

КЛАССИФИКАЦИЯ, ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

Дамиан ИОРДАКИ, студент факультета реальных наук,
экономики и окружающей среды
Бельцкого государственного университета имени Алеку Руссо.
Научный руководитель: Павел ПЕРЕТЯТКУ, доктор, конференциар

Résumé: *L'une des tâches principales de la construction mécanique consiste à développement ultérieur, perfectionner et développer de nouvelles méthodes technologiques de traitement des ébauches de pièces de machines et d'amélioration de la qualité des pièces d'usinage. Une attention particulière est accordée aux techniques de finition, dont le volume dans l'intensité de travail totale des pièces augmente constamment. Parallèlement à l'usinage par découpage, des procédés de traitement par déformation plastique sont utilisés, faisant appel à des types d'énergie chimique, électrique, lumineuse et autres.*

Mots-clés: *méthode, matériau, qualité de traitement, propriétés, modification.*

1. Введение

Произведем классификацию методов обработки, выделяя и формулируя наиболее общие и значимые классификационные признаки.

1. По характеру участия в технологическом процессе различают методы собственно обработки, методы контроля и измерения и вспомогательные методы (например, транспортирование объекта).
2. По виду свойств объекта, изменяемых в результате обработки, различают методы изменения объемных свойств (термическая обработка), методы изменения свойств поверхностного слоя (поверхностно пластическое деформирование, электроискровое легирование), методы размерного формообразования.
3. По принадлежности к переделу (заготовительный, обработка с удалением припуска, упрочняющая обработка, обработка с нанесением покрытий, сборка).

4. По характеру формирования конфигурации изделия:
 - методы, основанные на перераспределении в пространстве объема заготовки без его изменения;
 - методы, основанные на удалении припуска с поверхности заготовки (субтрактивные или дезинтеграционные методы)
 - методы, базирующиеся на наращивании слоев материала на заготовку (аддитивные или интеграционные методы);
 - комбинированные.
5. По механизму воздействия (первичному процессу) на обрабатываемый объект различают следующие методы обработки:
 - методы теплового воздействия (процессы нагревания, плавления, испарения, спекания, затвердевания, конденсации) характеризуются подводом к поверхности обрабатываемого тела интенсивных тепловых потоков (плотность мощности до 10^7 МВт/м²). К ним относятся фрикционное разрезание, электроконтактная, электроэрозионная, плазменная, лазерная, электронно-лучевая обработка. Некоторые методы теплового воздействия связаны с генерированием тепла в объеме или части объема объекта обработки (омический нагрев, нагрев ТВЧ, контактный нагрев). Несмотря на различия в способах генерации и подвода тепловых потоков в рабочую зону, их распределения по поверхности или объему обрабатываемого объекта, основной процесс, определяющий характер изменения его состояния, является тепловым;
 - методы химической обработки (процессы растворения, осаждения, образования новых или разложения исходных веществ) характеризуются химическим взаимодействием вещества обрабатываемого объекта с реагентами рабочей среды;
 - методы электрохимического воздействия основаны на процессах переноса заряда и вещества через границу раздела фаз «твердое тело – жидкость» под действием электрического поля. Это электрохимическая размерная обработка, полирование, оксидирование, катодное осаждение металлов и сплавов,
 - методы механического воздействия характеризуются непосредственным контактным взаимодействием твердых тел с различными значениями поверхностной энергии, одно из которых является обрабатываемым объектом. В результате такого взаимодействия обрабатываемый объект деформируется. В зависимости от вида деформаций различают две подгруппы методов данной группы. В первую из них входят методы, основанные на деформации объекта обработки с последующим разрушением (обработка резанием, пробивка и вырубка листовых заготовок и пр.), а во вторую – те методы, в которых указанная деформация не сопровождается диспергированием материала (горячая объемная штамповка, вытяжка);
 - методы гидромеханической обработки основаны на непосредственном преобразовании энергии жидкой рабочей среды в работу разрушения

