

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №9(159). С.14-24.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №9 (159). P. 14-24.

Научная статья
УДК 621.047; 621.9.048
doi: 10.30987/2223-4608-2024-14-24

Пути совершенствования качества наукоемких изделий комбинированными методами

Александр Андреевич Извеков¹, аспирант
Владислав Павлович Смоленцев², д.т.н.
Олег Николаевич Кириллов³, д.т.н.

^{1, 2, 3} Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

¹ vmzizvekov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

² vsmolen@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0327-0354>

³ kirillov.oli@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Приведены результаты научных и прикладных исследований в области современных методов комбинированной обработки с сочетанием в единой технологии тепловых, магнитных, лучевых, химических постоянных и импульсных воздействий и их сочетаний с механическими процессами. Материалы статьи способствуют созданию и развитию новых путей повышения качества наукоемких изделий, направлены на расширение технологических возможностей при производстве авиационной, космической, транспортной и других отраслей техники. К новым методам совершенствования качества наукоемких изделий комбинированными методами следует отнести их использование в технологических комплексах, создаваемых из оборудования отечественного производства, выпуск которого может успешно преодолеть проблемы импортозамещения. Рассмотрены технологические возможности, целесообразность назначения и оценки их эффективности на повышение качества научно обоснованных сочетаний в едином процессе внешних и внутренних воздействий. Предложен единый подход к проектированию комбинированных технологий с оценкой возможностей каждого назначаемого вида воздействий с учетом уровня их производственной технологичности. Показан новый подход к управлению качеством создаваемых наукоемких изделий путем экономически обоснованного придания им эффективных эксплуатационных свойств за счет применения разработанных многослойных покрытий, технология создания и использования которых внесла весомый научный вклад в технологическую науку.

Ключевые слова: качество, комбинированные методы обработки, технологические комплексы, импортозамещение, покрытия

Для цитирования: Извеков А.А., Смоленцев В.П., Кириллов О.Н. Пути совершенствования качества наукоемких изделий комбинированными методами // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 9 (159). С. 14–24. doi: 10.30987/2223-4608-2024-14-24

Ways of quality improvement for high-tech products by combined methods

Alexander A. Izvekov¹, PhD student

Vladislav P. Smolentsev², D. Eng.

Oleg N. Kirillov³, D. Eng.

^{1, 2, 3} Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

¹vmzizvekov@gmail.com

²vsmolen@inbox.ru

³kirillov.olli@yandex.ru

Abstract. The results of scientific and applied research in the field of modern methods of combined treatment using the combination of thermal, magnetic, ray, chemical permanent and impulse action accompanied by mechanical processes in a single technology are presented. The materials of the article contribute to the creation and development of new ways to improve the quality of high-tech products, aimed at expanding technological capabilities in the production of aviation, space, transport and other branches of technology. New methods of improving the quality of high-tech products by combined methods include their use in technological complexes created from the equipment of domestic production, which can successfully overcome the problems of import substitution. Technological capabilities, meaningfulness for assigning and evaluating their effectiveness to improve the quality of scientifically based combinations in a single process of external and internal influences are viewed. A unified approach to the design of combined technologies is proposed with an assessment of the capabilities of each assigned type of impact, taking into account the level of their operability. A new approach to high-tech products quality management is shown through feasible conferring of effective operational properties due to the use of developed multilayer coatings, the creation technology and use of which made a significant scientific contribution to technological science.

Keywords: quality, combined processing techniques, technological complexes, import substitution, coatings

For citation: Izvekov A.A., Smolentsev V.P., Kirillov O.N. Ways of quality improvement for high-tech products by combined methods / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 9 (159). P. 14–24. doi: 10.30987/2223-4608-2024-14-24

Введение

При создании наукоемких изделий в авиакосмической и в других отраслях машиностроения потребовалось создание научных основ формирования качества перспективных изделий на базе имеющихся и создаваемых комбинированных методов обработки с учетом использования их в современных технологических комплексах, значительная часть которых требовала импортозамещения. Для этого потребовался глубокий анализ возможностей различных видов тепловых, химических, механических воздействий при работе в форме комбинированных технологических процессов. Такой материал многие годы создавался на базе отработки производственной технологичности создаваемых изделий в

ходе многократных усовершенствований конструкции и технологии при подготовке изделий к серийному выпуску, что рассмотрено в работах [1, 2].

