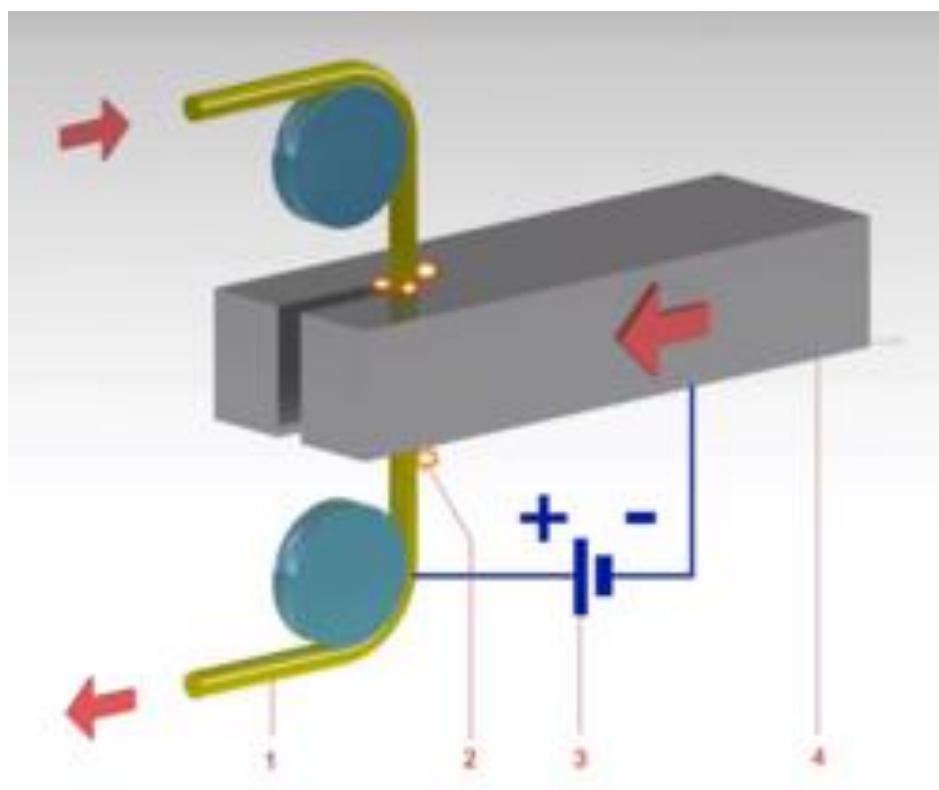


КАЛИН ВЛАДИМИРОВ АНАСТАСОВ

НЕКОНВЕНЦИОНАЛНИ ИНДУСТРИАЛНИ ТЕХНОЛОГИИ



КАЛИН ВЛАДИМИРОВ АНАСТАСОВ

***НЕКОНВЕНЦИОНАЛНИ
ИНДУСТРИАЛНИ ТЕХНОЛОГИИ***



УНИВЕРСИТЕТСКО ИЗДАТЕЛСТВО
“ВАСИЛ АПРИЛОВ”
ГАБРОВО, 2026

В учебника са разгледани физичните основи и технологичните особености на неконвенционалните методи и технологии, за обработване повърхнините на детайлите. Тези методи и процеси все по-успешно разширяват и утвърждават областта на ефективното си приложение в производството на съвременни машини, уреди, съоръжения, инструменти.

Информацията от учебника има за цел да обогати и задълбочи познанията на студентите в областта на неконвенционалните (електрофизични и електрохимични) технологии. По-конкретното запознаване с физичната същност и характеристика на процесите, с влиянието на основните технологичните фактори върху качествените показатели, с технологичните им възможности и особеностите на използваните съоръжения е необходимо условие за възприемането на целесъобразни решения при разработването на неконвенционални технологии в различни отрасли на индустрията.

Учебникът е предназначен за обучение по дисциплината *“Неконвенционални технологии в машиностроенето”* за образователно-квалификационната степен *“бакалавър”* по специалността *“Машиностроителна техника и технологии”*, дисциплината *„Електрофизични и електрохимични методи за обработване”* за образователно-квалификационната степен *“бакалавър”* по специалността *“Индустриален мениджмънт”* и по дисциплината *“Неконвенционални методи за обработване на материалите ”* за образователно-квалификационната степен *“бакалавър”* по специалността *“Технология на машиностроителните материали”*, но може да бъде полезен и на студентите от другите специалности на професионални направления *“Общо инженерство”* и *“Машино инженерство”*, както и на инженерите технолози в практиката.

Автор: гл. ас. д-р инж. Калин Анастасов

Рецензент: доц. д-р инж. Иван Амуджев

Университетско издателство „Васил Априлов“, 2026

ISBN: 978-954-683-751-6

СЪДЪРЖАНИЕ

ВЪВЕДЕНИЕ	5
Глава първа - ОСНОВНИ ПОНЯТИЯ, ОБЛАСТ НА ПРИЛОЖЕНИЕ И КЛАСИФИКАЦИЯ НА ВИСОКОЕФЕКТИВНИТЕ МЕТОДИ ЗА ОБРАБОТКА	7
1.1 Обща класификация на технологичните процеси и методи	7
1.2 Класификация на неконвенционалните процеси и методи	10
1.3 Технологични процеси и методи за обемно формообразуване	15
Глава втора – ВИСОКОЕФЕКТИВНИ МЕТОДИ ЗА ОБРАБОТКА НА МАТЕРИАЛИ, ОСНОВАНИ НА ПРЯКОТО ИЗПОЛЗВАНЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ	25
2.1 ЕЛЕКТРОХИМИЧНА ОБРАБОТКА	25
2.1.1. Механизъм и закономерности на формообразуването	25
2.1.2. Типични технологични операции при електрохимичната обработка	32
2.1.3. Оборудване за електрохимично маркиране	34
2.1.4. Оборудване за електрохимично отстраняване на грапавини	36
2.1.5 Оборудване за електрохимично обемно копиране	38
2.1.6 Оборудване за електрохимично пробиване на отвори	41
2.1.7 Оборудване за електрохимично полиране	47
2.2 ЕЛЕКТРОЕРОЗИОННА ОБРАБОТКА	45
2.2.1 Процес на електроерозионната обработка	45
2.2.2 Технологични схеми за електроерозионна обработка	49
2.2.3 Оборудване за процеса на електроерозионно пробиване	51
2.2.4 Оборудване за процеса на електроерозионно шлифоване	54
2.3 ЕЛЕКТРОКОНТАКТНА ОБРАБОТКА	60
2.3.1 Примери за практическо приложение на електроконтактна обработка	62
2.3.1.1 Електроконтактно рязане	62
2.3.2 Оборудване за електроконтактно рязане	62
2.3.3 Оборудване за електроконтактно шлифоване	64
2.3.4 Оборудване за електроерозионна обработка с къса дъга	65

2.4 АНОДНО – МЕХАНИЧНА ОБРАБОТКА	67
2.4.1 Анодно – абразивна обработка.....	67
2.4.2 Оборудване за провеждане на анодно – механично/абразивно илифование.....	70
2.4.3 Оборудване за отстраняване на усенъци и закръгляне на остри ръбове.....	72
 Глава трета – ВИСОКОЕФЕКТИВНИ МЕТОДИ ЗА ОБРАБОТКА НА МАТЕРИАЛИ, ОСНОВАНИ НА ИЗПОЛЗВАНЕТО НЕЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ	74
 3.1 ЛЪЧЕВИ ВИДОВЕ ОБРАБОТКИ	74
3.1.1 Светлинна(лазерна) обработка.....	74
3.1.2 Оборудване за лазерно рязане.....	78
3.1.3 Оборудване за извършване на операции за лазерно пробиване.....	81
3.1.4 Оборудване за лазерно заваряване.....	83
3.1.5 Оборудване за електронно – лъчева обработка.....	87
 3.2 ПЛАЗМЕНИ ВИДОВЕ ОБРАБОТКИ	88
3.2.1 Технологични възможности на плазмената обработка.....	88
3.2.2 Технологични схеми за плазмена обработка.....	90
3.2.3 Оборудване за плазмено заваряване.....	93
3.2.4 Оборудване за плазмено напластяване.....	95
3.2.5 Оборудване за плазмено нанасяне.....	97
 3.3 УЛТРАЗВУКОВА ОБРАБОТКА	99
3.3.1 Технологични възможности на ултразвуковата обработка.....	100
3.3.2 Оборудване за провеждане на ултразвукова обработка.....	102
 3.4 ХИДРОАБРАЗИВНА ОБРАБОТКА	105
3.4.1 Общи сведения за хидроабразивната обработка.....	105
3.4.2 Технологични възможности на хидроабразивната обработка.....	106
3.4.3 Области на приложение на хидроабразивната обработка.....	109
3.4.4 Оборудване за хидроабразивна обработка.....	110
 ЗАКЛЮЧЕНИЕ	113
 ЛИТЕРАТУРА	114

ВЪВЕДЕНИЕ

Широкото използване в машиностроенето на материали с особени физико-механични характеристики, които обуславят лошата им обработваемост с традиционни методи за рязане, изработването на детайли със сложни форми, повишени изисквания към качеството на повърхностния слой и точността на изработката, както и необходимостта от намаляване на себестойността на обработката и повишаване на производителността на труда, доведоха до появата и широкото разпространение в производството на електрофизични и електрохимични методи за обработка (ЕФХО) и на базираните на тези методи технологични процеси.

В групата на ЕФХО методите за обработка се включват онези технологични методи за обработка на заготовки, при които енергийното въздействие върху заготовката се осъществява не чрез традиционните методи на рязане, обработка чрез пластична деформация, термична и химическа обработка, а чрез други видове въздействие или комбинация от няколко от тях [2, 6, 13, 14, 16, 18]. Към тези иновативни видове енергийно въздействие се отнасят електрическото, електрохимичното въздействие и въздействието с потоци от микрочастици.

Електрофизичните и електрохимичните методи и технологии понастоящем се прилагат на всички етапи от производството на детайли, започвайки от получаването на заготовки и завършвайки с тяхната довършителна обработка. Въз основа на използването на технологиите от тази група в производството се решават уникални технологични задачи, осигуряващи зададеното отстраняване, преместване или нарастване (голямо или малко) на обема на материала на заготовката. Много от методите на ЕФХО позволяват обработката на материали с толкова високи характеристики на якост, чиято обработка с традиционно използваните методи за рязане е невъзможна. Използването на методите за обработка и технологиите от група ЕФХО позволява изработването на детайли със сложна форма, както и обработката на повърхности в труднодостъпни места, което при използването на конвенционалните методи за обработване изисква значителни икономически и времеви разходи. Прилагането в такива случаи на методи и технологии от групата ЕФХО дава неоспорими предимства по отношение на технико-икономическите показатели при производството на детайли. Към такива повърхности се отнасят, например, отвори и канали с изключително малки размери, измервани в микрометри.

Технологичните методи от групата ЕФХО се характеризират основно с липсата на силово взаимодействие между инструмента и обработваната заготовка. Това дава възможност за изработване на сложни детайли с високи показатели за точност. Като правило, при прилагането на методите от групата ЕФХО не се изисква създаването на сложни взаимни премествания на инструмента и заготовката, което значително опростява конструкцията на технологичното оборудване и приспособленията и улеснява автоматизацията на технологичния процес. При това в много случаи обработващият инструмент се изработва от обикновени конструкционни материали, а това позволява създаването на инструмент със сложна форма при ниска стойност. Следва да се отбележат особено широките възможности за използване на методите от групата ЕФХО за нанасяне на покрития върху повърхностите на заготовките и по този начин модифициране на повърхностните им слоеве [1, 3, 17, 20]. Тези методи осигуряват възможност за нанасяне от една страна, на тънкослойни покрития, а от друга страна, на напластяване на материали с голяма дебелина на слоя, нанасяне на покрития с различно функционално предназначение.

При изключително широките възможности на цялата разглеждана група конкретните ЕФХО технологии по области на приложение, като правило, са по-ограничени, а изискванията към точността на параметрите на технологичния процес са по-тесни и строги, отколкото технологиите, използващи методи за механична обработка. Много технологии на ЕФХО са изключително енергоемки, изискват специални условия за тяхното осъществяване и се характеризират с повишени изисквания към техниката на безопасност и утилизацията на технологичните отпадъци от производството. Освен това някои процеси, протичащи при тяхното прилагане, все още не са достатъчно проучени, а в редица случаи липсват ясно определени структура на технологичния процес, съдържание на отделните операции и режими на обработка, осигуряващи изискваното качество на повърхността и точността на обработката.

Глава 1. ОСНОВНИ ПОНЯТИЯ, ОБЛАСТ НА ПРИЛОЖЕНИЕ И КЛАСИФИКАЦИЯ НА ВИСОКОЕФЕКТИВНИТЕ МЕТОДИ ЗА ОБРАБОТКА

1.1. Обща класификация на технологичните процеси и методи

Промяната на геометрията на всеки детайл е свързана с промяна на формата и размерите, докато при по-сложните изделия – и на модулната функционална структура.

Формообразуването (първично формообразуване) обхваща голяма група от технологични процеси, при които материалът преминава от безформено съществуване към устойчива форма – твърдо тяло, което става носител на служебното предназначение [1, 2, 3, 8, 12].

От физичните методи на формообразуване най-популярни са: леенето – формообразуването от течено състояние на материала; екструзията и пресоването – формообразуването от вискозностечно и вискозноеластично състояние на материала; синтероването – формообразуването от прахообразна форма на материала.

Химичните методи са представени чрез: галванопластиката – формообразуването от йонно състояние; обемната литография – формообразуването от послойно омрежване на мономери или олигомери; обемното послойно изграждане – формообразуването чрез отлагане и епитаксия от пареообразно състояние. Произвеждат се заготовки (полуфабрикати) и готови изделия от метали и сплави, метални оксиди, полимери и полимерни материали (пластмаси), керамика и стъкло.

Формоизменението (вторично формообразуване) е представено от следните три големи групи от технологични процеси и методи:

➤ Първата група обхваща технологическите процеси и методи на формоизменение чрез пластична деформация, при която материалът на заготовката тече под действието на температура и налягане (гореща пластична деформация) или само на налягане (студена пластична деформация) и заема определената му форма (коване, шамповане, валцоване, пресоване). Произвеждат се заготовки и готови изделия чрез сгъване, изтегляне, формуване, усукване, повиване, навиване и намотаване;

➤ Втората група обхваща процеси и методи на формоизменение чрез: разделяне на части (рязане, изрязване, отрязване, срязване,

разкрояване), като изходната заготовка се разделя на части, представляващи отделни заготовки, завършени изделия и отпадъчен материал; отнемане на малки части (рязане със стружка, рязане чрез ерозия) от материала.

Използват се различни по вид технологични процеси на разделяне:

- термични процеси на газово-лазерно рязане, плазмено рязане, електроразрядно дъгово рязане, електроннолъчево рязане, газоворазрядно рязане; механични процеси на рязане с гилотини, ролки, профилни ножове и ножици, механично рязане с течна струя и абразивни зърна и крехко счупване; електрохимични процеси на рязане и разкрояване. Произвеждат се заготовки, полуфабрикати и готови изделия;

Отнемането на части от материала се извършва по различен начин:

- чрез непрекъснато образуване и отнемане на стружка от инструменти с дефиниран режещ клин – рязане на материалите; чрез образуване на финни стружки от множество остриета (недефиниран режещ клин) на абразивни частици – абразивно обработване; чрез локална термична ерозия – електроерозионно, лазерно, електроннолъчево и плазмено размерно обработване. Произвеждат се завършени изделия.

➤ Трета група обхваща процеси и методи на формоизменение чрез:

- свързване (съединяване) или сглобяване на отделните части или компоненти в едно цяло чрез: механични скрепителни елементи (винтове, болтове, шпилки), еластично-пластична деформация (пресоване, студено заваряване), заваряване, запояване, залепване.

- прибавяне на малки обеми от материал до образуването на едно цяло чрез: наваряване, електрошлаково възстановяване, плазмено напластяване, галванопластика, обемна литография.

Много често процесите на формообразуване и формоизменение се наричат размерни процеси на обработване на материалите. Употребяват се по аналогия и понятията размерообразуване и размероизменение.

От една страна формата и размерите на едно тяло могат да се променят независимо, така например формата може да бъде запазена при обработването (например цилиндърът си остава цилиндър), но размерът (дължината и/или диаметърът) се променя. Това обяснява възникването на понятията формообразуване и размерообразуване. На практика обаче най-

често се променят формата и размерите, поради което в този случай се говори общо за формообразуване.

От друга страна границата между размерното и неразмерното обработване е относителна (промяната на диаметъра с няколко микрометра при нанасяне на покритие върху една повърхнина остава в границите на допусковото поле на отклоненията и тази технология се явява неразмерна). Нанасянето на покрития със същата дебелина в условията на планарната технология (за производството на полупроводникови компоненти) се явява размерна технология, тъй като размерите на създаваната структура са от същия порядък.

Описаните групи от технологични процеси и методи се отнасят предимно до образуването или промяната на обемно твърдо тяло, т.е. това са обемните технологии, свързани с формообразуването.

Редно е да се създадат нови групи на формообразуване в общата класификация на процесите и методите, тъй като в съществуващата класификация (DIN 8580) се включват само две групи на повърхнинните технологии – технологии на покритията и технологиите на почистването.

Повърхнинните технологични процеси и методи обхващат [8,12]:

➤ Първа група – процеси и методи на формообразуване чрез нанасянето или проникването на материала и образуването на покритие или на слой (тънък или дебел). Включват процеси при които материалът се нанася (отлага) непосредствено върху повърхнината – боядисването, лакирането, електрофорезата, галваностегията, изпаряването и разпрашването, плазмената полемизация, повърхнинната съполимеризация или графтингът. Включват се още процеси при които материалът прониква (внася се) чрез дифузия в повърхностния слой - разпрашването, платирането, йонното нанасяне на тънки слоеве, лазерното претопяване (на повърхностния слой заедно с нанесено покритие), легирането, термообработването. Включват се и процеси, при които новия материал се образува (по химичен път) непосредствено върху повърхността, като се използват атомни и молекулни потоци във висок и свръхвисок вакуум или в обема на повърхностния слой – йонно имплантиране, термична дифузия.

➤ Втора група – процеси и методи на повърхнинно формообразуване чрез повърхностно пластично деформиране.

Тук спадат процесите на довършващото обработване чрез неподвижни или търкалящи се деформиращи тела (ролки, сфери), накатаването, калиброването, струйното обработване, вибрационното пластично деформиране.

➤ Трета група – процеси и методи на повърхнинно формообразуване чрез разрушаване (разяждане, ецване) на повърхнината и отнемане на материал. Тук попадат механичните процеси на шлифование, полиране, свръхзаглаждане, претриване; химичните и електрохимичните процеси на разяждане и полиране; плазменохимичните процеси на разяждане; йонноплазмените и йонните процеси на разпрашване.

➤ Четвърта група – процеси и методи на повърхнинно почистване и подготовка на повърхнините (неразмерни технологии за отстраняване на чужди примеси и замърсявания). Различават се процеси и методи на грубо почистване (механично, химично и ултразвуково), на фино или електрохимично почистване (обезмасляване, байцване и декапиране) и вакуумно почистване (йонно, йонно-плазмено разпрашване).

Така описаната обща класификация на технологичните процес и методи обхваща осем групи процеси и методи на формообразуване и размерообразуване – четири обемни и четири повърхнинни.

Изградената по този начин обща класификация позволява да се систематизират характерните за машиностроението технологични методи и процеси, да се разкрие общото в тях, да се улесни изучаването им или запознаването с тях.

1.2. Класификация на неконвенционалните процеси и методи

Голямото разнообразие на електрофизичните и електрохимичните процеси за обработването на материалите по вида и характеристиката на енергийните въздействия и работната среда, както и по технологичните им възможности, затруднява изграждането на единна класификация по един отделен признак, определящ еднозначно мястото на всеки процес сред останалите, а също и на тяхната взаимна връзка. Например при доразвитие на общата класификация на методите и процесите за изработване на детайлите, изградена въз основа на технологичното им предназначение, се получава твърде сложна и преплитаща се схема, тъй като един и същ процес или метод се използва както при подготовка на заготовките, така и при

изработването на повърхнините, а също и при окончателното обработване, свързано със заключителните процеси.

Една първична класификация на неконвенционалните (електрофизични и електрохимични) процеси и методи и разновидностите им, може да се направи, ако те се групират по признака основно въздействаща (преобразувана) енергия върху материала и вида на въвежданата енергия (електрическа, електромагнитна, акустична и др.) в работната зона. Вследствие на това се оформят три групи електротехнологии съдържащи: електрохимически методи за обработване и разновидностите им (използва се химическото въздействие на електрическия ток); електрофизическите методи за обработване и разновидностите им (използва се топлинното въздействие на електрическия ток, механичното му въздействие или електромагнитното му поле); комбинирани методи за обработване и разновидностите им (използва се съчетаване на различни въздействия на тока с различни процеси на механично обработване) (Фиг. 1). При използване на такъв класификационен признак се формират следните подкласове [6]:

1. Процеси и методи, основани на топлинното енергийно въздействие с висока интензивност на въвежданата електрическа или електромагнитна енергия (електроерозионно, лазерно и електроннолъчево обработване, обработване с нискотемпературна плазма и техни разновидности).

Електрическият разряд, потокът от фотони или електрони, плазмената струя се разглеждат като концентриран поток от енергия с висока плътност на мощността, взаимодействащ с повърхностния слой от материала на заготовката, формирайки интензивен повърхностен източник на топлина [3, 18]. При достигане на характерна за отделните видове материали прагова плътност на мощността в зоната на въздействието се осъществява активно топене и изпаряване на материала, което е в основата на разнообразните технологични приложения.

2. Процеси и методи, основани на механичното и импулсно-механичното въздействие на електрическата, електромагнитна или акустична енергия, непосредствено въведени или преобразувани в зоната на въздействие (ултразвуково, електроимпулсно, магнитноимпулсно, магнитноабразивно обработване и техните разновидности).

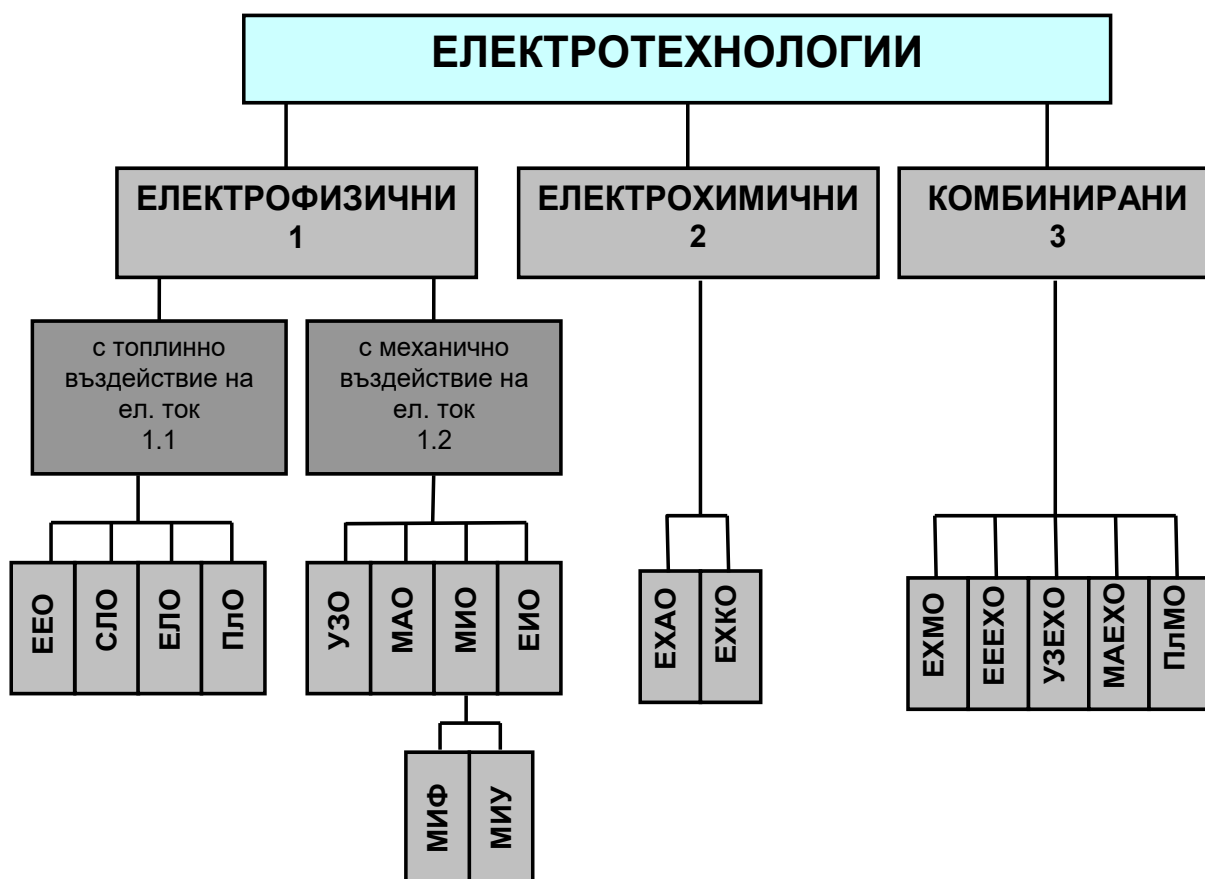
В основата на разнообразните технологични приложения (размерно обработване, пластично деформиране, почистване, запояване и т.н.) на този подклас стоят механичните въздействия с относително високи параметри (интензивност, честота, налягане, скорост и др.), които пряко или посредством подходяща работна среда се упражняват върху материала на заготовката, осъществявайки съответните технологични ефекти.

3. Процеси и методи, основани на химичното действие на електрически ток (електрохимично размерно обработване, електрохимично заглаждане и полиране, електрохимично почистване, електрохимично напластяване и т.н.).

Разнообразните технологични приложения са изградени върху анодното разтваряне на металите и сплавите, а също и на отлагането им върху катода в случаите на напластяване при преминаването на електрически ток със сравнително висока плътност през електролит с подходяща характеристика.

4. Процеси и методи, основани на комбинираното въздействие с различни видове енергии (електрохимико-механично, електроерозионно-електрохимично, плазмено-механично, ултразвуково-електрохимично, магнитноабразивно-електрохимично и други комбинирани процеси, както и техните разновидности).

В тяхната основа лежи възможността за облекчено съчетаване на главните (доминиращите) въздействия на електрофизичните и електрохимичните процеси помежду им, както и с различни процеси за механично обработване, предизвикващо многократното нарастване на технологични ефекти.



Фиг.1. Класификационна схема на електротехнологиите

(ЕЕО – електроерозионно обработване; СЛО – светлиннолъчево обработване; ЕЛО – електроннолъчево обработване; ПЛО – плазменно обработване; УЗО – ултразвуково обработване; МАО – магнитоабразивно обработване; МИО – магнитоимпулсно обработване; МИФ – магнитоимпулсно формообразуване; МИУ – магнитоимпулсно уякчаване; ЕИО – електроимпулсно обработване; ЕХАО – електрохимично анодно обработване; ЕХКО – електрохимично катодно отлагане; ЕХМО – електрохимично – механично обработване; ЕЕЕХО – електроерозионно – електрохимично обработване; УЗЕХО – ултразвуково – електрохимично обработване; МАЕХО – магнитоабразивно – електрохимично обработване; ПЛМО – плазменно – механично обработване)

Изложената класификация се отличава с простота и стройност, като облекчава разкриването на същността, физичните особености и технологични характеристики на процесите в рамките на всеки подклас, както и обосноваването на възприеманите решения. С нея е съобразено и подреждането на материала в учебника.

Електрофизичните и електрохимичните процеси и методи могат да бъдат групирани и по други характерни признаци, които имат подчертана технологична насоченост, а именно:

- според наличието или отсъствието на контакт между инструмента и заготовката, методите се разделят на контактни (електроконтактни, електроабразивни, магнитоабразивни) и безконтактни (лазерни, електрохимични, плазмени и др.) [2, 6];

- според предизвикания технологичен резултат от въздействието, методите биват - за размерно обработване (предизвикващи промяна на формата и размерите на повърхнините на заготовката), или за неразмерно обработване (предизвикващи такава промяна в границите на точността на заготовката - нанасяне на тънкослойни покрития, термообработване, йонно азотиране и т.н.);

- според начина за постигане на технологичен резултат, по който процесите и методите се подразделят на осъществявани с отнемане, без отнемане и с прибавяне на материал.

Допълнително разгледаните класификационни признаци позволяват подходящото групиране на процесите и методите в съответните по-долни класификационни нива и изграждането на цялостна класификационна схема, която пълно обхваща електрофизичните и електрохимичните процеси и методи, като сравнително ясно ги разграничава и определя тяхната взаимна връзка.

