

Черкаський державний технологічний університет  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Кондаков Андрій Вадимович

УДК 621.9.048.4

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

### **ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КЕРОВАНОГО ФОРМУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ СТАЛЕЙ ПРИ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНІЙ ОБРОБЦІ ДРОТЯНИМ ЕЛЕКТРОДОМ**

131 – Прикладна механіка

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень.  
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів  
мають посилання на відповідне джерело  
\_\_\_\_\_ А. В. Кондаков

Науковий керівник:  
Осипенко Василь Іванович,  
доктор технічних наук, професор

Черкаси – 2021

## АНОТАЦІЯ

**Кондаков А.В. – Технологічне забезпечення керованого формування параметрів поверхневих шарів сталей при електроерозійній обробці дротяним електродом – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 Прикладна механіка – Черкаський державний технологічний університет Міністерства освіти і науки України, Черкаси, 2020.

Застосування інноваційних розробок в технології обробки матеріалів дозволяє розширити використання високоякісних матеріалів високої твердості в машинобудуванні. Під час їх обробки, стандартні способи виробництва поступово витісняються більш прогресивними стратегіями, наприклад, обробка електроерозією, електрохімічна обробка, ультразвукова обробка та лазерна обробка.

Електроерозійна обробка (ЕЕО) включає в себе комплексне залучення численних фізичних явищ. Електричні іскри між катодом та анодом утворюють велику кількість тепла над невеликою ділянкою деталі. Матеріал деталі видаляється завдяки виникненню розплавлення і випаровування, викликаних високою температурою при обваленні каналу плазми розряду. Параметри поверхневих шарів сталевих деталей, технічні та технологічні характеристики процесу, які визначають механізми та результати їх формування потребують подальших комплексних системних досліджень. Розвиток уявлень про формування параметрів поверхневих шарів сталевих деталей при електроерозійній обробці дротяним електродом дозволить підвищити їх експлуатаційні характеристики, за рахунок більш якісного прогнозування та керованого формування заданої мікрогеометрії та фізико-механічних властивостей.

Сукупність представлених у дисертації результатів експериментальних та теоретичних досліджень становить нове вирішення актуальної науково-

технічної задачі підвищення ефективності технологічного забезпечення прогнозування та керованого формування мікрогеометрії та фізико-механічних властивостей поверхневих шарів сталей при електроерозійній обробці дротяним електродом.

У *вступі* наведено загальну характеристику дисертаційних досліджень, їх актуальність, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, предмет та об'єкт дослідження, сформульовано мету та задачі наукового дослідження.

*Перший розділ* роботи присвячений аналізу стану проблем та факторів, що мають вплив на формування якості поверхонь при електроерозійній обробці дротяним електродом. Проведений детальний аналіз параметрів сучасних генераторів технологічного струму електроерозійних вирізних верстатів та механізми їх впливу на формування одиничної ерозійної лунки, продуктивність процесу різання та якість сформованих поверхонь. Проаналізовано вплив характеристик дротяного електроду-інструменту на процес електроерозійного вирізання. Розглянуто відомі моделі формоутворення поверхні при електроерозійній обробці та особливості формування структури поверхневих шарів.

У *другому розділі* представлено розроблені та підібрані методики та обладнання для реалізації комплексу експериментальних досліджень керованого впливу основних параметрів електроерозійного дротяного вирізання на формування мікрогеометрії, структури та фізико-механічних властивостей поверхневих шарів сталей. Запропоновано та адаптовано оригінальну методику визначення напруг у зоні термічного впливу після електроерозійного дротяного різання у відомих простих технологічних схемах.

*Третій розділ* присвячений теоретичним та експериментальним дослідженням процесів формування геометрії одиничної ерозійної лунки та мікрогеометрії поверхонь утворених масовою дією розрядів при електроерозійному дротяному вирізанні (ЕЕДВ). Виявлено закономірності

зміни енергоефективності процесу руйнування конструкційної Сталі 45 в обраному діапазоні режимів роботи генератора. Для групи сталей з відомими та достатньо близькими теплофізичними характеристиками (Сталь 45, Сталь 48, 40X, У10, Х12М) отримана система рівнянь, які дозволяють на етапі проектування технологічного процесу електроерозійного дротяного вирізання для відомих енергії розряду, що виділяється на аноді, тривалості розряду та коефіцієнта перекриття лунок розраховувати три базові параметри шорсткості –  $R_z$ ,  $R_a$ ,  $R_q$ . Отримані закономірності виникнення та впливу вібрацій дротяного електроду-інструменту (ДЕІ) на формування мікрогеометрії оброблених поверхонь. Розроблено математичну статистичну модель для розрахунку впливу вібрацій ДЕІ на мікрогеометрію оброблених поверхонь.

*В четвертому розділі* наведено результати системного комплексу досліджень по визначенню мікротвердості, структури та товщини зони термічного зміцнення в якісній вуглецевій конструкційній Сталі 45 після ЕЕДВ. Отримані результати забезпечують поповнення бази даних та розширення уявлень про закономірності впливу часово-енергетичних характеристик імпульсів технологічного струму на формування термічно зміцненого шару за ЕЕДВ якісних вуглецевих сталей. Висунуто, обґрунтовано та експериментально підтверджено гіпотезу про те, що при ЕЕДВ якісних вуглецевих сталей за використання розрядних імпульсів струму з енергетичними та часовими параметрами характерними для сучасних електроерозійних вирізних верстатів домінуючий вплив на формування товщини термічно зміцненого шару має тривалість імпульсу струму. Проведена серія чисельних експериментів в цілому підтвердила отримані експериментальні результати, що дозволяє з похибкою, що не перевищує 15% використовувати їх для прогнозування та керування формуванням необхідної за умовами експлуатації товщини термічно зміцненого шару при ЕЕДВ широкої групи конструкційних та інструментальних вуглецевих сталей.

Результати комплексу експериментальних досліджень залишкової напруги в ЗТВ сталі У7А після дротяного електроерозійного різання повного

зйому та додаткових проходів показали, що максимальна напруга розтягу скорочується зі збільшенням кількості додаткових проходів. Для чорнової електроерозії спостерігається релаксація залишкових напружень у часі, що зменшує максимальне залишкове напруження розтягу.

Отримані результати, по суті, відкривають перспективний шлях до мінімізації енергетичних затрат на обробку тієї чи іншої марки сталі та керування характеристиками оброблених поверхонь, як з точки зору формування мікрогеометрії, так і глибини зміни структури в зоні термічного впливу.

*Ключові слова:* електроерозійна обробка, енергія імпульсу, електроерозійне дротяне вирізання, залишкова напруга, зона термічного впливу, одиничний іскровий розряд, термічно зміцнений шар, мікротвердість.

## SUMMARY

**Kondakov A.V. – Technological support of the controlled formation of the parameters of surface layers of steels in the electroerosion processing with a wire electrode – Manuscript.**

The dissertation on competition of a scientific degree of the Doctor of Philosophy on a specialty 131 Applied mechanics - the Cherkasy State Technological University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Cherkasy, 2020.

Application of innovative developments in technology of processing of materials allows to expand use of high-quality materials of high hardness in mechanical engineering. During their processing, standard production methods are gradually being replaced by more progressive strategies, such as electroerosion treatment, electrochemical treatment, ultrasonic treatment and laser treatment.

Electrical discharge machining (EDM) involves the complex involvement of numerous physical phenomena. Electric sparks between the cathode and the anode generate a large amount of heat over a small area of the part. The material of the part is removed due to the occurrence of melting and evaporation caused by high temperatures during the collapse of the discharge plasma channel. The parameters of the surface layers of steel parts, technical and technological characteristics of the process, which determine the mechanisms and results of their formation require further comprehensive system studies. The development of ideas about the formation of the parameters of the surface layers of steel parts during EDM treatment with a wire electrode will improve their performance, due to better forecasting and controlled formation of the specified micro geometry and physical and mechanical properties.

The set of results of experimental and theoretical researches presented in the dissertation is a new solution of the actual scientific and technical problem of

increase of efficiency of technological maintenance of forecasting and controlled formation of micro geometry and physical and mechanical properties of surface layers of steels at electroerosive processing by a wire electrode.

*The introduction* presents the general characteristics of dissertation research, their relevance, scientific novelty and practical significance of the results, subject and object of research, formulates the purpose and objectives of research.

*The first section* is devoted to the analysis of the state of problems and factors that affect the formation of surface quality during EDM treatment with a wire electrode. The detailed analysis of parameters of modern generators of technological current of electroerosive cutting machines and mechanisms of their influence on formation of a single erosion hole, productivity the process of cutting and quality of the formed surfaces is carried out. The influence of the characteristics of the wire electrode-tool on the process of electroerosive cutting is analyzed. The known models of surface formation during electroerosive treatment and features of formation of structure of surface layers are considered.

*The second section* presents the developed and selected methods and equipment for the implementation of a set of experimental studies of controlled influence of the main parameters of EDM wire cutting on the formation of micro geometry, structure and physical and mechanical properties of surface layers of steels. An original method for determining stresses in the zone of thermal influence after EDM wire cutting in known simple technological schemes is proposed and adapted.

*The third section* is devoted to theoretical and experimental studies of the processes of formation of the geometry of a single erosion hole and the micro geometry of the surfaces formed by the mass action of discharges in wire electrical discharge machining (EEDV). Regularities of change of energy efficiency of the process of destruction of structural steel 45 in the selected range of modes of

operation of the generator are revealed. For a group of steels with known and sufficiently similar thermophysical characteristics (Steel 45, Steel 48, 40X, U10, X12M) a system of equations is obtained, which allows at the stage of designing the technological process of EDM for known discharge energy released at the anode, discharge duration and the coefficient of overlap of the holes to calculate the three basic parameters of roughness –  $R_z$ ,  $R_a$ ,  $R_q$ . The regularities of the occurrence and influence of vibrations of the wire tool electrode (DEI) on the formation of the micro geometry of the treated surfaces are obtained. A mathematical statistical model for calculating the effect of DEI vibrations on the micro geometry of treated surfaces has been developed.

*The fourth section* presents the results of a systematic set of studies to determine the microhardness, structure and thickness of the thermal hardening zone in high-quality carbon structural Steel 45 after EEDV. The obtained results provide replenishment of the database and expansion of ideas about the patterns of influence of time-energy characteristics of process current pulses on the formation of a thermally strengthened layer by EEDV of high-quality carbon steels. The hypothesis that the EEDV of high-quality carbon steels with the use of discharge current pulses with energy and time parameters characteristic of modern EDM cutting machines has a dominant influence on the formation of the thickness of the thermally hardened layer has been put forward, substantiated and experimentally confirmed. The conducted series of numerical experiments, in general, confirmed the obtained experimental results, which allows with an error not exceeding 15% to use them to predict and control the formation of the required operating conditions of the thickness of the thermally strengthened layer at EEDV of a wide group of structural and tool carbon steels.

The results of a set of experimental studies of residual stress in HAZ steel U7A after wire EDM cutting of complete removal and additional passes showed that the maximum tensile stress decreases with increasing number of additional passes.



For rough electroerosion, there is a relaxation of residual stresses over time, which reduces the maximum residual tensile stress.