- или пластического деформирования объекта обработки (водоструйная, кавитационная, электрогидравлическая);
- методы магнитного воздействия основаны на непосредственном технологическом использовании магнитных или электромагнитных полей для изменения состояния объекта обработки;
 - методы радиационного воздействия характеризуются взаимодействием обрабатываемого объекта с различными видами излучения (рентгеновское, γ - излучение);
 - методы быстрого прототипирования (rapid prototyping) выделились в отдельную группу в последние годы. В эту группу входят различные методы, в которых используются специфические физические или химические эффекты. Типичным представителем является объемная фотолиитография, основанная на эффекте образования твердой фазы из раствора под действием света;
 - комбинированные методы обработки характеризуются одновременным участием нескольких разнородных процессов в заданном изменении состояния объекта обработки.
6. По степени диспергирования вещества при его удалении (нанесении) выделяют методы диспергирования на макроуровне (точение), микроуровне (тонкое шлифование, гидроабразивная и ультразвуковая обработка), суб-микроуровне (молекулярном, атомарном, ионном).
7. По удельному расходу энергии методы обработки разделены (проф. В. В. Швец) на три группы:
- методы, при реализации которых удельный расход энергии не превышает величину энергии плавления (≈ 104 Дж/см³). Типовой представитель – обработка резанием, при которой достаточно разрушить связи лишь небольшой части атомов и молекул для разделения материала;
 - методы с удельным расходом энергии в диапазоне от энергии плавления до энергии испарения (для стали примерно 6×104 Дж/см³). В этом случае ослабевают связи между всеми атомами и молекулами обрабатываемого вещества, что имеет место, например, при литье;
 - методы обработки с удельной энергией выше 105 Дж/см³. Достигается полное разрушение связей между молекулами и атомами. Это электроэрионная, лазерная обработка.
8. По характеру переноса информации на обрабатываемый объект можно выделить две группы методов. Первая из них основана на прямом переносе информации с промежуточного носителя – инструмента на объект в результате копирования формы рабочей поверхности инструмента (методы прямого копирования). Вторая группа методов базируется на кодировании исходной информации в виде траекторий относительного перемещения характеристического образа инструмента (обкатывание и построчное сканирование).
9. По характеру взаимосвязей, отношений между первичными процессами воздействия на заданный параметр состояния объекта обработки выделим

три группы методов; аддитивные, супераддитивные и субаддитивные. Поясним данное разбиение множества методов обработки следующим примером. Пусть для воздействия на объект используются k первичных процессов физической или химической природы b_1, b_2, \dots, b_k , каждый из которых в отдельности обеспечивает скорость V_i ($i = 1, 2, \dots, k$) изменения данного параметра состояния ($V_i > 0$). Суперпозиция этих процессов может привести к одному из трех результатов:

$$V_{\Sigma} = \sum V_i; V_{\Sigma} > \sum V_i; V_{\Sigma} < \sum V_i$$

где V_{Σ} – скорость изменения указанного параметра состояния при реализации всех первичных процессов одновременно. Очевидно, это вызвано наличием взаимосвязей между первичными процессами. Очевидно также, что практический интерес представляют супераддитивные методы обработки, в которых проявляется так называемый синергический эффект. Далее будет показано, что этот эффект наблюдается в ряде комбинированных методов обработки.

10. Методы обработки часто делят на две группы в зависимости от характера применяемого инструмента:

- контактные МО предполагают использование в качестве инструмента компактное твердое тело, свойства которого определяют характер изменения свойств объекта обработки;
- бесконтактные методы обработки основаны на использовании в качестве инструмента физических (химических) полей, соответствующим образом организованных во времени и пространстве и определяющих характер изменения свойств обрабатываемого объекта.

Такое деление удобно с точки зрения описания процессов формообразования изделий, проектирования инструмента, оценки технологических возможностей метода обработки и в ряде других случаев.

Приведенная классификация, естественно, не претендует на полноту описания и охвата всего многообразия существующих методов обработки. Тем не менее она позволяет упорядочить это многообразие, в том числе по системообразующим признакам МО: характеру физических или химических процессов, характеру их взаимодействия, характеру изменения состояния объекта обработки.

1.2 Методы обработки материалов

Рассмотрим кратко наиболее распространенные методы обработки материалов, заостря внимание на их специфических особенностях и оставляя подробное обсуждение на долю соответствующих разделов книги. Для этого воспользуемся схематическими изображениями каждого МО, приведенными на рис. 1. Описание процессов, ответственных за разрушение материала, эффектов, вызывающих это разрушение, а также ограничения области применения соответствующих методов представлены в табл. 1. Как видно, несмотря на существенные различия в механизме разрушения материалов, все эти методы могут успешно применяться для целей размерной обработки деталей машин, то есть имеют общую целевую функцию. К настоящему времени

известно около 40 физико-химических методов обработки [1], каждый из которых породил множество способов обработки и технологических систем для их реализации. Для сравнения в табл. 2 сведены данные о достигаемых технологических характеристиках некоторых методов и способов обработки, которые дают представление о их возможностях. К числу наиболее сложных операций механообработки относится обработка отверстий малого диаметра (1 мм и менее), особенно при значительной величине отношения длины отверстия к его диаметру. Для обработки таких отверстий широко применяют физико-химические методы обработки. Информация, приведенная в табл. 1.2, дает представление о технологических возможностях и характеристиках различных методов и способов ФХОМ, используемых в таких технологиях.

