатным состоянием на базе известных флюсов, применяемых преимущественно в форме паст различной вязкости. За счёт тугоплавкости чугуна достигнута возможность получить для горячей зоны изделий облегчённые детали с хорошими защитными свойствами, например, при работе в морской воде. А при использовании более лёгких алюминиевых сплавов снижается масса изделий, облегчается и удешевляется их изготовление, что может являться решающим фактором при оценке производственной технологичности и показателей качества создаваемой продукции [4].

Таблица 3 – Состав используемых флюсовых паст для термостойких покрытий из чугуна

Марка флюса	Массовая доля элемента, %							
	NaF	TiO ₂	Ti порошок (ПТМ)	Cr ₂ O ₃	SiO ₂	KCl	NaCl	Na ₃ AlF ₆
ФС-71	6,4	13,6	13,6	9,1	57,3	–	–	–
АН-А1	–	–	–	–	–	50	20	30
ЖА-64	–	–	–	–	3	38	15	44
АНФ-28	CaF 41-49	Al ₂ O ₃ 0-5	CaO 26-32	MgO 0-6	11-15	–	–	–

4 Обсуждение и заключение

Результаты работы показывают, что замена освоенных тепловых и электрохимических методов обработки деталей комбинированными процессами позволяет:

- повысить уровень технологичности на порядок и более, сохранив при этом требуемые показатели качества обработки для основных видов материалов;
- обеспечить весомые технико-экономические результаты, в том числе, за счёт отсутствия необходимости глубокой перенастройки оборудования при различных сочетаниях используемых в изделиях материалов;
- получать как прошивные отверстия разного профиля в деталях, так и многокомпонентные, многослойные термостойкие покрытия.

Обоснованность полученных результатов комбинированных методов на основе разработанных режимов и выбранных жидких рабочих сред для типовых марок обрабатываемых материалов подтверждается примерами их эффективного применения в авиакосмической отрасли машиностроения:

- для освоенных и новых процессов комбинированного прошивания отверстий в типовых металлических деталях, в том числе, в многоканальных форсунках жидкостных ракетных двигателей с наложением на инструмент вибраций различной частоты или совместно со световым облучением зоны обработки лазером.

– для нанесения покрытий на теплонагруженные детали, теплостойкость которых обеспечивается за счёт использования материальной композиции чугуна с керамическими гранулами, в рабочих средах предложенного состава с различным агрегатным состоянием на базе известных флюсов, применяемых преимущественно в форме паст различной вязкости. Это особенно важно для деталей из лёгких алюминиевых сплавов, при использовании которых снижается масса изделий, облегчается и удешевляется их изготовление, что может являться решающим фактором при оценке производственной технологичности и показателей качества создаваемой продукции [4].

Следует отметить, что приведённые в работе сведения носят рекомендательный характер и могут быть конкретизированы по результатам опытных работ.

Рассмотренные в статье материалы позволяют оценить состояние и пути совершенствования комбинированных методов обработки наукоемких изделий, обосновать основные направления исследований по повышению качества продукции и развитию технологической науки в области отечественного машиностроения.