The obtained results, in fact, open a promising way to minimize energy costs for processing a grade of steel and control the characteristics of treated surfaces, both in terms of micro geometry formation and the depth of structure change in the thermal zone.

**Key words:** *electroerosive treatment, pulse energy, electroerosive wire cutting, residual stress, thermal impact zone, single spark discharge, thermally hardened layer, microhardness.*

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України*

1. В. І. Осипенко, А. В. Кондаков, О. В. Тімченко, «Моделювання теплових процесів формування одиничної лунки розрядами сучасних генераторів електроерозійних вирізних верстатів». *Вісник ЧДТУ 2019. – №3. – С. 154-162.*

*Здобувачем виконано чисельне моделювання форми границь фазових переходів та розраховані об'єми фазових перетворень матеріалу анода та мінімальна кількість енергії, що витрачена на них.*

2. В. І. Осипенко, А. В. Кондаков, О. В. Тімченко «Визначення залишкових напруг в інструментальній сталі у7а після електроерозійного дротяного вирізання». *Вісник ЧДТУ – 2019. – №4. – С. 126–131.*

*Здобувачем проведено обробку та аналіз результатів експериментальних досліджень залишкової напруги в ЗТВ сталі У7А після дротяного електроерозійного різання повного зйому та додаткових проходів.*

### *Європейського Союзу*

3. V. Osypenko, O. Plakhotnyi, O. Timchenko and A. Kondakov, «Determination of microhardness and depth of thermally Hardening zone in quality carbon structural steel after wedm Using different discharge parameters», *журнал «Nonconventional Technologies Review», Romania. – 2020. – Vol. 24 №3 – С. 31–39.*

*Здобувачем запропоновано концепцію, схему та методикку проведення експериментальних досліджень розподілу мікротвердості по товщині поверхневих шарів зразків.*

*Матеріали й тези конференції*

4. А. В. Кондаков, «Визначення залишкових напруг в інструментальній сталі Х12М після електроерозійного дротяного вирізання». *Збірник тез доповідей: Студентської науково-Практичної конференції ЧДТУ (18-20 квітня 2017 р.) – С. 94.*
  
5. А. В. Кондаков, «Перспективні шляхи підвищення ефективності електроерозійної обробки матеріалів» *Участь в міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку науки на початку третього тисячоліття в країнах Європи та Азії» (31.01.2018), <http://conferences.neasmo.org.ua/uk/art/4200>.*

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ	14
ВСТУП	15
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ФОРМУВАННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ПРИ ЕЛЕКТРО- ЕРОЗІЙНІЙ ОБРОБЦІ ДРОТЯНИМ ЕЛЕКТРОДОМ	20
1.1 Аналіз впливу параметрів генераторів струму сучасних електроерозійних верстатів на формування лунок	20
1.2 Моделі формоутворення поверхні при електроерозійній обробці	41
1.3 Оцінка впливу коливань ДЕІ на процес та результати електроерозійного дротяного вирізання	50
1.4 Особливості формування структури поверхневих шарів сталей при електроерозійній дротяній обробці	57
1.5 Концепція, технічні та технологічні основи керування формуванням параметрів поверхневих шарів сталей	63
1.5.1 Багатопрхідне електроерозійне дротяне вирізання	63
1.5.2 Обробка із застосуванням водних розчинів поверхнево- активних речовин	66
1.5.3 Використання робочих рідин з порошковими присадками	70
1.6 Висновки за розділом 1	71
РОЗДІЛ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ І МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	74
2.1 Експериментальна база досліджень та оцінка достовірності результатів	74
2.2 Методики експериментальних досліджень	75
2.2.1 Методи оцінки достовірності результатів вимірювань	75
2.2.2 Методика визначення шорсткості поверхні та мікронерівностей при електроерозійному дротяному вирізанні	75
2.2.3 Методика дослідження мікротвердості зразків	79
2.2.4 Методика реєстрації коливань ДЕІ	83
2.2.5 Методика визначення розподілу напружень в поверхневому шарі деталі після електроерозійної обробки	88
2.3 Висновки за розділом 2	90
РОЗДІЛ 3. ФОРМУВАННЯ МІКРОГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ПРИ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНІЙ ОБРОБЦІ ДРОТЯНИМ ЕЛЕКТРОДОМ	91

3.1 Фізико-технологічні особливості формування одиначної лунки при електроерозійній обробці дротяним електродом	91
3.1.1 Енергетичні параметри одиначних імпульсів при використанні сучасних генераторів технологічного струму	91
3.1.2 Результати математичного моделювання теплофізичної дії одиначного розряду на поверхню анода	97
3.1.3 Формування одиначної лунки з врахуванням процесів утворення облямовуючого буртика	102
3.2 Засади формування мікрогеометрії поверхні при електроерозійному дротяному вирізанні	109
3.3 Методика прогнозування параметрів шорсткості при обробці сталей	112
3.4 Вібрації дротяного електрода як окремий чинник впливу на формування мікрогеометрії оброблених поверхонь	119
3.5 Вплив коливань дротяного електрода на стабільність процесу різання та мікрогеометрію утворених поверхонь	124
3.6 Результати експериментальних досліджень впливу частоти та амплітуди коливань дротяного електрода на шорсткість оброблених поверхонь	127
3.7 Математична статистична модель для розрахунку впливу коливань дротяного електрода на шорсткість оброблених поверхонь	131
3.8 Висновки за розділом 3	138
<b>РОЗДІЛ 4. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ СТАЛЕЙ ПРИ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНІЙ ОБРОБЦІ ДРОТЯНИМ ЕЛЕКТРОДОМ</b>	140
4.1 Гартувальні структури, що утворюються в поверхневих шарах вуглецевих та легованих сталей при електроерозійній обробці	140
4.2 Експериментальні дослідження розподілу мікротвердості в поверхневих шарах деталі за різних енергетичних режимів електроерозійного дротяного вирізання	146
4.3 Математичне моделювання розподілу тепла в поверхневих шарах деталі при електроерозійній обробці	159
4.4 Оцінка рівня залишкових напружень, що виникають в зоні термічного впливу інструментальної сталі	165
4.5 Висновки за розділом 4	170
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ</b>	172
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b>	175

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

- АмПАР – амфолітна поверхнево - активна речовина  
АПАР – аніоактивна поверхнево - активна речовина  
ВПД – верстат – пристосування – інструмент – деталь  
ВР ПАР – водний розчин поверхнево - активних речовин  
ГКІ – генератор коротких імпульсів  
ДЕІ – дротяний електрод-інструменту  
ЕЕВВ – електроерозійний вирізний верстат  
ЕЕДВ - електроерозійне дротяне вирізання  
ЕЕО – електроерозійна обробка  
ЕР – енергетичний режим  
ЕХРО – електрохімічна розмірна обробка  
ЗТВ – зона термічного впливу  
КПАР – катіоактивна поверхнево - активна речовина  
МЕП – міжелектродний проміжок  
ПАР – поверхнево - активна речовина  
РР – робоча рідина  
WEDM – wire electrical discharge machining

## ВСТУП

**Актуальність теми.** В умовах сьогодення з розвитком сучасних технологій в галузі машинобудування особливої уваги набуває електроерозійна обробка яка створює точні складно контурні деталі інструментального виробництва, авіадвигунобудування, авіаційної та ракетно-космічної техніки. Неповність даних, щодо структурних складових поверхневого шару після електроерозійної обробки, не дає можливості з впевненістю характеризувати експлуатаційні властивості поверхні.

Алгоритми розрахунку продуктивності та шорсткості, засновані на режимах обробки, характерних для верстатів 70-80-х років минулого століття, не дозволяють достатньо точно прогнозувати результат обробки, у результаті чого, потужність генератора використовується не завжди ефективно і не в повній мірі задовольняються вимоги до мікрогеометрії, товщини та фізико-механічних властивостей поверхневих термічно змінених шарів. З врахуванням цього, задача подальшого розширення бази даних для технологічного забезпечення керованого формування параметрів поверхневих шарів сталей при електроерозійній обробці дротяним електродом є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема дисертаційної роботи відповідає основним цілям державної програми розвитку машинобудування від 2006 року затвердженої постановою КМУ за номером 516 на період 2006-2011 рр. Зокрема: «Забезпечення споживачів сучасною високоефективною продукцією машинобудування вітчизняного виробництва», «Інноваційний розвиток та ефективна конкурентоспроможність всіх інших секторів регіональної економіки», «Розроблення цільових комплексних програм, спрямованих на розвиток окремих підгалузей машинобудування». Також узгоджується з основними цілями проекту Стратегії розвитку промислового комплексу України від 2018 року на період до 2025 року. Зокрема: «Модернізація та зростання

промислового виробництва», «Підвищення ресурсоефективності промисловості», «Сприяння цифровізації промисловості».

При формулюванні теми та завдань досліджень було враховано принципи Концепції розвитку цифрової економіки та суспільства України та плану заходів щодо її реалізації від 2018 року затвердженої постановою КМУ за номером 67-р на період 2018-2020 рр. Зокрема: «Трансформація секторів економіки в конкурентоспроможні та ефективні», «Технологічна та цифрова модернізація промисловості та створення високотехнологічних виробництв», «Розвиток цифрових індустрій та цифрового підприємництва».

**Мета і завдання дослідження.** Мета роботи: підвищення ефективності технологічного забезпечення прогнозування та керованого формування мікрогеометрії та фізико-механічних властивостей поверхневих шарів сталей при електроерозійній обробці дротяним електродом.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі вирішуються наступні завдання:

1. Провести аналіз сучасних підходів, технічних та технологічних засад керування формуванням параметрів поверхневих шарів сталей при електроерозійній обробці дротяним електродом.

2. Підібрати та розробити комплекс методик, приладів та обладнання для проведення системних експериментальних досліджень мікрогеометрії та фізико-механічних властивостей поверхневих шарів сталей при електроерозійній обробці дротяним електродом.

3. За результатами комплексу теоретичних та експериментальних досліджень розробити методику, яка на основі врахування основних технологічних параметрів процесу дозволяє розрахувати мікрогеометричні характеристики сформованих поверхонь, при електроерозійній обробці дротяним електродом сталей з відомими теплофізичними характеристиками.

4. Виявити та оцінити вплив коливань дротяного електрода на стабільність процесу різання та мікрогеометрію утворених поверхонь.



5. Встановити закономірності керованого впливу на фізико-механічні властивості, характер їх зміни та однорідність, структуру та товщину зони термічного впливу при обробці сталей за технологією ЕЕДВ з різними енерго-часовими параметрами імпульсів.

**Об'єкт дослідження.** Фізичні і технологічні процеси, що визначають формування параметрів поверхневих шарів сталей при електроерозійній обробці дротяним електродом.

**Предмет дослідження.** Закономірності керованого впливу часово-енергетичних, механічних та теплофізичних параметрів у МЕР на формування необхідних для тих чи інших умов експлуатації мікрогеометрії, фізико-механічних властивостей, структури та товщини зони термічного впливу сталей при їх обробці за технологією ЕЕДВ.