Обсудим с учетом данных табл. 1—1.2 некоторые технологические особенности физико-химических методов обработки, определяющие область их целесообразного применения [2, с. 36-40]:

- возможность обработки разнообразных по физико-механическим свойствам материалов без значительного силового воздействия на заготовку. Это позволяет обрабатывать нежесткие изделия или существенно уменьшить соответствующую погрешность обработки, упростить и удешевить элементы оборудования. Так, используя ЭХО или ЛО, удается получать высокоточные детали из фольги, осуществлять маркирование ответственных изделий без силового воздействия на них, обрабатывать заготовки тонкого поперечного сечения типа пера лопатки ГТД;

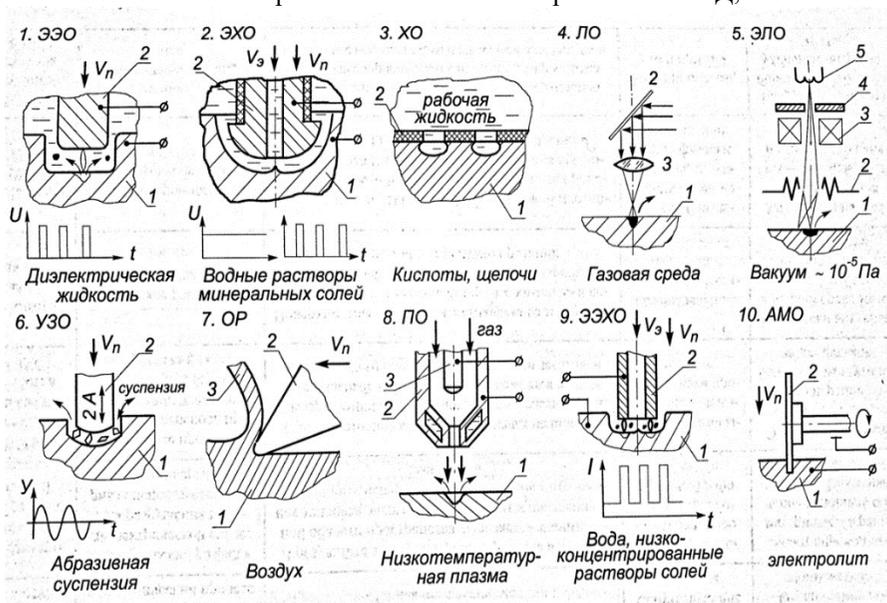


Рис. 1. Схемы реализации различных МО

Таблица 1. *Общая характеристика наиболее распространенных методов обработки*

Метод обработки	Основной физический или химический процесс	Описание механизма	Сопутствующие процессы	Ограничения по применению
1. Электроэрозионная обработка (ЭЭО)	Электрический разряд в диэлектрической среде. Для разрушения материала используется тепловая энергия	В результате электроискрового разряда в локальной области пространства выделяется значительная тепловая энергия, что приводит к плавлению и частичному испарению микрообъемов материала электродов	Износ противоэлектрода, пиролиз углеродсодержащей рабочей смеси	Электропроводные материалы. Ограниченная площадь обработки. Дефектный слой
2. Электрохимическая обработка (ЭХО)	Электродные процессы и процессы переноса при пропускании электрического тока через границу раздела фаз	При достаточно высоких потенциалах начинается электрохимическая реакция анодного растворения, интегральный эффект которой выражается в удалении заданного припуска с поверхности заготовки	Тепло и газовыделение в межэлектродном промежутке	Электропроводные материалы. Проблема регенерации рабочей среды и утилизации шламов
3. Химическая обработка (ХО)	Химическое растворение материала	Поверхностные атомы обрабатываемого материала в зоне контакта взаимодействуют с химически агрессивной рабочей средой и удаляются в объем раствора в виде продуктов реакций	Газовыделение, тепловые эффекты реакций	Химически активные в данной среде материалы. Проблема безопасности жизнедеятельности
4. Лазерная обработка (ЛО)	Нагрев микрообъема материала фокусированным лучом ОКГ	При попадании излучения ОКГ с высокой плотностью мощности на поверхность материала происходит нагрев микрообъема этого материала с последующим плавлением и (или) испарением	Нагрев близлежащих слоев материала, структурно фазовые превращения	Ограничен размер пятна излучения ($\approx 10-100$ мкм). Зона термического влияния
5. Электроннолучевая (ЭЛО)	Нагрев микрообъема материала пучком электронов	Взаимодействие пучка электронов с поверхностью материала сопровождается нагревом микрообъема материала с последующим плавлением и испарением	Те же процессы, что и при ЛО	Вакуумирование рабочей зоны. Высокие энергозатраты