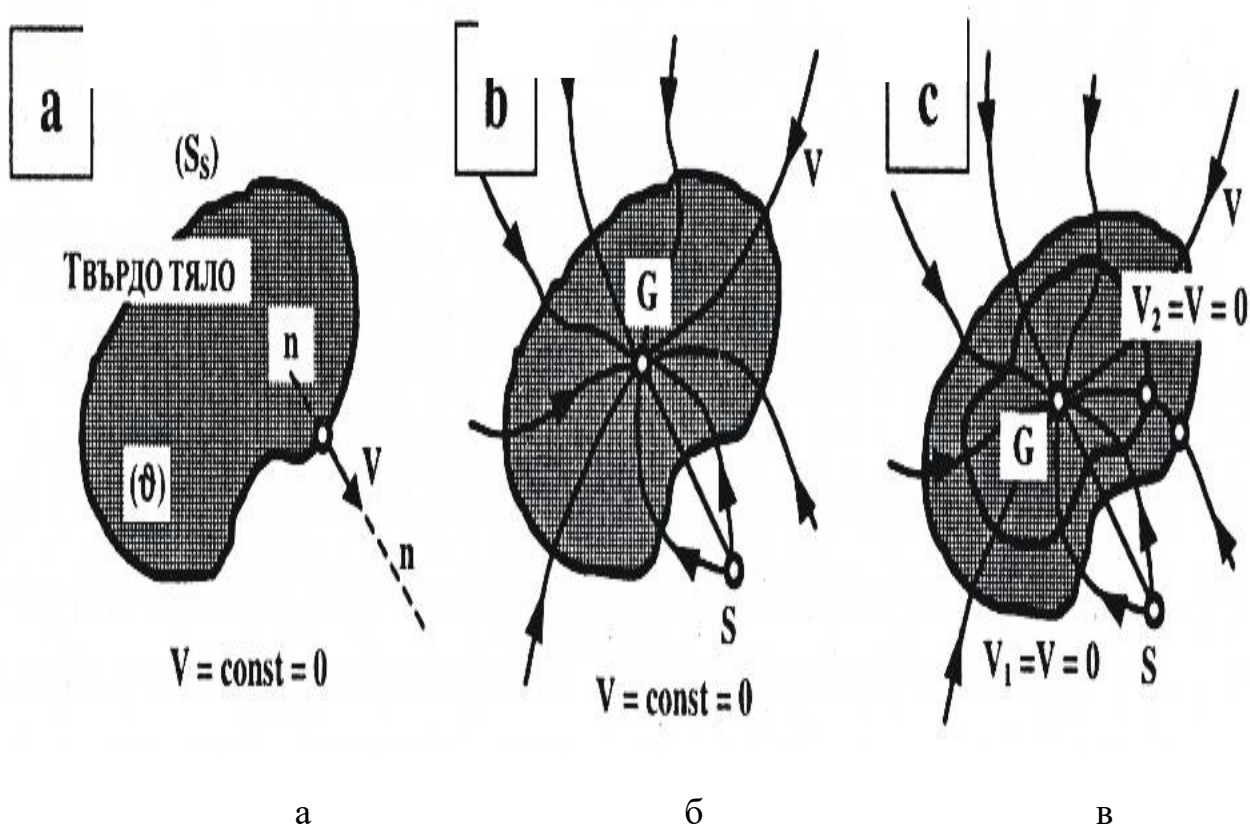
Електрофизичните и електрохимичните технологии поради големите си технологически възможности имат твърде широко разпространение, като завоюват все по-нови области, в които се утвърждават. Същевременно не бива да се смята, че те ще изместят напълно конвенционалните методи за обработване, които са доказали своите качества и непрекъснато се усъвършенстват. Основните области, в които електрофизичните и електрохимичните процеси са утвърдили своето ефективно използване, са енергомашиностроенето, уредостроенето, електрониката, инструменталното производство и т.н. Успешно се използват и при осъществяването на редица технологични операции в общото машиностроене.

1.3. Технологични процеси и методи на обемно формообразуване

Всеки детайл (прост или сложен по форма), представлява твърдо тяло, характеризиращо се със специфичния и неповторим начин, по който се съчетават в него реалните геометрични повърхнини (фиг. 2).

Реалните (физичните) повърхнини се различават от геометричните (идеалните) повърхнини по това, че:

- притежават определени физични и химични свойства;
- не притежават идеалната геометрична форма и размери, т.е. съществуват отклонения на формите (от равнинност, от цилиндричност, от сферичност), отклонения във взаимното разположение на повърхнините и отклонения на размерите;
- грапави са и в определена степен са вълнообразни.



Фиг. 2. Твърдо тяло – детайл или заготовка (а), произвеждаща система от направляващи градиентни линии (б) и произвеждаща система от образуващи повърхнини на еднаква скорост на формообразуване (в)

Материалът на изделието определя физичните и химичните свойства на реалните повърхнини или т.н. повърхнинни свойства на изделието.

Технологичните методи на изработване от своя страна определят грапавостта, вълнообразността, отклоненията от идеалната форма, отклоненията във взаимното разположение на повърхнините и отклоненията от номиналните размери, които са характерни за реалните повърхнини.

Изучаването на формообразуването се абстрахира от материалните свойства на повърхнината и от нейните отклонения, т.е. разглеждат се само идеалните геометрични повърхнини и тяхното преобразуване в процеса на формообразуването.

Изделието се характеризира (или описва) от затворената гранична повърхнина S_s , която отделя неговия обем V от околната среда (фиг. 2).

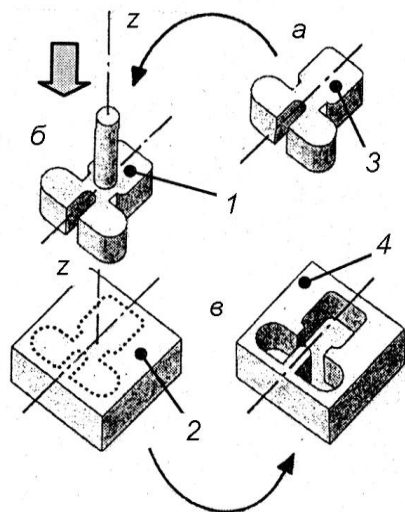
Съгласно теорията на Волков – Лившиц – Картър (ВЛК – теория), геометричната форма и нейната промяна се характеризират чрез:

- произвеждащата система от направляващи линии, които при изпъкнала повърхнина излизат от един източник S , при вдлъбната повърхнина влизат в един сток G , а на достатъчно голямо разстояние от източника или стока те представляват система от успоредни линии, като тя е една и съща и за заготовката (или инструмента), и за детайла;

- произвеждащата система от образуващи повърхнини на еднаква скорост на движение по направляващите линии ($V_n = \text{const}$: изоповърхнини), които винаги остават нормално разположени към тях във всяка точка на обработване;

- мащабното преобразуване на образуващата повърхнина на заготовката (или на инструмента) в нова образуваща повърхнина – повърхнината на детайла, като и двете образуващи повърхнини се характеризират с $V_n = 0$;

- технологичния процес на формообразуване, който представлява мащабно преобразуване, започващо от образуващата повърхнина на заготовката ($t_0 = 0 : V_n = 0$) и завършващо върху образуващата повърхнина на детайла ($t = t_s : V_n = 0$), като по време на самото преобразуване скоростта на движение по направляващите линии е различна от нула ($t_0 < t < t_s : V_n \neq 0$) т.е. между двете



Фиг.3. Формообразуване
чрез отпечатване: а - негативен профил на
повърхнината – работната повърхнина на
инструмента; б – формообразуване чрез
вдълбаване и отпечатване;
в – отпечатък върху заготовката;

гранични повърхнини се вписва множество от мащабно променени образуващи повърхнини, които се характеризират с различна моментна скорост на движение ($V_n = \text{const}$).

Изменението на скоростта на формообразуване може да бъде непрекъснато, импулсно или пулсиращо. Различават се стационарен, ($t_s > t > 0 : V_n \neq 0 = \text{const}$) и нестационарен ($t_s > t > 0 : V_n \neq \text{const}$) режими на формообразуване.

Процесът на формоизменение (формообразуване) представлява преобразуването на геометрията (на формата и размерите) на заготовката в геометрия на детайла. Взаимодействат си твърдо тяло (заготовка) с твърдо тяло (инструмент), което преобразува формата и размерите на заготовката. Инструментът не търпи съществена промяна в резултат на взаимодействието.

Взаимодействието между инструмента и заготовката може да бъде представено чрез три характерни случая на геометрична трансформация:

- взаимодействието без навлизане на инструмента в обема на заготовката т. н. външно (или вътрешно) обработване, при което формата на инструмента няма нищо общо с формата на изделиято;

- взаимодействието чрез вдълбаване (навлизане, проникване) на инструмента в обема на заготовката или т.н. отпечатване (копиране, вдълбаване, оставяне на следа или отпечатък), при което инструментът отпечатва огледално произвеждащата образуваща повърхнина като се получава негативен

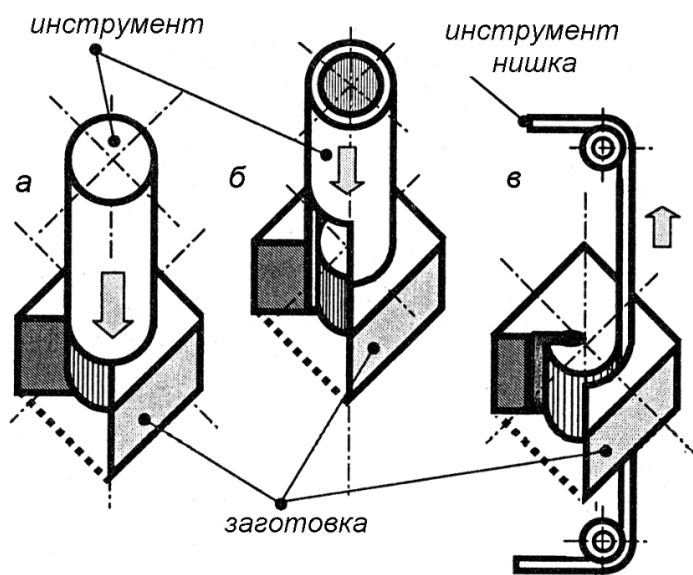
отпечатък (релеф, вдлъбнатина) с различна дълбочина – от инструмента върху заготовката (фиг. 5);

- взаимодействието, при което инструментът пронизва обема на заготовката, т.н. пробиване или изрязване (отрязване, разрязване, прорязване, разкрояване). При пробиването се получава отвор с формата на напречното сечение на профилирания инструмент, докато при изрязването – отвор и изрязано изделие или отпадък, като се работи с профилиран или непрофилиран инструмент (фиг. 4).

В съответствие с общия модел на формообразуване в случая на отпечатване условията за произвеждане на исканата форма са:

- да съществува една и съща произвеждаща система от направляващи линии за заготовката и за детайла;

- произвеждащата образуваща повърхнина на инструмента ($t_s > t > 0 : V_n = 0$) да бъде отворена повърхнина, която представлява също негативен профил на образуващата повърхнина на детайла – образуваща повърхнина, която се отпечатва върху заготовката чрез: пластично деформиране или локално разрушаване чрез механична или термична ерозия или електрохимично разтваряне на материала.



Фиг. 4. Пробиване на отвор чрез отпечатване (а), чрез изрязване с профилиран (б) и непрофилиран инструмент (в)

Всички точки от работната повърхнина на инструмента са неподвижно свързани помежду си, тъй като са точки от едно материално тяло и се движат

заедно по паралелни произвеждащи направляващи линии с еднаква скорост $V_1 = V_2 = \dots V_i = V_n$ равна на линейната (при праволинейно движение) или на ъгловата (при криволинейно движение) скорост на вдълбаване на инструмента.

Формообразуването чрез отпечатване на образуващата повърхнина има едно основно предимство – простото движение и управление на инструмента и един съществен недостатък – сложният за изработване инструмент, който носи негативния профил на действителната повърхнина на изделието – т.н. профилиран инструмент.

Инструментът най-често се движи по една единствена координатна ос Z, управляван от следяща система (с обратна връзка) при постоянна линейна или ъглова скорост. и контактно формообразуване чрез пластично деформиране) или при постоянна работна хлабина (при безконтактно формообразуване чрез ерозия или анодно разтваряне) между инструмента и заготовката.

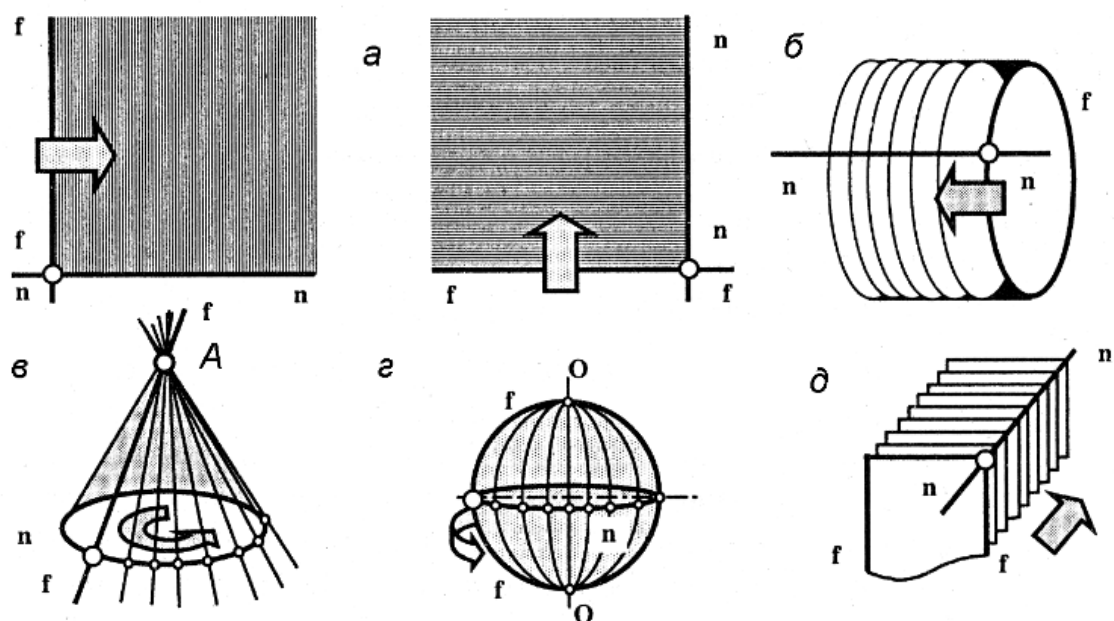
Инструментът е значително по-евтин при безконтактните методи на обработване (електрохимично размерно обработване, електрическа ерозия), тъй като при тях отсъства силовото взаимодействие между заготовката и инструмента – към инструмента не се предявяват сериозните изисквания за механична якост, твърдост, изнosoустойчивост и жилавост. Той се изработва по значително по-прости и евтини технологии при използването на по-евтини материали (месинг, смес от графит и меден прах). Въпреки това всеки инструмент – с повече или по-малко сложна геометрична форма, представлява скъпо средство за производство.

Методът на отпечатване търпи най-голямо развитие поради:

- възможността всяка произвеждаща образуваща повърхнина, колкото и сложна да е тя да се разбие на прости (елементарни) повърхнини: равнината, кръговият и некръговият (контурът на основата му е произволна затворена линия, а не кръг) цилиндър, кръговият и некръговият конус и торът (който като граничен случай включва сферата), които да се изработват една след друга с прости, по-универсални и по-евтини инструменти – метод на отпечатване на прости геометрични форми (фиг. 5);

- възможността да се добавят допълнителни движения (праволинейни или въртеливи) при вдълбаването на инструмента, при което да се работи дори с прости непрофилирани инструменти, като се произвеждат

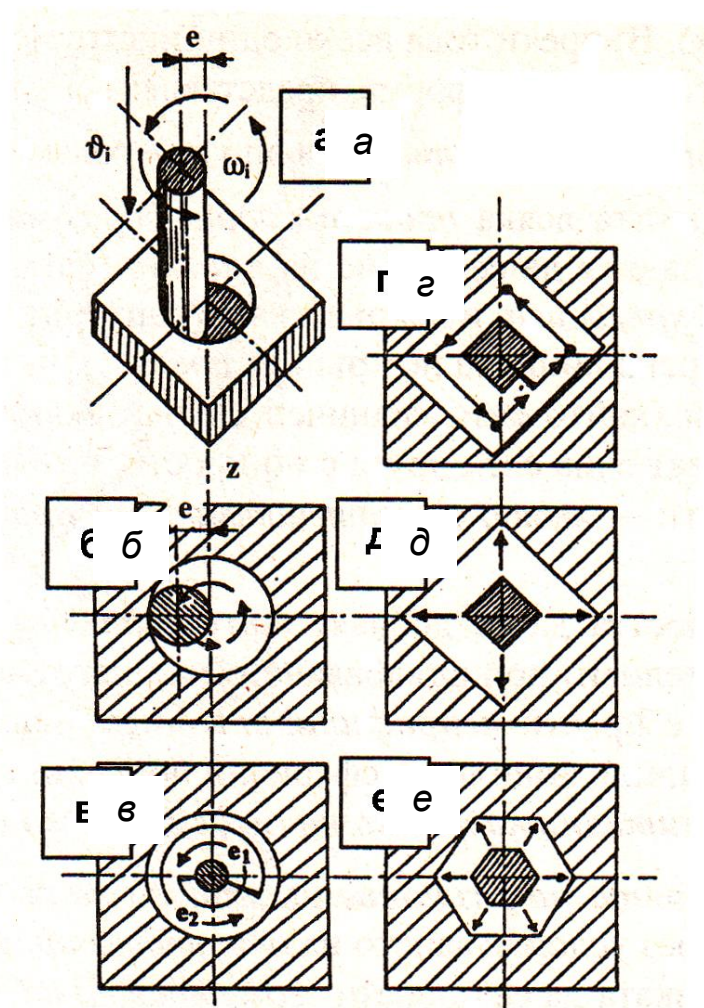
цилиндрични, конични и сферични повърхнини – метод на обработване с допълнителна координата на движение на инструмента (фиг. 8).



Фиг. 5. Образуване на елементарни геометрични повърхнини:
 а – равнина; б – кръгова цилиндрична повърхнина;
 в – кръгова конична повърхнина полигон; г – сферична повърхнина;
 д – сложна повърхнина

Тенденцията на развитие на метода на отпечатване е точно определена – чрез усложняването на относителното движение на инструмента и заготовката да се опрости геометрията на инструмента (до непрофилиран инструмент), като се унифицират и стандартизират неговите форми и размери.

Всяка една от елементарните геометрични повърхнини може да се възприеме като непрекъснато множество от последователните положения на движеща се произвеждаща образуваща (права, крива, отворена или затворена) линия. Тя се движи, водена от произвеждаща направляваща линия (фиг. 5).



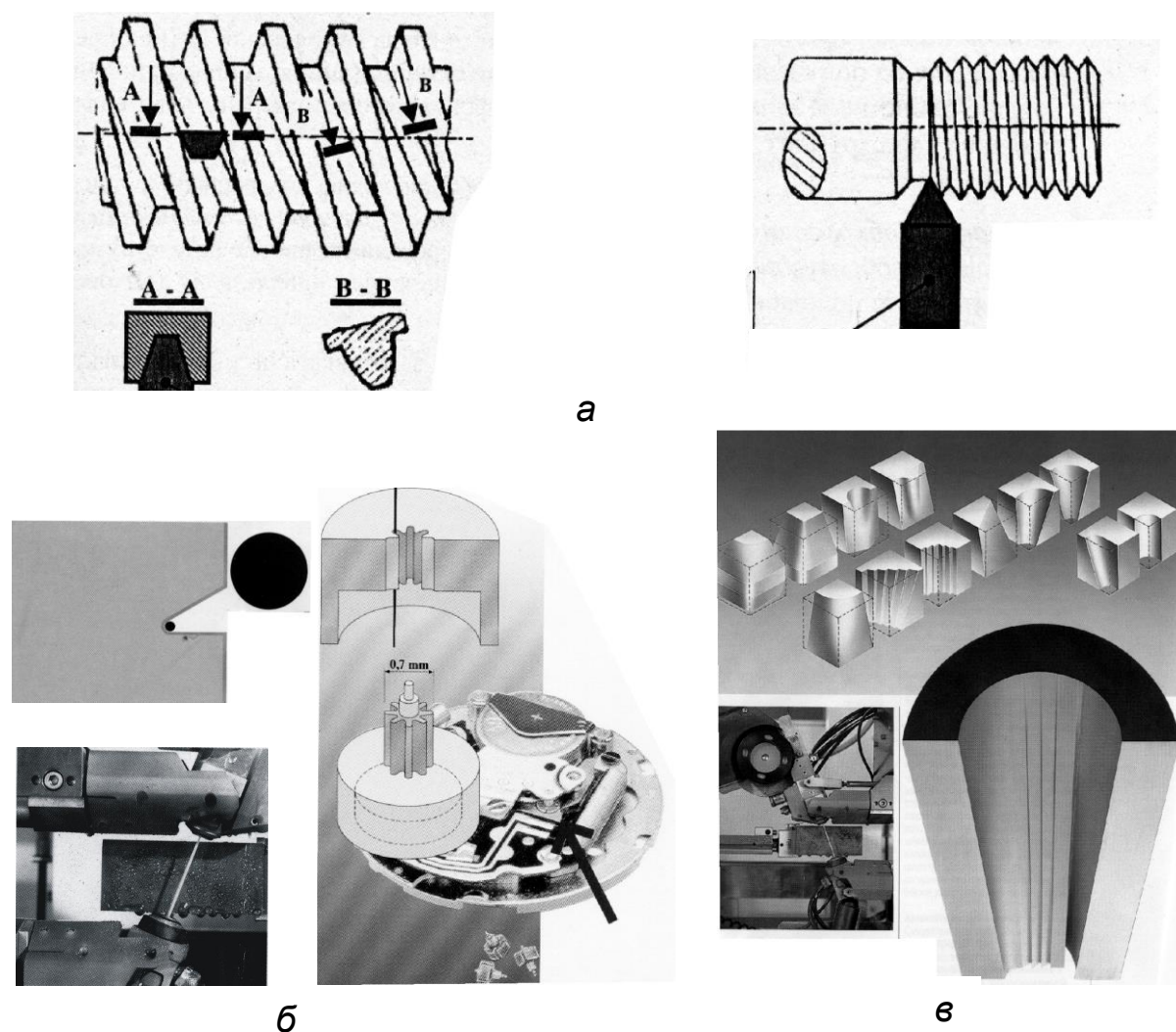
Фиг. 6. Метод на отпечатване с допълнително движение на непрофилиран инструмент: а, б, в – въртливо движение на инструмента около оста Z; г – линейно движение по начупен полигон; д, е – линейно радиално движение

По-голямата част от практически използваните повърхнини се образуват най-често от произвеждащите права линия, окръжност, елипса, парабола, еволвента, винтова линия.

Произвеждащата образуваща линия може да се копира едновременно по цялата си дължина при относителното движение на заготовката и инструмента (фиг. 6, 7, 8а). В тези случаи произвеждащата образуваща линия съвпада с режещата или формиращата (линия) част на инструмента – стругарския нож при рязане (фиг. 7 а), дюзата при екструзия или палтрузия (изтегляне), щанцата при изрязване, пробиване или изтегляне.

Разновидност на този метод на повърхнинно формообразуване са нишковите (електроерозионни, електрохимични и ултразвукови) методи на рязане, които използват като инструмент движеща се силно опъната цилиндрична

метална нишка (от месинг или от волфрам) (фиг. 7 б) [11,12]. Образуващата линия е права и най-често се изрязват цилиндрични или конични (фиг. 7 в) повърхнини в зависимост от наклона на работната част на нишката чрез промяната на положението на водачите на нишката.



Фиг. 7. Получаване на повърхнина чрез копиране (отпечатване) на линия:
а - струговане; б – нишково електроерозионно изрязване на сложна повърхнина; в -
нишково електроерозионно изрязване на конична повърхнина

Следващата крачка на развитие на формообразуването чрез отпечатване се основава на това, че всяка произвеждаща образуваща линия, колкото и сложна да е тя, може да се получи последователно точка по точка при относителното движение на заготовката и инструмента по един от следните основни методи (фиг. 8):

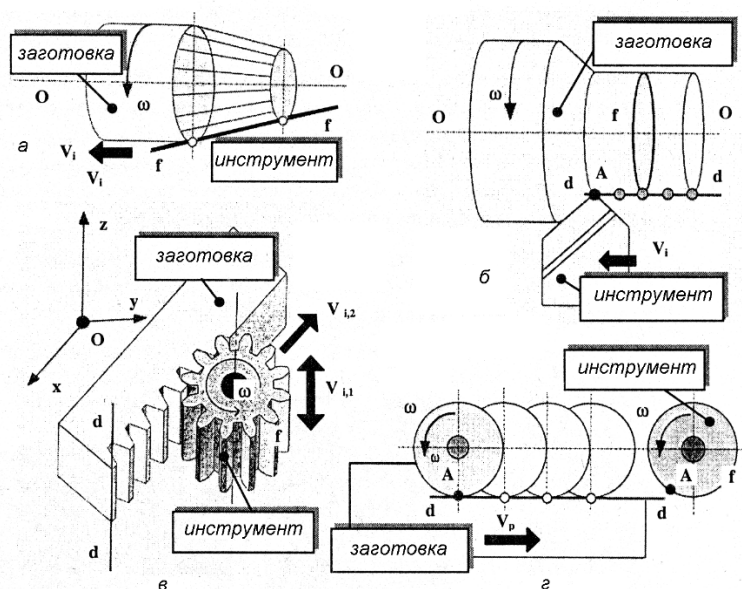
- метод на копиране профила на инаструмента (фиг. 8 а);

- метода на сканиране (на следата), при който произвеждащата образуваща линия се получава като следа от движението (по определен начин) на една единствена произвеждаща (линейна) точка, например върха на режещия инструмент, фокусирания лазерен или електронен лъч (фиг. 8 б);

- метода на обхождане (обгъркване, отгъркване), при който произвеждащата образуваща линия се получава като обвиваща линия на последователните положения на режещите ръбове на инструмента при неговото относително преместване без приплъзване (обхождане) спрямо заготовката (фиг. 8 в);

- метода на допиране, при който произвеждащата образуваща линия се получава като допирателна на множеството от спомагателни геометрични линии, образувани от движението на една или множество точки от инструмента (фиг. 8 г);

- метода на изрязване чрез трепанация в пластични (с прекъснат контур на изрязване образуван от пробитите един до друг отвори) или в крехки (с прекъснат контур от пробити глухи отвори, например при лазерното скрайбиране) материали.



Фиг. 8. Методи за получаване на произвеждаща образуваща линия:

а – метод на копирането; б – метод на сканирането;

в – метод на обхождането точка по точка; г – метод на допирането

Точковите методи на формообразуване са получили най-широко приложение при контактните методи на обработване, тъй като механичното обработване или силовото взаимодействие в една единствена точка изисква много по-малка мощност от едновременното обработване в множество от точки (взаимодействие по линия или по повърхнина). За сметка на това обаче се извършват синхронно множество от сложни относителни движения между заготовката и инструмента.

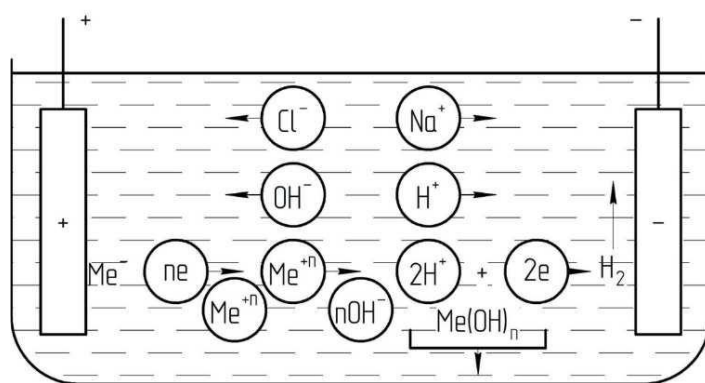
От геометрична гледна точка основният метод на формообразуване е методът на отпечатване (чрез производяща образуваща повърхнина). Останалите методи са само частен случай на този метод – произвеждащата повърхнина не съществува физически, тя се образува по време на обработването чрез подходящо движение на произвеждащата образуваща линия или точка.

Глава 2. ВИСОКОЕФЕКТИВНИ МЕТОДИ ЗА ОБРАБОТКА НА МАТЕРИАЛИ, ОСНОВАНИ НА ПРЯКОТО ИЗПОЛЗВАНЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ

2.1. ЕЛЕКТРОХИМИЧНА ОБРАБОТКА

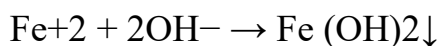
2.1.1. Механизъм и закономерности на формообразуването

Електрохимичната обработка (ЕХО) се основава на електрохимично (анодно) разтваряне на метала на заготовката при високи плътности на електрическия ток [3]. Механизмът на разтваряне на метала при ЕХО се основава на електролизата. Това е процес, при който се извършва окисляване или редукция по повърхностите на електродите (проводници на електрически ток), свързани с източник на захранване (ИЗ) и поставени в токопроводящ разтвор – електролит [4]. Един от електродите (заготовката) е свързан с положителния полюс и представлява анод, а вторият (инструментът) – с отрицателния полюс, като последният представлява катод. В електролитите молекулите на веществото се разпадат на електрически заредени частици – йони, всеки от които пренася един или няколко електрически заряда. Броят на положителните и отрицателните заряди, пренасяни от йоните, е еднакъв, поради което като цяло електролитът е електрически неутрален. Например, молекулата на натриев хлорид, разтваряйки се във вода, се разпада на катион натрий Na^+ и анион хлор Cl^- , освен това водата съдържа йони на водород H^+ и хидроксид OH^- . Ако към електродите, потопени в този разтвор, се приложи потенциална разлика, тогава анионите на хидроксида OH^- и хлора Cl^- ще се движат към анода, а катионите на водорода H^+ и натрия Na^+ – в посока към катода. Електрическата верига (ИП – електрод – електролит – електрод – ИП) при това ще се затвори и ИП ще премества електрони по външната верига (фиг. 9).

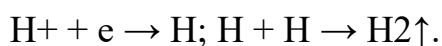


Фиг. 9. Схема на механизма на електролизата

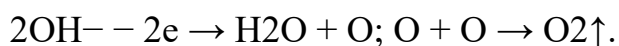
Металните йони няма да преминат в разтвора. Атомите на Fe, като отдават електрони, ще образуват желязни йони: $\text{Fe} - 2e \rightarrow \text{Fe}^{+2}$. Образуващият се метален йон Me се свързва с йона на хидроксида OH^- , образувайки хидрат на металния оксид $\text{Me}(\text{OH})_n$, който се разтваря слабо във вода и преминава в утайка, например за желязото:



Йоните на водорода H^+ се разрязват на катода, образувайки атоми на водорода, които под формата на мехурчета излизат от разтвора:



При това на анода се отделя газообразен кислород:



При ЕХО се използват такива електролити, чиито катиони (Na^+ , H^+ и др.) не се отлагат върху повърхността на катода, което осигурява много важно предимство на ЕХО – неизменност на формата на електрода-инструмент през целия период на неговата експлоатация [5]. Съгласно обединения закон за електролизата, формулиран М. Фарадей, масата на веществото М в милиграми, разтворено на електрода, съставлява:

$$M = KIt_e, \text{ където:}$$

K – електрохимичен еквивалент на веществото (табл. 1), мг/Ас;

I – сила на тока, преминаващ през електролита;

t_e – време на електролиза;

В действителност, всеки компонент на сплавта има свой електрохимичен еквивалент, т.е. своя скорост на анодно разтваряне. Поради това в процеса на обработка възникват вдлъбнатини и изпъкналости, които определят макропрофила и грапавостта на повърхността.