Исследования научных школ Воронежа [3 – 5], Брянска [6], других городов страны и зарубежья показали, что имеется реальная перспектива совершенствования качества наукоемких изделий с использованием комбинированных методов обработки.

Роль и место комбинированных воздействий в проектируемых комплексах

В основе проектируемых технологических комплексов лежат физические связи между воздействиями [2] и показателями качества [3] создаваемых изделий с

использованием установленных закономерностей управления их эксплуатационными показателями, в том числе технологическими методами [2, 6].

В основе всех методов обработки, используемых в технологических комплексах, лежат известные физические явления, которые определяют технологические возможности процессов формообразования. К таким воздействиям относятся: механические, тепловые, химические, магнитные, ядерные. Электрический ток, подаваемый в зону обработки, является источником энергии на технологические цели.

К наиболее изученным и востребованным в технологии машиностроения относится механическое воздействие на объект обработки, которое имеет два вида: постоянное и импульсное.

Постоянное воздействие применяется в большинстве процессов лезвийной обработки. К импульсным методам относят комбинированную обработку с механическим использованием абразивных гранул (шлифование, полирование, притирка и др.), ударные методы (ковка, штамповка, вибрационное упрочнение и др.), а также обработку с наложением вибраций, лучевых импульсов, ультразвуковых колебаний (размерная обработка, интенсификация процессов и др.). Последний приведенный вид занимает более половины трудоемкости при изготовлении деталей машин. Повышение его технологических показателей за счет комбинирования с другими видами воздействий дает значительный выигрыш, в технологических показателях комбинированных технологий и открывает широкие перспективы по расширению технологических возможностей по управлению качеством при создании наукоемкой конкурентоспособной продукции, в том числе отечественного выпуска.

Тепловое воздействие может иметь как самостоятельное технологическое

приложение (например термообработка), но и являться одним из видов воздействий при других процессах (например, для нагрева изделий при механообработке, электроэрозионных процессах, для придания материалам особых свойств и др.). При этом в большинстве известных технологических приемах совершается комбинация нескольких воздействий.

Химическое воздействие используется в том числе для химического воздействия (например, для очистки заготовок [3]), при полировании, формообразовании листовых деталей по фотошаблонам, получении знаков и др., нанесении покрытий химико-термической обработкой (цементация, цианирование и др.). Оно лежит в основе электрохимической размерной и комбинированной обработки, протекающей за счет химических реакций преобразования.

Магнитное и другие виды лучевого воздействия могут являться структурной составляющей процессов, где требуется электрический ток и возникают электромагнитные поля различной интенсивности, которые могут составить часть комбинированного метода обработки с участием магнитного или другого лучевого воздействия. В комбинированных методах обработки самостоятельное магнитное воздействие используется весьма редко, поэтому подробно здесь не рассматривается. Более полную информацию по этому вопросу можно получить из [4].

Ядерное воздействие, как один из видов лучевой обработки, в настоящее время практически не используется, хотя имеются сведения о положительном влиянии облучения на повышение предела усталостной прочности деталей, работающих при знакопеременных нагрузках. Пока неизвестны количественные показатели ядерного облучения, имеются отрывочные сведения по качественным связям показателей процесса с соответствующими технологическими

возможностями, что недостаточно для управления процессом при комбинированной обработке.

Использование известных воздействий в комбинированных методах

обработки, используемых в технологических комплексах приведено на рис. 1.