6. Ультразвуковая обработка (УЗО)	Механическое разрушение	Абразивные зерна получают энергию от торца инструмента, колеблющегося с УЗ частотой, внедряются в поверхность материала, производя хрупкое разрушение микрообъемов	Распространение УЗ колебаний в объеме ванны	Хрупкие материалы. Ограниченная площадь и глубина внедрения
7. Обработка резанием (ОР)	Механическое разрушение	Механическое, силовое взаимодействие двух или более тел с различной поверхностной энергией	Силовой, тепловой и электрический эффекты	Сильная зависимость от механических характеристик материала
8. Плазменная обработка (ПО)	Тепловое и газодинамическое воздействие плазменной струи	Низкотемпературная плазма, попадая на поверхность, приводит к нагреву, плавлению, испарению материала	Структурно-фазовые превращения в материале	Зона термического влияния. Качество поверхности
9. Электроэрозионно-химическая (ЭЭХО)	Анодное растворение, электрический разряд в электропроводящей среде	Совместное протекание в пространстве и (или) во времени перечисленных первичных процессов приводит к удалению материала с заготовки	В соответствии с первичными процессами	Ограничения по площади обработки
10. Анодно-Механическая	Анодное растворение, электрический разряд, механическое действие	Комбинированное воздействие сочетаний перечисленных процессов на материал	—	В соответствии с первичными процессами

Таблица 1.1. Технологические возможности некоторых методов и способов обработки

Принятая аббревиатура, наименование и сущность МО. Способ обработки	Рабочая среда	Технологические показатели					Средние удельные затраты	
		Производительность см ³ /мин	Достигаемая точность		Качество ПС (R_{min}, h)		Вт/см ²	Дж/см ³
			Δ , мм	Квалитет	R_a , мкм	h , мкм		
1. ОР. Обработка резанием								
— точение	Воздух	3-300	0,03-0,05	7-14	0,16	20-200	—	2×10^3
— фрезерование	Жидкость	0,15-60	0,05	7-13	0,32	20-70	—	6×10^3
— протягивание	Пары	0,3-30	—	6-9	0,16	5-10	—	2×10^4
— шлифование		0,3-1,8	—	6-9	0,16	1-20	—	6×10^4
2. ЭЭО. Эрозионное разрушение твердых тел в результате электрического разряда	Диэлектрическая жидкость	25	0,04	—	1,25	20-5000	10^4 - 10^6	—

— прошивка отверстий		0,5	0,02	7-8	1,25	20-50	—	10 ⁶
— электроконтактная обдирка валов		500	—	12-14	40-160(R _z)	500-5000	10 ³ -10 ⁸	—
3. УЗРО. Ультразвуковая размерная обработка. Хрупкое абразивное разрушение	Абразивная суспензия	2	0,02	7-9	0,63	1-50	10 ³ -10 ⁴	4×10 ⁶
4. ЭХО. Анодное растворение токопроводящих материалов	Электролиты	25	0,1	—	0,32	—	10 ³ -10 ⁴	—
5. СЛЮ. Светолучевая обработка. Воздействие лазерного излучения на твердое тело	Газ, вакуум	—	0,01	—	5	100	10 ⁶ -10 ⁸	5×10 ⁶
6. ЭЛО. Электроннолучевая обработка	Вакуум	1	0,01	—	5	10-200	10 ⁶ -10 ⁸	5-10 ⁵
7. ПЭО. Разрушение под действием концентрированного теплового потока	Газ, жидкость	500-2000	0.1-0,5	—	160-320(R _z)	500-1000	10 ³ -10 ⁵	—
8. ХО. Химическая обработка. Растворение в агрессивных средах	Кислоты, щелочи	S × 10 ⁻³ , где S площадь	Сохраняется точность заготовки	—	—	—	—	—