**Методи дослідження.** Як теоретична база при постановці та вирішенні поставлених завдань використовуються основні положення теорії іскрового розряду, теорії теплопровідності (нестационарні процеси), методи математичного планування та обробки результатів експерименту. Експериментальні дослідження проводились на спеціалізованому електроерозійному обладнанні з використанням сучасної реєструючої та вимірювальної апаратури.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному:

– Вперше для групи сталей з відомими та достатньо близькими теплофізичними характеристиками (Сталь 45, Сталь 48, 40Х, У10, Х12М) отримана система рівнянь, які дозволяють на етапі проектування технологічного процесу електроерозійного дротяного вирізання для відомих енергії розряду, що виділяється на аноді, тривалості розряду та коефіцієнта перекриття лунок розраховувати три базові параметри шорсткості –  $R_z$ ,  $R_a$ ,  $R_q$

– Вперше доведено, що при ЕЕДВ якісних вуглецевих сталей за використання розрядних імпульсів струму з енергетичними та часовими параметрами характерними для сучасних електроерозійних вирізних верстатів домінуючий вплив на формування товщини термічно зміцненого шару має

тривалість імпульсу струму. Величина енергії розряду, яка виділяється на аноді на даний процес має другорядний вплив.

– Вперше встановлено, що в ЗТВ сталі У7А після дротяного електроерозійного різання повного зйому та додаткових проходів максимальна напруга розтягу скорочується зі збільшенням кількості додаткових проходів.

– Отримали подальший розвиток та розширення уявлення про закономірності впливу часово-енергетичних характеристик імпульсів технологічного струму на формування термічно зміцненого шару за ЕЕДВ якісних вуглецевих сталей в контексті ефективного керування формуванням необхідних для тих чи інших умов експлуатації фізико-механічних властивостей поверхневих шарів деталей.

#### **Практичне значення одержаних результатів:**

– Розроблена методологія прогнозування шорсткості оброблених поверхонь при багатопрохідній електроерозійній обробці з енерго-часовими параметрами розрядів характерними для генераторів сучасних електроерозійних вирізних верстатів.

– Отримані результати створюють технологічну базу даних для керованого формування параметрів поверхневих шарів сталей необхідних для тих чи інших умов експлуатації деталі.

– Розроблено та адаптовано методику визначення напруг у ЗТВ після електроерозійного дротяного різання у відомих простих технологічних схемах.

– Результати досліджень з похибкою, що не перевищує 15% можна використовувати для прогнозування товщини термічно зміцненого шару при ЕЕДВ широкої групи конструкційних та інструментальних вуглецевих сталей.

**Особистий внесок здобувача.** Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати отримано здобувачем самостійно. Наукові положення, що виносяться на захист, та висновки дисертаційної роботи належать автору.

У роботах, опублікованих у співавторстві:

– Виконано чисельне моделювання форми границь фазових переходів та розраховані об'єми фазових перетворень матеріалу анода та мінімальна кількість енергії, що витрачена на них [134].

– Проведено обробку та аналіз результатів експериментальних досліджень залишкової напруги в ЗТВ сталі У7А після дротяного електроерозійного різання повного зйому та додаткових проходів [147].

– Запропоновано концепцію, схему та методику проведення експериментальних досліджень розподілу мікротвердості по товщині поверхневих шарів зразків [142].

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати досліджень доповідалися на наукових конференціях: Студентської науково-практичної конференції ЧДТУ (18-20 квітня 2017 р.); Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку науки на початку третього тисячоліття в країнах Європи та Азії» (31.01.2018)

**Публікації результатів дисертації.** Результати досліджень, що подані в дисертації, опубліковані у 5 наукових працях, у тому числі 3 статтях у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у періодичному фаховому виданні іноземної держави, що входить до Європейського Союзу, 2 - у рекомендованих фахових виданнях України) та у 2 тезах доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 190 сторінки, з них обсяг основного тексту – 153 сторінок, 67 рисунків, 20 таблиць, список використаних джерел складає 143 найменувань і займає 16 сторінок.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ФОРМУВАННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ПРИ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНІЙ ОБРОБЦІ ДРОТЯНИМ ЕЛЕКТРОДОМ

### 1.1 Аналіз впливу параметрів генераторів струму сучасних електроерозійних верстатів на формування лунок

Одним із найновітніших та масових способів обробки металів являється електроерозійна технологія. В групі електроерозійного технологічного обладнання у переважній більшості мають розвиток вирізні верстати. Завдяки своїй високій ефективності електроерозійного дротяного вирізання (ЕЕДВ) при виготовленні точних складно контурних деталей інструментального виробництва [1].

До основних переваг ЕЕДВ можна віднести:

1. Процес різання проходить по двох (чотирьох) керованих координатах із мінімальною шириною пазу, що прорізається. При цьому номенклатура деталей які можна обробляти за допомогою ЕЕДВ значно розширюється за рахунок складно контурних деталей, що виготовлені із дорогих та твердих сплавів та матеріалів, які складно обробити іншими методами.

2. Обробка проходить практично без силового впливу інструменту на заготовку, що дозволяє обробляти поверхні тонкостінних деталей.

3. Можливість варіювання електричними режимами в широкому діапазоні, що забезпечує досягнення оптимального поєднання точності та продуктивності обробки.

4. Дротяний електрод-інструмент використовується для чорнової, чистової та прецизійної обробки. При цьому скорочується ряд підготовчих операцій, пов'язаних із виготовленням електроду-інструменту складної форми.

Однак процес ЕЕДВ навіть на сучасному етапі розвитку вимагає вдосконалення. Серед найбільш суттєвих недоліків електроерозійного дротяного вирізання можна виділити наступні:

1. Алгоритми розрахунку продуктивності та шорсткості, засновані на режимах обробки, характерних для верстатів 70-80-х років минулого століття, не дозволяють прогнозувати результат обробки і, як наслідок, не ефективно використовується потужність генератора.

2. Практично відсутні дані, щодо структурних складових поверхневого шару після електроерозійної обробки. Таким чином, з впевненістю, не можливо характеризувати експлуатаційні властивості поверхні.

3. Наявність відбіленого загартованого шару на поверхні деталі в деяких випадках є не припустимою.

4. З врахуванням наведених недоліків, розрахунок припусків та режимів для багатопрохідної обробки стає неефективним.

5. Невелика швидкість (продуктивність) обробки, особливо на чистових та напівчистових режимах.

6. Недостатньо висока стабільність процесу обробки. При обриві дротяного електроду-інструменту (ДЕІ), в залежності від технологічних умов, загальний час обробки зростає в 1,4-1,7 разів. Останній факт значно зменшує резерв підвищення енергії імпульсу навіть за умови оптимізації інших факторів, що впливають на перебіг процесу ЕЕДВ.

7. За один чорновий технологічний прохід досягається шорсткість поверхні не менше  $Ra = 3,5-4,0$  мкм. Меншої шорсткості можна досягти при обробці за декілька технологічних проходів, що збільшує загальний час обробки.

8. За один чорновий технологічний прохід досягається точність не менше  $\pm 0,035$  мм, особливо при високопродуктивному різанні, що в багатьох випадках недостатньо і також вимагає додаткових чистових проходів [2].

Для усунення вищенаведених недоліків, як правило, застосовуються наступні технічні та технологічні прийоми [3-5]:

- оптимізація енерговиділення в міжелектродному проміжку (МЕП);
- використання адаптованих алгоритмів керування постійними часу роботи генераторів;
- розробка нових, більш досконалих вузлів верстатів та типів генераторів;
- створення робочих рідин з необхідними властивостями.

Фізична природа ЕЕО забезпечує їй як методу формоутворення унікальну технологічну гнучкість як стосовно складності форми оброблюваних поверхонь, так і номенклатури оброблюваних матеріалів. Єдине обмеження, що визначає можливість використання ЕЕО, полягає в тому, що оброблюваний матеріал електрода-інструмента повинний бути струмопровідним.

Процес електроерозійного руйнування поверхні електрода зумовлений сукупною дією трьох видів процесів, що проходять у міжелектродному проміжку (МЕП): електричних, теплових та газогідродинамічних.

Під електричними процесами розуміють процеси, що визначають пробій МЕП, заповненого рідким середовищем, формування короткочасного зосередженого джерела тепла під впливом плазми в каналі розряду і баланс енергії в МЕП.

Під тепловими процесами розуміють передачу тепла (від поверхневих шарів усередину матеріалу електродів), що визначає глибину локальної зони проплавлення.

Під газогідродинамічними розуміють процеси, пов'язані з формуванням стійкого плазмового каналу і рухом рідини під дією імпульсного виділення енергії в каналі розряду та тиском у системі примусового промивання проміжку.

Виходячи з цього, послідовно розглянемо та проаналізуємо відомі дані про електричну, теплову та газогідродинамічну сторони процесу [6–10].

Електричні процеси в міжелектродному проміжку, розвиваючись у часі, проходять послідовно декілька стадій (фаз):

Перша фаза – підготовка та утворення каналу наскрізної провідності між найбільш близько розміщеними ділянками електрода та заготовки (фаза малого струму). Чітких, теоретично обґрунтованих та експериментально підтверджених пояснень дії механізму утворення каналу розряду до теперішнього часу не існує.

Більшість дослідників схиляються до думки, що в основі механізму пробою лежить процес ударної іонізації речовини, що заповнює МЕП. У будь-якій речовині завжди присутня деяка кількість вільних носіїв заряду (електрони та іони). Під дією електричного поля ці носії почнуть рухатися в напрямку градієнта поля рівноприскорено, поки не відбудеться зіткнення електрона чи іона з молекулами речовини, при якому заряджена частинка передає частину своєї енергії молекулі речовини та втрачає швидкість.

Величина, енергії яку електрон чи іон можуть передати нейтральній молекулі, пропорційна величині падіння потенціалу, яка доводиться на довжину вільного пробігу носія заряду. Таким чином, чим більша величина напруги, тим більшу енергію електрон чи іон передають зустрічній молекулі. При деякому значенні напруги на електродах досягається стан, за якого електрон може передати молекулі енергію, достатню для іонізації, тобто з молекули рідини чи газу буде вибито ще хоча б один електрон, котрий також виконає іонізацію і т. д. Відбудеться лавиноподібне наростання кількості нових носіїв заряду, які утворять електропровідний канал-шнур, здатний пропустити струм великої сили. Варто відзначити, що ударна іонізація іоном – процес маловірогідний через малу рухомість іонів. Процес пробиття триває дуже короткий час. Перекриття проміжку провідним каналом займає не більше  $10^{-8} - 10^{-7}$  с.

Друга фаза – процес бурхливої іонізації та розширення каналу зі швидкостями що відповідають швидкостям розповсюдження ударних хвиль (3000 – 5000 м/с). З ростом струму до максимуму канал розряду продовжує розширюватися, але зі швидкостями суттєво меншими (200 – 500 м/с). Швидкість розширення та діаметр каналу при малих МЕП залежать також від

параметрів міжелектродного середовища та матеріалу електродів, у парах яких він розширюється. Після переходу струму через максимум розширення каналу практично припиняється.