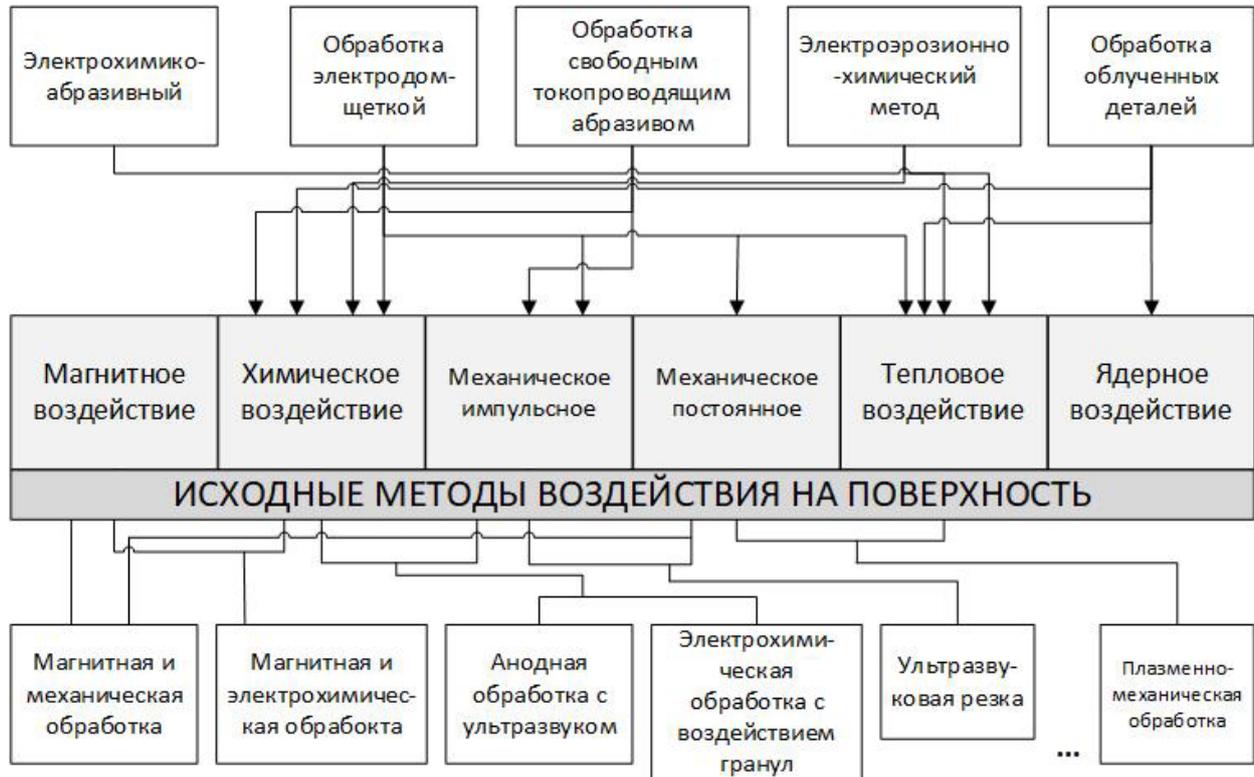


Рис. 1. Классификация воздействий в комбинированных методах обработки, используемых в технологических комплексах

Fig. 1. Classification of impacts in combined processing techniques used in technological complexes

При выполнении операций в комбинации с использованием режущего и абразивного инструментом при обработке механическое действие совмещается с возникающими тепловыми воздействиями на материал заготовки, что может привести к изменениям химического состава сплавов его структуры, а также другим явлениям, вызывающим как положительное, так и негативное влияние на качество и технологические возможности детали. Следовательно, требуется нормировать количество образующейся тепловой энергии, например теплопереносом жидким электролитом. Однако при этом необходимо научно обосновать граничные условия назначения каждого воздействия, при

нарушении которых может снизиться уже достигнутый уровень эксплуатационных показателей проектируемого метода обработки, что количественно обосновывается по методике [2] в процессе отработки технологичности конструкции и служит инструментом для формирования эффективной структуры проектируемого комбинированного процесса.

Анализ возможных сочетаний известных воздействий (см. рис. 1) показывает, что на их базе можно спроектировать не менее 800 новых комбинированных процессов, обладающих существенными полезными свойствами, в том числе в области повышения качества создаваемых наукоемких изделий и для решения задач

импортозамещения. Перспективы в данной области технологической науки впечатляющие, поскольку в настоящее время в мире изучено или практически используется не более 20...30 таких технологических приемов, в основном при прямом подключении постоянного тока, где анодом является заготовка, что составляет не более 2 % от возможного количества требуемых в промышленности комбинированных методов обработки.