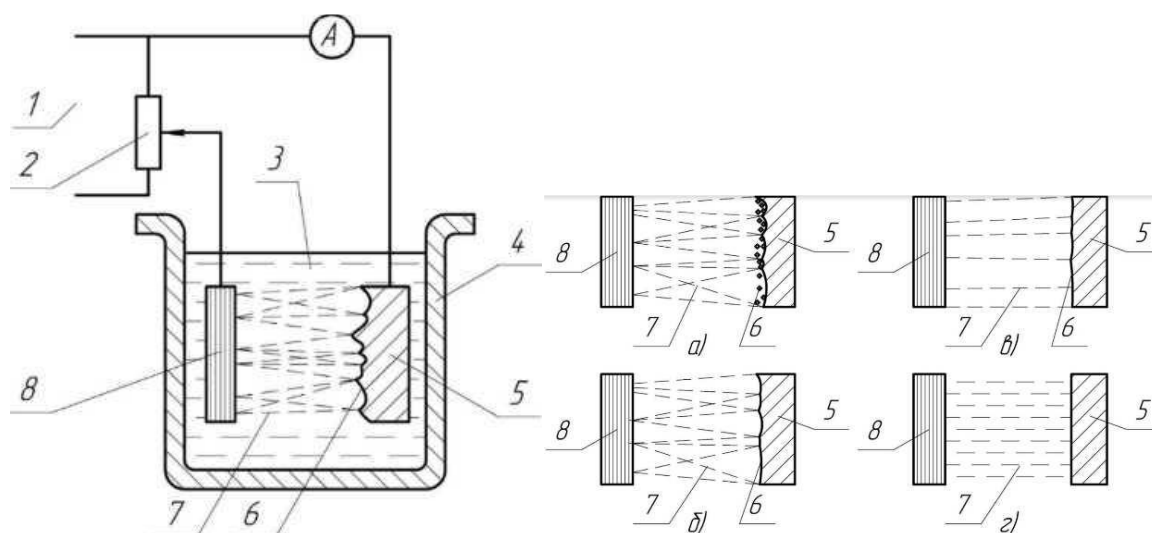
Таблица. 1. Електрохимичен еквивалент на някои материали

Материал	K, mg/Ас
Ст 45	0,223
Стомана 12Х18Н9Т	0,165
Топлоустойчиви стомани	0,26 – 0,29
Титанови сплави	0,158 – 0,162
Алуминиеви сплави	0,092 – 0,093

В зависимост от начините на изпълнение на ЕХО всички операции по електрохимично разтваряне се подразделят на две различни групи, всяка от които има свои закономерности [6]:

- операции, изпълнявани в стационарен електролит при ниска плътност на тока;
- операции, изпълнявани в проточния електролит при висока плътност на тока.

Електрохимичната обработка в стационарен електролит се разделя на полиране, профилиране (копиране), заостряне (заточване), довършване. Електрохимичната обработка в проточен електролит се подразделя на профилиране (копиране), пробиване на канали и отвори, разрязване и др. Принципна схема на електрохимичната обработка в стационарен електролит (фиг. 12) за най-типичната операция – електролитно полиране [7]. Електрическият ток, преминаващ през електролита 3 и електродите 8 и 5, предизвиква разтваряне на повърхността на анода 5 в електролита и образуване на продукти на разтваряне 6 (фиг. 10, а), които, задържайки се в вдлъбнатините на грапавината на повърхността, изолират последните от преминаването на тока, концентрирайки силовите му линии върху незащитените участъци от повърхността на анода. Настъпва бързо разтваряне на изпъкналостите и повърхността на анода се изглажда.



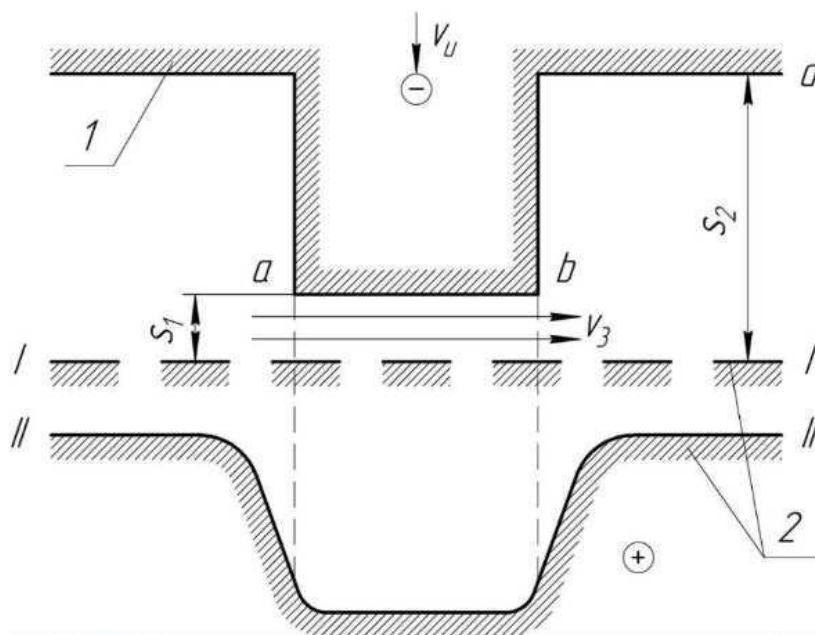
Фиг.10 . Схема на електрохимична обработка в стационарен електролит

Електрополирането има разнообразни приложения. Най-доброто качество на повърхността се постига при електрополиране на чисти и хомогенни метали и сплави. Полирането на турбинни лопатки от легирани и трудно обработваеми сплави премахва повърхностно напрегнатите слоеве метал след механична обработка, повишава устойчивостта на корозия и намалява грапавостта на повърхността, като по този начин намалява трудоемкостта на операцията. Полирането на еволвентния профил на зъбните колела подобрява сработваемостта на повърхностите, отстранява дефектния повърхностен слой и намалява трудоемкостта на операцията. Външното и вътрешното полиране на тръби от легирани стомани и специални сплави подобрява качеството на обработената повърхност и намалява трудоемкостта на операцията. Процесът на профилиране се осъществява чрез анодно разтваряне на заготовката, поставена вътре в кух цилиндричен катод. Разтварянето протича по-интензивно в участъците, по-близки до катода, в резултат на което се получава промяна на формата, в този случай закръгляне на заготовката. Заточването и острието на режещия инструмент се осъществява, чрез създаване на повишена плътност на тока върху острието, което се осигурява чрез подходящо разположение на острието на инструмента спрямо катода; характерът на заточването зависи също така от първоначалния ъгъл на заточване. Довършването чрез електрохимичен метод при стационарен електролит се използва за обработка на повърхностите на щанци, пресови форми и лярски форми след електроерозионна обработка. При заточване и довършване може да се постигне точност до 0,1 мм при височина на микронеравностите на обработените повърхности $Ra = 0,32 \div 0,63$ мкм. Предимства на електрохимичната обработка в стационарен електролит:

- възможност за получаване на повърхности с малка височина на микронеравностите, липса на необходимост от специален инструмент. Недостатъци:
- ниска специфична производителност; чувствителност към промени в състава на електролита и неговото състояние; проявяваща се в нарушаване на стабилността на процеса, влияние върху процеса на нехомогенността на структурата на заготовката.

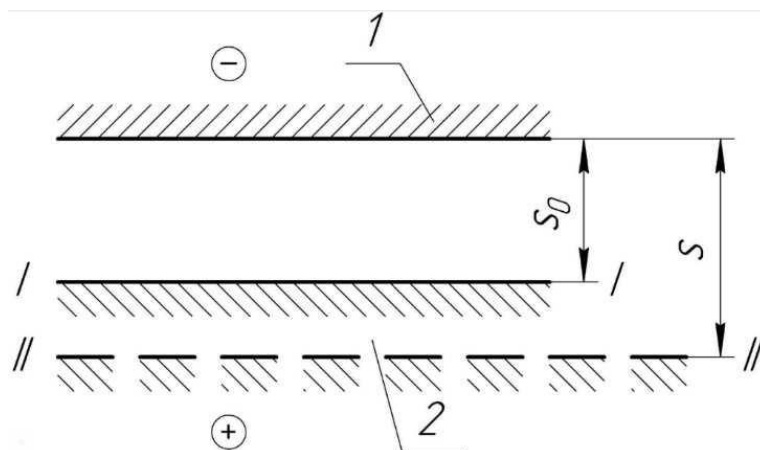
При ЕХО в проточния електролит се използват токове с висока плътност. Локализирането на процеса на обработка се осигурява от конструкцията на инструмента и създаването на малки междуелектродни разстояния. Образуващите се при електролиза продукти на разтваряне се отстраняват от

междуелектродното пространство от потока на електролита. Принципната схема на електрохимичната обработка в проточния електролит е изобразена на фиг. 11. Токът, протичащ между катода-инструмент 3 и анода-заготовка 1, предизвиква разтваряне на повърхността на анода, в резултат на което в него се възпроизвежда профилът на катода-инструмент под формата на вдлъбнатина 4 с отрицателна форма. В началото на процеса отделни участъци от катода 3 са разположени значително по-близо до заготовката-анод 1 и през тях, благодарение на по-малкото съпротивление на електролита 2, преминава по-голям ток. В резултат на това намиращите се тук участъци от заготовката се подлагат на анодно разрушаване по-бързо. Електрическият ток преминава и през други участъци, но поради по-малката плътност на тока в тези участъци скоростта на тяхното анодно разтваряне е по-малко интензивна. В края на обработката, когато анодът придобива отразената форма на катода, плътността на тока се изравнява по цялата повърхност. В реални условия процесът значително се усложнява, което води до неравномерно отнемане на метал. Затова работната част на електрода-катода представлява, от своя страна, леко коригиран профил на обработвания елемент на заготовката. Точността на копиране на електрод-инструмента върху заготовката зависи от скоростта на разтваряне на участъците от заготовката, намиращи се на различни разстояния от електрод-инструмента. Нека разгледаме получаването на вдлъбнатина в плоска заготовка 2 с електрод-инструмент 1, имащ изпъкналост ab .



Фиг.11 . Схема на ЕХО в нестационарен електролит

В началото на процеса границата на заготовката заема положение I–I. На разстояние s_1 от нея се намира изпъкналостта ab на електрода-инструмент, която се придвижва към заготовката със скорост $V_{и}$, така че да се поддържа постоянна хлабина S_1 . През междуелектродната хлабина се прокарва електролит със скорост $V_з$. Ако приблизително приемем, че токът, относителната проводимост на електролита и напрежението са еднакви по цялата дължина на междуелектродното разстояние, тогава скоростите на анодното разтваряне на материала под участъците ab и cd ще бъдат обратно пропорционални на величината на междуелектродните разстояния в тези участъци: $V_{ab} / V_{cd} = S_2 / S_1$. С разтварянето на метала на заготовката и придвижването на електрода-инструмент разстоянието S_2 намалява, но условието $S_2 > S_1$ остава валидно, т.е. отнемането на метал под изпъкналостта протича по-бързо. След известно време в плоската заготовка ще се получи вдлъбнатина с граница II–II. Формата на електрода-инструмент се е отразила върху анода и е постигната размерна обработка. При ЕХО скоростта на анодното разтваряне и точността на обработката са толкова по-високи, колкото по-малка е междуелектродната хлабина. При все това с намаляването на хлабината, процесът на неговото регулиране се усложнява, съпротивлението на протичането на електролита се увеличава и може да възникне пробив, който да доведе до повреда на обработваната повърхност. Поради увеличаването на газовото запълване при малки разстояния скоростта на анодното разтваряне намалява. Следва да се избере такъв размер на разстоянието, при който се постигат оптимални скорост на отнемане на метал и точност на формообразуването. За ЕХО на отвори и малки кухни, лопатки на газотурбинни двигатели, както и при разрязване на заготовки, се установява и поддържа разстояние S_1 , равно на $0,1 \div 0,3$ мм. За големи кухни, лопатки на енергийни машини, за схеми на струговане се задава разстояние S_1 , равно на $0,3 \div 0,5$ мм. При струйния метод на обработка разстоянието между електродите се избира в диапазона $1 \div 15$ мм. В случай на неподвижни електроди в началото на процеса се установява хлабина S_1 , равно на $0,1 \div 0,3$ мм. При ЕХО се използват три метода за регулиране на междуелектродните разстояния (фиг. 12).



Фиг. 12. Схема на междуелектродни хлабини

1. При работа с неподвижни електроди хлабината постоянно се увеличава, а скоростта на анодното разтваряне намалява. Режимът се променя по време на обработката на заготовката, т.е. е нестационарен. В началото на процеса на анодно разтваряне електродът-инструмент 1 се намира спрямо заготовката 2 на разстояние s_0 . След известно време τ границата на обработваемата повърхност на заготовката, която е заемала положение I–I, ще се премести в положение II–II, а разстоянието ще се увеличи с дебелината на разтворения слой.

2. При постоянна скорост на подаване на инструмента режимът на обработка с течение на времето се доближава до стационарен режим. Разгледа се схемата на пробиване, при скорост на подаване $V_{\text{и}} = \text{const}$. Ако избраната скорост на подаване е по-малка от скоростта на разтваряне на метала, то хлабината постепенно се увеличава. Това води до намаляване на скоростта на отстраняване на материала. След известно време скоростта на подаване на инструмента и скоростта на разтваряне на материала на заготовката се изравняват и режимът става стационарен. При превишаване на скоростта на подаване на електрод-инструмента над скоростта на разтваряне на метала също се получава саморегулиране на хлабината и се установява стационарен режим с постоянна установена хлабината.

3. При периодичното придвижване на електрода-инструмент спрямо заготовката на определени интервали от време работният ток се изключва, електродът-инструмент се доближава до контакт със заготовката, след което се отдръпва на изчисленото разстояние и работният ток се включва отново. Между циклите на приближаване и отдалечаване на инструмента той или се оставя неподвижен относно заготовката, или се премества към нея със скоростта на работното подаване. В момента на включване на работния ток

хлабината S е равна на изчислената стойност. След това, в зависимост от схемата на движение на електрода-инструмент между циклите на неговото приближаване и отдалечаване, хлабината или се увеличава, или остава постоянна. Времето между циклите се измерва в секунди, поради което промяната на хлабината във времето е незначителна и тя може да се приеме за равна на изчислената хлабина, а режимът да се счита за стационарен. Съвременното оборудване за ЕХО, като правило, разполага с адаптивна система за управление, една от функциите на която е регулирането на скоростта на подаване без допиране на инструмента до обработваната повърхност.

2.1.2. Типични технологични операции при електрохимичната обработка

При избора и определянето на операции по електрохимична обработка (ЕХО) вместо механична обработка чрез рязане или електроерозионна обработка, следва да се направи оценка на целесъобразността на такава замяна, като се отчитат следните предимства и недостатъци на ЕХО. Предимствата на ЕХО са:

- възможност за обработка на неръждаеми, термоустойчиви стомани, титанови сплави, закалени конструкционни стомани с по-висока производителност, отколкото при механичната обработка и електроерозионната обработка;
- липса или много малко износване на електродния инструмент в сравнение с обработката чрез рязане и електроерозионната обработка;
- възможност за образуване на сложни повърхности във всякакви токопроводими материали с по-малки загуби на труд;
- ниска грапавост на обработените повърхности след ЕХО;
- проста кинематика и конструкция на използваното оборудване.

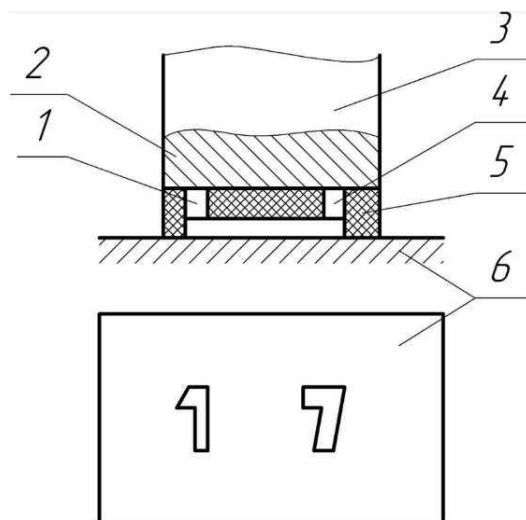
Недостатъците на ЕХО са:

- висока корозионна агресивност на използваните електролити, вследствие на което детайлите от работната зона на машините и приспособленията трябва да се изработват от неръждаеми стомани, а обработваните детайли и повърхностите, които влизат в контакт с тях след ЕХО, трябва да имат антикорозионна обработка;
- високата енергоемкост на процеса.

Като се имат предвид предимствата и недостатъците, с метода ЕХО се препоръчва извършването на следните типови операции:

- електрохимично маркиране;
- електрохимично отстраняване на усенъци;
- електрохимично обемно копиране;
- електрохимично пробиване на отвори и канали със сложна форма;
- електрохимично разрязване;
- електрохимично полиране.

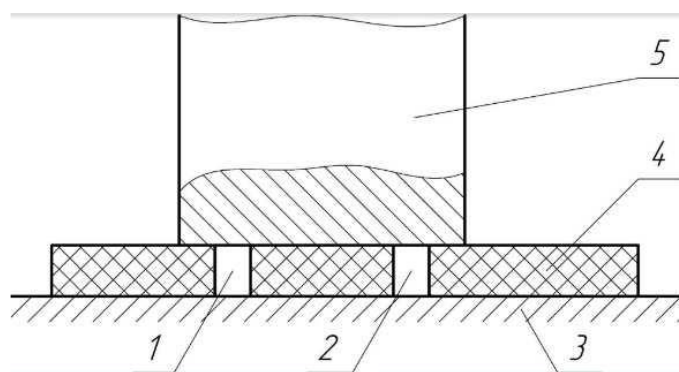
Електрохимичното маркиране на детайлите се извършва предимно по схема с неподвижни електроди (фиг. 13). Информацията (цифри, букви, рисунки) се пренася върху детайла чрез копиране на профила върху електродите или чрез селективно разтваряне на метала в прорезите на диелектричния трафарет [8].



Фиг. 13. Обща схема на процес на електрохимично маркиране

Схема на копиране на знаци, с помощта на които върху детайла се нанасят цифри. Знаците 1, 4 върху инструмента са изпълнени в огледално отражение и са закрепени върху челната част на корпуса 3. Пространството между тях е запълнено с диелектрик 2, който предпазва материала на детайла от разтваряне в участъците между знаците. Пространството между работната част на нанасяните знаци 1, 4 и заготовката 6 се поддържа от диелектрични подложки 5. Ако дълбочината на нанасяне на информацията е малка ($0,01 \div 0,02$ mm), то електролитът в междуелектродното пространство се нанася с тампон; ако е необходимо да се получат вдлъбнатини до $0,3 \div 0,4$ mm между инструмента и детайла, се прокаква електролит. За сметка на анодното разтваряне на метала под знаците се образуват вдлъбнатини,

повтарящи профила на знаците, както е показано в долната част. Тъй като процесът протича при ниска скорост на движение на електролита или без никакво прокарване, продуктите от обработката се отлагат във вдлъбнатината, образувайки контрастно изображение. При използване на диелектрични шаблони нанасяната информация има формата на прорези 1, 2 (фиг. 14). Шаблонът 4 се поставя върху детайла 3 и се притиска с электрод-инструмент 5. Процесът на анодно разтваряне протича в електролита, предварително нанесен върху повърхността на детайла. 3 и се притиска электрод-инструмента 5. Процесът на анодно разтваряне протича в електролита, предварително нанесен върху повърхността на детайла. Ако се изисква прокарване на течността, тогава шаблонът се притиска по контура, като се оставя хлабина между него и електрода-инструмент, или се правят прорези в самия шаблон за преминаване на електролита. Ролята на шаблона може да изпълнява слой от фотоемулсия, нанесен върху детайла. За фино маркиране без прокарване на електролита диелектричните вложки се изработват така, че междуелектродната междина да бъде $0,02 \div 0,15$ мм, като при това работното напрежение от източника на захранване, в зависимост от материала на детайла, може да бъде от 3 до 16 волта. Времето за маркиране се определя експериментално, обикновено то възлиза на няколко секунди [9].



Фиг. 14. Схема на процес с използване на диелектрични шаблони

2.1.3. Оборудване за електрохимично маркиране

При необходимост от нанасяне на графично изображение върху метални повърхности на изделията за дългосрочно използване се използва специализирано оборудване. Към такова оборудване спадат стационарни и преносими гравирани установки със специални маркиращи глави. Пример за такова оборудване е устройството ЕС100 на фирма „Лазер-мастер“, изобразено на фиг. 15.



Фиг. 15. Външен вид на устройството за електрохимично маркиране модел EC100 [10]

Към основните предимства на този модел следва да се отбележат възможността за нанасяне на светло или тъмно маркиране, малкото тегло и компактните размери. Техническите характеристики на устройството са представени в табл. 2.

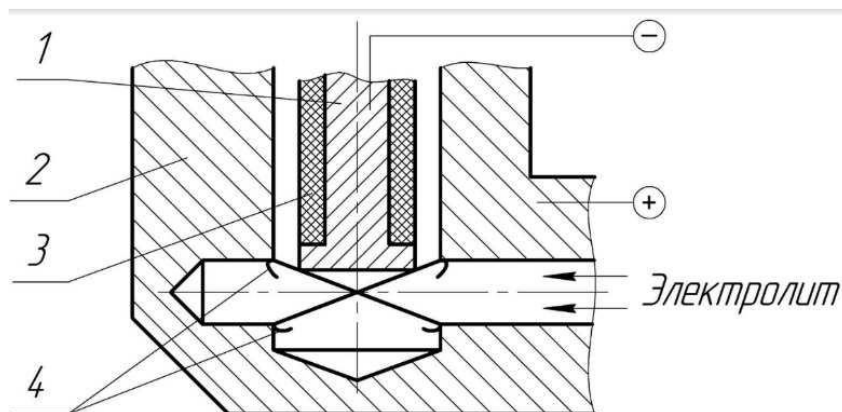
Таблица .2. Технически характеристики на устройството за електрохимично маркиране EC100

Напрежение, V	220
Мощност, W	50 – 160
Работна температура, °C	1 – 40
Маса, kg	3
Габарити, mm	200x160x90

На пазара съществува доста широк избор от оборудване за електрохимично маркиране, поради което изборът не се ограничава само до приведеното в примера устройство.

Електрохимичното отстраняване на грапавини по схемата, показана на фиг. 16, с неподвижни електроди може да се извършва в труднодостъпни места, например в свързващите канали на гориво разпределителната апаратура. След механична обработка по ръбовете на отворите се образуват грапавини 4, които в процеса на експлоатация на детайла могат да се откъснат и да попаднат в дюзите на инжекторите. Те трябва да бъдат отстранени, а ръбовете – заоблени. За извършване на такава операция в един от отворите на заготовката 2 се въвежда електроден- инструмент 1, чиято външна

странична повърхност е покрита с изолация 3. Процесът на разтваряне на грапавините и заобляне на ръбовете отнема части от минута. При това се намаляват височинните параметри на грапавостта на повърхността, в резултат на което допълнително се намаляват хидравличните загуби.



Фиг. 16. Процес на премахване на усенъци на вътрешни повърхнини на детайла

2.1.4. Оборудване за електрохимично отстраняване на грапавини

На фиг. 17 е представена установка Sk-ECM450D за извършване на електро- химично отстраняване на грапавини от изделия, произведена от фирма Semat. Машината е в състояние да отстранява усенъци и да закръгля остри ръбове в детайли от конструкционни, термоустойчиви, закалени, магнитни стомани и сплави, алуминиеви и титанови сплави.



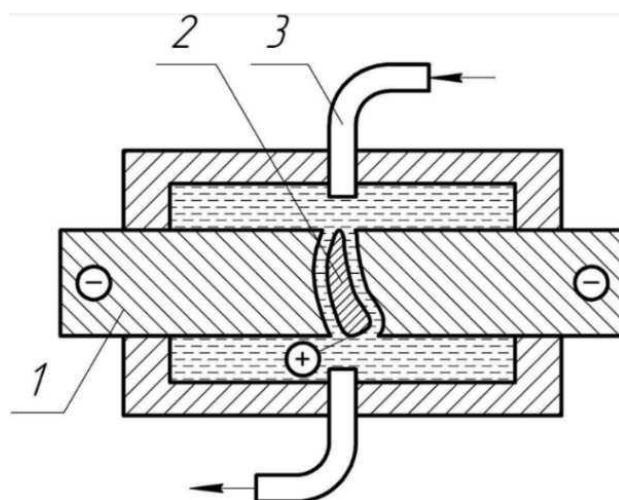
Фиг. 17. Външен вид на машината модел Sk-ECM450D за електрохимично отстраняване на грапавини [11]

Основните технически характеристики на това оборудване са представени в табл. 3.

Таблица. 3. Технически характеристики на машината модел Sk-ECM450D

Време за обработване, sek	5 – 600
Мощност (не повече), kW	20
Максимален размер на детайла, mm	500x600x550
Размер на работната повърхност на масата на машината, mm	500x600
Диапазон на тока, A	1 – 450
Диапазон на напрежението, V	6 - 30
Приложими електролити	10 – 15% NaCl, NaNO ₃

Електрохимичното обемно копиране се извършва по същата схема, както и при електроерозионната обработка, т.е. детайлът в процеса на обработка остава неподвижен, а електродът или електродите извършват стъпково придвижване със скоростта на подаване. При това се осъществява електрохимично формообразуване на детайла-анод чрез копиране на профилите на електродите-катоди. Високата ефективност на електрохимичното формообразуване се постига при обработката на много заготовки със сложна форма. Един от широко разпространените видове на този вариант е обработката на работния профил на турбинните лопатки. Общата схема на метода за обработка чрез обемно копиране е изобразена на фиг. 18.



Фиг. 18. Схема на обработване с обемно копиране

Заготовката 2 се поставя между два месингови копира – електроди 1 – със съответната форма на разстояние $0,3 \div 0,5$ мм от тях. През образувалата се

междина под налягане около 1 МРа се прокарва 10%-ен разтвор на готварска сол, подаван през фитинг 3. Режим на формообразуване: напрежение на електродите 8÷11 волта, плътност на тока 15÷20 А/см², скорост на подаване 0,3÷0,4 mm/min. Металът от заготовката се отстранява със скорост на подаване при грапавост на обработената повърхност $Ra = 1,25 \div 2,5 \text{ }\mu\text{m}$. Изхождайки от особеностите на електрохимичното формообразуване, се счита, че максималният отнесен слой, отстраняван от обработваната повърхност, трябва да бъде не повече от двойната стойност на минималния отнесен слой. Така, ако средно от всяка точка се отнемат по 0,8 mm, то минималното отнемане във всяка част на заготовката трябва да бъде не по-малко от 0,4 mm. В процеса на електрохимичното формообразуване едновременно се откриват дефекти по обработваната повърхност, по-специално микро-пукнатини. По този начин при обработката се осъществява не само формообразуване, но и контрол на качеството, което е особено важно за отговорни детайли, например турбинни лопатки. Практиката показва, че електрохимичните методи за формообразуване са 4÷10 пъти по-производителни от механичната обработка. Електрохимичният метод на обработка е особено ефективен при обработката на заготовки от термоустойчиви и титанови сплави.

2.1.5. Оборудване за електрохимично обемно копиране

Подобна методика за обработка може да бъде осъществена на специализирано оборудване, например на електрохимична копирно-пробивна машина SFE-5000M. Външният вид на машината е показан на фиг. 19. Техническите характеристики на машината са посочени в табл. 4.

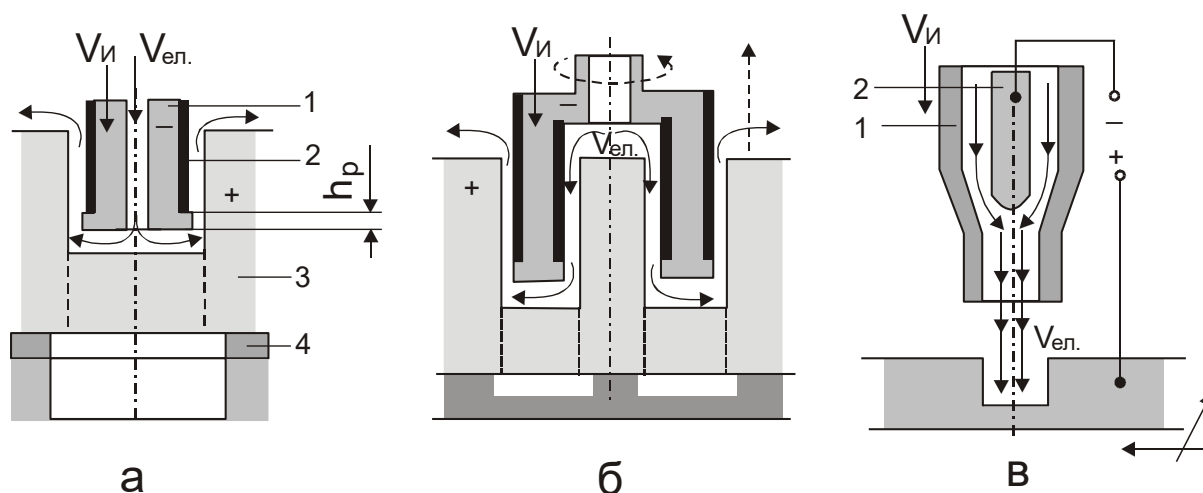


Фиг. 19. Външен вид на електрохимичната машина за копиране и пробиване SFE-12000M [12]

Таблица. 4. Технически характеристики на електрохимичната машина за копиране и прошиване модел SFE-12000M

Площ на обработване, cm^2	120
Постижима точност на обработване, mm	0,005
Постижима грапавост на обработената повърхнина, Ra	0,16 – 3,2
Използван електролит	12% разтвор на NaNO_3
Напрежение, V	380
Честота, Hz	50
Мощност, kW	40
Габарити на машината, mm	2100x1700x2100

Електрохимичното пробиване на отвори и канали със сложна форма може да се извършва в детайли от труднообработваеми стомани и сплави по различни схеми (фиг. 20).