Список литературы

- 1 Смоленцев, Е. В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. М: Машиностроение, 2005. – 511 с.
- 2 Справочник технолога / Под общей редакцией А. Г. Сулова М: Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.
- 3 Аддитивные технологии изготовления инструментов для комбинированных методов обработки / В. П. Смоленцев, Н. Н. Ненахов, А. А. Извеков, И. Г. Стародубцев // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2022. – № 7 (133). – С. 3-8.
- 4 Сафонов, С. В. Методология отработки технологичности при запуске в производство наукоемких изделий авиакосмической техники / С. В. Сафонов, В. П. Смоленцев, А. В. Мандрыкин // Наукоемкие технологии в машиностроении, №7 (97), 2019. - С.30-34.
- 5 Теоретические основы проектирования технологических комплексов / А. М. Русецкий и др.; под. общ. ред. А.М. Русецкого // Минск: Беларус. наука. – 2012. – 239 с.
- 6 Смоленцев, В. П. Электрохимическое маркирование деталей / В. П. Смоленцев, Г. П. Смоленцев, З. Б.Садыков // М: Машиностроение. – 1983. – 72 с.
- 7 Пат. 2537410.РФ.В23Н. Электрод-инструмент для прошивки отверстий / Смоленцев В. П. Салтанаева Е. А, Смоленцев Е. В, Коптев И. Т., Пишкова Н. В. // Патентообладатель ГОУВПО «ВГТУ» №2012140004, заявл.18.09.2012, опубл.10.01.2015. Бюл. №1.
- 8 Смоленцев, В. П. Механизм формирования высокоресурсного термостойкого покрытия / В. П. Смоленцев, А. И. Портных, Е. В. Паничев // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2019. – Т.15. – № 1. – С. 96-99.
- 9 Портных, А. И. Повышение эксплуатационных характеристик деталей путём модификации поверхностного слоя. / А. И. Портных, С. В. Сафонов, В. П. Смоленцев // Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты. - Том 3. Коллект. монография. – М.: Изд. дом «Спектр», 2014. – С. 365-405.
- 10 Смоленцев, В. П. Модификация поверхностного слоя алюминиевых сплавов электроэрозионным нанесением покрытий / В. П. Смоленцев, А. В. Норман, В. В. Золотарев Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2016. – № 4. – С.14-21.

References

- 1 Smolentsev E. V. Design of electrical and combined processing methods. Moscow: Mechanical Engineering, 2005. – 511 p.
- 2 Handbook of a technologist / Under the general editorship of A. G. Suslov Moscow: Innovative mechanical engineering, 2019. – 800 p.
- 3 Additive technologies for manufacturing tools for combined processing methods / V. P. Smolentsev, N. N. Nenakhov, A. A. Izvekov, I. G. Starodubtsev // Science-intensive technologies in mechanical engineering. – 2022. – No. 7 (133). – P. 3-8.

4 Safonov S. V. Methodology for testing manufacturability when launching high-tech aerospace products into production / S. V. Safonov, V. P. Smolentsev, A. V. Mandrykin // High-tech technologies in mechanical engineering, No. 7 (97), 2019. – P. 30-34.

5 Theoretical foundations for designing technological complexes / A. M. Rusetsky et al.; under. general. ed. A. M. Rusetsky // Minsk: Belarusian. science. – 2012. – 239 p.

6 Smolentsev V. P. Electrochemical marking of parts / V. P. Smolentsev, G. P. Smolentsev, Z. B. Sadykov // M: Mechanical Engineering. – 1983. – 72 p.

7 Patent. 2537410.RF.B23N. Electrode-tool for drilling holes / Smolentsev V. P., Saltanaeva E. A., Smolentsev E. V., Koptev I. T., Pishkova N. V. // Patent holder of the State Educational Institution of Higher Professional Education “VSTU” No. 2012140004, declared. 18.09.2012, published. 10.01.2015. Bulletin №1.

8 Smolentsev V. P. Mechanism of formation of high-resource heat-resistant coating / V. P. Smolentsev, A. I. Portnykh, E. V. Panichev // Bulletin of the Voronezh State Technical University. – 2019. – Vol. 15. – No. 1. – P. 96-99.

9 Portnykh A. I. Improving the performance characteristics of parts by modifying the surface layer. / A. I. Portnykh, S. V. Safonov, V. P. Smolentsev // Progressive mechanical engineering technologies, equipment and tools. - Volume 3. Collected monograph. – M.: Publishing house "Spectr", 2014. – P. 365-405.

10 Smolentsev V. P. Modification of the surface layer of aluminum alloys by electrical discharge coating / V. P. Smolentsev, A. V. Norman, V. V. Zolotarev High-tech technologies in mechanical engineering. – 2016. – No. 4. – P. 14-21.

© Смоленцев В. П., Извеков А. А., Стародубцев И. Г., 2024