Оптимизация расчета, назначения и выбора структурных составляющих комбинированного процесса при проектировании технологических комплексов

При формировании технологических комплексов необходимо учитывать требуемые, расчетные, достигнутые, научно обоснованные и ожидаемые технологические показатели комбинированного метода. Выбор величины взаимного влияния структурных элементов, при анализе технологичности, может оказаться значительно интенсивнее прямого воздействия на комбинированный процесс и способно нейтрализовать или даже ухудшить достигнутый результат проектирования нового процесса. Базовые виды комбинированных методов обработки, их структура, технологические возможности, область применения рассмотрены в [7]. Эффективность проектируемых процессов зависит не только от сочетания воздействий, но и обоснованности выбора базового варианта, который требуется усовершенствовать за счет комбинации с другими методами воздействия с известными технологическими характеристиками. В зависимости от уровня технологичности проектируемого метода, относительно ранее освоенного, требуется обосновать эффективность присоединения к базовому варианту других видов воздействий с учетом их совместимости и возможности реализации в технологических комплексах.

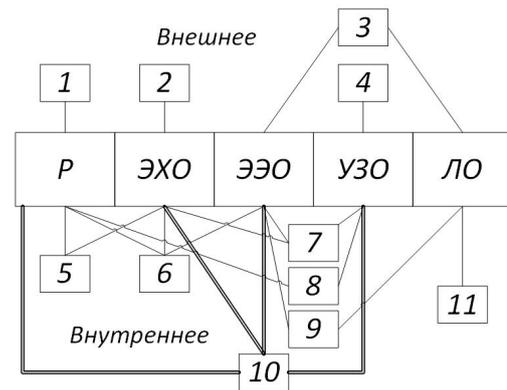


Рис. 2. Факторы, определяющие комбинированное размерное формообразование поверхности при внешнем воздействии:

1 – механическое постоянное; 2 – химическое; 3 – тепловое; 4 – механическое импульсное; при внутреннем воздействии: 5 – наклеп поверхности; 6 – хрупкость материала; 7 – состав; 8 – структура; 9 – температура плавления; 10 – совместимость материалов инструмента и детали; физико-механические характеристики обрабатываемого материала; 11 – отражательная способность

Fig. 2. Factors determining the combined dimensional shaping of the surface under external influence: 1 – mechanical constant; 2 – chemical; 3 – thermal; 4 – mechanical pulse; under internal influence: 5 – surface cleavage; 6 – material brittleness; 7 – composition; 8 – structure; 9 – melting point; 10 – compatibility of tool and part materials; physical and mechanical characteristics of the processed material; 11 – reflectivity

На рис. 2. показаны внешние и внутренние факторы, определяющие показатели практически используемых методов обработки: резания (Р), электрохимической (ЭХО), электроэрозионной (ЭЭО), ультразвуковой (УЗО), лазерной (ЛО), на базе которых можно комбинировать нетрадиционные гибкие технологии технологических комплексов.

При обосновании выбора воздействий для комбинированной обработки учтена та часть, которая оказывает в основном внешнее влияние на исследуемые процессы (см. рис. 2). К внутренним факторам относятся характеристики обрабатываемого материала, большинство которых является неотъемлемыми свойствами детали и в настоящее время не может эффективно использоваться для управления в целях повышения технологических показателей процесса и качества обработки.

Исключением служит наклеп и отражательная способность поверхности, которые можно изменять в довольно широких пределах. Однако такие факторы не достаточны для эффективного управления процессом.