Фиг. 20. Прошиване на проходни отвори чрез ЕХАО

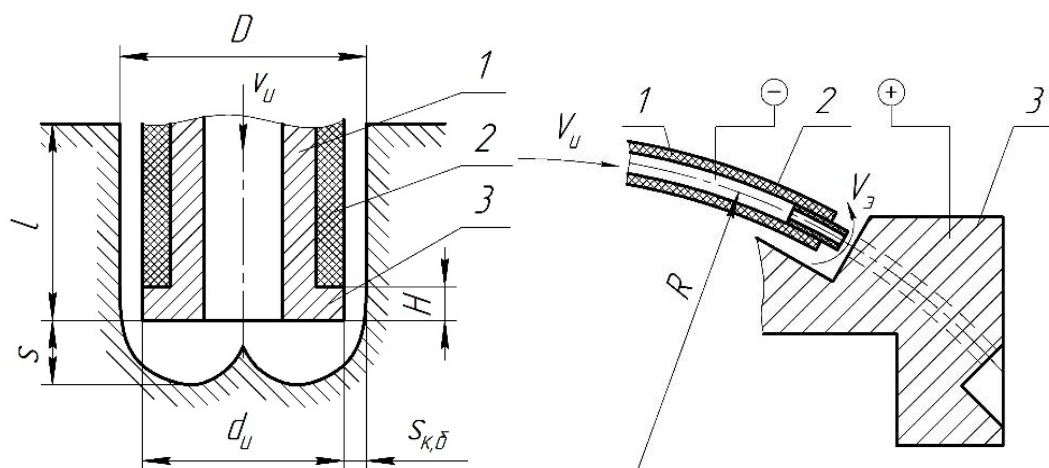
На фиг. 20а е показана схема за прошиване на проходен некръгъл отвор, при която електродът – инструмент 1 има къса работна (калибровача) част с височина $h_p = 0,5 \div 1,5 \text{ mm}$ и неработна част, покрита с изолационен материал 2. Заготовката 3 е поставена върху диелектрична подложка 4, за да не се поврежда масата на машината при излизане на инструмента. Електролитът се подава със скорост $V_{\text{ел}} = 5 \div 50 \text{ m/s}$ през отвор в инструмента. Подавателната скорост на инструмента е в границите на $0,8 \div 10 \text{ mm/min}$ при работно напрежение $U = 8 \div 10 \text{ V}$ и плътност на тока $i_A = 50 \div 100 \text{ A/cm}^2$.

На фиг. 20б е показана схемата за прошиване на профилни и цилиндрични отвори с диаметрални размери над $100mm$, извършвано чрез пръстеновидно изрязване. По този начин се повишава производителността, намалява се енергопоглъщаемостта и се подобрява използваемостта на материала. При прошиването на некръгли отвори инструментът извършва само подавателно движение със скорост $V_{\text{и}} = 1 \div 2 \text{ mm/min}$, а при цилиндрични отвори инструментът се върти с честота до 100 min^{-1} , с което се стабилизират условията за протичане на процеса. Подавателното движение със скорост $V_{\text{и}} = 2 \div 4 \text{ mm/min}$, може да се осъществи и от заготовката 3.

Прошиване на отвори с малки диаметри ($0,2 \div 5mm$) се осъществява, чрез електролитна струя под налягане, формираща се в тръба от изолационен материал 1 (фиг. 20в). Напрежението в границите на $100 \div 800V$ се подава от токопроводящ елемент 2, поставен в тръбата 1, която се премества към заготовката с подавателна скорост $V_{\text{и}}$. Необходимостта от високо напрежение се обяснява със значителното разстояние между електродите и малкото напречно сечение на струята.

При обработването на система отвори е целесъобразно прилагането на многоелектродна схема на прошиване. Близкото разстояние на отворите и малката дебелина на стените между тях не затрудняват реализирането на такава схема.

Електрохимично пробиване на отвори с електрод-инструмент 1 (фиг. 21), работната част на който има токопроводяща лента с височина H , а останалата част е покрита с електроизолационен слой 2, осигурява постоянна големина на страничната хлабина по цялата височина на отвора, а следователно последният има цилиндрична форма. Прилагането на въртеливо движение $V_{\text{в}}$ към електрода повишава точността на пробиваното отворче и качеството на обработената повърхност. При изработването на канали за смазване в корпусни детайли, колянни валове и други, ЕХО позволява да се свържат всички участъци на детайла с отвор с произволно сечение и криволинейна ос. За тази цел електродният инструмент 1 се придвижва към заготовката 2 по радиуса. За да се елиминира конусността на отвора, електродният инструмент 1 трябва да се покрие със слой изолация. Скоростта на пробиване на такива отвори $V_{\text{и}} = 0,03 \text{ mm/сек}$, а дълбочината на пробиване може да надвишава диаметъра му 30 пъти.



Фиг. 21. Обработка на изделието с електрод-инструмент

2.1.6. Оборудване за електрохимично пробиване на отвори

Технологичните операции по пробиване на отвори могат да се извършват на широк спектър от оборудване. Пример за оборудване, използвано в областта на електрохимичната обработка, е търговският модел на машината SEMAT от серията Sk-ECM. Външният вид на машината е показан на фиг.22. На тази машина е възможно да се извършват операции по размерно формообразуване на изделия от токопроводими материали. Формирането на обработената повърхност се постига чрез обратно копиране на размерите и формата на електрод-инструмента при анодно разтваряне на заготовката. Възможно е изработването на оформящи повърхности на щампови, пресови и леярски приспособления и инструменти. Налице е възможност за ремонт и възстановяване на инструменти.



Фиг. 22. Външен вид на електрохимичната машина SEMAT от серия Sk-ECM [13]

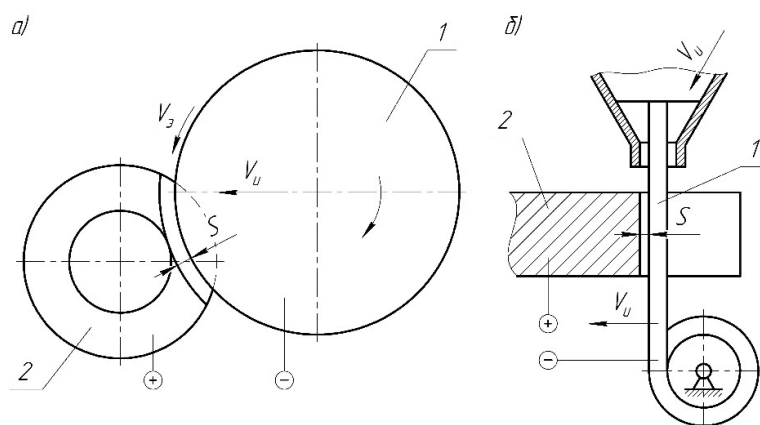
Техническите характеристики на машината са посочени в табл. 5. В зависимост от моделната серия са посочени диапазони на възможните стойности.

Таблица. 5. Технически характеристики на машината SEMAT от серия Sk-ECM

Максимален постоянен ток, А	450 – 2700
Максимален променлив ток, А	1300 – 8100
Максимална площ на обработване, mm	200x120
Размери на работната маса на машината, mm	500x600
Обем на резервоара за електролит, l	1000

Електрохимичното рязане на заготовки може да се извършва по следните схеми:

- с електроден-инструмент под формата на тънък метален диск;
- при използване на непрофилиран електроден-тел.



Фиг. 23. Схеми за извършване на операцията по електрохимично рязане

При рязане по схемата (фиг. 23а) металният диск се задвижва с въртене със скорост $30 \div 40$ m/sek, а електролитът се подава в зоната на рязане чрез поливане. Анодното разтваряне протича без забележимо натоварване върху заготовката, поради което е възможно да се режат с висока точност и без деформации тънки детайли. Скоростта на рязане може да достигне $0,2 \div 0,3$ mm/sek при грешка в обработката не повече от 0,1 mm. При използване на непрофилиран електроден-тел (фиг. 23 б) на последния се осигурява постоянно придвижване със скорост на подаване V_u , а електролитът се прокаква под налягане през зоната на рязане. Скоростта на рязане може да достигне 0,2 mm/sek, ширината на канала $0,5 \div 5$ mm, дебелината на рязания метал $0,1 \div 20$ mm, а отклонението в ширината на канала е не повече от 0,1

mm. Предимството на този метод на рязане е не само липсата на усенъци, но и наличието на заобляне на прорязаните ръбове с радиус до 0,5 mm.

Електрохимичното полиране може да се извършва по два варианта:

- в стационарен електролит;
- в течащ електролит.

Полирането в течащ електролит се извършва за обработка на предварително оформени повърхности със сложен профил с неподвижен катод-инструмент. Последният се поставя с малък хлабина над обработваните повърхности на заготовката, като се прокарва електролитът през работната зона, се интензифицира процесът на анодно разтваряне за сметка на високата плътност на тока и се осигурява достатъчно висока размерна точност. Този метод е получил наименованието „анодно-хидравлично размерно полиране“ (АГРП).

2.1.7. Оборудване за електрохимично полиране

Извършването на полиране по този метод е възможно на машината SEMAT от серия Sk-EPP25, която е изобразена на фиг. 24. Тази настолна установка е предназначена за електролитно-плазмено полиране на малки детайли от различни токопроводящи сплави. Прилага се в часовникарската и бижутерската промишленост, след 3D-печат в медицината и авиацията. Техническите характеристики на машината са посочени в табл. 6.



Фиг. 24. Външен вид на машината за електролитно-плазмено полиране от серия Sk-EPP25 [14]

Таблица. 6. Технически характеристики на машината от серия Sk-EPP25

Работно напрежение, V	200 – 350
Максимален ток, A	25
Плътност на тока, A/sm ²	0,5 – 0,8
Работна температура, °C	70 - 90

2.2. ЕЛЕКТРОЕРОЗИОННА ОБРАБОТКА

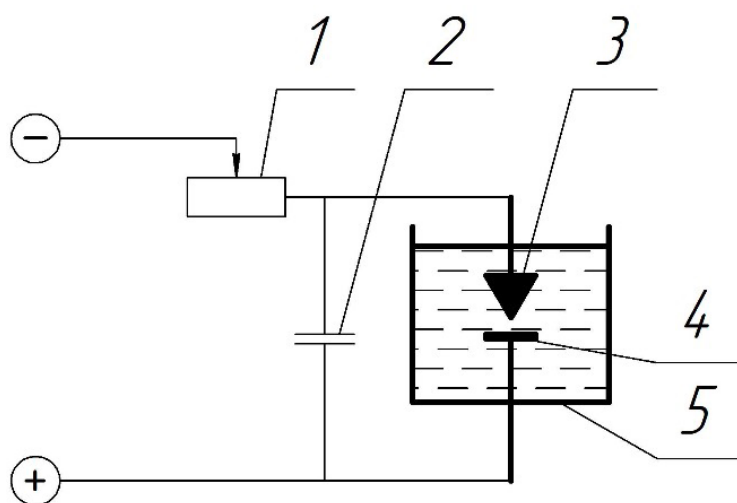
2.2.1. Процес на електроерозионната обработка

В основата на методите за електроерозионна обработка (ЕЕО) лежи използването на енергията от електрически разряд, предизвикан между електрод-инструмента и обработваната заготовка, за отстраняване на материал при формоването на детайла. Понастоящем към електроерозионната обработка се отнасят:

- електроискрова (кондензаторни генератори)
- електроимпулсна, (независими генератори)
- електроконтактна.

При преминаването на импулси на електрически ток между два електрода възниква разрушаване на електродите, т.е. електроерозия. Разрушаването на електрода става чрез образуването на вдлъбнатина по повърхността му под въздействието на единичен електрически разряд. Причината за образуването на вдлъбнатината е локалното нагряване на електродите до много висока температура. Механизмът на разрушаване на материала може да се представи по следния начин. При сближаване на два метални електрода, намиращи се под напрежение, настъпва момент, когато между участъците на електродите, намиращи се на минимално разстояние един от друг, се създава електрическо поле с висока интензивност. Това води до пробив на междуелектродното разстояние. В началото на пробива електроните, изтръгвани от най-изпъкналите участъци на повърхността на катода, се устремяват към анода. При сблъсък на електроните с молекулите на газа (въздуха) настъпва йонизация на газа в междуелектродната среда и се образува тесен проводим канал, по който лавинообразно се устремява поток от електрони. Лавината от електрони носи значително количество енергия, която се освобождава върху материала на анодния електрод под формата на топлинна енергия и води до локално разтопяване и частично изпаряване на електрода. Възникването и разпределението на електрическите разряди по повърхността се определят от промяната на минималното разстояние между взаимодействащите повърхности на електродите. Вследствие на това при обработката (при въздействие върху материала на периодични импулси с определена последователност) върху електрода-заготовка се отразява формата на електрода-инструмент. Процесът на ерозия значително се интензифицира в течност. Отстраняваният от ерозионната вдлъбнатина метал в течността се втвърдява под формата на финодисперсни гранули със

сферична форма. На фиг. 25 е изобразена схема на ЕЕО: 1 – променливо съпротивление; 2 – кондензатор; 3 – електрод; 4 – детайл; 5 – вана с работна течност.



Фиг. 25. Обща схема на процеса на електроерозионната обработка

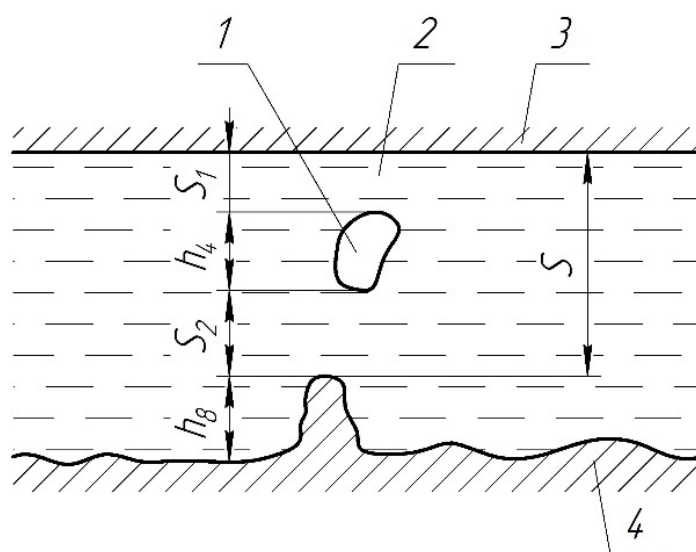
При пробив на течността се образува йонизиран канал на проводимост, по който преминава цялата енергия на импулса. При това част от енергията се отделя в течността под формата на ударна вълна и кавитационни мехурчета. Друга част от енергията се отделя върху електродите под формата на топлинна енергия вследствие на преминаването на ток през електродите [15]. Електроерозионният процес е електротермичен. Нагряването на повърхността на електродите се създава в резултат на бомбардирането на анода с електрони, а на катода – с положителни йони. В началото разрядът се дължи на йоните на течността, а след това – на йонизираните пари на метала. Температурата на канала на искрата достига 40000°C , а температурата на повърхността на металния електрод – 10000°C . При електроерозионната обработка се използват искрови и дъгови електрически разряди. При електроискровата обработка преобладава искровият разряд, при който диаметърът на канала е значително по-малък, отколкото при дъговия разряд, и възниква значителна концентрация на енергия върху електрода. Това води до това, че при електроискровата обработка преобладава механизмът на разрушаване чрез изпаряване. При електроимпулсната обработка преобладава дъговият разряд. При дъговия разряд прегряването на метала и превръщането му в парообразно състояние рязко намаляват, тъй като температурата на канала на дъговия разряд е по-ниска, отколкото при искровия разряд. Ето защо основният механизъм на разрушаване на материала на електрода при електроимпулсната обработка е

отстраняването на метала в капково-течно състояние. С приближаването на електрода-инструмент към заготовката напрежението E на електрическото поле нараства обратно пропорционално на разстоянието между електродите:

$$E=U/S,$$

където U – разликата в потенциалите между електрода-инструмент и заготовката; S – разстоянието между електродите.

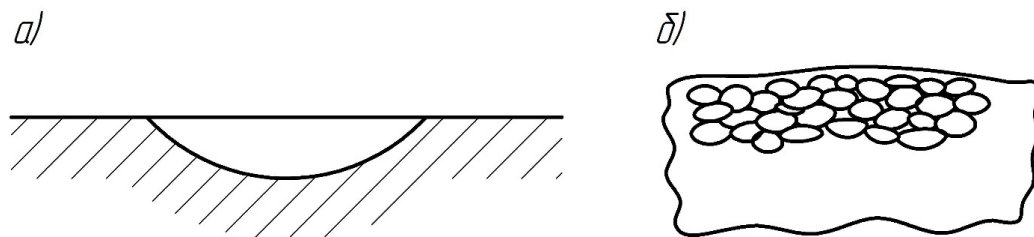
Механизмът на спада на мощността при замърсяване на работната течност е показан на фиг. 26. С цифра 1 са обозначени частиците от метал; 2 – работната течност; 3 – електродът-инструмент; 4 – електродът-заготовка.



Фиг. 26. Замърсяване на работната течност с метална частица

Най-голямото напрежение възниква в участъка, където междуелектродното разстояние е минимално. Разположението на този участък зависи от локалните изпъкналости, неравностите по инструмента и заготовката, както и от наличието и размерите на електропроводимите частици, намиращи се в междуелектродното пространство. Определянето на изчислената хлабина S , между електрода-инструмент 3 и заготовката 4 зависи от височината h на локалния микро- или макроиздатък върху заготовката. Напрежението на полето в района на изпъкналостта ще бъде най-голяма, което повишава вероятността от пробив на междуелектродното пространство в тази точка. Освен това, интензивността ще зависи от наличието на електропроводими частици 1 в диелектрика 2. Частица 1 с размер h намалява пресметнатата хлабина до размер $S_1 + S_2$. Ако не се отчита възможността за наличие на такива частици в междинното пространство, то в изчисленията би трябвало да се приеме разстояние, равно

на S . Тъй като действителното разстояние ще бъде по-малко от разстоянието между електродите, тогава интензитетът на полето в участъците, където има електропроводими частици, ще се окаже по-висок. Ако електродите се сближат до разстояние от няколко десетки микрометра, то на отделни места интензитетът на полето може да достигне стойност, при която в мястото с най-малка хлабина възниква електрически разряд. В резултат на това се образува вдлъбнатина във формата на сферична дупка с радиус R . Образуването на ямки при ЕЕО схематично е изобразено на фиг. 27.



Фиг. 27. Варианти на образуване на ямки при ЕЕО

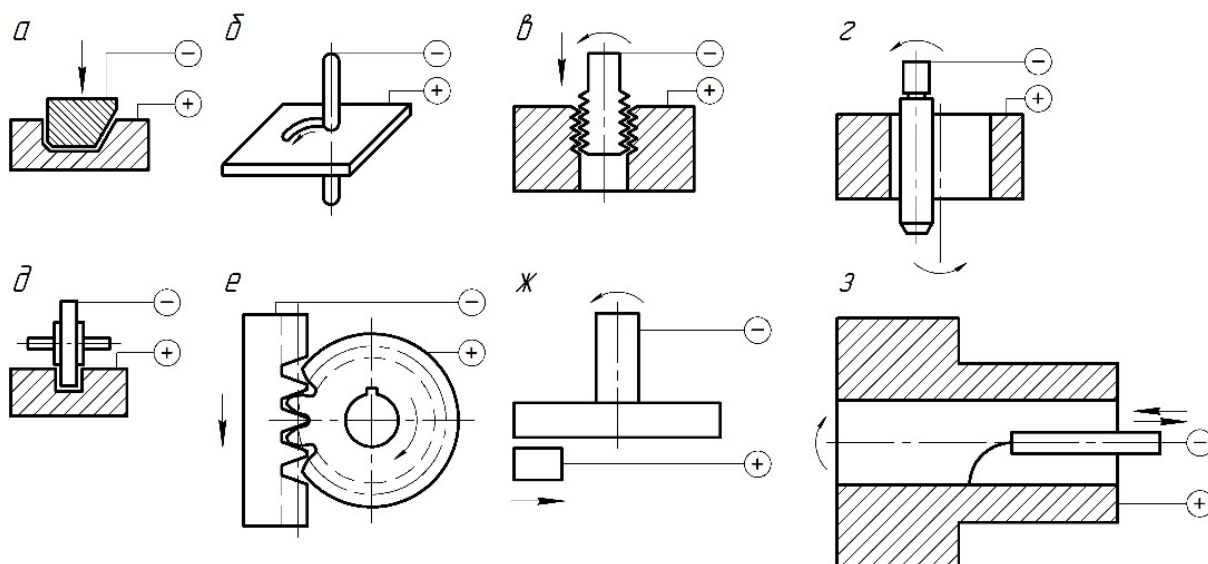
Степента на електроерозия на електрода при определени условия зависи от полярността на електродите. Така, при еднакви материали на електродите в условия на действие на къси импулси се наблюдава по-голяма ерозия на електрода, свързан към анода. При въздействието на продължителни импулси катодът е подложен на по-голяма ерозия. Ето защо при електроискрована обработка (импулси с малка продължителност) оптималната полярност на свързване на електродите е пряка, т.е. заготовката е анод, а инструментът – катод. При електроимпулсна обработка полярността е обратна: заготовката е катод, а инструментът – анод. Електроерозионната обработка, като правило, се извършва в работна течност, която представлява диелектрична среда. Работната течност в процеса на електроерозионната обработка изпълнява редица функции:

- 1) като улавя частици от разтопен метал и метални пари, изхвърляни от отвора в процеса на електрическия разряд, течността спомага за процеса на диспергиране на продуктите на ерозията и образуването на сферични гранули. Улавянето на частиците от течността предотвратява също така отлагането на продуктите от ерозията на един електрод върху противоположния;
- 2) работната течност отстранява продуктите от ерозията от зоната на обработка, почиства междueleктродното разстояние и по този начин допринася за стабилното протичане на процеса;

3) работната течност охлажда електродите. Важен фактор е също така, че работната течност значително увеличава електрическата проводимост на междуелектродната хлабина. При електроимпулсната обработка най-често се използват индустриални и трансформаторни масла, а при електроискровата – керосин и вода. По време на обработката работната течност се замърсява с продукти на ерозията, повишава се съдържанието на пепел и вискозитетът ѝ се увеличава, при което намалява производителността на обработката. Обикновено обработката се извършва в среда от неподвижна работна течност. Но за да се отстраняват по-добре продуктите на ерозията и да се активизира процесът, се прилага прокарване на работната течност. При ниско налягане на прокарване (до 50 kPa) и неголеми разходи на течност износването на електродния инструмент намалява. При увеличаване на налягането и дебита на течността може да се повиши производителността, но при това износването на електрода се увеличава. Използваната работна течност се регенерира чрез отстояване или филтриране. Използваното масло може частично да се регенерира чрез добавяне на керосин към него.

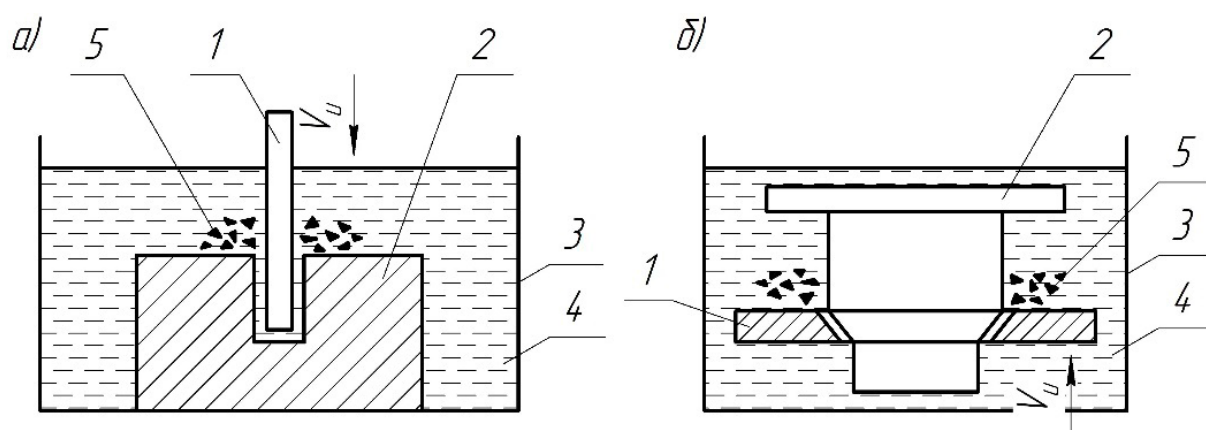
2.2.2. Технологични схеми за електроерозионна обработка

Понастоящем се прилагат няколко технологични схеми за електроерозионна обработка: пробиване, електроерозионно шлифване, разрязване с профилен или непрофилен инструмент, електроерозионно укрепване. Най-често кухините се обработват по принципа на пробиване с обемно копиране на формата на електрод-инструмента (фиг. 28а). По този начин се изработват профилни кухини в матрици, пресови форми, форми за леене; обработват се работни колела на турбини, компресори, турбинни и компресорни лопатки, тънкостенни детайли, решетки, мрежи и дълбоки отвори. Този метод се използва също за маркиране и отстраняване на счупен инструмент.



Фиг. 28. Схеми на формообразуване на детайли при електроерозионна обработка

За извършване на операции по разрязване се използва непрофилиран електрод-инструмент под формата на тел (фиг. 28б), която постоянно се подновява в работната зона чрез пренавиване от подаващата бобина към приемащата бобина. Материалът за нишковидните електроди е мед, месинг с диаметър $0,1 \div 0,2$ mm, а за диаметри по-малки от 0,08 mm се използва волфрамова или молибденова тел. Скоростта на пренавиване зависи от диаметъра на телта, материала на електрода и обработваната детайла и др. Например, оптималната скорост на пренавиване на медна тел с диаметър 0,15 mm при обработка на твърда сплав с дебелина 15 mm е $3 \div 4$ mm/min. Производителността при обработка с тел-електрод се определя от площта на повърхността, която се разрязва за единица време, и достига до 10 mm²/min. Грапавостта на обработената повърхност достига $Ra = 0,32$ μm при точност на обработката от няколко микрометра. Освен подаващото движение инструментът може да получава и допълнително движение за формоване на детайла. Благодарение на тези допълнителни движения е възможно да се нарязва резба (фиг. 28в), да се извършва вътрешно шлифование (фиг. 28г), да се изрязват канали (фиг. 28д), да се нарязват зъби (фиг. 28д), да се извършва плоско шлифование (фиг. 28ж), фино вътрешно шлифование (фиг. 28з). Електроерозионно пробиване – отстраняване на метал от кухини, вдлъбнатини, отвори, канали, както и от външни повърхности (фиг. 29 а).



Фиг. 29. Схеми за изработване на вдлъбнатина (а) и профилен вал (б): 1 – електрод; 2 – детайл; 3 – вана; 4 – работна течност; 5 – продукти от обработката.

Електродът-инструмент 1 се придвижва линейно към заготовката 2 със скорост $V_{и}$. И двата електрода са поставени във вана 3, пълна с диелектрик 4. Продуктите от обработката 5 се изхвърлят в междueleктродното пространство и се отлагат на дъното на ваната. Чрез пробиване могат да се получат повърхности както с права, така и с криволинейна ос. Съществуват два варианта на пробиване:

1. пряко копиране, при което електродът-инструмент се намира над заготовката (фиг. 29а);
2. обратно копиране, при което заготовката е разположена над електрода-инструмент (фиг. 29б). Придвижването при подаването тук може да се осъществява от заготовката.

Вторият вариант позволява да се улесни отстраняването на остатъците от обработката и, благодарение на намаляването на броя на страничните разряди чрез частици от разтопен метал в междueleктродното пространство, да се повиши точността на обработката на детайла. При изработването на вдлъбнатини разрядите възникват не само на работната страна на електрода-инструмент, но и на неговите странични повърхности. Ето защо, освен работната междина, регулирана от скоростта на подаване на инструмента, се формира странична междина, зависеща от степента на износване на електрода-инструмент.

2.2.3. Оборудване за процеса на електроерозионно пробиване

За осъществяване на процеса на електроерозионно пробиване се използва широк спектър от достъпно търговско оборудване. Пример за това е оборудването на компанията „АРТА“, която се занимава с производството на

електроерозионни машини за тесен спектър от технологични операции. Най-простият и евтин модел е машината АРТА А30 – прецизна 3-осова електроерозионна координатно-пробивна машина. Оборудването е показано на фиг. 30. Представеният комплекс има компактна конструкция с използване на неподвижна работна маса и каретки по осите X, Y, монтирани върху стоманена плоча-рамка. Машината в базовата комплектация включва система ЦПУ АРТА-х.10, високопроизводителен енергийно ефективен генератор с рекуперация на енергия, хидравличен агрегат АРТА СВ60 Мини. Техническите характеристики са посочени в табл. 7.