Третя фаза – біля каналу розряду починає формуватися газова порожнина, яка в подальшому прогресивно розширюється. Швидкість розширення газової порожнини становить 50 – 100 м/с в початковій стадії її утворення і поступово зменшується до 1 – 5 м/с. Процес завершується відділенням від каналу розряду ударної хвилі.

У зв'язку з тим, що через МЕР протікає струм, у ньому, як і в будь-якому іншому навантаженні, виділяється енергія. Енергія, що виділилася в МЕР, розраховується за формулою [2]:

$$E_i = \int_0^{t_i} i(t) \cdot u(t) dt, \quad (1.1)$$

де  $i(t)$  – струм через проміжок;  $u(t)$  – напруга на проміжку;  $t_i$  – тривалість імпульсу.

Розглянемо принципову базову схему алгоритму розрахунку технологічних параметрів для реального процесу ЕЕДВ. Вихідними даними для розрахунку основних характеристик технологічного процесу електроерозійної вирізної обробки є вимоги креслення і технічних умов на оброблювану деталь або виріб. До основних з них належать:

- 1) геометричні характеристики виробу;
- 2) матеріал (теплофізичні та механічні властивості);
- 3) необхідна точність обробки;
- 4) величина шорсткості поверхні;
- 5) максимально можлива продуктивність обробки;
- 6) вимоги до якості поверхневого шару (наприклад, припустима величина зміненого шару);
- 7) технічні характеристики наявного технологічного обладнання;
- 8) економічні показники (вартість обробки тощо).



Як додаткову умову, що визначає можливість розмірної обробки, у вихідні дані необхідно також внести умови адитивності, тобто визначити  $f_{гран}$  для конкретного режиму ЕЕДВ.

Усі ці умови визначають як технологічні режими обробки, так і найбільш прийнятний технологічний маршрут. Електроерозійну вирізну обробку більшої частини виробів звичайно виконують послідовно за 2 – 4 технологічні проходи. Це обумовлено високими вимогами до точності, шорсткості та глибини зони структурних змін сучасних виробів інструментального виробництва, задовольнити які за один технологічний прохід чорнового різання (різання повного зйому) практично неможливо. Основна мета першого чорнового проходу – сформувати поверхню виробу з припуском на наступні технологічні проходи за мінімальний час. Мета проходів додаткового різання – за мінімальний час одержати задану кресленням геометричну точність та шорсткість поверхні виробу. Умовно представимо процес розрахунку технологічних режимів ЕЕДВ у вигляді трьох послідовних етапів.

На першому етапі проводять оцінку технічних характеристик моделі верстата і генератора, вибирають діаметр та матеріал дротяного електрода-інструмента. При цьому варто виходити з можливості закріплення деталі заданих розмірів на столі верстата, наявності необхідного розхилу інструментальної скоби, необхідної точності приводів верстата та жорсткості системи ВПД.

На другому етапі, виходячи з матеріалу та товщини деталі, діаметра та матеріалу електрода, характеристик генератора технологічного струму, фізико-хімічних властивостей робочої рідини (РР), визначають необхідну мінімальну кількість технологічних проходів, величини еквідистант та параметри розрядних імпульсів (тривалість  $t_i$ , напруга  $U_{xx}$ , амплітуда струму  $I_a$ , частота слідування  $f_p$ ) для кожного технологічного проходу.

На третьому етапі визначають параметри прокачування РР через міжелектродний проміжок.

Розглянемо детальніше відомі експериментальні та розрахункові залежності, що дозволяють у певних межах достовірності виконати розрахунки технологічних режимів ЕЕДВ.

Тривалість та амплітуда струму розряду визначають густину теплового потоку. При електроерозійній обробці непрофільованим електродом використовують однополярний іскровий розряд. Іскровий розряд є такою формою самостійного розряду, що виникає в результаті пробоя міжелектродного проміжку при достатньо високому значенні різниці потенціалів між електродами та параметрами джерела, що забезпечують неможливість збудження дугового розряду. Іскровий розряд характеризується дуже малою тривалістю  $10^{-7} \dots 10^{-6}$  с, високою густиною потужності в каналі розряду –  $10^6 - 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> [8].

Характерними для цієї форми є локалізованість ерозійного процесу й глибина руйнування. Це обумовлено малою тривалістю процесу, при якому канал іскрового розряду не встигає розширитися або переміститися по поверхні електродів на значну відстань. Висока температура в каналі розряду призводить до зосередженого й глибокого руйнування поверхні. Крім того, короткочасність проходження іскрового розряду надає вибухоподібного характеру процесу ерозії з викидом продуктів ерозії з великою швидкістю. Інтенсивність протікання процесу іскрової ерозії, в першу чергу, визначається густиною енергії, реалізованої в іскровому проміжку. При іскрових розрядах анод сильніше піддається ерозії, ніж катод.

Кожен генератор коротких імпульсів, що входять в електроерозійний комплекс, забезпечує обробку визначеним пакетом режимів, параметри яких визначаються тривалістю імпульсу, амплітудою напруги та струму (визначають загальну енергію розряду (див. рівняння (1.1))), сквапністю, частотою та формою імпульсу.

Розглянемо, яким чином кожний з указаних параметрів впливає на фізичні особливості перебігу процесу ерозії.

*Тривалість імпульсу.* Стосовно умов електроерозійного дротяного вирізання використовують тривалість імпульсу від 0,05 до 5 мкс. Для визначення оптимальної тривалості імпульсу в роботах [6, 7] використовується задача Стефана, у результаті чого отримана формула:

$$t_i = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\left[ k_4 \cdot c \cdot \rho \cdot T_{пл} \left( 1 + \frac{L_{пл}}{c \cdot T_{пл}} \right) \right]}{B_0^2}, \quad (1.2)$$

де  $c$  – теплоємність;  $\rho$  – густина;  $L_{пл}$  – прихована теплота плавлення;  $T_{пл}$  – температура плавлення.

Величина  $B_0$  лежить у межах від  $0,775 \cdot 10^3$  (Al); до  $6 \cdot 10^3$  (W). Для сталей різних марок  $B_0 = (0,880 - 1,2) \cdot 10^3$  (табл. 1.1).

Більш детальний аналіз режимів обробки та якості отриманої поверхні дозволив побудувати номограми, що зв'язують шорсткість обробленої поверхні (сталь), тривалість імпульсу та амплітуду робочого струму (рис. 1.1) [11].

Таблиця 1.1

**Чисельні значення коефіцієнта  $B_0$  різних матеріалів**

Матеріал	$B_0$	Матеріал	$B_0$
Al	775	Cu	1400
Сталь 45	880	ВК-6	4400
Залізо-Армко	900	ВК-15	5000
Ni	1200	W	6000

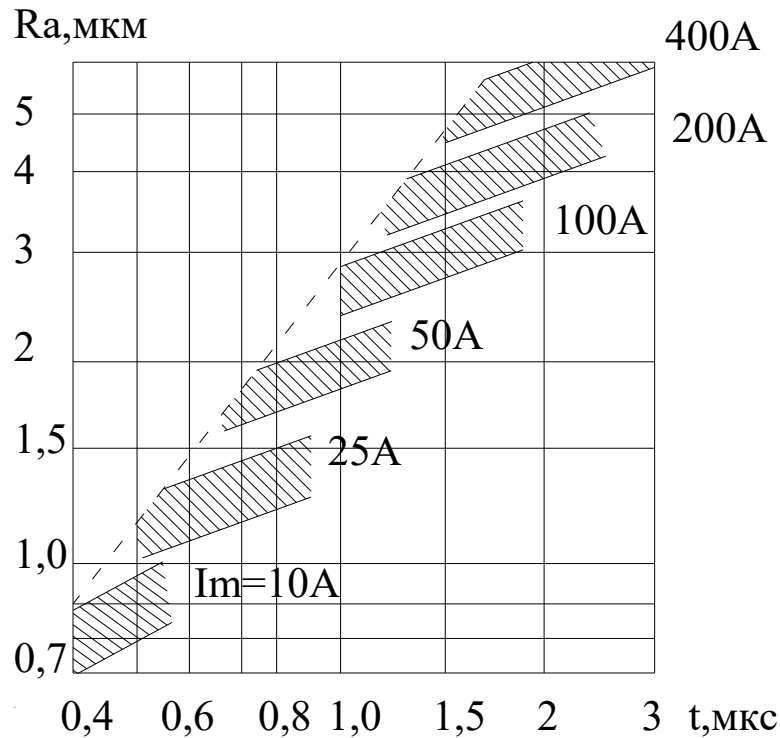


Рис. 1.1 – Залежність шорсткості обробки від тривалості імпульсу струму та амплітуди робочого струму

В роботах В.М. Коренблюма, Б.М. Біхмана, Г.А. Алексєєва [12; 13] для розрахунку параметрів режиму високопродуктивного вирізання була використана методика аналітичного визначення амплітуди ( $I_m$ ) і тривалості ( $t_i$ ) імпульсів розрядного струму, що забезпечують задану шорсткість поверхні. Ця методика виходить із переважної ролі теплових процесів при електроерозійній обробці і використовує розв'язок задачі плавлення однорідного півпростору заданим тепловим потоком при безупинному видаленні розплаву. Вираз, що зв'язує  $I_m$  і  $t_i$  прямокутних імпульсів розрядного струму з висотою нерівностей  $R_z$ , обробленої поверхні, має вигляд [13]:

$$t_1 = 4,63k_1^{2,44} n^{0,22} (Q_1 + rQ_2)^{0,78} 10^{0,22m-0,33} k_3 \cdot \frac{(k_2 R_z)^{3,22}}{(U_s I_m)^{1,22}} + 52,7n \frac{(k_1 k_2 R_z)^4}{(U_s I_m)^2}, \quad (1.3)$$

Де  $U_s$  напруга близько дугової стадії розряду;

$$\begin{aligned}
k_1 &= d_1 / h_1, \\
k_2 &= h_1 l / R_2; \\
n &= \lambda C_1 S_1 (T_r T_0)^2; \\
Q_1 &= S_1 C_1 (T - T_0) + S_1 C_1 (T - T_0) + S_1 L_{11}; \\
Q_2 &= S_2 C_2 (T_2 - T_1) + S_2 L_2; \\
m &= \frac{\sqrt{\pi} C_1 (T_1 - T_0)}{2 L_{11}}, \tag{1.4}
\end{aligned}$$

де -  $d_i$ ,  $h_i$  – діаметр і глибина одиничної розрядної лунки;

коефіцієнти:

$\lambda$  – теплопровідність;

$S_1$ ,  $S_2$  – густина твердої та рідкої фаз;

$C_1$ ,  $C_2$  – питома теплоємність твердої та рідкої фаз;

$L_1$ ,  $L_2$  – питома теплота плавлення та випаровування;

$T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_0$  – температура плавлення, кипіння та початкова;

коефіцієнт  $n$  ( $0 \leq n \leq 1$ ) характеризує дію тепла, що йде на перегрівання та випаровування металу.