Из сказанного следует, что направленное управление процессом [1, 6], в том числе параметрами, определяющими качественные

показатели изделия в комплексах, практически целесообразнее осуществлять через внешние факторы. Связь между качественными показателями комбинированных методов обработки и внешними воздействиями может быть представлена в виде комплекса, где возможно сочетание различных элементов:

$$\begin{aligned} P_p &\supset (M, X, M_p, M_i, T_p, Y, MX, MM_p, MM_i, MT_p, MY, XM_p, \dots) \\ P_r &\supset (M, X, M_p, M_i, T_p, Y, MX, MM_p, MM_i, MT_p, MY, XM_p, \dots) \\ R_z &\supset (M, X, M_p, M_i, T_p, Y, MX, MM_p, MM_i, MT_p, MY, XM_p, \dots) \\ T &\supset (M, X, M_p, M_i, T_p, Y, MX, MM_p, MM_i, MT_p, MY, XM_p, \dots) \\ G_i &\supset (M, X, M_p, M_i, T_p, Y, MX, MM_p, MM_i, MT_p, MY, XM_p, \dots) \\ U &\supset (M, X, M_p, M_i, T_p, Y, MX, MM_p, MM_i, MT_p, MY, XM_p, \dots) \\ \Xi &\supset (M, X, M_p, M_i, T_p, Y, MX, MM_p, MM_i, MT_p, MY, XM_p, \dots) \end{aligned}$$

где P_p – производительность; P_r – погрешность; R_z (или другой параметр) – шероховатость; T – глубина измененного слоя; G_i (или другой показатель) – механические свойства обработанного материала; U – износ инструмента; Ξ – удельный расход электроэнергии, которые зависят от магнитного M (лучевого), химического X , механического постоянного M_p и импульсного M_i , теплового T_p , ядерного Y воздействия и их сочетаний.

Построение полной математической модели оптимизации комбинированных процессов затруднено, при ограниченной изученности взаимного влияния внешних воздействий построение в [7]. При этом, оптимизация выбора внешних факторов осуществима при определенных допущениях. В комплексах необходимо сохранить те воздействия, которые значимы для технологического показателя, при этом каждое из них может иметь множество технологических применений.

На примере магнитного воздействия M , которое включает в себя электромагнитные поля от электрического и лучевого влияния на качественные и количественные характеристики объектов исследования, характерно отсутствие моментального непосредственного влияния на показатели, но его присутствие изменяет переменные характеристики, например абразивных гранул

при комбинированном шлифовании, особенно в труднодоступных участках в местах контакта инструмента. Для некоторых воздействий следует учесть неизменность воздействий. Так, тепловые факторы определяют технологические показатели всех видов электроэрозионной и лучевой обработки, которых известно и изучено не менее семи.

Обоснование и выбор структуры взаимных влияний составляющих комбинированного процесса выполняется с учетом взаимовлияния различных факторов, наиболее полно удовлетворяющих требованиям проектировщиков технологических комплексов.

Базовые технологические показатели, достигнутые с использованием комбинированных методов обработки

На диаграммах (рис. 3) показаны технологические показатели эрозионно-химического прошивания конструкционных сталей, которое в полной мере изучено и получена достоверная информация для адекватной оценки показателей спроектированного процесса [4, 6]. Результаты оцениваются с учетом возможности их эффективного использования в технологических комплексах.