Таблица 1.2. Технологические возможности различных методов обработки при получении отверстий малого диаметра

Метод или способ обработки		Технологические показатели				Дефектный измененный поверхностный слой	Рабочая среда	Примечание
		Подача, мм/мин	Шероховатость	Погрешность размера, мм	Отн. износ инструмента			
Механические	УЗАО	1,8	1,25-2,5	0,01-0,02	150	Риски глубиной 0,1 мм, насыщение ПС абразивом	Абразивная суспензия	Плохо обрабатываются вязкие, высокопрочные материалы, сколы, заусенцы, острые кромки
	АС	30-50	20	0,025-0,06	2	Прижоги, наклеп	30% водный раствор кальцинированной соды; эмульсол	После обработки остаются заусенцы и острые кромки
	ОС	<0,5	20-40	0,06-0,1	Стойкость 7-20 мин	Наклеп		

Тепловые	ЭЭО	0,1-0,5	0,63-2,5	0,1	60-120	Оплавленный слой, микротрещины	Техническая и дистиллированная вода	Снижение усталостной прочности детали, острые кромки. Обрабатываются только токопроводящие материалы
	СЛО	0,5	1,25-0,16	0,05-0,1	—	Оплавленный слой, микротрещины	Атмосферный воздух	Конусность и нестабильность диаметра отверстия по глубине. Образование на входной кромке валика застывшего металла
	ЭЛО	0,5	0,08-0,32	0,05-0,1	—	Оплавленный слой, микротрещины	Вакуум 10 ⁻¹ мм. рт. ст.	Конусность и неравномерность диаметра по глубине
	ИЛО	0,5	0,08-0,32	0,05-0,1	—	Оплавленный слой	Вакуум 10 ⁻¹ мм. рт. ст.	Конусность отверстия, зависимость качества поверхности от структуры материала
Электрохимические	ЭХПР	0,5-4	0,32-0,63	0,01..0,3	—	Растравливание по границам зерен. Наводораживание ПС	Растворы минеральных солей	Низкое качество изоляции ЭИ
	ЭХПС	4	0,63-2,5	0,03	—	Растравливание по границам зерен	Растворы минеральных солей	Частые поломки и засорение капиллярной части. Агрессивная РЖ. Давление на входе до 10 МПа, напряжение до 1000 В
Комбинированные	ЭЭХО	40-300	1,25-2,5	0,1-0,2	5-20	Продольные риски глубиной до 0,1 мм	Техническая вода, водные растворы минеральных солей	Двухстадийная обработка для удаления дефектного слоя в режиме ЭХО
	ЭХО + УЗО	4	10-20	0,1	50-70		Водные растворы минеральных солей	
	АС + ЭХО	5-12	0,8-1	0,025-0,06	0,5-2			

- значительно меньше зависимость технологических показателей обработки от физико-механических свойств материала. Возможна обработка закаленных сталей, твердых сплавов, стекла, алмазов, синтетических композиционных материалов, современных керамических материалов, а также изделий из материалов со специфическими свойствами с использованием соответствующего МО;
- технологические возможности новых физико-химических методов обработки шире, чем при обработке резанием или пластическим деформированием.

Так, стала возможной обработка отверстий любого геометрического сечения с криволинейной осью, отверстий диаметром 1-200 мкм, обработка малых отверстий с отношением длины к диаметру более 100, трепанация отверстий и пазов, обработка полостей в труднодоступных местах и другие операции. Это расширяет возможности конструктора при принятии технических решений;

- многие методы ФХОМ характеризуются высокой стойкостью или полным отсутствием износа инструмента. В ряде случаев инструмент в традиционном его понимании вообще отсутствует (бесконтактная обработка).

Наряду с изложенными достоинствами, физико-химические МО обладают специфическими недостатками, сдерживающими их распространение. К числу таких общих недостатков следует отнести следующие:

- специфические требования к организации производства с точки зрения безопасной жизнедеятельности, охраны окружающей среды, культуры производства заставляют при внедрении соответствующих технологий затрачивать дополнительные средства для оснащения производства специальными помещениями, эффективными очистными сооружениями, средствами регенерации рабочих сред, утилизации отходов;
- повышенная энергоемкость соответствующих технологий по отношению к традиционным при прочих равных условиях характеризуется данными, приведенными в табл. 1.3.