Стосовно умов електроерозійного вирізання сталевий заготовки анода латунним дротом, коли використовуються мікросекундні імпульси, через високу густину енергії в каналі розряду ( $10^7 - 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>) матеріал переважно випаровується. З високою вірогідністю можна прийняти  $n = 0,8...0,9$ . Відповідно до вимірів розмірів одиничних розрядних лунок коефіцієнти  $K_1=7...10$ ,  $K_2=1,1...1,4$ , з осцилограм процесу вирізання  $U_s = 30...35$  В [14].

Для більшості інструментальних сталей (У8, Х12М та інш.) теплофізичні константи, що входять в вираз (1.3) становлять:

$$\lambda = 0,88 \text{ кал/(см с град);}$$

$$S_1 = 7,9 \text{ г/см}^3; S_2 = 7,5 \text{ г/см}^3;$$

$$C_1 = 0,166 \text{ кал/г град}; C_2 = 0,232 \text{ кал/г град};$$

$$L_1 = 50 \text{ кал/г}; L_2 = 1590 \text{ кал/г};$$

$$T_1 = 1530^\circ\text{C}; T_2 = 2735^\circ\text{C};$$

$$P = 2,38 \cdot 10^5 \text{ кал}^2/\text{см}^4 \text{ C};$$

$$Q_1 = 2380 \text{ кал/см}^3;$$

$$Q_2 = 13870 \text{ кал/см}^3.$$

Коефіцієнт форми розрядних імпульсів струму приймають рівним  $K_3 \approx 7$ . Обчислення для одержання номограм проводили при значеннях шорсткості поверхні  $Ra=1.2; 2.2; 3.2; 4.2$  мкм, що охоплюють діапазон від чистової до чорнової обробки. Коефіцієнт  $k_i=d_n/h_n$  приймає значення від 6 до 10, при цьому менша величина стосується більш коротких імпульсів (до 1 мкс) [12]. Імпульсні значення розрядного струму (без врахування коефіцієнта форми) прийняті рівними для чистових режимів 25 – 100 А, для напівчистових – 75 – 200 А, для чорнових – 100 – 250 А.

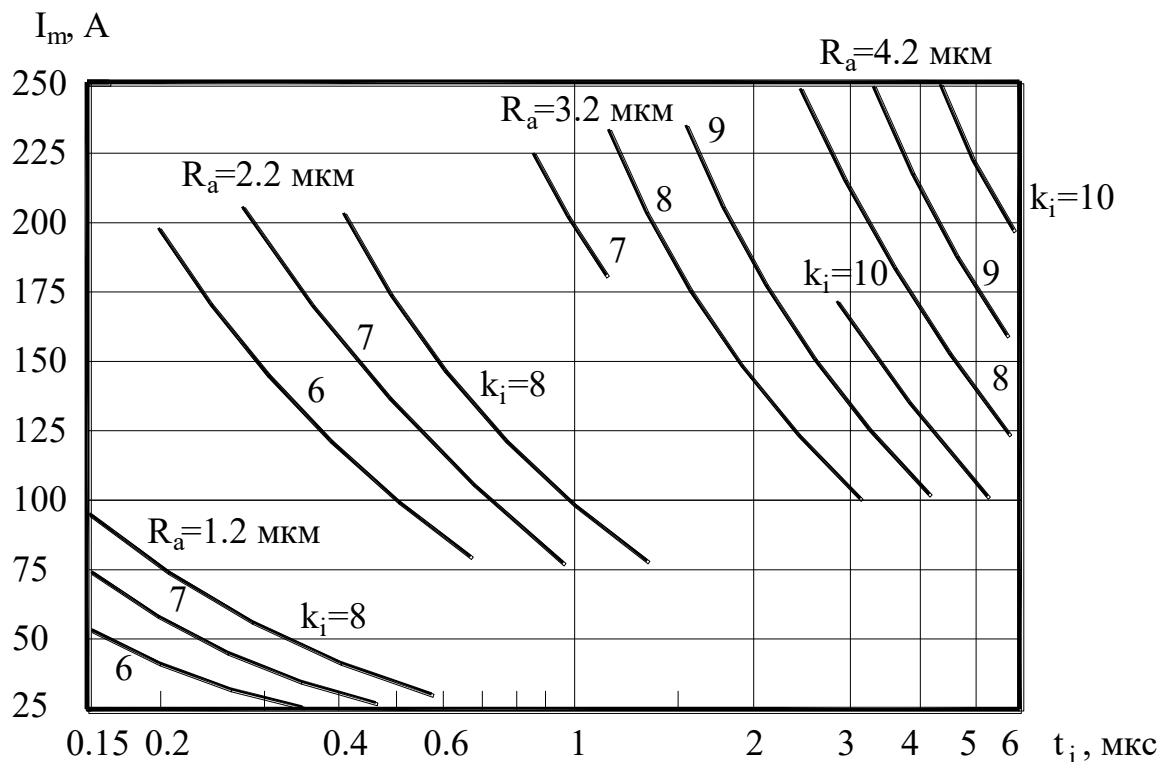


Рис. 1.2 – Номограми для визначення тривалості імпульсу та максимального значення струму для отримання заданої шорсткості ( $Ra = 1,2; 2,2; 3,2; 4,2$  мкм і  $k_i = 6 - 10$  [12])

Номограми, наведені на рис. 1.2, дозволяють оцінити параметри одиничних розрядних імпульсів, якщо задана необхідна шорсткість обробленої поверхні. Згідно з [12; 15], режими високопродуктивного

вирізання ( $100 - 200 \text{ мм}^2/\text{хв}$ ) забезпечують шорсткість  $Ra = 2,2...4,2 \text{ мкм}$ . Ці режими відповідно до отриманих номограм реалізуються розрядами, що мають тривалість одиниці – частки мікросекунд і амплітуди струму  $100 - 400 \text{ А}$ .

У роботі [12] зроблене припущення, що з укороченням розрядних імпульсів навантажувальна здатність електрода-дроту збільшується як за рахунок меншого зносу (менша глибина одиничних розрядних лунок і відповідне зменшення діаметра ерозійної лунки), так і за рахунок більшої асиметрії електричної ерозії (менша частинка енергії розряду передається дроту-катоду).

Аналіз номограм показує, що при виборі параметрів розрядних імпульсів для високопродуктивного вирізання необхідно визначити максимально допустиму шорсткість обробки, обмежену діаметром електрода-дроту і його зносом. Відповідно до виразу (1.3) при збільшенні амплітуди імпульсів струму у два рази висота нерівностей зростає на 30 %, а збільшення імпульсного струму у три рази приводить до зростання шорсткості на 50 %.

*Амплітудні значення напруги та струму* (рис. 1.3) разом з тривалістю імпульсу визначають загальну енергію розряду та її баланс у МЕР. Амплітуда напруги холостого ходу генератора  $U_{xx \text{ max}}$  за інших рівних умов визначає максимальне значення геометричної величини МЕР. На процесі в каналі розряду суттєвий вплив має крутизна переднього фронту імпульсу напруги [13]. Збільшення крутизни приводить до збільшення густини теплового потоку на початку розряду і, таким чином, до збільшення відносного руйнування анода.

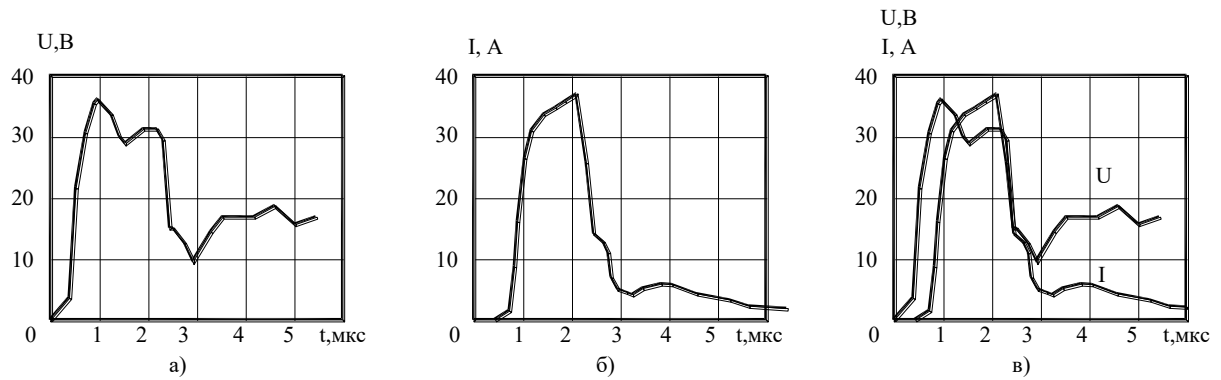


Рис. 1.3 – Типові осцилограми імпульсу струму та напруги при ЕЕДВ для генератора технологічного струму ГКІ 300-200А

Величина міжелектродного проміжку за умов електроерозійного дротяного вирізання змінюється в межах від 0,01 до 0,06 мм. Залежність величини МЕР від параметрів режиму ЕЕДВ теоретично не розраховується, оскільки вона залежить в тому числі від швидкості подачі, товщини заготовки, електропровідності міжелектродного проміжку, тощо. Дані про вплив величини МЕР на загальну енергію розряду та баланс енергії в проміжку є досить обмеженими та не полишеними протиріч в оцінках [16 – 18].

При цьому більшість дослідників виказують в тій чи іншій мірі обґрунтовані висновки про те, що для кожного енергетичного режиму ГКІ існує оптимальне значення МЕР.

Сквапність імпульсів – це параметр, що визначає співвідношення між часом дії імпульсу  $t_i$  та періодом повторення імпульсів  $T$ :

$$\psi = \frac{T}{t_i} . \quad (1.5)$$

Для іскрової обробки  $\psi$  обирається в межах від 6 до 10. Менше значення лімітується високою ймовірністю локалізації розрядів, що небезпечно для обриву ДЕІ, а більше значення недоцільне через зниження робочого струму і, відповідно, продуктивності. При значенні  $\psi > 30$  вважають, що обробка проводиться одиничними розрядами (значення більше 10 не характерні для електроіскрової обробки). Великою сквапністю визначається можливість



концентрації у часі значних енергій та потужностей у зоні обробки. Час між імпульсами необхідний для видалення із зони дії розряду продуктів ерозії та охолодження електродів [19].

*Частота імпульсів* – це кількість імпульсів, що подається на проміжок за 1 секунду. Більші значення частоти відповідають чистовим режимам обробки. Проведення чорнової обробки на підвищених частотах може спричинити появу обриву ДЕІ через суттєве погіршення гідродинамічних умов на проміжку.

В загальному випадку імпульси можна поділити на робочі та холості (імпульси напруги, що не призводять до пробую МЕР). Причинами появи холостих імпульсів можуть бути: завищена для обраного енергетичного режиму величина міжелектродного проміжку; наявність нерівномірності електропровідності матеріалу електродів або робочої рідини, що тимчасово збільшує напруженість пробую проміжку; робота спеціальних блокуючих систем ЕЕВВ (системи регулювання швидкості подачі та величини МЕР, системи адаптивного керування параметрами енерговиділення) та інші фактори.

*Форма імпульсів.* Вибір форми імпульсів залежить від матеріалу деталі, граничного зносу інструмента, форми оброблюваної порожнини (для прошивної обробки) та необхідної шорсткості оброблених поверхонь [20]. Для електроіскрової обробки використовують прямокутні, гребінчасті імпульси та колоколоподібні. Для вирізної обробки з тривалістю імпульсів менше 10 мкс зазвичай використовують імпульси струму, що близькі до трикутної форми.