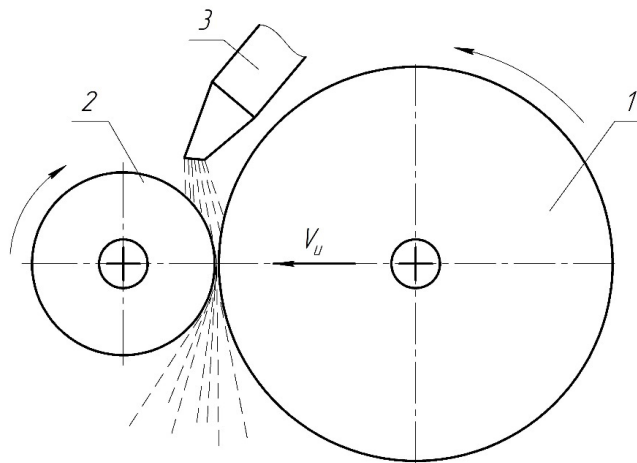


Фиг. 30. Външен вид на машината модел АРТА А30 [16]

Таблица. 7. Технически характеристики на машината модел АРТА А30

Брой управляеми оси	3
Координатни премествания по осите X, Y, Z, mm	110x60x60
Работна течност	Дестилирана вода, Въглеродородни течности
Габаритни размери на машината, mm	1300x1000x1400
Електрозахранване, V	220
Максимална употребявана мощност, kW	6
Минимален диаметър на електрода, mm	0,02
Максимални размери на обработвания детайл, mm	150x159x80

Схема на процеса на електроерозионно шлифване е показана на фиг. 31.



Фиг. 31. Схема на електроерозионното шлифване

Метален електрод-инструмент 1 във формата на диск извършва въртливо и постъпателно движение към заготовката 2 със скорост V_u . Заготовката може да се върти. Течността се подава чрез струя от дюза 3. При големи размери на заготовките процесът може да протича във вана с работна течност. Шлифването може да бъде както срещупосочно, така и в същата посока.

2.2.4. Оборудване за процеса на електроерозионното шлифоване

За осъществяване на процеса на шлифоване на електроерозионна машина е необходимо да има вграден инструментален модул с режеща тел, притежаващ определен ход и наклон на инструмента. Такава функционалност притежава оборудването на японската фирма SODICK, например машините от серия AQ. По-конкретно, на фиг. 35 е изобразена машина от модел AQ535L, която е способна, освен операции по шлифоване, да извършва операции по пробиване на отвори, маркиране и изрязване.



Фиг. 32. Външен вид на машината модел AQ535L [17]

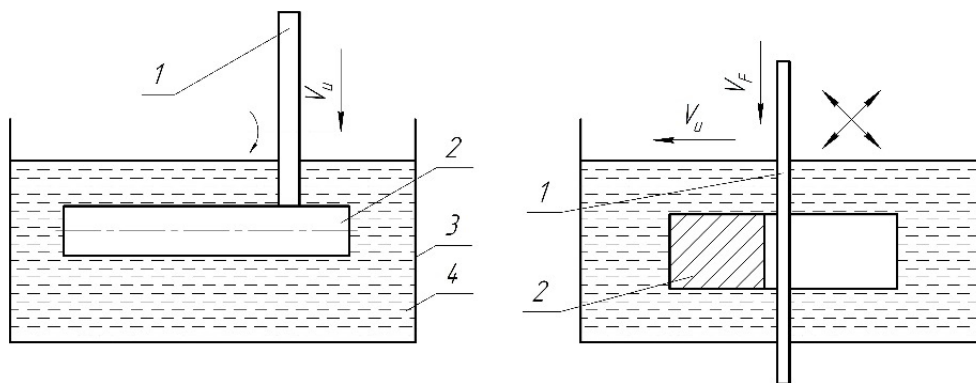
Следва да се отбележи, че моделът AQ535L вече е остарял, тъй като в момента се произвежда модифицирани и обновени машини от серията AQ-Premium. Машините от споменатата моделна серия са в състояние да обработват значително по-големи изделия, а техните функционални възможности са много по-широки, отколкото при предшественичката. Въпреки това машината AQ535L се счита за еталонна и по-изгодна за закупуване за извършване на конкретни операции, като например описаното шлифоване на повърхности. Към основните технически параметри на

оборудването от модел AQ535L следва да се отнесат данните, посочени в табл. 8.

Таблица. 8. Технически параметри на машината модел AQ535L

Брой управляеми оси	3
Координатни премествания по осите X, Y, Z,mm	550x350x300
Работна течност	Дестилирана вода, Въглеродородни течности
Габаритни размери на машината, mm	1970x2435x2355
Електрозахранване, V	380
Максимална употребявана мощност, kW	15
Максимална височина на детайла, mm	270
Максимални размери на обработвания детайл, mm	150x159x80
Дебелина на нишковидния електрод, mm	0,1 – 0,3

Разрязване с профилен или непрофилен инструмент включва разделяне на заготовката на части – отрязване – и получаване на непряко линеен контур – изрязване, което се извършва само с непрофилиран електрод-инструмент. Профилният електрод-инструмент 1 при разрязване на детайли (фиг. 33а) може да бъде изработен във формата на диск или пластина. Той се премества към заготовката 2 със скорост V и в равнината на въртенето му по дължината на детайла. Обработката се извършва във вана 3 с диелектрична течност 4.



Фиг. 33. Електроерозионно разрязване с профилиран (а) и непрофилиран (б) електрод-инструмент

Ако разрязването се извършва с пластина с едноразмерно придвижване към заготовката, тогава това ще бъде пробиване. При използване на непрофилиран електрод (фиг. 33 б) инструментът 1 се изработва под формата на кръгла тел с диаметър $0,02 \div 0,3 \text{ mm}$ или пръчка, които могат да се придвижват в различни посоки със скорост V и във всяка част от заготовката 2. За да се елиминира влиянието на износването на електрод-инструмента върху точността на прорязваните канали, телта или пръчката се придвижва по оста със скорост V . Нарязването се извършва в вана с диелектрична течност.

Електроерозионното укрепване, включващо легиране и нарастване на повърхността, обикновено се извършва на въздух. Частиците от разтопения метал на инструмента на въздух не успяват да изстинат и се отлагат върху повърхността на заготовката, образувайки върху нея слой от сплав, наситен с легиращи елементи от електрода-инструмент (или с легиращ компонент от състава на работната среда). Освен това, нанесеният върху заготовката слой е закален до висока твърдост и благодарение на това притежава повишена износоустойчивост. Нека разгледаме възможностите за прилагане на електроерозионни процеси в различни технологични схеми, осъществявани с тези методи. Пробиване в електроискров режим с профилен инструмент се използва:

а) при директно копиране:

- за изработване на ковашки матрици, пресови форми с малки размери от твърди сплави и стомани;
- за изработване на фини решетки, вълноводи, гребени и други детайли за радиоелектронната промишленост;

- за пробиване на отвори и системи от отвори с произволно сечение в труднообработваеми материали (най-малкият диаметър на кръглия отвор е около 0,1 мм);
- за изработване на отвори с криволинейна ос;
- за нарязване на резби върху карбидни и закалени стоманени заготовки;
- при маркиране на детайли;
- за изработване на свързващи канали в корпусни детайли на хидроапаратура;
- за отстраняване на отломки от свредла, метчици и други инструменти;

б) при обратно копиране:

- за изработване на профилни външни повърхности, имащи стъпаловидни преходи, препятстващи излизането на металорежещия инструмент;
- за изработване на профилни стъпаловидни вътрешни повърхности.

Пробиването в електроимпулсен режим намира приложение:

- при обработката на ковашки матрици с големи размери;
- за получаване на работния профил на големи пресформи;
- за предварителна обработка на обемни заготовки със сложна форма, например лопатки на турбини и компресори;
- за изработване на канали със сложно сечение и криволинейна основа, например между лопатъчни вдлъбнатини в работни колела на газови турбини;
- за получаване на свързващи канали в детайли на хидравлично оборудване;
- за отстраняване на дисбаланс при детайли от крехки и твърди материали, например магнитни сплави.

Електроерозионното шлифване в течни среди се използва:

- при изработката на детайли от крехки, вискозни материали и детайли, съставени от тънки листове (ротори на електрически машини) ;
- за нарязване на външни резби върху детайли от твърди сплави и закалени стомани;
- за получаване на прецизни отвори;
- за заточване на твърдосплавни режещи инструменти;

- за профилиране и изправяне на електропроводими абразивни и диамантни дискове.

Електроконтактното шлифване във въздушна среда позволява отстраняването на дебели слоеве метал при относително висока грапавост на повърхността. То се използва широко за отстраняване на локални дефекти и повърхностен дефектен слой от слитъци, ковани изделия и валцувани продукти. Разрязването с профилен електроден-инструмент в режим на електроискров разряд позволява да се изпълняват:

- канали и прорези с малка ширина, например в цанги;
- профилни електроди-инструменти за пробиване;
- разрязване на заготовки от волфрам и други материали.

Чрез разрязване с непрофилиран електрод-инструмент се получават:

- тесни проходни или затворени прорези; изрязващи матрици с малки размери от твърди сплави и закалени стомани;
- работната част на фрези и други инструменти;
- прорези в цанги за закрепване на детайли с малък диаметър (по-малко от $2 \div 3 \text{ mm}$);
- таблетки от магнитни и волфрамови сплави, при обработката на които е необходимо да се постигне минимален разход на материал;
- надписи, знаци, гравюри.

Електроконтактното рязане с диск или лента в течност се използва:

- за получаване на заготовки от труднообработваеми материали (неръждаеми, термоустойчиви, титанови, магнитни и други сплави);
- за рязане на тръби от конструкционни материали;
- за прорязване на тесни канали и пробиване отвори в детайли.

Рязането във въздушна среда намира широко приложение в металургичната промишленост за:

- разделяне на части на валцувани изделия;
- отрязване на ливни канали от големи лети заготовки.

Електроерозионното укрепване и легиране се прилагат:

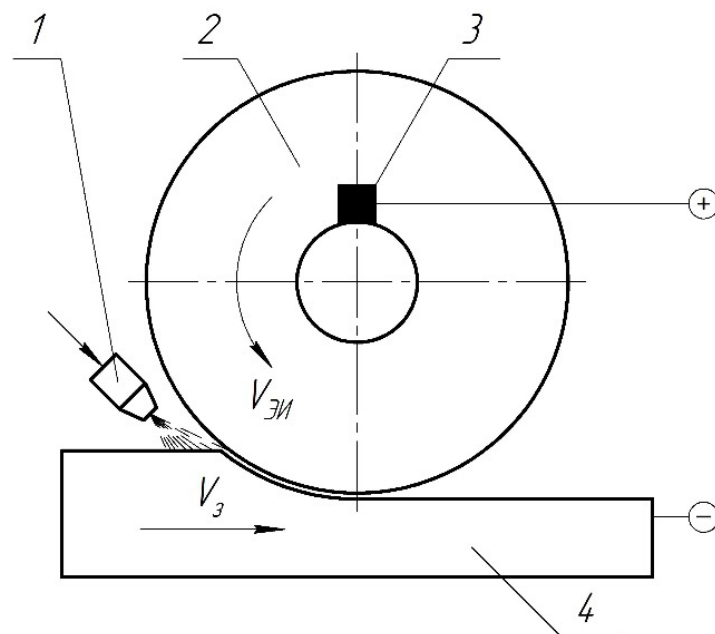
- за укрепване на остриетата на стоманени инструменти;
- с цел възстановяване на размерите на износени детайли;

- за повишаване на изнosoустойчивостта на подвижните елементи на конструкциите;
- за нанасяне върху електрическите контакти на материали с ниско електрическо съпротивление.

За осъществяването на всички изброени по-горе процеси в еднаква степен са подходящи вече споменатите технологични комплекси. В зависимост от изискваните параметри на обработката е необходимо внимателно да се подбират възможните режими на обработка и оборудването, което ги осъществява.

2.3. ЕЛЕКТРОКОНТАКТНА ОБРАБОТКА

Същността на електроконтактната обработка (ЕКО) се основава на електро-ерозионното разрушаване на електрода-заготовка под въздействието на електродни разряди. Принципната схема на ЕКО е изобразена на фиг. 34.



Фиг. 34. Схема на електроконтактната обработка

Към електрода-инструмент 2 чрез четково устройство 3 и към заготовката 4 се подава напрежение на постоянен ток. При това на електрода във формата на диск се придава въртене с голяма периферна скорост ($30\div 50$ m/sec), а на заготовката – движение на подаване V_z . Процесът може да протича на въздух, в работна течност (вода с анти-корозионни добавки) или с поливане на зоната на обработка. Повърхностите на електрода не са идеално гладки и имат неравности. При въртенето му изпъкналостите му периодично се приближават към заготовката, чак до контакт. На определено разстояние между електродите възниква единичен разряд, който преминава в дъгов разряд и предизвиква разтопяване на метала на заготовката. Разтопените метални частици се отстраняват от зоната на контакт с бързо въртящ се инструмент. При този метод продължителността и честотата на импулсите на тока зависят от качеството на работната повърхност на електрода и честотата на неговото въртене. Въртящият се електрод сам регулира параметрите на импулсите, затова не се изисква специален генератор, както при ЕЕО, а се използва постоянен или променлив ток с ниско напрежение. Ако процесът протича във въздушна среда, възникват

по-продължителни дъгови разряди отколкото при обработка в течност, тъй като след контакта между инструмента и заготовката дъгата може да гори доста дълго време. При това частици от разтопен метал могат да достигнат обработената повърхност и, прониквайки в нея, значително да влошат качеството на тази повърхност. Поради това ЕКО на въздух се извършва при подготвителни операции и такива груби операции, при които не се поставят изисквания към качеството на повърхностите. Например, при отрязване на наливни канали и излишъци при отливки от високо-якостни стомани и сплави [18]. Освен това термичното въздействие на разрядите предизвиква структурни промени в повърхностните слоеве на метала. Дълбочината на слоя с променена структура при обработка на въздух може да достигне $2\div 3$ mm. При използване на течности при ЕКО процесът се подобрява качествено, а именно:

- подобрява се локализацията на електрическите разряди;
- интензивно се отстраняват от зоната продуктите на ерозията, които се отлагат на дъното на съда;
- осъществява се охлаждане на електрода и заготовката;
- намалява се грапавостта на обработената повърхност;
- изключва се прилепването на разтопени частици към заготовката.

Като работни течности се използват вода, $2\div 3$ % емулсия; $2\div 3$ % разтвор на калцинирана сода CaCO_3 и др. Материали за електродни инструменти могат да бъдат мед, чугун (при обработка на плоски елементи), стомана Ст3 (при операции по отрязване). ЕКО се характеризира с висока производителност. Основният фактор, определящ производителността на ЕКО, е мощността, реализирана в междуелектродното пространство. С увеличаването на тока и напрежението се увеличава скоростта на отнемане на метал. ЕКО се използва за рязане, струговане, отстраняване на фаски в листови заготовки за заваряване, грубо обработване на слитъци, заточване на режещи инструменти.

2.3.1. Примери за практическо приложение на електроконтактната обработка

2.3.1.1. Електроконтактно рязане

Електроконтактното рязане се извършва в следните режими (табл.9):

Таблица .9. Режими на електроконтактното рязане

Работен ток, А	1500-10000
Работно напрежение, V	24-31
Вид на тока	Променлив
Скорост на диска електрод, m/sek	30-100
Износване на диска-електрод (% обем отделен метал)	До 5
Дебелина на диска-електрод, mm	2-6
Диаметър на диска-електрод, mm	750-1000

Електроконтактното рязане с въртящ се диск или непрекъснатата лента с подаване на ниско напрежение към инструмента и заготовката, се препоръчва за рязане на тръби, кръгли и правоъгълни заготовки, профилни изделия и други детайли от различни токопроводими материали. Производителността на електроконтактното рязане достига 2000 mm²/sek за стомана и до 4000 mm²/sek – за алуминиеви сплави. Ширината на разреза в резултат на обработката надвишава с 1÷4 mm дебелината на дисковия електрод.

2.3.2. Оборудване за електроконтактно рязане

Оборудването за извършване на електроконтактно рязане се състои предимно от машини с комбинирани методи на взаимодействие с заготовката. Например, машината модел 4А350 използва комбиниран процес на анодно разтваряне и електроерозионно въздействие върху обработваната заготовка при движещ се спрямо обработваната повърхност електроден-инструмент. Работна среда в този случай е електролитът, който отделя върху анода пасивиращ слой. Обикновено това е воден разтвор на течено стъкло. Външният вид на машината е показан на фиг. 35, а техническите характеристики – в табл. 10.



Фиг. 35. Външен вид на машината модел 4A350 [19]

Таблица. 10. Технически характеристики на машината модел 4A350

Максимална височина на обработвания детайл, mm	350
Размери на работната маса, mm	2000x800
Габарити на машината, mm	3700x4600x3700
Електрозахранване, V	380
Максимална мощност, kW	5,6
Обем на резервоара за диелектрик, l	500

В авторемонтните заводи се прилага електроконтактно шлифване на възстановени чрез напластяване основни и биелни шийки на коляновите валове. В този случай, поради високата твърдост на напластения метал (HRC 50÷55), абразивното шлифване е малко ефективно. Обработката на шийките се извършва с чугунен диск на модернизирана цилиндрично шлифовъчна машина, като детайлът и инструментът са свързани към източник на постоянен ток (детайлът – анод, дискът – електрод – катод). За охлаждане в зоната на обработка се подава 5%-на емулсия. Режимите на електроконтактно шлифване са посочени в табл. 11.

Таблица. 11. Режими на електроконтактно шлифоване

Работен ток, А	600-800
Работно напрежение, V	26-28
Скорост на въртене на дисковия инструмент, m/sek	30
Скорост на въртене на детайла, m/sek	0,25
Средна прибавка, mm	2,5
Производителност на обработката, mm ² /min	60000

Поради факта, че обработката на детайли по този начин е доста трудоемка и тясноспециализирана операция, използваните за нейното осъществяване машини са големи по размери и строго стационарни устройства. Най-разпространеният и доказал се в областта на обработката на материали е машината ME301. Електроконтактната машина ME-301 е оборудвана с двуколонен карусел с диаметър на планшайбата 2,8 m. Обработката на изделията се извършва във вана с работна течност.

2.3.3. Оборудване за електроконтактно шлифоване

По този начин пример за оборудване за електроконтактно шлифоване може да бъде машината ME-301, изобразена на фиг. 36.



Фиг. 36. Външен вид на машината модел ME301

Техническите характеристики на машината според паспортните данни са посочени в табл.12.

Таблица 12 Технически характеристики на машината модел ME301

Максимален размер на обработваните детайли, mm	1000x1500x600
Диаметър на планшайбата, mm	2800
Габарити на машината, mm	6500x8000
Електрозахранване, V	380
Обем на резервоара за диелектрик, l	2500

При обработката на фаски за заваряване върху бронирани листове от високоякостна стомана, с въртящ се чугунен електрод и потапяне на заготовката и инструмента във вода, производителността на процеса достигаше $70\,000\text{ mm}^3/\text{min}$, като при това минутната производителност е $2\div 3$ пъти по-висока от производителността на механичната обработка. За разновидност на ЕКО следва да се счита и новият метод на електроерозионна обработка с къса дъга (ЕЕОКД). Този метод се използва за отстраняване на прибавки от големи заготовки от термоустойчиви и титанови сплави чрез енергията на нисковолтов квазистационарен дъгов разряд с постоянен ток. Обработката се извършва с въртящ се чугунен или меден електрод с поливане с вода или чрез потапяне на заготовката в нея. ЕЕОКД се отличава с най-високата производителност сред всички електрофизични и електрохимични методи и достига $2,5\text{ sm}^3/\text{sek}$ при грапавост $Ra = 25\div 50\text{ }\mu\text{m}$ и дълбочина на променения слой $0,1\div 0,2\text{ mm}$ за топлоустойчив сплав. При обработка на груби повърхности може да се постигне грапавост $Ra = 2,5\div 6,3\text{ }\mu\text{m}$ при производителност $0,5\text{ sm}^3/\text{sek}$.

2.3.4. Оборудване за електроерозионна обработка с къса дъга

Като се има предвид относителната новост, както и високата производителност на метода в сравнение с останалите, представени в този параграф, оборудването за неговото прилагане е комплексно и скъпо. Пример за това е гамата от прецизни координатно-пробивни машини на фирма „АРТА“. Моделите АРТА 1040 и e-Drill 10 позволяват извършването на операции по изработване на сложни отвори, отстраняване на прибавки вътре в отворите и много други сложни технологични задачи. На фиг. 37 а, е показан моделът АРТА 1040, а моделът e-Drill 10 е изобразен на фиг. 37 б.



Фиг. 37. Външен вид на машините за електроерозионна обработка с къса дъга: а – модел APTA 1040; б – модел APTA e-Drill 10 [20]

Техническите характеристики на двете машини са обобщени в обща таблица 13.

Таблица 13 Технически характеристики на машините APTA модели 1040 и e-Drill 10
APTA 1040 APTA e-Drill 10

Параметри на машините	APTA 1040	APTA e-Drill10
Брой управляеми оси	3	3
Ход на преместване по осите, X, Y, mm	200x320	250x350
Максимални размери на заготовките, mm	420x220x145	500x400x200
Работна среда	Дестилирана вода, течни въглеродороди	Питейна вода
Габарити, mm	1950x2000x2050	1400x700x1800
Диаметър на електрода, mm	0,2-3	0,3
Електрозахранване, V	220	220
Употребявана мощност, kW	6	3

2.4. АНОДНО-МЕХАНИЧНА ОБРАБОТКА

Анодно-механичната обработка (АМО) се основава на комбинирано механично, електроерозионно и електрохимично въздействие върху материала на отстранявания слой. С увеличаването на специфичната мощност, подавана в зоната на обработка, този метод по характер на електрическото въздействие се доближава до електроерозионното, а при намаляване на специфичната мощност – до електрохимичното. При всички методи на анодно-механичната обработка работните хлабини между токопроводящата връзка и детайла са много малки ($0,01 \div 0,03$ мм), което осигурява висока плътност на тока и интензивно електрохимично и електроерозионно въздействие. По време на обработката свързващият материал се изгаря и износените абразивни зърна се откъсват, което допринася за самозаточването на дисковете.

Предимства на АМО:

- висока производителност при груби режими на обработка;
- високо качество на обработената повърхност при фини режими;
- възможност за обработка на всякакви труднообработваеми метали и сплави;
- сравнително лесно отстраняване и утилизиране на продуктите от обработката, вариране на режимите на обработка в широки диапазони.

Недостатъци на АМО:

- експлоатационни неудобства при използването на течна стъкло като електролит;
- относителна сложност при експлоатацията;
- висока цена на оборудването.

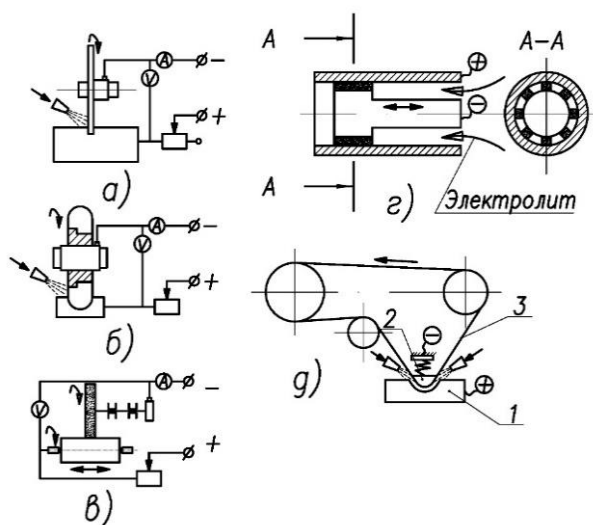
2.4.1. Анодно-абразивна обработка

Отстраняването на метал при анодно-абразивната обработка се дължи на възникването в зоната на обработка на следните явления:

- а) анодно разтваряне на материала, което води до отстраняване на част от метала на отрязващия се слой и образуване на филм;
- б) нагряване на материала на отрязващия се слой;
- в) електроерозионно разрушаване;

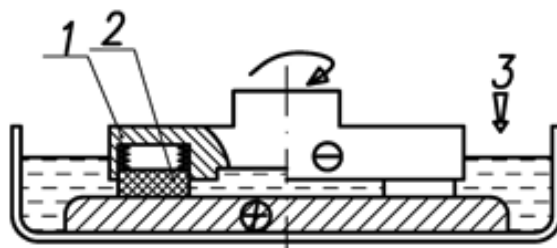
г) механично отрязване на метала с абразив, предварително отслабен от анодното въздействие, топлинните и електроерозионните процеси сами по себе си. Отстраняването на метал при АМО се осъществява чрез електрически ток в междуелектродната междина почти без силова натоварване върху възлите на анодно-механичната машина, за разлика от металорежещите машини, в които тези възли са силно натоварени. Интензивността на отнемането на метал практически не зависи от механичните свойства на обработваните метали и инструмента (твърдост, жилавост, якост), поради което АМО е целесъобразно да се прилага за изделия от високолегирани стомани, твърди сплави и др. АМО се различава според вида на инструмента, използван за механично въздействие:

- инструменти от стомана, чугун, мед, месинг, графит. Обработката се извършва при напрежение $10 \div 12$ V, като за електролит се използва течено стъкло (натриев силикат);
- свързан абразив (този вариант на АМО се нарича анодно-абразивен). Като инструменти при това се използват абразивни или диамантени токопроводящи дискове и абразивни пръти. Разновидност на този процес е схемата на анодно-механично шлифование с неметална лента.
- несвързан абразив (този вариант на АМО се нарича електро-химико-механичен). При този метод на обработка анодният слой се отстранява с финодисперсен абразив, намиращ се в суспензия в електролита. Като режещ инструмент при разрязване се използва стоманен диск с дебелина $0,5 \div 6$ мм и диаметър до 1200 мм (фиг. 38 а).



Фиг. 38. Типови схеми на анодно-механична обработка: а) – разрязване; б) – обработкана профилна повърхност; в) – шлифование с абразивен диск; г) – хонинговане; д) – шлифование с лента

Дисковият електрод-инструмент (катод) се върти със скорост $10 \div 25 \text{ m/sec}$ и се придвижва към заготовката. Като електролит се използва воден разтвор на течено стъкло. Отстраняването на метал от заготовката става чрез анодна пасивация, електротермични явления и механично въздействие на електрод-инструмента върху заготовката. С дисковия електрод се разрязват заготовки с диаметър до 150 mm , а с лентовия – до 600 mm . Производителността на разрязването е $2000 \div 6000 \text{ mm}^2/\text{min}$. При анодно-абразивно шлифване (фиг. 38в) абразивният диск се върти със скорост $30 \div 40 \text{ m/sec}$ и представлява катод, а обработвания детайл – анод. При шлифването се използват диамантени дискове с метална свързка, дискове от електрокорунд, силициев карбид, при които порите са запълнени с разтопен метал или графит. Като електролит при шлифването на стомани се използва $5 \div 10 \%$ -ен разтвор на азотна киселина с натрий с добавка на инхибитори на корозията. Производителността на анодно-абразивното шлифване е значително по-висока от тази при обикновеното шлифване и възлиза на $2000 \div 4000 \text{ mm}^3/\text{min}$. Постига се точност на обработената повърхност до $0,003 \text{ mm}$, а грапавостта — до $Ra = 0,16 \text{ }\mu\text{m}$; не възникват значителни структурни промени и вътрешни напрежения. При електрохонинговането електронеутралните абразивни пръчки се поставят върху метална основа, която служи като катод (фиг. 38г). Процесът на анодно-механично шлифване на неметална лента (фиг. 41д) се извършва по схемата на обичайното лентово шлифване. Детайл 1 е анод и може да извършва колебателни движения. Катод 2 е меден или твърдосплавен копир, който притиска електронеутралната лента 3 към детайла. Обработката може да се извършва с подвижен или неподвижен катод-инструмент. При анодно-абразивно полиране (фиг. 39) металният електрод-инструмент 1 с не електропроводими абразивни накладки 2 се поставя над анода-заготовката. За отстраняване на пасивиращия слой върху заготовката в разтвора се въвежда дребнозърнест абразив 3, смеси - еластични неелектропроводими абразивни накрайници от поролон, гума, дърво и други меки материали. Като абразив се използват шлифовъчни прахове от електрокорунд, както и хромов оксид. Обработката се извършва както при постоянен, така и на променливо напрежение и ток от 6 до 18 V в разтвори на азотна киселина и натрий. Този процес се прилага за полиране на детайли от неръждаеми стомани и други плоски повърхности на детайли. След полиране се постига грапавост на повърхността $Ra = 0,08 \div 0,04 \text{ }\mu\text{m}$.



Фиг. 39. Анодно-абразивно полиране

2.4.2. Оборудване за провеждане на анодно-механично/абразивно шлифоване

Операциите по анодно-механична и анодно-абразивна обработка на повърхности са доста сходни, поради което могат да бъдат комбинирани на базата на една машина. Пример за такава „базова“ машина за операции по анодна обработка е моделът на електрохимичната шлифовъчна машина ОШ-625ЕФ3. Към особеностите на тази машина се отнася защитата на работната зона със специална кабина, пречистването на електролита от производствени отпадъци с помощта на центробежно въздействие, преместването на работните органи върху ролкови опори. Диамантеният диск при този тип обработка практически не се износва благодарение на електрохимичните въздействия в зоната на обработка. Външният вид на машината модел ОШ-625ЕФ3 е показан на фиг. 40.



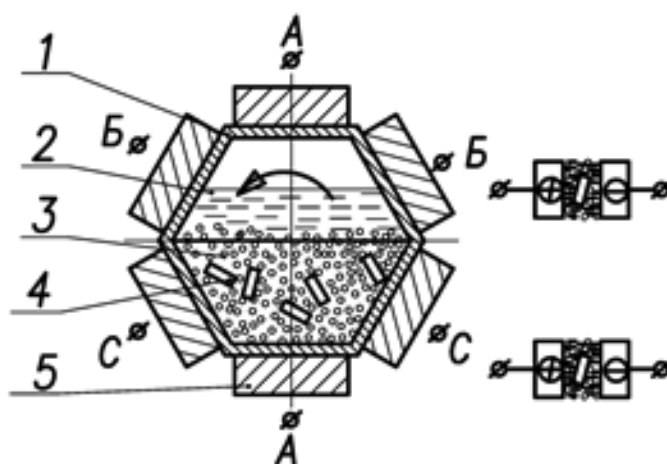
Фиг. 40. Външен вид на машината за електрохимично шлифване модел ОШ-625ЕФ3 [21]

Техническите параметри и характеристики на машината за електрохимично шлифване модел ОШ-625ЕФ3 са посочени в табл. 14.