Таблица 1.3. Сравнительные значения показателей энергопотребления

Метод обработки	Удельный расход энергии, кВт ч/кг	Мощность оборудования, кВт	КПД преобразователя энергии	Сопоставление с обработкой резанием
ЭЗО	7-50	1-100	0,1-0,6	Заметно выше
ЭХРО	8-30	1-120	0,6-0,9	Заметно выше
УЗО	25-250	0,1-25	0,2-0,4	Заметно выше
СЛО	250-2000	0,5-5	0,02-0,2	Значительно выше

- высокая стоимость оборудования ведущих фирм. Отечественное станкостроение практически не производит в настоящее время конкурентоспособную продукцию. Поэтому всяческой поддержки заслуживает практика передовых заводов авиадвигателестроения, производящих подобное оборудование своими силами и добившихся на этом пути значительных

успехов. Это прежде всего Казанский, Пермский и Самарский моторостроительные заводы, ММПО «Салют».

В связи со сказанным можно сформулировать общие требования к области применения физико-химических методов обработки в машиностроении: такое применение тем выгоднее, чем сложнее форма изделия, тверже обрабатываемый материал и хуже его обрабатываемость резанием. Эти положения иллюстрируются данными, представленными в табл. 1.4. [3, с. 29-55]

Выше рассмотрены достаточно общие свойства методов ФХОМ. Однако каждый из них обладает собственными специфическими свойствами. Так, уникальной особенностью ЭХО является наблюдаемая в широком диапазоне режимов обработки прямая зависимость между производительностью и качеством поверхностного слоя, спонтанное скругление острых кромок в процессе обработки, наличие необработанного конуса на дне глухого прошитого отверстия.

Таблица 1.4. Целесообразность использования ФХОМ вместо обработки резанием

Метод обработки	Степень сложности изделия							
	Особо сложная		Сложная		Средней сложности		Простая	
	Твердость материала изделия							
	Высокая	Низкая	Высокая	Низкая	Высокая	Низкая	Высокая	Низкая
1. ЭЭО	4-5	2-3	3-1	2-3	2-3	2-3	3	2-3
2. ЭХО	4-5	3-1	3-4	3	3-1	3	3-1	1-2
3. УЗО	3-5	2-3	3-1	2	3	2	3	2

Обозначения: 1 – совершенно нецелесообразно, 2 – недостаточно выгодно, 3 – выгодно, 4 – безусловно выгодно, 5 – только ФХОМ.

Суммируя опыт применения ФХОМ в машиностроительном производстве, можно выделить наиболее общие тенденции развития этих методов:

- плотность энергии, подводимой к поверхности заготовки, постоянно растет, а съем металла все более локализуется. Рассмотрим в связи со сказанным, как развивались методы теплового воздействия на материал по данным табл. 1.5. Как видно, все более значительная тепловая энергия локализуется на все меньшей площади поверхности;

Таблица 1.5. Сравнительная характеристика некоторых методов теплового воздействия

Источник тепла	Площадь пятна, см ²	Плотность энергии, Дж/см ²	Температура в пятне, °С
Газовая горелка	10 ⁻²	10 ⁴	3×10 ³
Электрический разряд	10 ⁻³	10 ⁵	6×10 ³
Электронный луч	10 ⁻⁷	10 ⁷	10 ⁵
Лазерный луч	10 ⁻⁷	10 ⁸	10 ⁶

- в рамках технологических возможностей МО формируются способы и технологии на их основе, предназначенные либо для интенсивного съема

припуска с относительно низким качеством поверхностного слоя (черновая обработка) либо для высокоточного изготовления деталей с относительно низкой производительностью (чистовая обработка);

- наиболее быстро развиваются и совершенствуются комбинированные МО, объединяющие два или более различных физико-химических воздействия на объект.

Литература:

1. ПОПИЛОВ Д.Я. *Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов*: Справочник. Москва, издательство "Машиностроение", 400с., 1982.
2. САУШКИН Б.П., МОРГУНОВ Ю.А. *Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей*. Москва: Дрофа, 655 с., 2002.
3. ШАНДРОВ Б.В. *Физико-химические методы обработки*. Москва 100 с., 2006.