В загальному випадку середній робочий струм можливо визначити з відомого виразу [53]:

$$I_{роб} = K_{vi} \frac{I_m}{\Psi}, \quad (1.6)$$

де  $K_{vi}$  – коефіцієнт використання імпульсів (доля числа робочих розрядів від числа генерованих);  $\Psi$  – сквапність імпульсів.

Для стабільного процесу вирізання  $K_{ei} \approx 0,7$ . При використанні поняття питомої продуктивності  $M_a$  (продуктивність на 1 А робочого струму) продуктивність можна записати:

$$M = M_a I_{роб}, \quad (1.7)$$

На рис. 1.4 подані номограми для оцінки частоти повторення імпульсів, робочого струму та очікуваної продуктивності вирізання [12].

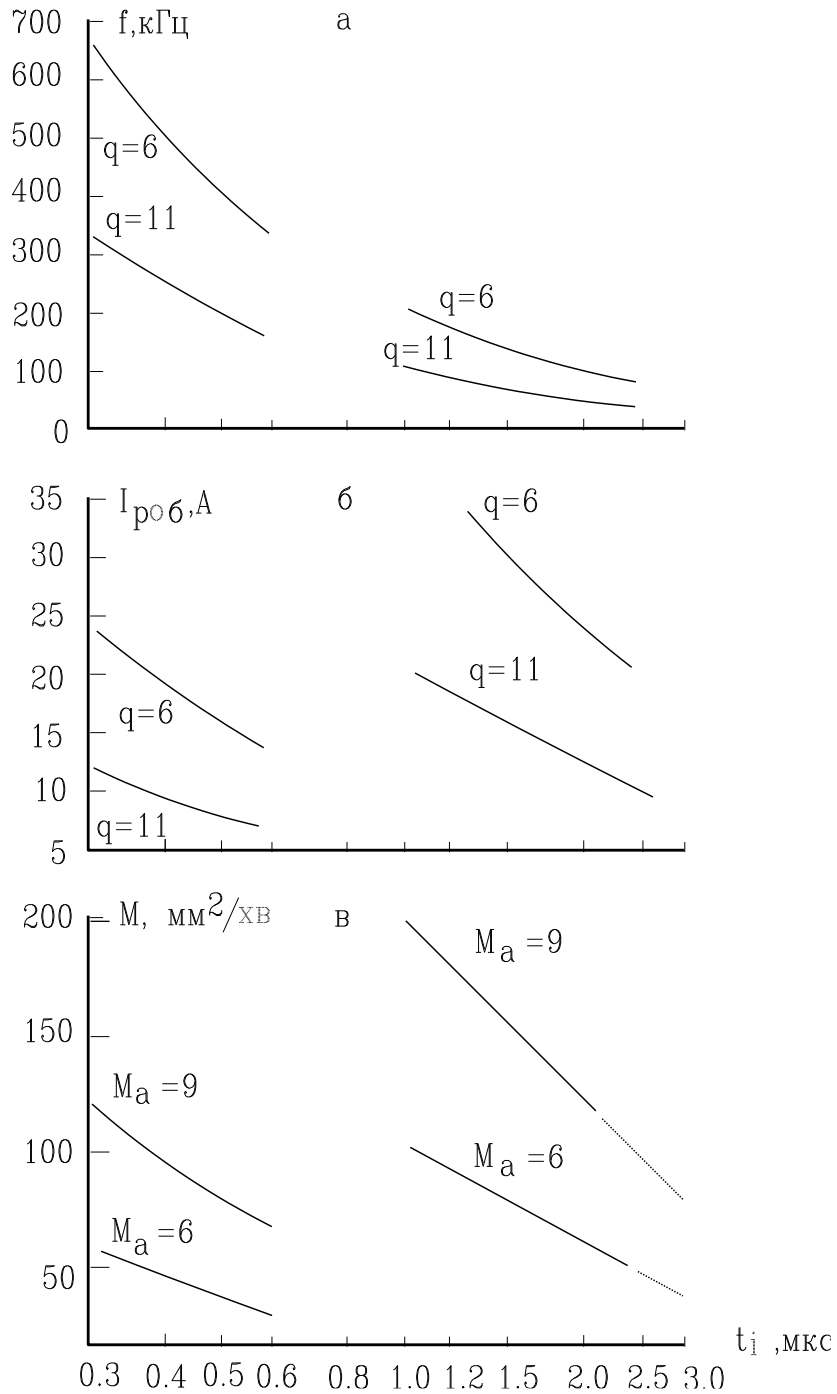


Рис. 1.4 – Номограми для оцінки частоти імпульсів (а), робочого струму (б), та продуктивності вирізання (в)

Проведений огляд та аналіз літературних джерел показали, що існує ряд робіт, в яких автори намагаються пов'язати параметри розрядних імпульсів з основними технологічними показниками ЕЕДВ – продуктивністю процесу та шорсткістю отриманих поверхонь. Однак системи розрахунків, засновані на дослідженнях окремих процесу (більшість досліджень не враховують специфічні технологічні особливості обладнання для ЕЕДВ), не дають цілісного уявлення про вплив усього комплексу факторів (електричний, гідродинамічний, та тепловий режими процесу, теплофізичні характеристики матеріалу електродів, фізико-хімічні властивості робочого середовища, параметри технологічних систем обладнання) на кінцеві технологічні показники (продуктивність вирізання, точність контуру, шорсткість отриманої поверхні).

Між тим проведений попередній аналіз показав можливість покращення кінцевих технологічних показників ЕЕДВ за рахунок моделювання та удосконалення фізико-технологічних процесів, що забезпечить коректне визначення зони оптимальних електричних параметрів для пари матеріалів інструмент-деталь, ступеню необхідної ефективності охолодження ДЕІ і виносу з МЕР продуктів ерозії та газопарової суміші і, відповідно, параметри керування постійними часу роботи ГКІ [21].

Аналіз відомих досліджень теплових та гідродинамічних процесів у МЕР показує, що для заданої пари матеріалів той чи інший механізм процесу ерозійної руйнації електродів визначається параметрами імпульсів: загальною енергією, тривалістю, частотою, сквапністю, густиною потужності в електродних плямах [14, 43, 55]. У свою чергу параметри механізму ерозійного руйнування електродів визначають не тільки енергетичні, але й технологічні характеристики процесу. Тобто в основі ефективного використання процесів електроерозійної обробки повинно бути оптимальне узгодження енергетичних і електричних характеристик імпульсу з теплофізичними характеристиками матеріалу електродів, що визначають швидкість зйому, питомі витрати енергії, величину зони структурних змін, чистоту поверхні та ін.

Ерозійні процеси проходять на поверхні електродів (глибина одиничної лунки при енергії імпульсу до 10 мДж не перевищує 3...10 мкм). Таким чином, при розгляді фізико-хімічних властивостей матеріалу електрода і їх впливу на перебіг процесу ерозії, розподіл енергії між електродами й руйнування останніх, необхідно розуміти не весь об'єм матеріалу, а лише властивості поверхневих шарів.

Дослідниками [22 – 31] для аналізу ерозійної стійкості або оброблюваності матеріалів було сформовано ряд критеріїв, які мають відповісти на запитання: “Який з двох електродів більше схильний до ерозійного руйнування?” До переліку базових критеріїв входять температура та питома теплота плавлення і випаровування матеріалу, його теплопровідність, теплоємність, густина та ін. В багатьох випадках результати, отримані різними дослідниками, не завжди співпадають. Це пов'язано з прийнятими авторами припущеннями та спрощеннями, відмінностями енергетичних та часових параметрів використовуваних імпульсів, властивостями робочих рідин, наявністю неоднорідності складу поверхневих шарів електродів, та ін..

В технологіях ЕЕДВ більша частина деталей виготовляється з інструментальних сталей або твердих сплавів (властивості матеріалів усередині цих груп відрізняються не більш ніж на 10 %). Обробка інших матеріалів, хоча і не виключається, але частинка операцій з їх застосуванням невелика.

За базовий матеріал деталі можна обрати конструкційну вуглецеву Сталь 45 (ГОСТ 1050-88). Усі інші матеріали з відповідними показниками слід зводити до базового матеріалу.

Щодо матеріалу ДЕІ, то для виготовлення непрофільованого електрода-інструмента найчастіше використовують латунь Л62, Л65. Цей матеріал є пластичним, має добру теплопровідність, легко обробляється. На практиці досить часто використовується ДЕІ з цинковим покриттям фірми “AGIE”. Цей

тип ДЕІ дозволяє отримати асиметричний розряд і, відповідно, досягти продуктивності обробки до  $300 \text{ мм}^2/\text{хв}$ .

Існує ряд трактувань [32 – 41], щодо фізичного механізму зносу ДЕІ і, відповідно, кілька гіпотез щодо зменшення зносу ДЕІ. Згідно з однією з них зменшення зносу пояснюється захисними властивостями вуглецевих плівок, що утворюються на електроді при піролізі робочої рідини (керосину тощо) під дією розряду. Вуглецева плівка, згідно з даними авторів цієї гіпотези, виконує теплозахисні функції завдяки високій температурі плавлення графіту.

Аналогічне явище було описано в роботі [42] для латунного дроту в середовищі технічної води. Автор показує, що на окремих режимах обробки на поверхні латунного дроту формується захисна плівка, що складається з оксидів міді та цинку. Попередньо відтворивши близьку за складом плівку, можливо зменшити знос і, відповідно, температурне поле ДЕІ.

Таким чином, при незмінному матеріалі заготовки підбір матеріалу інструмента (або його поверхневих шарів) впливає на механізм формування каналу розряду та теплові процеси в зоні дії електродних плям. Однак при цьому практично відсутні дані про кількісні та якісні закономірності впливу фізико-хімічних властивостей поверхневих шарів ДЕІ на теплову асиметрію іскрового розряду.

В роботах [14; 43] запропоновано математичну модель для оцінки ерозійного руйнування електродів при різному значенні енергії розряду. Для розрахунків застосовувалася відома з математичної фізики так звана задача Стефана про сполучення двох температурних полів за особливої умови на рухомій границі розділу.

Реальні режими, що використовуються в сучасних ЕЕВВ, в більшості випадків суттєво не вкладаються в рамки наведених обмежень [15; 44 – 49]. Зупинимося на проблемі детальніше.

1. Фракталометричними дослідженнями встановлено, що при більшості режимів ЕЕДВ матеріал видаляється з лунки у вигляді пари, в межах від 70 % до 90 %.

2. В каналі розряду при густині потужності  $10^7 - 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> відбувається активне випаровування матеріалу електрода, що має характер вибуху. Пари видаляються майже одночасно без додаткового перегрівання.
3. Експериментально визначена форма лунки може суттєво відрізнитися від кульового сегмента.
4. Теплофізичні константи металів у твердій, рідкій та паровій фазах залежать від температури.