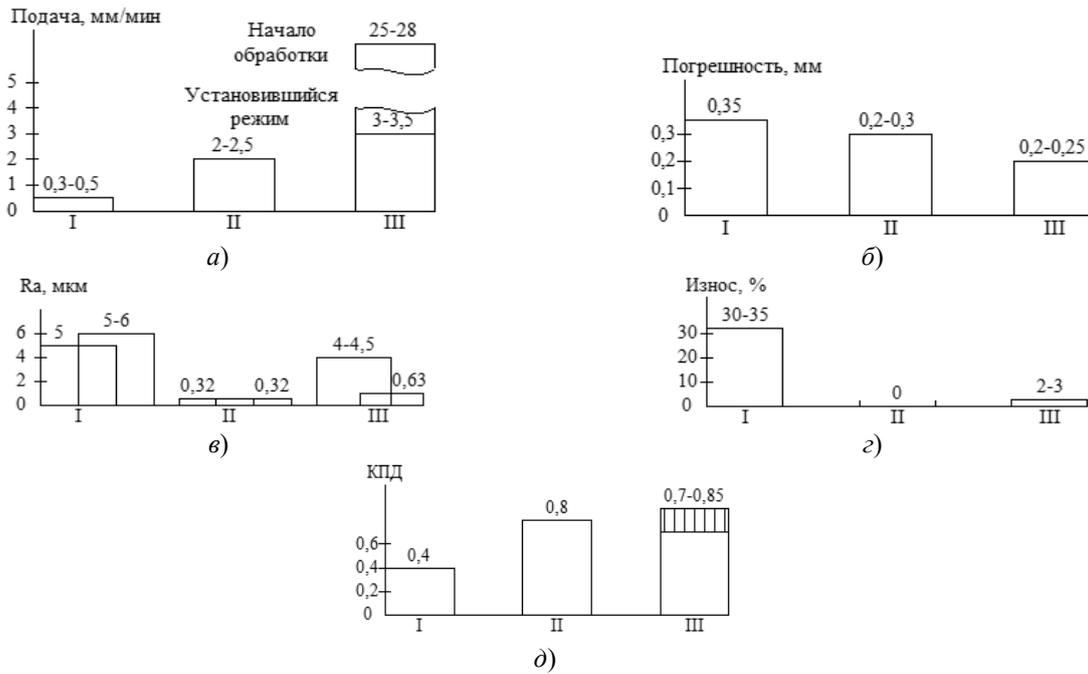


Рис. 3. Технологические показатели и эффективность освоенных и новых процессов прошивки отверстий в типовых деталях:

a – скорость прошивки (подача инструмента); *б* – погрешность формы и размеров отверстия; *в* – шероховатость торцевой (слева) и боковой поверхности; *г* – износ инструмента; *д* – коэффициент полезного использования технологического тока; I – электроискровая обработка; II – электрохимическая размерная обработка; III – комбинированная обработка

Fig. 3. Technological indicators and efficiency of mastered and new processes of stitching holes in standard parts: processing *a* – the speed of the firmware (tool feed); *b* – the error of the shape and size of the hole; *c* – the roughness of the end (left) and side surface; *d* – tool wear; *e* – capacity utilization of technological current; I – electric spark, II – electrochemical dimensional; III – combined

Усредненная величина подачи, для отверстий малой глубины, значительно превышает скорость перемещения инструмента при электроэрозионной и электрохимической обработке.

Шероховатость, погрешность, и параметр использования подводимой энергии эквивалентны параметрам для исходных методов. Износ инструмента (см. рис. 3) по сравнению с электроэрозионной обработкой значительно снизился, при этом в начале процесса он приблизился к показателю безизносной схемы. В отличие от нее, производительность комбинированного метода возросла, а не снизилась, как это свойственно безизносной схеме электроэрозионной обработки.

Изучение экспериментальных результатов и показателей на рис. 3 и показывает, что целевые показатели для комбинированного процесса выполнены: достигнута значительная производительность (наиболее значимо при

малой глубине отверстий), не утрачены приемлемая шероховатость и износ инструмента, усовершенствованы или сохранены на исходном уровне остальные показатели.

Условия, применение которых рационально для обоснования правомерности выбора эрозионно-химической прошивки в качестве оптимального процесса показаны в табл. 1. Представлены расчетные зависимости и наиболее продуктивные режимы обработки, принятые для других сравниваемых методов, проанализированы полученные технологические показатели.

Анализ параметров в табл. 1 доказывает обоснованность [7] назначения электроэрозионно-химической обработки для прошивки неглубоких (до 1...2 мм) качественных отверстий. Рекомендуемые в [4] режимы электроэрозионно-химической прошивки отверстий с глубиной до 5...6 мм приведены в табл. 2.

1. Анализ результатов выбора воздействий и методов проектирования комбинированных методов обработки при прошивке отверстий в наукоемких изделиях

1. Analysis of the results of the selection of impacts and design approaches of combined processing technics for piercing holes in high-tech products

Наименование метода	Режимы и расчетные технологические показатели [4]	Достигнутые показатели
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 съема за счет 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·ч/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 $\beta = (1,2... 1,3)$ – 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: $V_L = \frac{\alpha}{\gamma} \eta \frac{\beta \chi (U - \Delta U)}{S},$ где $\beta = 1,5 ... 3,0$.	Скорость прошивки в начале обработки возрастает до 20 раз

2. Режимы комбинированной обработки

2. Combined processing modes

Обрабатываемый материал	Состав рабочей среды	Напряжение, В	Скорость прокачки рабочей среды, м/с
Сталь конструкционная	Токопроводящие эмульсии (СОЖ); Слабые растворы: 6...8% NaNO_3 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

Стабильное обеспечение качества изделий за счет применения комбинированных методов нанесения покрытий

Отработка технологичности [2, 6] выявила, что в технологических комплексах можно обеспечить высокие эксплуатационные показатели с технологическим воздействием на поверхностный слой из однослойных и многослойных покрытий.