Таблица. 14. Технически характеристики на машината за електрохимично шлифване
модел ОШ-625ЕФ3

Преместване на масата, mm	550
Размери на работната маса, mm	450x200
Габарити на машината, mm	2500x2650x2360
Електрозахранване, V	380
Мощност на главното вретено, kW	2,2
Точност на позициониране по осите, mm	0,004

Отстраняването на усенъци и заобляването на остри ръбове при дребни детайли се извършва в анодно-абразивни барабани, работната камера има форма на шестостен (фиг. 41). На перфорираните винипластови стени на барабана 1 отвън са закрепени метални плочи-електроди 5. Съседните плочи са включени към различни фази (А, Б, С) на вторичната намотка на трифазен понижаващ трансформатор. Барабанът се запълва с обработваните детайли 4 и порцеланови топчета 3 с диаметър 3÷5 мм. Електролитът 2 се влива в барабана с помпа и се излива през отворен отвор в резервоара. В процеса детайлите, които са електроди със свободен потенциал, се подлагат на анодно разтваряне и абразивно въздействие. Работното напрежение на пластините е 8÷12 V, а токът достига до 300 А. Продължителността на процеса е 1÷2 часа. Анодно- абразивна обработка се използва за заточване на твърдосплавни режещи инструменти, за изработване на прецизни твърдосплавни детайли с грапавост на повърхността $Ra = 0,32 \mu m$. Увеличава износоустойчивостта на инструмента до 150%.



Фиг. 41. Външен вид на анодно-абразивен барабан за отстраняване на усенъци и закръгляне на ръбовете

2.4.3. Оборудване за отстраняване на усенъци и закръгляне остри ръбове

Съществуват цели фирми, които се специализират в производството на оборудване за химическа обработка на изделия. Те внимателно анализират нуждите на пазара и активно се приспособяват към тях, като предлагат готови решения под формата на оборудване. Една от тези фирми е немската компания EMAG, специализирана в оборудване за металообработка. Компанията предлага широк спектър от технологични решения в областта на металообработката, включително и за процеси по обработка на ръбове и отстраняване на грапавини с всякаква степен на сложност. Серията ECM (electro-chemical machining), чиято основа е специализацията в електрохимичната обработка, е идеално подходяща за извършването на горепосочените процеси. Възможността за обработка на външни и вътрешни кухини на детайли, отвори, труднодостъпни възли и съединения е в основата на технологичните възможности на машините от серията ECM. Серията е представена от моделите PTS 2500, PT, PO 100 SF, PO 900 BF, CS, CL900. Разликите между моделите се състоят в габаритите на обработка, необходимите стойности на точността и необходимите технологични операции. На фиг. 42 е представена машина модел PTS 2500. Твърди се, че по време на обработката инструментът практически не се износва (с възможност за обработване на труднообработваеми сплави и метали). Възможно е да се постигнат високи показатели за качеството на повърхността, без усенъци и промяна в структурата на материала.



Фиг. 42. Външен вид на ECM машината за отстраняване на усенъци чрез ЕХО методи, модел PTS 2500 [22]

Техническите характеристики на машината са представени в табл. 15.

Таблица. 15. Технически характеристики на ЕСМ машината за отстраняване на грапавини чрез методи EXO, модел PTS 2500

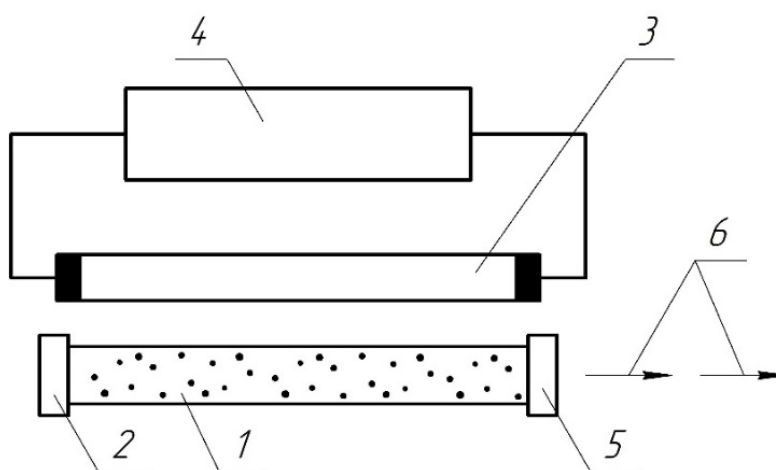
Габаритни размери на обработвания детайл, mm	800x550x515
Размери на работната зона, mm	1070x700
Габарити на машината, mm	2100x3200x2900
Генератори на импулса мощност, A	12000
Продължителност на импулса, msec	50
Система за подготовка на електролита	

Глава 3. ВИСОКОЕФЕКТИВНИ МЕТОДИ ЗА ОБРАБОТКА НА МАТЕРИАЛИ, ОСНОВАНИ НА ИЗПОЛЗВАНЕТО НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ

3.1. ЛЪЧЕВИ ВИДОВЕ ОБРАБОТКА

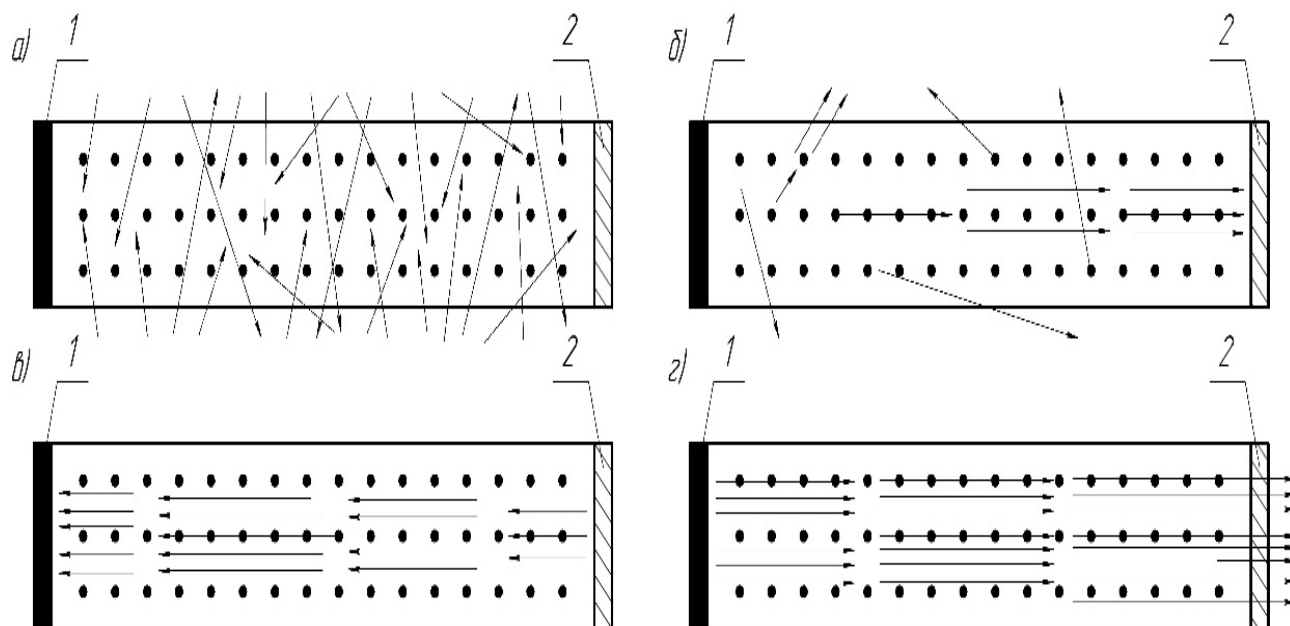
3.1.1. Светлинна (лазерна) обработка

Лазерът или оптичният квантов генератор (ОКГ) е източник на светлинни лъчи, характеризиращи се с висока плътност на енергията и кохерентност, т.е. успоредност на излъчваните лъчи. Лазерното излъчване може да се получава както в импулсен, така и в непрекъснат режим. Съществуват три вида лазери: твърдотелни, газови и течни. За технологични цели се използват твърдотелни и течни лазери. Всеки атом или молекула (частица) на веществото може да притежава различна, но напълно определена стойност на енергията и да се намира на редица напълно определени дискретни енергийни нива. Ако частицата промени своето енергийно състояние, тя преминава от едно ниво към друго. За да премине на по-високо енергийно ниво, частицата трябва да погълне квант светлина – фотон. При преминаване към по-ниско енергийно ниво се излъчва част от енергията или фотони. Честотата на поглъщаната или излъчвана светлина се определя от физическите константи на активното вещество на лазера. Широко е използван кристален лазер на базата на синтетичен рубин във формата на пръчка, служеща като резонатор, в който възниква и се формира лъчът, излъчван от лазера. На фиг. 43 е изобразена най-простата схема на кристален лазер.



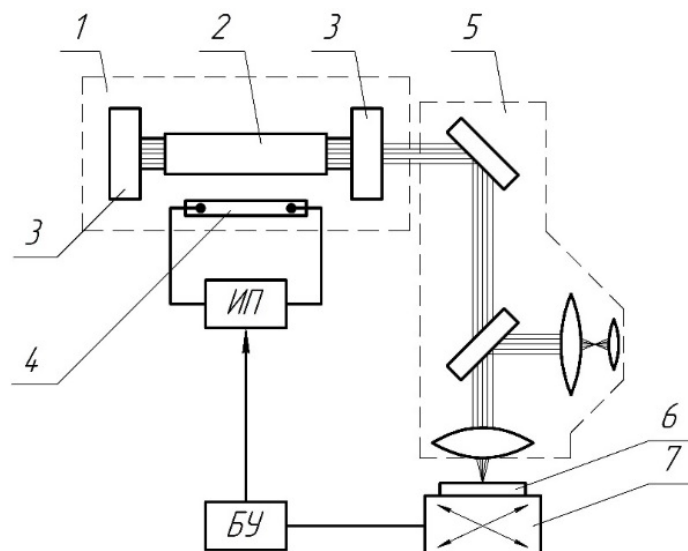
Фиг. 43. Схема на кристален лазер

Рубиновият прът 1 е снабден с импулсна лампа 3, пълна с ксенон и избухваща при импулсен разряд на кондензатора на източника на захранване 4 (източник на енергия за помпа). По краищата на дорника са монтирани непрозрачна 2 (с коефициент на отражение, равен на 1) и полупрозрачна (с коефициент на отражение 0,5) пластини 5. Светлинният лъч 6, възникващ в резултат на възбуждането на атомите, излиза навън през пластината 5. На фиг. 44 е показан процесът на образуване на лазерния лъч.



Фиг. 44. Последователен процес на образуване на лазерния лъч

Атомите на хрома (черни точки), съдържащи се в рубина, се намират в невъзбудено състояние (фиг. 44а). Под действието на фотони от лампата атомите на хрома преминават във възбудено състояние. Част от излъчената енергия се разсейва през стените на пръта и се проявява под формата на люминесцентно светене на рубиновия кристал. Друга част от енергията, насочена успоредно на оста на пръта (фиг. 44б), по пътя на своето движение предизвиква верижна реакция на образуване на нови фотони (фиг. 44в). Фотоните, като се отразяват многократно от пластините 1 и 2, нарастват лавинообразно при всяко отражение и под формата на мощен светлинен лъч излизат от края с полупрозрачно покритие (фиг. 44г). На фиг. 45 е изобразена схема на лазерна технологична установка.



Фиг. 45. Схема на лазерна технологична установка

Лазерната глава 1 се състои от: работно тяло 2; две огледала- резонатори 3 (едно от огледалата е полупрозрачно); лампа за усиление на светлината 4 с отражател, оптична система 5 за фокусиране на лъча върху обработваемата детайл 6, монтирана на координатна маса 7; блок за управление (БУ), който осъществява навигацията на координатната маса, и източник на захранване (ИП) на лампата за усиление на светлината. Работното активно тяло на твърдотелните лазери е рубинът, представляващ кристал от корунд с примес на хром, итриево-алуминиев гранат (ИАГ) , който също е кристал от корунд с примес от неодим и стъкло с примес от неодим. Работни частици са примесите от хром или неодим. ОКГ на рубин и стъкло работят в импулсен режим, а тези на ИАГ могат да работят както в импулсен режим, така и в непрекъснат. Усилването на ОКГ, работещи в импулсен режим, се осъществява чрез импулсни ксенонови лампи, които се захранват от кондензаторна батерия. Работното тяло и лампата за усиление се поставят в отражател с цел по-пълно и равномерно използване на светлинния поток. При нагнетяването не цялата енергия, погълната от работното тяло, се превръща в излъчване. Значителна част от нея се губи при нагряване (за рубина около 50%). За отвеждане на топлината от работното тяло в някои случаи се предвижда принудително охлаждане с въздух, вода или течен азот. Работно тяло на газовите лазери могат да бъдат чисти газове: ксенон, криптон, хелий, азот или смеси газове, например въглероден диоксид с азот и хелий. Помпането се осъществява, като правило, от електрони при преминаването на електрически ток през газа. При сблъсък на електрон, движещ се с голяма скорост, с атом или молекула на газа, електронът предава

енергия на атома и го превежда на по-високо енергийно ниво [23]. Газовите лазери могат да работят както в импулсен режим, така и в режим на непрекъснато излъчване. При взаимодействие с повърхността на средата лазерното излъчване частично се отразява, а частично прониква във вътрешността на материала, поглъща се в него и се превръща в топлина. Повишаването на температурата води до стопяване на материала, неговото изпаряване, изтичане на стопилката от зоната на облъчване и образуване на вдлъбнатина. Този процес се съпътства от промяна на оптичните и термофизичните свойства, термично разширение, както и фазови преходи. Високите скорости на нагряване (до 10^{10} °C/ sek) и охлаждане (до 10^3 °C/sek), както и големите градиенти на температурата, могат да доведат и до други механизми на разрушаване, например до напукване на материала под въздействието на термични напрежения, възпламеняване и горене, термично разлагане на материала. В редица случаи тези фактори разширяват възможностите на лазерната обработка. Най-широко приложение в промишлеността лазерите са намерили при рязане на различни материали, пробиване на отвори и заваряване. Лазерното рязане притежава съществени предимства в сравнение с други методи:

- широк спектър от материали, подлежащи на рязане;
- възможност за получаване на тънки разрези благодарение на острото фокусиране на лазерния лъч;
- малка зона на термично въздействие на лъчението;
- липса на механичен контакт, което е особено важно при разрязването на тънколистови материали;
- химическа чистота на процеса на рязане;
- възможност за автоматизация на процеса;
- възможността за рязане по сложен контур в две и дори три измерения.

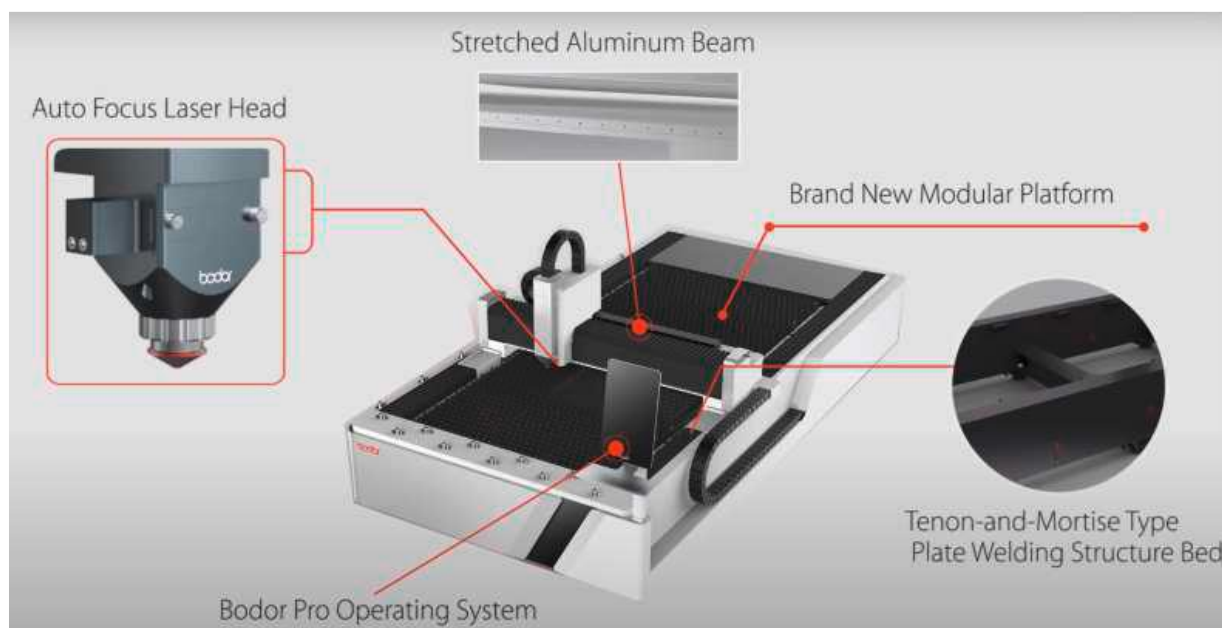
Лазерното рязане се осъществява при относително движение на фокусирувания лъч и обработвания детайл в две взаимно перпендикулярни посоки. Рязането се извършва, като правило, с вдухване на газ в зоната на рязане. Този процес е получил наименованието газолазерно рязане. Газът се избира в зависимост от обработвания материал. При рязане на дърво, шперплат, хартия, текстилни материали, пластмаси в зоната на рязане се подава въздух или инертен газ. Газът охлажда краищата на разреза и предотвратява възпламеняването на материала, разширяването на разреза, издухва от зоната на въздействие на лъча разтопения материал и почиства зоната на рязане. Това позволява получаването на обработени повърхности

на разреза с ниска грапавост и висока точност. При рязане на метал в зоната на нагряване се подава кислород. В резултат на екзотермичната реакция на окисляване на метала се отделя допълнителна топлина, което позволява значително да се повиши скоростта на рязане. Ширината на разреза при обработката на много марки стомана с дебелина 4 mm е от 0,8 до 1 mm на входа и от 2 до 4 mm на изхода. Скоростта на рязане на тънколистна стомана достига 10 m/min. Рязането на тънкостенно тръбно стъкло при производството на електровакуумни уреди се извършва при въртене на заготовката. При това върху повърхността на тръбата се създава тесен пръстенен източник на топлина, предизвикващ в стъклото големи температурни градиенти и термоциклични напрежения, които водят до образуването на пръстеновидна пукнатина и отчупване. В зависимост от скоростта на нарастване на термичните напрежения височината на микронеравностите Rz на повърхността на раздела може да варира от 40 до 0,2 μm . Лазери с непрекъснато излъчване с малка мощност се използват за нарязване на резистори чрез отстраняване на резистивния слой на необходимите места от керамичната основа. За тази цел лъчът се фокусира върху повърхността на заготовката, която се върти около надлъжната ос и едновременно с това се придвижва по нея. Нарязването на резистори с помощта на лазер позволява да се намалят техните размери и да се съчетае нарязването с контрол, като процесът се прекъсва практически мигновено при достигане на зададената номиналния размер. Скоростта на рязане достига 12 m/min. Лесното управление на лъча в съчетание със съвременните средства за програмно управление позволява да се получат разреза със сложни конфигурации и прави лазерното рязане много перспективно.

3.1.2. Оборудване за лазерно рязане

На настоящия етап от технологичното развитие съществува изключително широк избор от оборудване, достъпно за този вид обработка. Производителите постоянно усъвършенстват своето оборудване, като добавят нови възможности и подобряват старите характеристики. По този начин се осъществява постоянен процес на повишаване на качеството на крайния продукт, благодарение на което нарастват и изискванията на клиентите. Пример за широкия асортимент от налично оборудване е серията лазерни машини за рязане на компанията „Bodor“. Тази швейцарска компания е специализирана в сглобяването и продажбата на лазерни машини за широк спектър от задачи и технологични процеси. В зависимост от

изискваните условия компанията може да предложи машини за рязане от отворен тип (фиг. 46), от затворен тип (фиг. 47), машини за обработка на валове и тръби (фиг. 48), както и множество други, специализирани решения, включително мобилни и компактни устройства. Лазерната установка от отворен тип от серия А е оборудван с оптичен лазер с фиксирана работна повърхност. Рамата на машината е изцяло заварена и фрезована. Установката може да обработва въглеродни стомани до 20 mm, медни сплави до 6 mm, легирани стомани до 10 mm, както и алуминий до 10 mm.



Фиг. 46. Схема на машината от отворен тип от серия А [24]

Машината от серия А притежава технически характеристики, представени в табл. 16.

Таблица. 16. Технически характеристики на машината от серия А

Работно пространство, mm	6100x2500
Мощност на лазера, W	3000
Точност на позициониране, m	0,05
Максимална скорост на рязане, m/min	100

Машината от серия С със затворен тип разполага със защитна кабина. Това се обуславя от високата мощност на лазера – до 40 000 W. Освен това машината разполага с две сменяеми маси с различни размери, което позволява обработката на широк спектър от детайли.



Фиг. 47. Външен вид на машината от затворен тип от серия С

Машината от серия С притежава технически характеристики, представени в таблица 17.

Таблица. 17. Технически характеристики на машината от серия С

Работно пространство, mm	12500x2600
Мощност на лазера, W	1500 - 40000
Точност на позициониране, mm	0,05
Максимална скорост на рязане, m/min	110

Машината от серия К е предназначена за рязане на цилиндрични детайли с дължина до 6,5 m. Възможно е затягане на детайли с диаметър до 360 mm при кръгло сечение и до 254 mm при квадратно сечение.



Фиг. 48. Машина за обработка на валове от серия К

Машината от серия К притежава технически характеристики, показани в табл. 18.

Таблица. 18. Технически характеристики на машината от серия К

Работно пространство, mm	8649x1398x1811
Мощност на лазера, W	1000 - 3000
Точност на позициониране, mm	0,02
Максимална скорост на рязане, m/min	60

За пробиване на отвори се използват лазери, работещи в импулсен режим. При пробиването се получава термично въздействие на неподвижния лазерен лъч върху материала, което води до неговото стопяване и изпаряване. По дълбочина отворът се разширява главно за сметка на изпаряването, а по диаметър – за сметка на стопяването на стените и изтичането на течния материал. Показателите на обработката зависят в по-голяма степен от свойствата на материала и параметрите на излъчването. Формата на образуващия се отвор зависи от разфокусирането на лазерния лъч и положението на фокуса спрямо обработваната повърхност. При пробиване на отвори в детайли с малка дебелина обикновено се използват единични импулси с голяма енергия. Дълбоки отвори се получават при използване на серия импулси с ниска енергия ($0,1 \div 0,3$ J). В този случай се получават отвори с по-малка конусност и по-добро качество, а точността при това достига $1 \div 5$ % от диаметъра. Усъвършенствано е пробиването на отвори с диаметър $0,003 \div 1$ mm при съотношение дълбочина към диаметър до 10. Производителността при пробиване е $60 \div 240$ отвора в минута. За повишаване на производителността и качеството на обработката се използва продухване с кислород, въздух или инертен газ. Прилагането на лазерното пробиване позволи да се решат важни технологични задачи. Така, в промишлената обработката на часовникови камъни е изцяло преминала към лазерна технология. Решен е проблемът с грубото профилиране на диамантни нишки с последващо довършване чрез ултразвуков метод. Безконтактното отстраняване на материал позволява да се извършва термодинамично балансиране на жироскопите.

3.1.3. Оборудване за извършване на операции по лазерно пробиване

За операции по лазерно пробиване рядко се използват еднооперационни машини. При необходимост от извършване на подобни операции се използват комбинирани машини за лазерна обработка. Една от тези машини е оборудването на компанията „Лазери и апаратура“ модел „МикроЛаб МЛП1-2106“. Тази установка е предназначена за извършване на операции по рязане, надрязване и пробиване в поликристал, керамика и кристали. Машината е показана на фиг. 49.



Фиг. 49. Външен вид на машината за лазерна обработка модел „МикроЛаб MLP1-2106“ [25]

Машината модел MLP1-2106 притежава технически характеристики, представени в табл. 19.

Таблица. 19. Технически характеристики на машината модел МЛП1-2106

Работен ход, mm	200x200x100
Точност на позициониране, mm	0,003
Дължина на вълната на излъчване,	0,0106
Входна мощност, W	600
Минимален диаметър на фокалното петно в зоната на обработка, mm	0,05

Лазерното заваряване може да бъде точково и шевно – в стик, с припокриване и т.н. Производителността при точковото заваряване е около 60 операции в минута, а при шевното – в зависимост от материала от 0,5 до 4 м/ мин при дълбочина на стопяване от няколко милиметра. Детайлите се заваряват при по-ниски плътности на мощността, тъй като при заваряването са необходими само нагриване и стопяване на материала, без неговото изпаряване. Лазерното излъчване позволява заваряването на материали във вакуумна камера или в камера с атмосфера от инертен газ, което изключва окисляването на заваръчния шев. При заваряване на материали с голям коефициент на отражение, те се покриват с тънък слой от материал, който

добре поглъща лъчението, например графит. С помощта на лазерното заваряване могат да се получат висококачествени съединения от неръждаеми стомани, молибден, стъкло, кварц и др. Възможно е заваряването на разнородни материали, като волфрам и алуминий, мед и стомана. Надеждно се заваряват детайли с дебелина от 0,01 до 5 мм. Лазерното заваряване се прилага най-ефективно при заваряването на лесно деформируеми детайли, при заваряване на труднодостъпни места, когато е необходимо да се осигури особено чист шев с минимална зона на термично въздействие.

3.1.4. Оборудване за лазерно заваряване

Лазерното заваряване като високоефективна алтернатива на обичайното електродно заваряване, е намерила широко приложение в онези отрасли, където се изисква висока точност и обработка на труднотопими изделия. Така, за нуждите на промишлеността е разработено специално оборудване, с помощта на което би било възможно да се извършва обработка чрез лазерно заваряване. Оборудването за лазерно заваряване често се комбинира с такъв процес като лазерно напластяване, който в същата степен се използва за възстановяване на детайли и тяхното първоначално състояние. Например, в компанията „Лазерни технологии и компоненти“ има готови решения за извършване на операции по лазерно заваряване. Моделната гама от машини за лазерно заваряване „МУЛ“ се състои от както мобилни, така и стационарни установки.

На фиг. 50 е изобразен - модел „МУЛ-3D“, който към момента е най-новият модел от серията, оборудван с интегрирана система за позициониране на лазерната глава. Машината се отличава с компактност и производителност, които са на едно ниво с точността на позициониране. С помощта на това оборудване е възможно да се извършват ремонтни работи по изделия, създаване на заваръчни съединения и шевове. Благодарение на високата точност на позициониране е възможна обработка и създаване на изделия със сложна геометрия.



Фиг. 50. Външен вид на машината за лазерно заваряване модел МУЛ-3D [26]

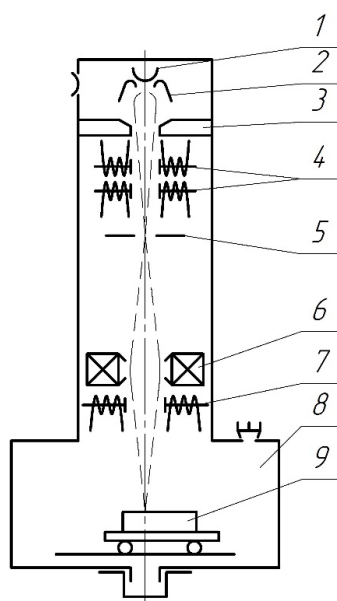
Машината модел МУЛ-3D притежава технически характеристики, представени в табл. 20.

Таблица. 20. Технически характеристики на машината модел МУЛ-3D

Максимална импулсна мощност, kW	8
Максимална мощност на излъчване, W	150
Дължина на импулса, μm	0,2 – 20
Тип на използваното влакно, μm	Кварц, 600 - 800

Електронно-лъчеви се наричат методите, при които за технологични цели се използва остро фокусиран лъч от електрони, движещи се с голяма скорост. Методът на електронно-лъчевата обработка (топене, заваряване, рязане) се основава - на използването на топлината, отделяща се при сблъсъка на потока от електрони с повърхността на обработваната заготовка. При електронно-лъчевата обработка детайлът се поставя в херметична камера, в която благодарение на непрекъснатата работа на вакуумните помпи се осигурява висока степен на разреждане (до 10^{-7} Па) . Тъй като електроните не променят химическите свойства на твърдото тяло, обработката с тях във вакуум представлява съществено предимство на този метод, тъй като при обработката не възниква химическо замърсяване на заготовката с газове. Съществена предпоставка за използването в техниката на електронния лъч като термичен инструмент за обработка на материали е относителната простота на получаването на голямо количество свободни електрони. Ако във вакуум се нагрее метална, например, танталова или

волфрамова тел, от повърхността на последната се емитират електрони (термоелектронна емисия), чийто брой и скорост зависят от температурата на нагряване. Кинематичната енергия на тези електрони, движещи се хаотично в пространството около емитера, е сравнително относително малка. Тя може да бъде значително увеличена чрез ускоряване на движението на електроните в определена посока под въздействието на електрическо поле, създадено от голяма разлика в потенциалите между емитера, който в този случай е катод, и анода. За тази цел се използва специално устройство – електронна пушка, която заедно с електронно-оптична система създава острофокусиран лъч от електрони, излъчвани от катода, ускорявани във вакуум от електрическо поле с потенциална разлика до 150 kV. Скоростта на електроните при това може да достигне 100 000 км/с и повече. Установки за обработка на материали с фокусиран електронен лъч се състоят от три основни устройства: електронна пушка, фокусираща система и работна камера. На фиг. 51 е изобразена схема на инсталация за обработка с електронен лъч. Източник на електронния лъч е катодът 1, представляващ волфрамова спирала, нагрявана до температура $2600\div 2800^{\circ}\text{C}$. При това се получава интензивна термоелектронна емисия от катода. Електроните, емитирани от катода на електронния пистолет, се фокусират в сноп от електрод 2, който е разположен непосредствено зад катода. Към електрод 2 се подава отрицателно (относително към катода) напрежение на сместване и електроните се ускоряват под действието на разликата в потенциалите между катода и анода 3. След това с помощта на магнитните полета, въздействащи върху електрод 2, на две двойки намотки 4, снопът от електрони се насочва към електро-оптичния център на магнитната фокусираща система 6. Между магнитните системи (4 и 6) е монтирана волфрамова диафрагма 5 с водно охлаждане. Тази диафрагма служи за улавяне на разсеяните електрони. Фокусното разстояние на магнитната леща 6 може да се променя при промяна на тока, протичащ през намотката, което се използва за настройка както на работния режим (работна точка), така и на необходимото напречно на лъча в мястото на сблъсъка му с повърхността на обработваната заготовка 9. Под фокусиращата система са разположени отклоняващи намотки 7, служещи за автоматично преместване на лъча по зададена посока. Заготовката се поставя в работната камера 8, в която се създава вакуум [27].