Наведені відмінності призводять до того, що результати розрахунку параметрів ерозійного руйнування електродів за режимів, характерних для ЕЕДВ, при використанні наведених моделей відрізняються від експериментально отриманих значень на 50 – 100%. Це є побічним підтвердженням тези про те, що отримати точні розв'язки нелінійної моделі за допомогою існуючих аналітичних методів практично неможливо. У зв'язку з цим постає необхідність використання числових методів для розв'язання поставлених задач та проблема забезпечення прийнятної для технологій ЕЕДВ точності розрахунку закономірностей руху меж розділу фаз.

Параметри одиничних імпульсів визначають значною мірою оптимальну полярність включення електродів і основні технологічні характеристики процесу. Однак взаємодія розрядів у квазіпаралельній порожнині між електродами за час паузи між імпульсами і розподіл розрядів по поверхні найвагомим чиним впливають не тільки на швидкість знімання, але і на відносний знос дротяного електрода-інструмента, шорсткість поверхні, товщину структурно зміненого шару.

Розряди розподіляються по оброблюваній поверхні гніздами, оскільки виникнення наступного розряду найбільше ймовірно поблизу ділянки, враженої попереднім розрядом. Чим менша пауза між імпульсами, тим за інших рівних умов більше розрядів у гнізді. Нерівномірність скупчення продуктів ерозії збільшує міжелектродний зазор і поліпшує процес видалення продуктів обробки. Накладення температурних полів від кожного з розрядів

гнізда призводить до локальних перегрівів ділянок електродів і скипання робочої рідини, що утворює в зазорі газопарову суміш. Деяка оптимальна кількість цієї суміші в міжелектродному зазорі сприяє видаленню продуктів ерозії, але якщо суміш заповнює весь зазор, то процес евакуації призупиняється [15]. Зменшення паузи між імпульсами до деякої межі збільшує швидкість знімання і знижує знос інструмента-анода; при цьому воно неістотно впливає на шорсткість поверхні. Внаслідок взаємного впливу температурних полів кожного з розрядів або гнізд розрядів і перемінних умов теплообміну, що залежать від геометричних характеристик міжелектродної порожнини, властивостей і умов прокачування робочої рідини, кінцева товщина зміненого шару завжди перевищує товщину цього шару від одиничних розрядів.

При погіршеному видаленні продуктів обробки з міжелектродного проміжку кількість розрядів у гніздах різко збільшується, тобто підвищується локалізація розрядів, що може викликати дугоутворення (так зване шлакування). Фіктивні та короткозамкнені імпульси, концентруючи на ділянці поверхні з великою щільністю продуктів ерозії, призводять до перегріву дротяного електрода. В більшості дослідників не викликає сумнів той факт, що саме локалізація є домінуючою причиною обривів ДЕІ [16; 51]. Для захисту дроту від обривів більшість розробників ЕЕВВ застосовують так звані адаптивні системи керування просторово-часовим параметрами енерговиділення в МЕП [52; 53].

Фірма “Charmilles Technologies” запропонувала пристрій для виявлення місця локалізації розрядів по товщині заготовки (при використанні двох струмопідводів), що вимірює різницю і суму струмів, що протікають під час кожного розряду в ланцюзі верхнього і нижнього струмопідводів, і визначає відношення різниці до суми (Європейський патент EP 0136975A2). Для визначення різниці і суми використовуються трансформатори струму, обмотки яких включені зустрічно і узгоджено.

Фірма “Міцубісі” запропонувала пристрій, у якому дискримінатор стану

ерозійного проміжку формує функції розподілу імпульсів холостого ходу, короткого замикання, аномальних і нормальних розрядів (заявка Японії № 61 – 111838). Лічильник на виході дискримінатора формує сигнал про небезпеку обриву.

Інший пристрій, запропонований цією ж фірмою, впливає на сервопідсилювач приводу подачі через дискримінатор стану, що працює від датчика звукових коливань дроту (заявка Японії № 61 – 111827). На холостому ходу їхня амплітуда дорівнює нулю, при нормальному процесі присутній увесь спектр, від середніх до високих частот, при короткому замиканні - той же спектр, але з амплітудами меншого рівня. У передобривному стані різко виділяються амплітуди в діапазоні середніх частот. Із появою сигналу про локалізацію розрядів можна автоматично збільшувати час паузи між імпульсами (заявка Японії № 61-109622). В іншій пропозиції при цьому автоматично знижується амплітуда імпульсів розрядного струму (заявка Японії №61 – 125731).

Фірма “Міцубісі” запропонувала використовувати для запобігання локалізації розрядів два резервуари з робочою рідиною і, відповідно, два насоси прокачування (заявка Японії № 61 – 109618): у першому резервуарі знаходиться рідина з малим питомим опором, у другому – з високим питомим опором. При локалізації розрядів рідина подається з першого резервуара, що забезпечує збільшення міжелектродного зазору і розосередження розрядів. Після нормалізації стану рідина подається з другого резервуара.

Фірма “Хітаті” запропонувала оригінальний детектор локалізації розрядів, заснований на порівнянні швидкості переміщення місця виникнення розрядів зі швидкістю перемотування дроту і виявленні збігу цих швидкостей за заданий час (заявка Японії № 62 – 54626). Швидкість переміщення розрядів фіксують за диференціальним сигналом струмів, що протікають у ланцюгах верхнього і нижнього струмопідводів. Зміна в часі амплітуди диференціального сигналу характеризує швидкість переміщення розрядів.

Фірма “Джапакс” запропонувала при збільшенні частоти розрядних



імпульсів вище заданої (локалізація розрядів), автоматично змінювати тиск рідини, що прокачується через сопла, швидкість перемотування і натяг ДЕІ (заявка Японії № 61 – 96218). Пристрій для здійснення цього способу містить тригер Шмідта, який підключений до струмообмежувального опору генератора і керує роботою лічильника, тактований задавальним генератором. При нормальному процесі вирізання лічильник періодично обнуляється, а при локалізації розрядів він переповняється, викликаючи спрацьовування керуючих ланцюгів.

Таким чином, складність досліджень процесів локалізації розрядів (у режимі реального часу виміряти розподіл температури в довільному перетині ДЕІ практично неможливо) обумовила тенденції до вирішення проблеми шляхом подальшого розвитку складних апаратних та програмних засобів керування параметрами енерговиділення в МЕП та обмеження експериментальних і теоретичних досліджень теплових та гідродинамічних умов у зоні локалізації розрядів.

## **1.2 Моделі формоутворення поверхні при електроерозійній обробці**

Поверхня після ЕЕО являє собою накладення великої кількості лунок одна на одну. Однак у цьому чисто статистичному процесі виявляються дискретні закономірності утворення виступу (піка) шорсткості в даній точці. Цей елементарний акт можна з достатнім ступенем точності моделювати накладенням трьох лунок одна на одну (рис. 1.5). Виступ у точці С характеризує величину  $R_z$  [54].

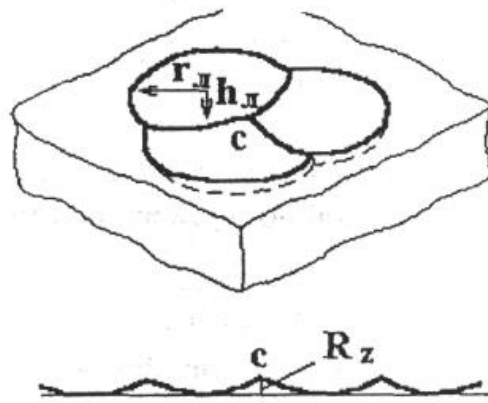


Рис. 1.5 – Схема утворення елемента обробленої поверхні при електроерозійній обробці

Необхідно відзначити, що ця схема формування виступів не передбачає тільки послідовного (безпосередньо один за одним) накладення лунок. Слідуючи один за одним, імпульси залежно від умов пробою МЕРП можуть діяти на поверхню в різних і далеко розташованих одне від одного місцях. Дана модель не враховує буртик, що утворюється навколо лунки, а оскільки висота буртика співставна з глибиною лунки нехтувати ним не можна. Крім того, одиничні лунки, що виникають на поверхні деталі при обробці на електроерозійних комплексах із сучасними генераторами технологічного струму, мають форму близьку до циліндричної із закругленими краями, тому апроксимація кульовими сегментами вносить похибку в розрахунки.

З чисто геометричної задачі про перетинання трьох кульових сегментів зв'язок величини  $R_z$  з параметрами лунки можна записати у вигляді:

$$R_z = \frac{\beta^2}{3} \cdot \frac{r_l^2 h_l}{r_l^2 - h_l^2} \quad (1.8)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт перекриття лунок.

Під терміном «коефіцієнт перекриття лунок» ми маємо на увазі відношення радіусу лунки до відстані між центрами сусідніх лунок:

$$\beta = \frac{r_l}{L}$$

За умовами утворення пробою, коефіцієнт перекриття лунок не може бути менше 1 і лежить у межах  $1 < \beta < 2$ . При  $\beta = 2$  має місце граничний випадок перекриття – торкання. Легко показати, що для  $R_z$  у залежності від величин  $\beta$  мають місце наступні межі:

$$\frac{1}{3} h_n \leq R_z \leq \frac{4}{3} h_n . \quad (1.9)$$

Однак, як свідчить практика, реальні межі величини  $\beta$  такі:  $1 < \beta < 1.1 - 1.2$ ). Це пов'язано з тим, що ймовірність пробою поблизу краю лунки вища через утворення напливу металу (буртика) по її краях.

Одна з форм лунки, що може утворитися при електроерозійній обробці, є близькою до кульового сегмента. В цьому випадку, легко одержати зв'язок величини  $R_z$  з енергією імпульсу  $W_i$ . Ця формула може бути записана в такий спосіб:

$$R_z = \frac{\beta^2}{3} k_4 \sqrt[3]{W_i} , \quad (1.10)$$

$$\text{де } k_4 = k_2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k_3}{k_1^2 \cdot \pi}} , \quad k_1 = \frac{r_n}{h_n} , \quad k_2 = \frac{k_1^2}{k_1^2 + 1} , \quad k_3 = \frac{\alpha_2^2}{B_0 \cdot \sqrt{\alpha_1}} ,$$

$B_0$  – коефіцієнт, що залежить від теплофізичних характеристик матеріалу;  
 $A$  – коефіцієнт температуропровідності (індекси 1 та 2 відносяться відповідно до рідкої та твердої фаз).

В даному випадку  $k_1 > 5$  (що має місце практично для всіх режимів електроерозійної розмірної обробки),  $k_2$  незначно відрізняється від одиниці,  $k_4$  залежить від теплофізичних характеристик оброблюваного матеріалу.

Величина  $k_4$  в залежності від матеріалу лежить у межах від  $(1,5 - 2) \cdot 10^{-3}$  (тверді сплави групи ВК) до  $(12 - 15) \cdot 10^{-3}$  (сплави на основі алюмінію) (табл.1.2).