Известны [4, 6, 7] освоенные технологии нанесения покрытий комбинированными методами на распространенные конструкционные материалы как стали 20, 45, нержавеющей стали типа 12X18H10T, твердые сплавы. Многослойные покрытия позволяют сформировать на поверхности заготовки слои, отличающиеся повышенной твердостью, износостойкостью, жаростойкостью и коррозионной стойкостью, а также создать антифрикционные слои путем применения в качестве поверхностных слоев материалов металлы, обладающие надежными эксплуатационными качествами. Решена проблема [8] нанесения качественных покрытий из чугуна на легкоплавкий сплав на основе алюминия, что позволило совместить в поверхностном слое высоконагруженных деталей свойства, ранее практически не используемые в изделиях и средствах технологического оснащения. Это, прежде всего, повышение защитных свойств объектов при работе в агрессивных средах, при повышенных температурах, в условиях высокого износа контактных поверхностей. Однако реализация комбинированных методов нанесения качественных, защитных покрытий на алюминиевые сплавы потребовала создания на уровне изобретений новых способов и устройств, преодоления производственных трудностей, вызванных ранее слабоизученных факторов. К ним относятся:

– высокая разность температур плавления и кипения материалов применяемых инструментов, значительно превышающая температуру плавления алюминиевых сплавов,

что может вызывать разрушение уже нанесенного чугунного покрытия за счет интенсивного испарения и выброса жидкой фазы материала катода из зоны разряда;

– наличие на поверхности алюминиевого сплава плотной, жаростойкой оксидной пленки малой электропроводности, приводящей к необходимости проведения обработки при повышенных значениях рабочего тока, которые также могут вызвать эрозию заготовки вследствие интенсивного нагрева, плавления и испарения при протекании рабочих токов большой величины;

– влияние межэлектродной воздушной среды, так как при нанесении покрытий происходит окисление и азотирование мелких капель расплавленного металла электрода-инструмента до их соприкосновения с поверхностью заготовки, которая нагрета до высоких температур, реагирует с элементами окружающей среды. За счет этого покрытия могут получаться дефектными с многочисленными порами, трещинами, наличием несплошностей и с недостаточной адгезией к материалу детали;

– ограничение по толщине чугунных покрытий, где ранее удавалось получать на алюминиевых деталях качественные поверхностные слои толщиной не более $20 \div 30$ мкм, нередко с измененным химическим составом. В [8] показаны предложенные пути и методы успешного устранения отрицательных факторов за счет научно обоснованного выбора межэлектродной среды. Для этого выбор состава и технологии использования среды базируется на исключении или уменьшении окисления материалов инструмента с управлением и регулированием процессом при нанесении содержащих углерод покрытий за счет его выгорания до 40... 60 %. Здесь для получения качественных защитных, токопроводящих металлических покрытий на поверхности деталей из алюминиевых сплавов перед их нанесением в зону разряда вводят регулируемое количество созданных химически активных флюсов,

снижающих тепловую защиту материала на границе покрытия и, как следствие, препятствующих разрушению поверхностного слоя основы [Пат. РФ № 2405662].

Флюсы (табл. 3) являются многокомпонентными системами с многообразными

интервалами температуры кристаллизации и состоят из смеси солей, окислов, сульфидов и других химических соединений, с добавлением в них небольшого количества фтористых соединений, интенсифицирующих действие флюса.