Фиг. 51. Опростена схема на електронно-лъчева установка

Благодарение на краткотрайността на действието на електронните лъчи и голямата плътност на лъчевия поток обработваният материал се топи и изпарява толкова бързо, че топлината не успява да се разпространи встрани от мястото на падане на лъча (на практика зоната на топене не е по-голяма от напречното сечение на лъча в мястото, където той попада върху заготовката). В посоката на излъчването електронният лъч въздейства на дълбочина, значително надвишаваща дълбочината, равна приблизително на 100 диаметъра на лъча. По този начин с електронен лъч могат да се режат материали без образуване на дефектен слой, практически без отпадъци и с висока производителност. С електронен лъч се обработват детайли от волфрам, титан, твърди сплави, синтетични камъни; извършва се заваряване и спояване. Поради малкия диаметър на снопчето от електронни лъчи, локалността на действието на създаваната от тях топлина и липсата на влияние от износването на инструмента при обработката може да се постигне висока точност на размерите и малка грапавост на повърхността. Електронни лъчи с диаметър $5\mu\text{m}$ позволяват да се извършва прецизна обработка с точност $\pm 1\mu\text{m}$. С електронен лъч при режими на довършителна обработка могат да се получат повърхности с височина на микронеравностите до $1\mu\text{m}$. Електронният лъч се управлява лесно чрез въздействие върху отклоняващите бобини 4. Контурното рязане може да се извършва чрез използване на механични премествания на масата с обработваната заготовка.

Недостатъци на електронно-лъчевата обработка:

- необходимост от провеждане на обработката в дълбок вакуум;
- необходимост от защита от рентгеново излъчване при инсталации с напрежение над 20 kV;
- висока цена на оборудването.

3.1.5. Оборудване за електронно-лъчева обработка

За извършване на операции по заваряване, рязане и топене чрез електронно-лъчев метод се използват специализирани машини, оборудвани с електронно-лъчева пушка. Пример за такова оборудване е машината модел Focus MEBW-60 на фирма UED. На тази машина е възможно да се извършват операции по заваряване, пробиване, напластяване, легиране и микрогравирание по повърхности. Външният вид на машината е показан на фиг. 52. Техническите характеристики на машината са представени в табл. 21.

Таблица. 21. Технически характеристики на машината модел Focus MEBW-60

Максимална мощност на лъча, kW	2
Максимален ток на лъча, mA	
-при 60 kV	33
-при 50 kV	40
Диаметър на лъча, mm	0,025
Максимален ъгъл на отклонение на лъча	+/-35



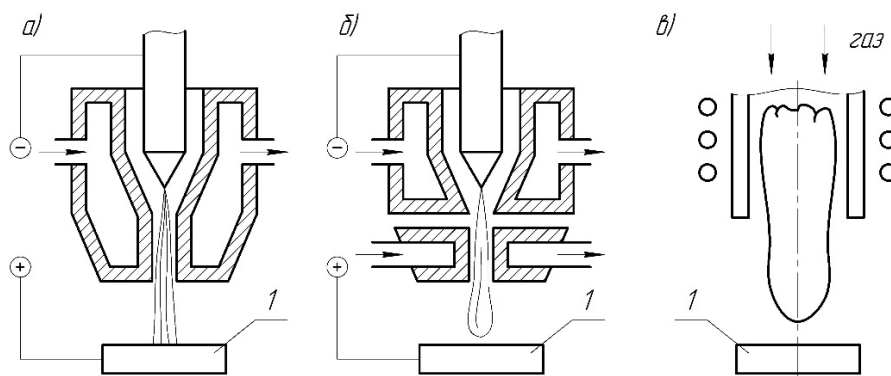
Фиг. 52. Външен вид на инсталацията за електронен лъчево заваряване модел Focus MEBW-60 [28]

3.2. ПЛАЗМЕНИ ВИДОВЕ ОБРАБОТКИ

Плазмата най-често се получава при протичането на електрофизични процеси: при електрически дъгов разряд, във високочестотно електрическо поле, с помощта на енергията на лазерното излъчване и т.н. Физическите свойства на плазмата и преди всичко високите стойности на температурата, енталпията и електропроводимостта привличат вниманието към нея като към уникално явление, позволяващо осъществяването на редица интересни физически и технически проекти. Плазмата е намерила технологично приложение преди всичко в процеси, изискващи високотемпературно концентрирано нагряване (металургия, заваръчни процеси). В промишлеността широко се използва плазмено рязане на различни метали и неметални материали, плазмено нанасяне на покрития от труднотопими метални оксиди, карбиди и нитриди. Като правило, за технологични цели се използва така т.нар. „нискотемпературна“ плазма с температура 10^3 – 10^5 К, представляваща частично йонизиран газ.

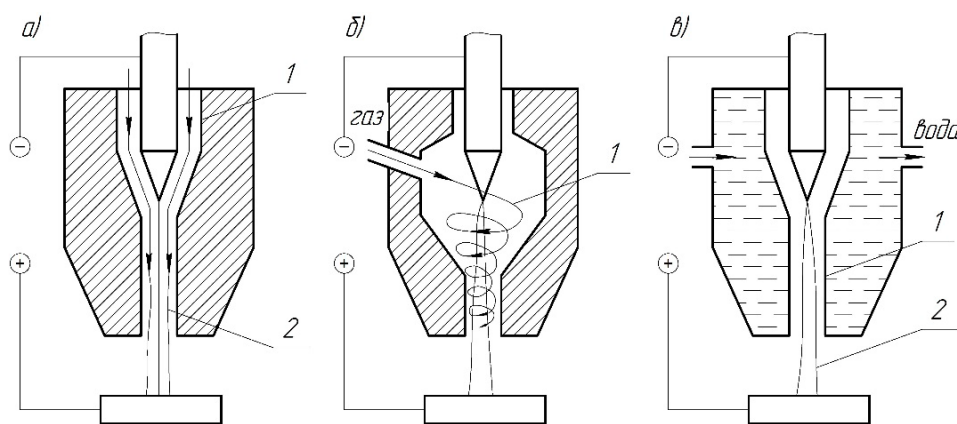
3.2.1. Технологични възможности на плазмената обработка

Плазмообразуваният газ, използван в плазмотрона, в значителна степен определя технологичните възможности на плазмената струя и трябва да се избира в зависимост от целта на процеса. Например, плазменото рязане на фигурни заготовки от ламарина с дебелина $40 \div 60$ mm от алуминиева миниева сплав се извършва със скорост $0,4 \div 2,0$ m/min и осигурява повишение на производителността в сравнение с механичните методи на рязане с $10 \div 30$ пъти. За получаване на плазма, използвана за технологични цели, са разработени цяла поредица от специални устройства (фиг. 53), наричани плазмотрони или плазмени горелки. Най-разпространени са плазмотроните, при които нагряването на газа до необходимата температура се осъществява чрез електрически дъгов разряд. Напоследък започват да се използват също и високочестотни плазмотрони с така наречения „безелектроден разряд“.



Фиг. 53. Схеми на плазмотрони

Във връзка с това в практиката на плазмената технология са се оформили три основни принципни схеми на плазмотрони. В двете схеми (а, б) за получаване на плазма се използва електрически дъгов разряд; в схемата, (в) нагряването на газа и образуването на плазма се осъществяват чрез безелектроден високочестотен индукционен разряд. По принцип същият резултат може да се постигне и при изгарянето на горими смеси в обикновени горелки за сметка на енергията от химическите реакции, но ефективността на такива устройства е значително по-ниска. В дъговите плазмотрони плазма с необходимите характеристики може да бъде получена при различни видове взаимодействие на дъгата с плазмообразуващия газ. Плазмообразуващите газове също могат да бъдат различни. Стабилизирането на дъгата в плазмотрона може да се осъществи чрез аксиален поток на газ 1, създаващ слой 2, който ограничава стълба на дъговия разряд (фиг. 54а).



Фиг. 54. Схеми за стабилизиране на дъгата в плазмотрона

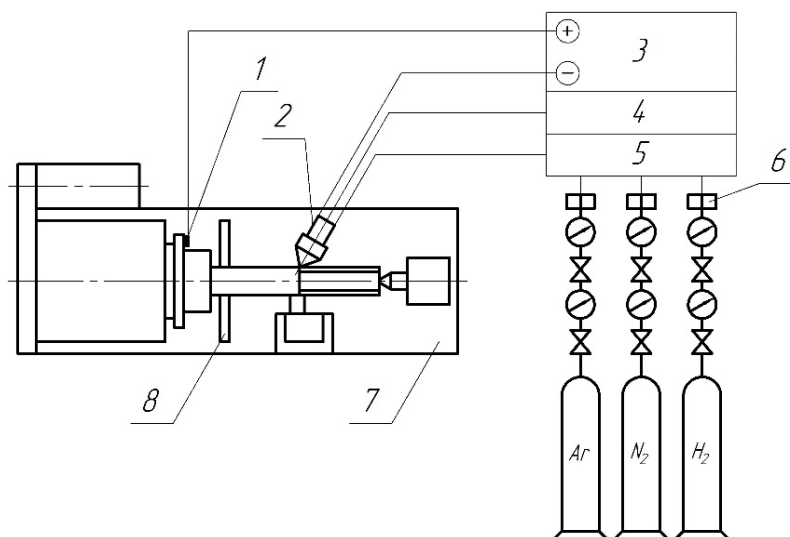
При тангенциално подаване на газ в дъговата камера на плазмотрона стабилизацията се постига за сметка на вихровия поток 1 на плазмообразуващия газ (фиг. 54 б). Изключително ефективен начин за

стабилизиране на дъговия разряд в плазмотрона и повишаване на неговите специфични енергийни характеристики е ограничаването на диаметъра на стълба на дъговия разряд чрез охлаждаема стена. Обикновено тази стена е изпълнена под формата на медно, водноохлаждаема дюза 1 със сравнително малък диаметър, ограничаваща външния диаметър на дъгата 2 (фиг. 54 в) . В реални условия в плазмотрона могат да се прилагат едновременно няколко метода за стабилизиране на стълба на дъговия разряд. Известни са комбинирани схеми за включване на изделието във веригата на плазмотрона (плазмена струя и токопроводим елемент), както и комбинирани начини за предаване на енергия към плазмобразуващия газ (химична енергия от изгарянето на горивото и електрическа енергия от дъгов или високочестотен разряд) .

3.2.2. Технологични схеми за плазмена обработка

Плазмено нагряване

Нагряването на детайли и материали до ниски температури (под точката им на топене) с помощта на плазмени горелки се използва сравнително рядко, но напоследък все по-често се използва плазмено-механичната обработка на метали, при която се осъществява такова нагряване. Същността на метода се състои в това, че при обработка, например при рязане на високоякостни метали и сплави, пред режещия инструмент се поставя плазмотрон, който нагрява тясна зона от обработвания материал. Тъй като при нагряването якостта на обработвания материал намалява, а пластичността се повишава, е възможно без влошаване качеството на повърхността да се увеличат подаването и дълбочината на рязане. Плазмено-механичната обработка се прилага при производството на детайли от термоустойчиви стомани, сплави на базата на волфрам и молибден и други материали, в които при механична обработка при обичайна температура в повърхностните слоеве се образуват микрорукнатини (фиг. 55).



Фиг. 55. Установка за плазмено-механична обработка

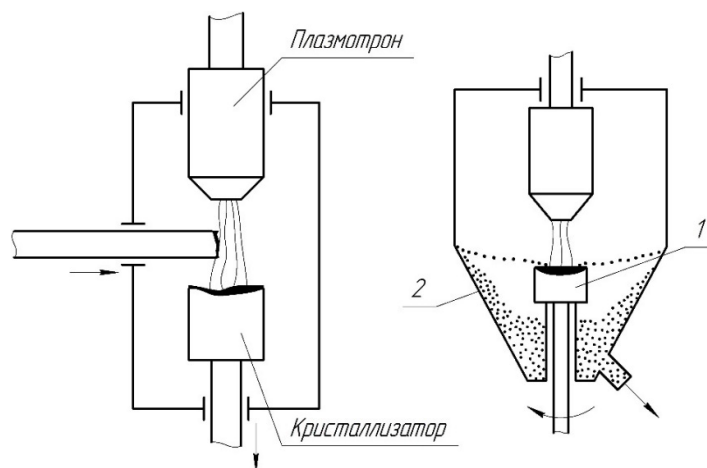
Установката за такава обработка се монтира на базата на универсален струг 7. При нея се използват плазмени горелки 2 с мощност до 50 kW при диаметър на дюзата 3 mm. Такива горелки дават възможност да се постигнат плътности на мощността до 7 GW/m². Смес от аргон, азот и водород (75 % Ar₂, 20 % N₂, 5 % H₂) се подава в горелката чрез система 5 за подаване на работен газ, система от клапани, манометри и дебитометри 6. Дъгата се запалва от високочестотно запалващо устройство. Първоначално се запалва спомагателна дъга между катода и включената за тази цел във веригата под формата на анод дюзата на горелката (използва се отворена горелка). При приближаване на горелката към обработваната повърхност се запалва главната дъга чрез подаване на по-висок потенциал. Токът от източника на захранване 3 се подава към обработваната заготовка с помощта на плъзгащ се контакт 1, разположен на патрона на струговата машина. Установката разполага със система за охлаждане 4 на горелката и топлоизолация 8 за защита на струга. Обработката чрез рязане при предварително нагряване с плазмена струя се извършва с твърдосплавни или минералокерамични режещи инструменти. Плазмената горелка позволява нагряване на тясна зона от заготовката, като при това нагряването не предизвиква окисляване на повърхността, а скоростта на нагряване до необходимата температура може да се регулира в широки граници, което позволява съчетаването на режима на работа на плазмотрона с режимите на рязане. Плазмената струя за предварително нагряване се използва също така при обработката на корозионно киселинноустойчиви и термоустойчиви стомани, кобалтови и никелови сплави. Установено е, че с повишаването на температурата на нагряване силите на рязане значително намаляват. При T = 500 °C, при

всички скорости на подаване намаляват средно с 24 % в сравнение с обработката при нормална температура, а при $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ – средно с 45 %. Резултатите от измерването на силите на рязане в диапазона на скоростите на рязане $v = 25\div 100\text{ m/min}$ показаха, че при повишени температури на обработваната повърхност скоростта на рязане не оказва влияние върху силата на рязане. Изследванията показаха също, че с повишаване на температурата на подгряване до $T = 630\text{ }^{\circ}\text{C}$ обемът на отнетия материал за единица време може да се увеличи до 45 % (поради увеличаване на скоростта на рязане, подаването и дълбочината на рязане). Прилагането на плазмено нагряване при струговане на цилиндрични заготовки с диаметър $100\div 350\text{ mm}$ от термоустойчиви никелови сплави, волфрам и молибден показва, че производителността на обработката се увеличава 6÷8 пъти, като износването на режещите инструменти намалява 5÷6 пъти. Скоростта на отнемане на метал при това може да достигне $3\div 4\text{ kg/min}$. Плазменото нагряване до по-високи температури може да доведе до разтопяване на неравностите на механично обработената повърхност, подобрявайки по този начин технологичните показатели.

Разтопяване на вещества

Разтопяването на метали и сплави, както и на неметални материали с използване на плазмено нагряване е получило широко разпространение. Този метод се отличава с висока стабилност, простота и гъвкавост на технологичния процес. Плазменото топене позволява да се използват най-разнообразни среди и изходни материали при минимални

загуби на легиращи компоненти. Най-разпространена е схемата на пещ за топене във водоохлаждаем кристализатор (фиг. 56).



Фиг. 56. Процес на плазмено топене

В такива пещи обикновено се използват за стопяване сложнолегирани сплави, например инструментални стомани. При това, благодарение на малкото съдържание в метала на неметални включения под формата на оксиди и кислород, неговите механични свойства (особено пластичността) се повишават значително. Плазменото нагряване се използва също за топене на метал с последващо раздробяване на стопилката и кристализирането ѝ под формата на малки капчици. Впоследствие този материал се използва като изходен продукт в праховата металургия, и т.н. Смилането на метала най-често се постига чрез разпръскване на разтопения метал при въртенето на тигела 1. Попадайки върху студените стени на кристализатора 2, капките от течен метал се втвърдяват и под формата на гранули се събират на дъното на камерата, като високата скорост на охлаждане на разтопения метал позволява получаването на неравновесни структури със специфични свойства.

Заваряване и напластяване

Заваряването с използване на плазмени източници и се прилага все по-широко, тъй като в сравнение с обикновената свободно горяща електрическа дъга се постига по-голяма дълбочина на проплавяване и по-малка ширина на шева, а съответно и по-тясна зона на термично въздействие. Процесът протича с по-голяма скорост при подобряване качеството на заваръчния шев. Чрез плазмено заваряване с едно преминаване се заваряват детайли с дебелина до 20 mm, което дава възможност значително да се повиши производителността на процеса, да се намалят възникващите при заваряването деформации и в крайна сметка да се получи по-работоспособно заваръчно съединение. Микроплазменото заваряване е разновидност на процеса на плазмено заваряване и се характеризира със сила на плазмения ток от порядъка на $0,1 \div 10$ А. Дебелината на заваряваните заготовки обикновено е $0,025 \div 1,0$ mm. Микроплазменото заваряване се прилага, когато с други методи е невъзможно да се получи заваръчно съединение, например, тънколистови материали (фолио, сифонно-мембранни възли) или детайли от радиоелектронната техника.

3.2.3. Оборудване за плазмено заваряване

Оборудването за извършване на операции по плазмено заваряване може условно да се раздели на мобилни и стационарни комплекси. Към мобилните комплекси спадат такива инсталации, които са в състояние да обработват детайли на труднодостъпни места или в случаи, когато е необходимо

излизане на екип от специалисти на обекта на клиента. Към стационарните съоръжения отнасят големите комплекси, предназначени за обработка на големи партии заготовки с големи и средни размери. Пример за мобилно оборудване може да послужи универсалният апарат за плазмено заваряване PMI на фирма SBI. Моделът PMI 500TL (фиг. 57) е към момента флагманската мобилна инсталация от цялата гама на PMI.



Фиг. 57. Външен вид на апарата за плазмено заваряване модел PMI 500TL [29]

Установката позволява извършването на операции по плазмено точково заваряване, импулсно точково заваряване, аргонно-дъгово и ръчно заваряване при постоянен ток. Техническите характеристики на апарата за плазмено заваряване модел PMI 500TL са представени в табл. 22.

Таблица. 22. Технически характеристики на апарата за плазмено заваряване модел PMI 500TL

Максимална мощност, kW	20
Максимален импулсен ток, A	500
Заваръчен ток, A	380
Плазмообразуващ газ	Ar
Защитни газове	Ar + He Ar + H
Диапазон на заваръчния ток, A	5 - 500

Плазменото напластяване се използва за нанасяне върху обработваните заготовки на повърхностни слоеве (най-често от метали или сплави, които се различават по състав от материала на основата) с цел повишаване на експлоатационните свойства на детайлите. За напластяването обикновено се използват материали със специални свойства (висока твърдост, повишена изнosoустойчивост, корозионна и термична устойчивост). Напластяването позволява получаването на изделия от евтини конструкционни материали с рационално разпределение на свойствата по отделните елементи. При това

значително се намалява разходът на скъпи легиращи материали. Дебелината на напластените за един проход слоеве може да достигне $4\div 5$ mm; възможно е многослойно напластяване. Напластяването се извършва с плазмени горелки с непряко действие (плазмена струя), което дава възможност да се регулира дълбочината на прогряване на основния метал чрез промяна на разстоянието между горелката и заготовката. За да се осигури защита на ваната от разтопен метал от взаимодействие с атмосферните газове, като газове, образувачи плазма, се използват аргон и водород. В машиностроителната промишленост чрез напластяване се укрепват отделни детайли на машините. Използването на напластяване позволява да се спестят дефицитни и скъпи инструментални стомани, например P18, P6M5, като инструментите се изработват от обикновени въглеродни стомани с напластяване на работните повърхнини. Масата на напластената инструментална стомана обикновено не надвишава $4\div 5\%$ от общата маса на инструмента, а издръжливостта на инструмента се повишава благодарение на по-добрите условия за отвеждане на топлината от режещия ръб. Плазменото напластяване се прилага за нанасяне върху стоманени основи на мед, бронз, сплави от типа „стелит“ (затваряща арматура за паропроводи), хромникелови сплави (клапани на двигатели с вътрешно горене). С помощта на плазменото напластяване за ремонтни цели се възстановяват скъпи възли и детайли (матрици, пресови форми, валци и др.) на металообработващото оборудване.

3.2.4. Оборудване за плазмено напластяване.

За извършване на плазмено напластяване е подходящо техническото решение на чешката компания KSK. Инсталацията за плазмено-прахово напластяване модел PPC 250 GMR е предназначена за извършване на операции⁸² по напластяване на пръстени, клапани, седла на спирателна арматура и форми за стъкло. Моделът е достатъчно мобилен, като също така има възможност за монтиране на кабина за защита на оператора (фиг. 58).



Фиг. 58. Външен вид на инсталацията за плазмено-прахово напластяване модел PPC 250 GMR [30]

Инсталацията за плазмено-прахово напластяване модел PPC 250 GMR включва следните съставни модули:

- Система за позициониране на горелката;
- Позициониращ механизъм;
- Управляващ шкаф;
- Източник на плазма;
- Блок за охлаждане на горелката;
- Система за подаване на прах;
- Плазмена горелка.

Техническите характеристики на инсталацията са представени в табл. 23.

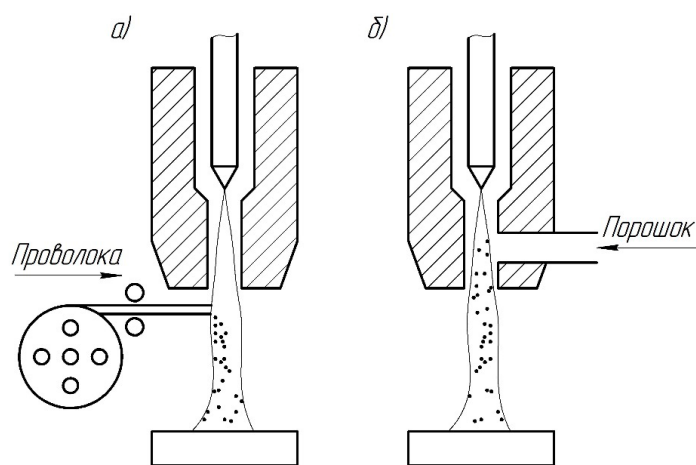
Таблица. 23. Технически характеристики на инсталацията PPC 250 GMR

Максимален диаметър на детайлите, mm	800
Мощност, kW	29
Размери на установката, mm	3500x2150x2860
Охлаждане на плазмотрона	Водно вградено
Плазмообразуващ газ	Аргон
Фракционен състав на праха, mm	0,050 – 0,200

Плазмено нанасяне

Нанасянето се различава от напластяването с това, че нанасяният материал се нагрива в плазмотрона и след това се отлага върху основата. При това температурата на основата, ако е необходимо, може да се променя в широк диапазон. Съществуват две основни разновидности на процеса (фиг. 59):

- а) нанасяне на метал, подаван в плазмотрона под формата на пръчка или тел;
- б) нанасяне на материал, подаван в плазмотрона под формата на прах(оксиди, нитриди, карбиди и др.).



Фиг. 59. Схема на процеса на плазмено нанасяне

Чрез плазмено нанасяне обикновено се получават слоеве с малка дебелина ($10^{-6} \div 10^{-3}$ м), като силата на сцепление на нанасяния материал с основния може да варира. Възможно е дори да се получат така наречените „корови“ изделия, състоящи се само от нанесения материал. Здравината на сцеплението на покритието с основата зависи както от механичното сцепление на нанасяните частици с основата, така и от характера на химическото взаимодействие на нанасяния материал с основния. За увеличаване на силата на сцепление обикновено се стремим да повишим степента на химическо взаимодействие на покритието с основата, което обикновено се постига чрез предварително нагриване на заготовката и създаване на междинни химически активни слоеве.

3.2.5. Оборудване за плазмено нанасяне

Пример за оборудване за осъществяване на процеса на плазмено нанасяне е инсталацията за плазмено нанасяне модел Met-PCC (PLAS) на фирмата Metallisation [31] (фиг. 60).



Фиг. 60. Външен вид на инсталацията за плазмено нанасяне модел Met-PCC (PLAS)

Тази система позволява използването на пистолети с мощност до 50 kV както с единичен източник на захранване, така и с добавяне на енергиен капацитет до 80 kV. От предната страна на устройството се намира интуитивен графичен потребителски интерфейс, включващ интеграция на видео и фото елементи. Системата разполага със сензорен дисплей на базата на операционната система Windows. Освен това системата е оборудвана с PLC адаптер, който позволява взаимодействие с други системи в рамките на една мрежа. Техническите характеристики на инсталацията са представени в табл. 24.

Таблица. 24. Технически характеристики на инсталацията модел Met-PCC(PLAS)

Работен газ	Ar
Максимална входяща температура на охлаждане на дюзата на разпръсквача, °C	16
Максимално мощност, W	480
Маса, kg	100

3.3. УЛТРАЗВУКОВА ОБРАБОТКА

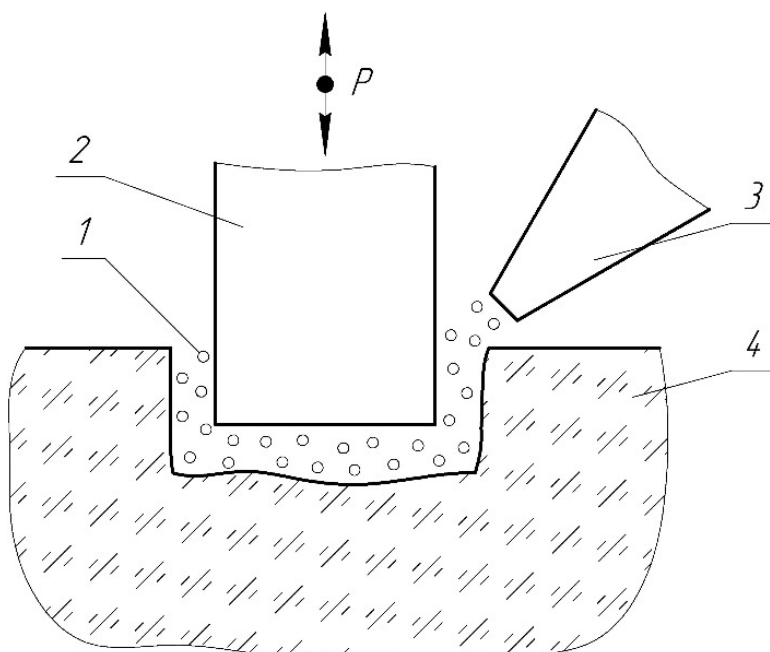
Под ултразвукова обработка се разбира обработка, при която материалът се отстранява с инструмент, колебаещ се с ултразвукова честота. Обработката може да се извършва както при честоти от ултразвуковия, така и от звуковия диапазон. Оптималните режими обаче се осигуряват при 16÷25 kHz (долната граница на ултразвуковия диапазон). Ето защо методът се нарича ултразвуков. Методът се развива в две направления:

- 1) обемна ултразвукова обработка на материали в среда от абразивна суспензия;
- 2) наслагване на ултразвукови колебания върху режещия инструмент при обичайната обработка чрез рязане.

С ултразвуковия метод успешно се изработват детайли от твърди и крехки, труднообработваеми материали. При това, за разлика от предишните методи (електроерозионни, електрохимични), той може да се използва както за токопроводими, така и за изолиращи (непроводящи ток) материали.

Механизъм на ултразвуковата размерна обработка.

Под размерна ултразвукова обработка се разбира контролирано разрушаване на обработвания материал в резултат на импулсно ударно въздействие на инструмента върху материала в абразивна среда (фиг. 61).



Фиг. 61. Схема на процеса на ултразвукова обработка

Механични колебания с ултразвукова честота ($f = 16 \div 30$ kHz) и малка амплитуда ($A = 0,01 \div 0,06$ mm) се предават на работния инструмент 2. В работната зона, т.е. в хлабината, между края на инструмента и заготовката 4, се подава абразивна суспензия 3 – суспензия от зърна 1 на абразива във вода. Зърната на абразива под действието на ударите на вибриращия инструмент постепенно осъществяват обработката (отчупват частици от материала). Размерът на отчупените частици е малък, но количеството удари и зърна на абразива е голямо (до $20 \div 100$ хил./см³), което води до сравнително интензивно отстраняване на материал. В резултат на това в заготовката се копира формата на работната на инструмента. Ултразвуковата размерна обработка представлява сложен физико-химичен процес, включващ разрушаване (отчупване) на обработваната повърхност в резултат на високи контактни напрежения, абразивно (драскащо) действие на зърната, разрушаване (раздробяване) на абразивните зърна, разрушаване в резултат на смачкващото, измиващото и химическото действие на течността, пренасяща абразива. Изследванията показват, че материалът се отстранява основно вследствие на пряк удар на края на инструмента върху абразивните зърна, разположени върху обработваната повърхност. При това се изхвърлят частици от материала. Ако пък ударът попадне върху зърно, намиращо се в суспензия, то, макар и такова зърно да придобие определен импулс на движение, частиците от материала не се изхвърлят. Голямо значение при разрушаването на материала има кавитацията – образуването и затварянето на кухини в течността под въздействието на ултразвукови колебания [32].

3.3.1. Технологични възможности на ултразвуковата обработка

Въз основа на анализа на обработваемостта чрез ултразвуков метод материалите се разделят на 3 групи. Материалите във всяка от тях се различават по критериите за крехкост t_x .

Първата група – крехки материали ($t_x > 2$) като стъкло, кварц, керамика, диамант, силиций, ферит и др. При ултразвукова обработка тези материали практически не се подлагат на пластична деформация. Те започват да се разрушават след етапа на малките деформации, които повече или по-малко точно се подчиняват на закона на Хук. За материалите от тази група прилагането на ултразвукова обработка за оразмеряване е най-ефективно.

Втората група – твърди сплави, закалени, цементиран и азотирани стомани, титанови сплави и други, за които $t_x \gg 1 \div 2$. При обработката на тези материали, наред с еластичните, възникват и микропластични деформации,

което влошава обработваемостта. Ето защо използването на ултразвуковия метод за обработка на материали от тази група не винаги е целесъобразно.

Третата група – пластични материали от типа на оловото, меките стомани и други, за които $\mu \approx 1$ – При ултразвукова обработка те практически не се разрушават, тъй като почти цялата работа на абразива се изразходва за микропластична деформация. Ето защо за материалите от третата група ултразвуковата обработка за придаване на размери е нецелесъобразна. При ултразвуковата обработка за придаване на размери се разграничават две движения:

1. основно (режещо движение) – надлъжни колебания на инструмента с ултразвукова честота, които предават енергия на абразивните зърна;
2. спомагателно – движение на подаване. Скоростта (v , m/sec) на основното движение се изчислява по формулата:

$$v = 4fA/1000,$$

където f – честота на колебанията, Hz; A – амплитуда на колебанията, mm. Качеството на обработената повърхност зависи от размера на абразивните зърна, амплитудата на колебанията на инструмента, грапавостта на повърхността на инструмента и др.

Точност на обработката.

При ултразвукова обработка отворът се разширява, т.е. неговите напречни размери стават малко по-големи от съответните размери на инструмента. Степента на разширяване зависи от зърнистостта на абразива. Така, при използване на абразив № 10 разширяването на отвора достига $0,4 \div 0,5$ mm, а при използване на абразив с фини зърна (№ 3) намалява до $0,03 \div 0,06$ mm. За повишаване на точността на обработката напречните размери на инструмента трябва да се коригират в зависимост от използвания абразив. При груба обработка с абразив № 8 ÷ № 12 корекцията е $0,2 \div 0,3$ mm, а при фина обработка с абразив № 3 ÷ № 40 – $0,08 \div 0,1$ mm. В процеса на ултразвукова обработка възниква конусност на отвора. Най-голямо влияние върху нея оказва зърнистостта на абразива. При обработка на отвори с дълбочина $5 \div 10$ mm с абразив № 12 конусността се движи в границите на $0,025 \div 0,04$ mm, а при използване на по-фин абразив – до 0,01 mm. Най-високата точност на обработката ($\pm 0,005$ mm) може да се постигне, като се

използват микропрахове. Размерната ултразвукова обработка има следните предимства:

- 1) възможност за използване на токопроводими и непроводящи материали при производството на детайли;
- 2) висока точност на обработката (до $0,01 \div 0,02 \text{ mm}$) при високо качество на обработената повърхност ($Ra = 0,32 \div 0,16$);
- 3) липса на нагряване на детайла в зоната на обработка и на дефектен слой върху обработената повърхност;
- 4) сравнително висока производителност при обработка на твърди и крехки материали.

Към основните недостатъци на ултразвуковата обработка трябва да се отнесат следните:

- 1) сложността при проектирането и изработването на ултразвуков инструмент, свързана с необходимостта от извършване на акустичен разчет;
- 2) непригодността на този метод за обработка на вискозни, труднообработваеми материали.

3.3.2. Оборудване за провеждане на ултразвукова обработка

Съществува възможност за внедряване в машини с ЦПУ на ултразвукови инструментални глави заедно с генератор на ултразвукови вълни. Пример за такова оборудване е продуктът на Тайванската фирма Acrow (фиг. 62).



Фиг. 62. Външен вид на ултразвуковата глава и генератора -тор на ултразвукови вълни на фирма Acrow [33]

Особеностите на ултразвуковата глава са възможността за използване на високочестотна вибрация до 24 000 такта в секунда. А генераторът позволява автоматично поддържане на необходимата честота, както и работа в достатъчно прецизни технологични системи. Техническите параметри на главата са представени в табл. 25.

Таблица. 25. Технически параметри на ултразвуковата глава Acrow

Дължина на главата, mm	135 – 165
Максимална честота на вибрации, Hz	24000
Амплитуда, mm	0,210
Препоръчителна скорост на въртене, tur^{-1}	6000

За осъществяване на процесите на ултразвуково заваряване е подходящо устройство от фирмата AltraSonic. Представената китайска компания се специализира в ултразвуково оборудване с различен профил. В гамата от оборудване, което тя предлага, влиза и апарат за ултразвуково заваряване на тесен спектър от материали. Външният вид на устройството е показан на фиг. 63. То представлява компактен модул с фиксирани изходни стойности на мощността, честота и площ на заваряваната зона.



Фиг. 63. Външен вид на ултразвуковия заваръчен апарат на фирма AltraSonic [34]

Възможностите на оборудването включват заваряване на материали като мед, алуминий, злато, сребро, никел. Възможно е заваряване на тънки пластини, пръти, проводници, тръби. Техническите характеристики са представени в табл. 26.

Таблица. 26. Технически характеристики на заваръчния апарат на фирмата AltraSonic

Мощност, kW	3 – 5
Зона за заваряване, mm ²	135
Работно налягане на въздуха, МРа	20
Честота, kHz	20
Напрежение на захранване, W	220/110

Ултразвуковите технологии се прилагат не само в процеса на механична обработка на изделия, но и в процеса на физическо почистване от промишлени замърсявания. Технологията за почистване в ултразвукови вани е известна от доста отдавна, но с нарастването на производствените нужди нарастват и изискванията към такива инсталации. Така, към момента за технологично решение в областта на ултразвуковото почистване на изделия може да се счита инсталацията модел МО-915 (фиг. 64) на компанията „Александра-Плюс“. Този уред е способен да извършва почистване на изделия при честота до 60 kHz. Освен това уредът е оборудван с топло и звукоизолационни материали.



Фиг. 64. Външен вид на ултразвуковата вана модел МО -915 [35]

Техническите характеристики на ваната са представени в табл. 27.

Таблица. 27. Технически характеристики на ваната модел МО-915

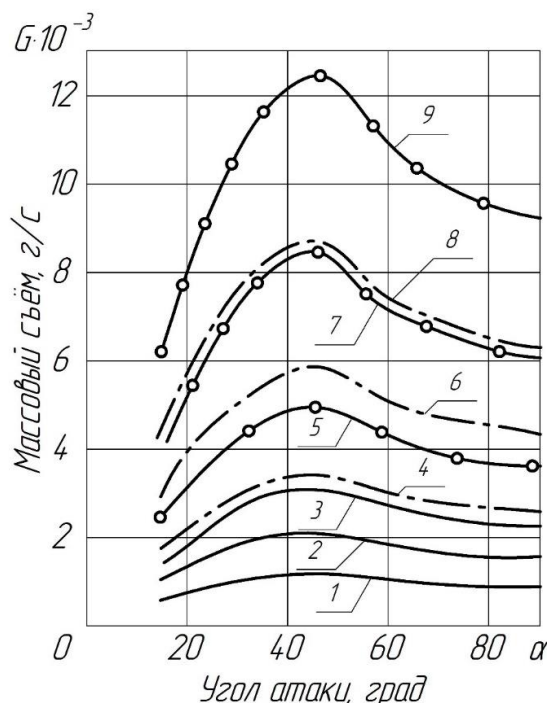
Пикова мощност на ултразвука, kW	0,65
Мощност на нагревателя, kW	0,6
Работен обем на ваната, l	14

3.4. ХИДРОАБРАЗИВНА ОБРАБОТКА

3.4.1. Общи сведения за хидроабразивната обработка

В основата на технологията на хидроабразивното рязане, лежи принципът на ерозионното въздействие на смес от високоскоростна водна струя, действаща като носител, и твърди абразивни частици върху обработвания материал. Процесът на струйна хидроабразивна обработка (ГАО) се състои в насочването на струя от суспензия, състояща се от вода и частици от абразивни материали, към обработваемата повърхност на заготовката. Физическата същност на механизма на хидроабразивното рязане се състои в откъсването и отнасянето от кухината на разреза на частиците от разрязвания материал чрез високоскоростен поток от твърдофазни частици. Стабилността на потока и ефективността на действието на двуфазната струя се осигуряват чрез оптимален избор на цял ред параметри на рязане, включително налягането и дебита на подаваната вода, а както и разхода и размера на частиците на абразивния материал. Ако обикновената вода се сгъсти под налягане $1000 \div 5000 \text{ bar}$, а след това се прокара през отвор с диаметър $0,1 \div 0,3 \text{ mm}$, тя ще тече много бързо (скорост $400 \div 1000 \text{ m/sec}$). Използването като абразив на електрокорунд, силициев карбид, гранат и др. повишава качеството и скоростта на рязане $2 \div 4$ пъти, при съответно повишаване на цената на процеса на рязане. Броят на ударите на абразивните частици варира в зависимост от условията на обработка от $2 \cdot 10^6$ до $25 \cdot 10^6$ в секунда. При удара на ъгловата частица върху повърхността се наблюдава процес на микрорязане на материала. Микрорязането се извършва единствено от върховете на абразивните частици (зърна) и поради краткотрайността и насочеността на ударното въздействие, то има много специфичен характер. Ударът на частицата по повърхността води до образуването на кратер. Изтласканият от кратера материал тече в посоката на падане на частицата с образуване на вал, докато той не се напука поради значителни бързодействащи натрупани деформирания. При удари под ъгъл 90° валът се разполага равномерно около кратера, при по-малки ъгли на атака валът се образува отстрани на кратера и в посоката на движение на частицата (фиг. 65). Съществува критична скорост, след която материалът започва да се изтласква от кратера. Абразивните частици в процеса на ударно взаимодействие с обработваната повърхност се износват, работните им ръбове се закръгляват, което с течение на времето води до намаляване на общата абразивна способност. При непрекъснатата обработка, в зависимост от вида на абразивния материал, схемите на инсталацията за струйна ХАО и

конфигурацията на обработваните детайли срокът на експлоатация на суспензията е от 40 до 70 часа. Суспензията се използва докато в отстоялата проба разрушените абразивни частици не надвишат 10 % от общия обем на суспензията, в противен случай суспензията се подменя [36].



Фиг. 65. Отнемане на материал в зависимост от ъгъла на падане на частиците

Недостатъци на тази технология:

- недостатъчно висока скорост на рязане на тънколистова стомана;
- ограничен ресурс на отделните компоненти и на режещата глава;
- невъзможност за повторна употреба на абразивния материал.

3.4.2. Технологични възможности на хидроабразивната обработка

Хидроабразивното рязане е незаменимо при рязане на многослойни и композитни материали, както и на керамика. Хидроабразивното рязане е особено ефективно при рязане на много трудни за обработка материали: титанови сплави, различни видове високоякостни керамики и стомани, както и композитни материали. При тяхното хидроабразивно рязане не се създават разкъсвания в структурата на материала, който по този начин запазва първоначалните си свойства. Хидроабразивната струя не променя физико-механичните свойства на материала и изключва деформация, стопяване и пригаряне на материала. Основни предимства в сравнение с лазерното, плазменото и механичното рязане са:

- най-високо качество на получените ръбове (които не изискват допълнителна механична обработка) ;
- позволява рязане на пакети, състоящи се от няколко слоя различни материали;
- възможност за рязане на различни композитни материали, тъй като не се създават разкъсвания в структурата на материала;
- обработка на материали с вълнообразна повърхност и сложни контури;
- липса на прах и газове;
- малка ширина на разреза;
- ниско тангенциално усилие при рязане върху детайла (заготовката не се затяга);
- висока скорост на рязане;
- ръбовете на материала не са подложени на термично натоварване, няма окиси и окалина;
- пълна взривобезопасност и пожаробезопасност на процеса на рязане.

Геометрия на заготовките

Диапазонът на дебелината на обработваните материали е от 0,1 до 300 mm. Оборудването на водещите производители позволява обработката на високоякостни и закалени стомани, цветни метали с дебелина до 150÷200 mm, порести материали и покрития до 300 mm.

Точност

Висока точност на рязане. Струята течност по своите технически възможности се доближава до идеалния точков инструмент, което позволява обработката на профил с всякаква сложност с зададен радиус на закръгление, тъй като ширината на разреза е от 1 до 1,5 mm.

Качество

Грапавостта на повърхността след струйно-абразивно обработване зависи главно от първоначалната грапавост; скоростта, ъгъла на атака и размера на абразивните частици; времето на обработка. При необходимост е възможно да се получи финишна повърхност с грапавост Ra 1,5÷2,5 µm.

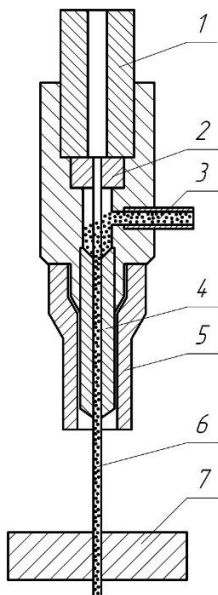
Физико-химични промени

Температура в зоната на рязане е ниска 60÷90°C. В резултат на това не се наблюдава забележимо повишаване на температурата на заготовката, което

по същество осигурява „студено“ рязане на всички материали. Това позволява при използването на хидроабразивната технология да се изключи разтопяването и пригарянето на материала в прилежащата зона. Микронагриването, предизвикано от отделянето на стружки от абразивната частица, се елиминира чрез потока от суспензия, съпътстващ тази абразивна частица.

Производителност

Намаляване се времето на празен ход на режещата глава, благодарение на възможността за рязане на тънколистови материали в многослоен пакет. Общата схема на устройството за извършване на хидроабразивна обработка е изобразена на фиг. 66.



Фиг. 66. Схема на устройството за хидроабразивна обработка

В инсталацията за хидроабразивно рязане водата под налягане от порядъка на 4000 атмосфери, създавано от високонапорна помпа, се подава в дюза с профилиран канал, в който се образува високоскоростна водна струя. След това водната струя попада в смесителната камера на режещата глава, където улавя постъпващите там абразивни частици, в резултат на което се образува водоабразивна смес. След това получената смес се ускорява в смесителната тръбичка (с диаметър около 1 mm) до свръхзвукова скорост (от порядъка на $900 \div 1200$ m/sec). Тази висока скорост на водно-абразивна струя се използва като универсален режещ инструмент. След рязането на материала остатъчната енергия на струята се поглъща от специален воден уловител. Режещата глава се монтира на устройството за позициониране на

координатната маса и може да се придвижва с помощта на електрозадвижвания по три координати с работни ходове, обусловени от габаритните размери на координатната маса. Схема на хидроабразивната глава: 1 – маркуч за високо налягане; 2 – профилиран канал; 3 – абразив; 4 – смесителна камера; 5 – корпус; 6 – струя от суспензия; 7 – детайл

3.4.3. Области на приложение на хидроабразивната обработка

Хидроабразивната обработка може да се използва за:

- Ремонт на фасади на сгради (отстраняване на лаково-бояджийски покрития, мазилка и др.).
- Саниране на бетон и стоманобетон (вкл. пълно отстраняване на бетона) .
- Безпрахово и пожаробезопасно отстраняване на корозия от метал.
- Измиване на речни и морски плавателни съдове, подготовка за нанасяне на покрития.
- Почистване на високоволтови изолатори.
- Отстраняване на всякакви покрития и отлагания от повърхности.
- Утилизация на оръжия.
- Вътрешно и външно почистване на топлообменно оборудване, тръбии колектори с различни диаметри и конфигурации.
- Пожаробезопасно рязане на различни материали (стоманени и железобетонни конструкции, стъкло, естествен камък и др.).
- С помощта на хидроабразивна струя могат да се режат практически всякакви материали:
 - черни и цветни метали и сплави;
 - труднообработваеми легирани стомани и сплави (включително: термоустойчиви и неръждаеми);
 - композитни материали;
 - керамични материали (керамогранит, плочки);
 - естествени и изкуствени камъни (гранит, мрамор и др.);
 - стъкло и композитно стъкло (триплекс, бронирано стъкло, армирано стъкло, стъклотекстолит и др.);
 - порести и прозрачни материали;
 - клетъчни и сандвич-конструкции;
 - бетон и стоманобетон

3.4.4. Оборудване за хидроабразивна обработка

За извършване на хидроабразивна обработка се използват специализирани машини с подаване на течности с абразивно вещество под високо налягане. На пазара се предлагат множество модели машини, но ще се спрем на няколко от тях. Машина за операции по рязане на метали е представен от модел AC3015 на китайската компания WIN-WIN. Станът има 5 оси на придвижване, налягане на потока на абразива до 4200 бара и уникална конструкция на самата машина. Конструкцията на машината е потопена в масло, което се изразява в постоянното намиране на сачмено-винтовата предавка и винтовите гайки в масло. Самата машина е изобразена на фиг. 67.



Фиг. 67. Външен вид на 5-осена машина модел AC3015 за хидроабразивна обработка на детайли [37]

Техническите характеристики на машината са представени в табл. 28.

Таблица. 28. Технически характеристики на 5-осната машина модел AC3015

Ъгъл на рязане, °C	0÷68
Точност на рязане, mm	до 0,1
Скорост на рязане, mm/min	до 11000
Максимален диапазон на рязане, mm	3000x1500x200
Размери на масата, mm	3800x2200x200

В случай че е необходимо да се обработва композитен материал, класическият метод на хидроабразивно рязане може да не е подходящ, тъй като композитите могат да бъдат повредени поради крехката си структура. Едно от съвременните решения на този проблем е специално разработената пробивна глава от китайската компания „HEAD“, изобразена на фиг. 68.



Фиг. 68. Външен вид на пробивна глава HeadWaterJet [38]

Техническите характеристики на пробивната глава HeadWaterJet са представени в табл. 29.

Таблица. 29. Технически характеристики на пробивната глава HeadWaterJet

Радиус на въртене, mm	266
Точност на рязане, mm	$\pm 0,05$
Размери на работната зона, mm	386x222x698

Съществуват също така компактни решения за хидроабразивна обработка. Пример за такова оборудване е инсталацията за хидро-абразивна обработка с ЦПУ модел KC-150A/6D (фиг. 69), която е оборудвана с защитна работна камера. Сред особеностите на това оборудване са наличието на 6 шпиндела, уловител за шлам, блок за пречистване на въздуха, както и въртяща се маса и работна камера.



Фиг. 69. Инсталация за хидроабразивна обработка с ЦПУ, модел KC-150A/6D

Инсталацията е предназначена за външна обработка (обдухване) на изделия със сложна геометрична форма, например турбинни лопатки, дискове на турбини, корпуси, тракторни колела, барабани, смесители и др. [40]. Възможна е обработка на изделия с еднократно зареждане на камерата до 6 единици изделия. Техническите характеристики на машината са представени в табл. 30 .

Таблица. 30. Технически характеристики на машината с ЦПУ модел KC-150A/6D

Габаритни размери на установката, мм	4250x2250x4500
Размери на работната зона, mm	1400x1400x1400
Максимални размери на детайла в шпиндела, mm: — диаметър — дължина	200 900
Максимална маса на обработваните детайли, kg	100
Консумирана мощност, kW	8,5
Получавана грапавост (Ra), μm	4,5÷0,8

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебника са разгледани някои от основните технологични методи за обработка на базата на концентрирани енергийни потоци, включително електрохимични, електроерозионни, лазерни, ултразвукови, електронно-лъчеви, хидроабразивни и комбинирани. Представени са основните типови операции на посочените методи и техните технологични характеристики, като са оценени предимствата и недостатъците. Изданието е структурирано по такъв начин, че всяка глава има еднаква структура, която съдържа теоретичен материал, описание на конструкциите и технологичните характеристики на обработката.

ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА

1. Кузманов, Т.В., Й. Т. Максимов, Х. Ц. Метев, *Неконвенционални технологии в машиностроенето*, Унив. издателство “В. Априлов”, Габрово, 2004.
2. Кузманов Т. В., Максимов Й. Т., Метев Х. Ц. *Съвременни индустриални технологии*. УИ “В. Априлов”, Габрово, 2004.
3. Кузманов Т.,Хр. Метев. *Неконвенционални технологии в машиностроенето (ръководство за лабораторни упражнения)*. ЕКС-ПРЕС,Г.,2005.
4. Богодухов, С. И. Технологические процессы в машиностроении: учеб. для вузов / С. И. Богодухов, Е. В. Бондаренко, А. Г. Схиртладзе и др.; под общ. ред. С. И. Богодухова. - М. : Машиностроение, 2009. - 640 с. : ил. ; 70х100/16. - ISBN 978-5-217-03408-6.
5. Богодухов, С. И. Технологические процессы в машиностроении: учеб. для вузов / С. И. Богодухов, А. Г. Схиртладзе, Р.М. Сулейманов и др.; под общ. ред. С. И. Богодухова. - М: Машиностроение, 2012. - 654 с.: ил. - I ISBN 978-5-94178-270-3.
6. Поляков З.И., Исаков В.М., Исаков Д.В., Шамин В.Ю. Электрофизические и электрохимические методы обработки: Учебное пособие для студентов-заочников. Компьютерная версия. - 2-е изд., перер. и доп. - Челябинск: ЮУрГУ, 2006. - 89 с.
7. Попов Л.М. Физико-химические методы обработки: Компьютерный текст лекций. - 2-е изд., перер. - Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2006. - 97 с.
8. Подураев В.Н. Технология физико-химических методов обработки. М.: Машиностроение, 1985. – 264 с.
9. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: Учебное пособие (в 2-х томах) / Под ред. В.П. Смоленцева. - М.: Высш. Школа, 1983. - I том - 386 с., II том - 208 с.
10. Бирюков, Борис Николаевич. Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки / Б. Н. Бирюков.- Москва : Машиностроение, 1981 .- 128 с. : ил., табл. - (Библиотека станочника).- Библиогр.: с. 127.
11. Электрохимическая размерная обработка металлов и сплавов. Проблемы теории и практики: Монография / О.И. Невский, В.М. Бурков, Е.П. Гришина, Е.Л. Гаврилова, А.В. Балмасов, А.В. Носков, М.Г. Донцов. ГОУ ВПО Иван. гос. хим.-технол. ун-т. Иваново, 2006, 282 с.
12. Попов Л.М. Физико-химические методы обработки: Компьютерный

текст лекций. – 2-е изд., перер. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2006. – 97 с. Открытый доступ: <https://lib-bkm.ru/load/77-1-0-1994>.

13. Системы электрохимической маркировки: [Электронный ресурс] // Лазер Мастер оборудование для лазерной маркировки. URL: <https://lazer-master.ru/oborudovanie-dlja-promyshlennoj-markirovki/sistemy-ehlektrokhimicheskij-markirovki/sistemy-ehlektrokhimicheskij-markirovki-es/>.

14. www.semat.ru/catalog.

15. Электрохимический станок SFE-12000M: [Электронный ресурс] // Завод по производству станков для электрохимической обработки металлов. URL: <https://stankofinexpo.ru/production/elektrokhimicheskij-standok-sfe-12000m>.

16. <http://www.semat.ru/catalog/25/333.html>.

17. <http://www.semat.ru/catalog/19/236.html>.

18. Овсянников Б.Л. Изучение устройства и работы установки для вырезной электроэрозионной обработки: Методические указания к лабораторным работам по курсу "Технология и оборудование электрофизических методов обработки". - М.: МИЭМ, 2007. - 20 с.

19. https://edm.ru/ru/items/item_16.

20. AQ-Premium - сверхгабаритные электроискровые вырезные станки: [Электронный ресурс] // Лидер электроискрового станкостроения Sodick. URL: <https://sodick.sodicom.biz/ru/aq-premium-edws/>.

21. Медведев В.В. Физико-механические методы обработки: конспект лекций по курсу «Физико-механические методы обработки». – Донецк.: ДонНТУ, 2012. – 122 с.

22. Анодно-механический ленточно-отрезной станок модели 4А350: [Электронный ресурс] // Производство станков, электроэрозионного оборудования и расходных материалов. URL: <https://stankitsp.com/catalog/anodno-mexanicheskie-lentochno-otreznye-standki/anodno-mexanicheskij-lentochno-otreznoj-standok-modeli-4a350>.

23. Прецизионный координатно-прошивной электроэрозионный станок для обработки отверстий (супердрель), 3D - микроэрозионного фрезерования АРТА 1040: [Электронный ресурс] // Дельта-тест электроэрозионные (электроискровые) станки и технологии АРТА. URL: https://edm.ru/ru/items/item_21.

24. Полуавтомат для алмазно-электрохимического шлифования с чпу пазов ош-625ЭФ3: [Электронный ресурс] // Производство станков шлифовальных, специальных, фрезерных, прессов. URL:

<https://krasnyborets.com/catalog/stanki-dlya-almazno-elektrokhimicheskogo-shlifovaniya/osh-625ef3/>.

25. Электрохимическая металлообработка: установка ЕСМ/РЕСМ PI 800: [Электронный ресурс] // Станки и производственные системы EMAG Group.

URL: <https://www.emag.com/ru/stanki/ustanovki-dlja-ehlektrokhimicheskoi-ecm-pecm-obrabotki/pi-800/>.

26. Вейко В.П., Петров А.А. Опорный конспект лекций по курсу "Лазерные технологии". Раздел: Введение в лазерные технологии. - СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. - 143 с.

27. Лазеры для резки листового металла (а): [Электронный ресурс]

28. Станок лазерной резки, сверления отверстий и скрайбирования поликора, керамики и кристаллов МикроЛаб МЛП1-2106: [Электронный ресурс] // Лазерное оборудование, купить оборудование для лазерной обработки с ЧПУ от производителя. URL: <https://www.laserapr.ru/lazernoe-oborudovanie/mashina-lazernoi-mikroobrabotki-MLP1-2106>.

29. Установка для лазерной сварки и наплавки мул-3d: [Электронный ресурс] // Латиком: твердотельные лазеры и их компоненты, лазеры для сварки. URL: <http://www.laticom.ru/oborudovanie/lazernaya-svarka-i-naplavka/seriya-mul/mul-3d/>.

30. Вейко В.П., Смирнов В.Н., Чирков А.М., Шахно Е.А. Лазерная очистка в машиностроении и приборостроении: Учебное пособие. - СПб.: НИУ ИТМО, 2013. - 103 с.

31. Аппарат электронно-лучевой сварки Focus MEBW-60: [Электронный ресурс]

32. <https://weber.ru/device/plazmennaya-svarka/208/>.

33. <https://www.plakart.pro/catalog/oborudovanie/ustanovki-dlya-naplavki/plazmennye/ustanovka-plazmennoy-naplavki-rrs-250-rtm/>.

34. <https://www.metallisation.com/products/met-pccplas/>.

35. Панина, Д. В. Перспективные методы отделочно-зачистной обработки в среде свободных абразивов на основе использования ультразвукового метода / Д. В. Панина, Е. Н. Колганова // Актуальные проблемы инженерных наук : материалы VI-й ежегодной научно-практической конференции преподавателей, студентов и молодых ученых Северо-Кавказского федерального университета † Университетская наука - региону ‡, Ставрополь, 02–27 апреля 2018 года. – Ставрополь: ООО ИД "ТЭСЭРА", 2018. – С. 475-476.

36. https://www.acrow-tools.com.tw/en/products_detal.php?id=3177.

37. China Ultrasonic Welding Transducer, Converter, Generator, Homogenizer, Atomization Factory, Manufacturers and Suppliers: [Электронный ресурс] // URL: <https://www.altrasonicautomation.com/>.
38. Ультразвуковая ванна AlexPulse MO-915: [Электронный ресурс] // Ультразвуковые технологии и оборудование: Александра-плюс. URL: <http://alexplus.ru/MO-915.html>.
39. <http://window.edu.ru/resource/385/71385>.
40. Станок гидроабразивной резки с ЧПУ под высоким давлением 4200 бар с 5-осевой режущей головкой: [Электронный ресурс] // Установки гидроабразивной резки, Запчасти гидроабразивной резки KMT_WIN-WIN. URL: <https://topwaterjet.ru/ac5/cutting-machine-3015ac.html>.
41. Сверлильная головка: [Электронный ресурс] // Шэньянская научно-техническая компания "HEAD". URL: https://www.headwaterjet.ru/product-in_209.html.
42. <https://www.gidroabraziv.com/products/ustanovka-gidroabrazivnoj-obrabotki-s-chpu-ks-150a-6d/>.
43. Тихомиров Р.А. Гидрорезание судостроительных материалов/ Р.А. Тихомиров, В.Ф. Бабин, Е.Н. Петухов. – Л.: Судостроение, 1987. – 164 с__