3. Состав флюсов, применяемых для нанесения чугунных покрытий на детали из алюминиевых сплавов

3. The composition of fluxes used for applying cast iron coatings to aluminum alloy parts

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	-	-	-

Преимуществом флюсов, предлагаемых для нанесения покрытий на алюминиевые сплавы электроэрозионным способом, является использование недефицитных доступных компонентов, применяемых для сварки алюминиевых материалов. Применение таких флюсов обеспечивает возможность использования комбинированных методов для получения технологичных покрытий и создает условия устойчивого протекания процесса нанесения качественных слоев, гарантирующих отсутствие в покрытии пор и трещин, обеспечивающих высокую коррозионную стойкость; электропроводимость и другие полезные свойства объектов с покрытиями.

Заключение

Обоснованы и реализованы пути совершенствования качества наукоемких изделий комбинированными методами при их использовании в технологических комплексах.

Показаны пути повышения качества изделий отечественной техники и средств технологического оснащения за счет научно обоснованной оценки уровня технологичности, где в качестве начальных условий при комбинации воздействий используют базовые процессы, выполняемые известными методами или при создании новой (ранее считавшейся неосуществимой) операции с ее технологическими показателями или желаемыми условиями выполнения.

На примерах освоенных комбинированных видах обработки доказана возможность выбора воздействий, отвечающих основным потребностям заказчика, для чего в работе предложены эффективные методы интенсификации желаемых воздействий и купировании отрицательных явлений.

В структуре проектирования перспективных комбинированных методов определен принцип, в котором каждый вид воздействия взаимосвязан с другими, а их сочетание в технологических комплексах способно

интенсифицировать благоприятные результаты суммарного воздействия на технологические показатели.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Бондарь А.В.** Качество и надежность // М. Машиностроение. 2007. 308 с.
2. **Сафонов С.В.** Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик изделий // Воронеж: Издат. дом ВГУ. 2015. 232 с.
3. **Смоленцев В.П., Сафонов С.В., Котуков В.И.** Поддержание качества поверхностного слоя изделий в процессе их очистки от загрязнений // Научно-технические технологии в машиностроении. 2014. № 7. С. 21–23.
4. **Смоленцев Е.В.** Проектирование электрических и комбинированных методов обработки // М: Машиностроение. 2005. 511 с.
5. **Кириллов О.Н.** Технология комбинированной обработки непрофилированным электродом // Воронеж: ВГТУ. 2010. 254 с.
6. **Справочник технолога** / Под ред. А.Г. Сулова // М: Инновационное машиностроение. 2019. 800 с.
7. **Комбинированные методы обработки** / Учебное пособие под ред. В.П. Смоленцева // Воронеж: ВГТУ. 2024. 91 с.
8. **Норман А.В., Смоленцев В.П., Кондратьев М.В.** Повышение качества деталей из легкоплавких материалов путем нанесения покрытий из чугуна // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т.19. № 3. 2023. С. 120–126.

REFERENCES

1. Bondar A.V. Quality and reliability. // Moscow: Mashinostroenie, 2007, 308 p.
2. Safonov S.V. Technological support of operational characteristics of products // Voronezh: Publishing house VSU, 2015, 232 p.
3. Smolentsev V.P., Safonov S.V., Kutukov V.I. Maintaining the quality of the surface layer of products in the process of cleaning them from contamination. // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2014, no. 7, pp. 21–23.
4. Smolentsev E.V. Design of electrical and combined processing methods. // Moscow: Mashinostroenie, 2005, 511 p.
5. Kirillov O.N. Technology of combined processing with a non-profiled electrode // Voronezh: VSTU, 2010, 254 p.
6. The technologist's handbook edited by A.G. Suslov, Moscow: Innovative mechanical engineering, 2019, 800 p.
7. Combined processing methods / Textbook edited by V.P. Smolentsev // Voronezh: VSTU, 2024, 91 p.
8. Norman A.V., Smolentsev V.P., Kondratiev M.V. Improving the quality of parts made of low-melting materials by applying cast iron coatings // Bulletin of the Voronezh State Technical University, vol. 19, no. 3, 2023, pp. 120–126.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 08.02.2024; одобрена после рецензирования 13.03.2024; принята к публикации 05.06.2024.

The article was submitted 08.02.2024; approved after reviewing 13.03.2024; accepted for publication 05.06.2024.