Таблиця 1.2

**Величини коефіцієнтів  $k_4$  для різних матеріалів анода**

Матеріал анода	$k_4 \cdot 10^{-3}$ , см/Дж <sup>1/3</sup>	Матеріал анода	$k_4 \cdot 10^{-3}$ , см/Дж <sup>1/3</sup>
Al	12 – 15	ХН77ТЮР	6 – 8
Cu	6 – 8	ВК – 6	1.5 – 2
Fe	5,5	ВК – 15	2,5 – 3
Ni	6 – 7	W, Mo	7 – 8
Сталь 45	5 – 6		

Для визначення зони термічного впливу знову ж таки рекомендується отримана з рішення задачі Стефана формула [14, 43]

$$h_T = 2\sqrt{\pi a t_i}, \quad (1.11)$$

де  $t_i$  - тривалість імпульсу.

Величина зони мікрodefektів визначається зумови, що на цій глибині величина пружних термічних напружень не повинна перевищувати 10% від  $\sigma_T$  оброблюваного матеріалу. В цьому випадку глибина зони мікрodefektів

$$h_\sigma = 4\sqrt{a t_\sigma}, \quad (1.12)$$

де  $t_\sigma$  – час вирівнювання температури до початкової температури,  $t_\sigma \sim (3 - 4) \cdot t_i$ .

Отже, можна записати, що  $h_\sigma = 2h_T$ , тобто

$$h_\sigma = 4\sqrt{\pi a t_i}. \quad (1.13)$$

Оскільки ми маємо справу в остаточному підсумку з накладенням ряду лунок одна на одну, тобто чиста величина зони термічного впливу і зони мікрodefektів буде мати вигляд

$$h_T = 2\sqrt{\pi a t_i} - R_z, \quad (1.14)$$

$$h_\sigma = 4\sqrt{\pi a t_i} - R_z. \quad (1.15)$$

В іншій роботі [55] пропонується визначати мікрогеометрію поверхні через обсяг матеріалу, що видаляється з лунки  $V$  та коефіцієнт перекриття лунок  $\beta$ . Середній обсяг матеріалу, що видаляється з лунки автор визначає за формулою:

$$V = \frac{\eta_i \cdot \int_0^{\tau_i} U \cdot I \cdot d\tau_i}{c_\delta \cdot \rho_\delta \cdot T_{пл}}, \quad (1.16)$$

де  $\eta_i$  – коефіцієнт використання імпульсів;

$c_\delta$  – теплоємність матеріалу деталі;

$\rho_\delta$  – густина матеріалу деталі;

$T_{пл}$  – температура плавлення матеріалу деталі.

Мікрогеометричні характеристики поверхні при електроерозійній обробці формуються за рахунок лунок, що взаємно перекриваються.

Автор робить такі припущення:

- усі лунки однакові;
- форма лунки близька до сферичної;
- режими обробки усереднюються;
- фізико-механічні властивості матеріалів незмінні в процесі обробки;
- коефіцієнт перекриття лунок постійний протягом усієї обробки і дорівнює своєму середньому значенню ( $\beta=1,5$ ).

Розрахункову схему для визначення параметрів шорсткості в цьому випадку можна представити у вигляді зображеному на (рис. 1.6).

Обсяг лунки, який відповідає обсягу вилученого металу, можна визначити як обсяг кульового сегмента по залежності [56]:

$$V = \frac{1}{3} \cdot (\pi \cdot h_k^2 \cdot (3 \cdot R - h_k)), \quad (1.17)$$

де  $R$  - радіус сфери;  $h_k$  - глибина лунки.

Через зроблені допущення можна стверджувати, що висотні параметри шорсткості  $R_{max}$  і  $R_z$  дорівнюють глибині лунки і тому завдання відшукування параметрів шорсткості зводиться до визначення глибини лунки, одержуваної при електроерозійній обробці.

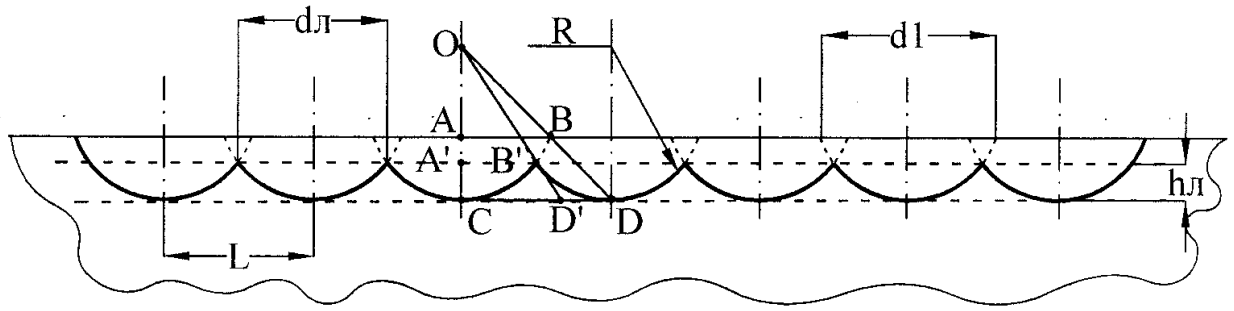


Рис. 1.6 – Розрахункова схема для визначення параметрів шорсткості [55]

При побудові даної розрахункової схеми автор під коефіцієнтом перекриття лунок розуміє відношення діаметра лунки до відстані між центрами:

$$\beta = \frac{d_n}{L} \quad (1.18)$$

З геометричних побудов (рис. 1.6) і враховуючи зроблені допущення, а так само знаючи, що відношення діаметра одиначної лунки до відстані між центрами сусідніх лунок це коефіцієнт перекриття  $\beta$  (1.23) одержимо залежність, що зв'язує радіус похідної сфери й глибину лунки:

$$R = \frac{2 \cdot \beta}{2 \cdot \beta - 1} \cdot h_n \quad (1.19)$$

Підставляючи (1.22) в (1.24) і виражаючи з отриманої залежності глибину лунки:

$$h_n = \sqrt[3]{\frac{(2 \cdot \beta - 1) \cdot V}{(4 \cdot \beta + 1)}} \quad (1.20)$$

Підставляючи в (1.25) залежність для розрахунків розплавленого обсягу металу (1.21) з урахуванням зроблених допущень автором отримано залежність для розрахунків глибини лунки, а, отже, і параметрів  $R_{max}$  та  $R_z$  [57-60].

$$R_z = R_{max} = h_n = \sqrt[3]{\frac{(2 \cdot \beta - 1) \cdot U \cdot I \cdot \tau_i \cdot \eta_i}{(4 \cdot \beta + 1) \cdot c_d \cdot \rho_d \cdot T_{nl}}} \quad (1.21)$$

Також з геометричних побудов автором встановлено залежності

параметра шорсткості  $R_p$  та  $R_a$  від  $R_z$ :

$$R_p = (1 - \alpha) \cdot h_d = 0,671 \cdot R_z, \quad (1.22)$$

$$R_a = 0,398 \cdot R_z. \quad (1.23)$$

Середній крок нерівностей профілю через зроблені допущення визначається діаметром утвореної лунки. Приймаючи коефіцієнт перекриття лунок рівним його середньому значенню автором одержано розрахункову залежність для визначення середнього кроку нерівностей профілю [57, 58,61]:

$$S_m = 4,5 \cdot R_z. \quad (1.24)$$

Залежність для розрахунків відносної опорної довжини профілю для розглянутого випадку може бути записана у вигляді:

$$l_p = 1 - \sqrt{1 - \varepsilon}, \quad (1.25)$$

де  $\varepsilon = p/100$ ,  $p$  – рівень фактор, %.

Слід зазначити, що автор цієї моделі підмінює класичне поняття «коефіцієнт перекриття лунок», вважає, що лунка має сферичну форму (для генераторів технологічного струму, розроблених в 1980-х - 1990-х роках, це близько до істини), не враховує вплив (буртик) утворений розплавленим матеріалом на краях лунки. Все це дає можливість стверджувати, що отримані автором залежності викликають сумніви по відношенню до поверхонь, утворених при обробці на верстатах з сучасними генераторами технологічного струму.

Проаналізовані моделі формування поверхневого шару розраховані для режимів з тривалістю імпульсів від 1 до 10 мкс, максимальним значенням робочого струму від 30 до 60 А і частотою від 22 до 100 кГц. Сучасна елементна база дозволяє отримувати імпульси тривалістю від 0,05 мкс, максимальним струмом до 1000 А. За таких умов на поверхні деталі виникають лунки, форма яких не відповідає шаровому сегменту, а відтак і розрахунки шорсткості поверхні та глибини зміненого шару не є коректними.

В роботах [14; 65] запропоновано математичну модель для оцінки ерозійного руйнування електродів при різному значенні енергії розряду. Для розрахунків застосовувалася відома з математичної фізики так звана задача Стефана про сполучення двох температурних полів за особливої умови на рухомій границі розділу. Було використано окремий випадок розв'язання плоскої (одновимірної) задачі для напівобмеженого тіла. Правомірність використання обраного варіанта задачі Стефана автори обумовили рядом припущень:

1. Радіус лунки  $r_l$  в 10 – 15 разів більше глибини  $h_l$ , тому при визначенні переміщення точки границі проплаву, що знаходиться проти центра джерела тепла, можна вважати  $r_l = \infty$ , знехтувати радіальним розсіювання тепла та вирішувати плоску (одновимірну) задачу.
2. Дія джерела тепла, утвореного розрядом, проявляється тільки в плавленні металу, випар не відіграє суттєвої ролі.
3. Процеси плавлення та видалення металу з лунки повністю розділені в часі, тобто при русі границі розплаву весь матеріал залишається в лунці.
4. Теплофізичні константи металів у твердій та рідкій фазах не залежать від температури матеріалу фази.
5. При визначенні об'єму ерозійної лунки її форму вважали близькою до кульового сегмента.

Використана задача Стефана описується системою двох рівнянь теплопровідності, що відносяться відповідно до рідкої (індекс 1) та твердої (індекс 2) фаз.

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}; \quad 0 \leq x \leq \eta; \quad (1.26)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}; \quad \eta \leq x \leq \infty,$$



де  $\eta$  – поточна координата рухомої границі плавлення;  $a$  – коефіцієнт теплопровідності.

При цьому для системи рівнянь (1.26) початкові та граничні умови формуються в такому вигляді:

$$\begin{cases} T_1(0,t) = T_{kun}; \\ T_1(\eta,t) = T_{nl} = T_2(\eta,t); \\ T_2(x,0) = T_0; \\ T_2(\infty,t) = T_0; \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} - \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = \rho q_{nl} \frac{\partial \eta}{\partial t}. \end{cases} \quad (1.27)$$

Розв'язок, що задовольняє початкові та граничні умови, має вигляд:

$$T_1(x,t) = T_{kun} - \frac{(T_{kun} - T_{nl}) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_1 \cdot t}}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{\alpha}{2\sqrt{a_1 \cdot t}}\right)}; \quad (1.28)$$

$$T_2(x,t) = T_0 + \frac{(T_{nl} - T_0) \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_2 t}}\right)\right)}{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\alpha}{2\sqrt{a_2}}\right)}. \quad (1.29)$$

Початкові та граничні умови виконуються, якщо:

$$\eta = \alpha \sqrt{t}, \quad (1.30)$$

причому значення  $\alpha$  – отримують з підстановки рішення (1.28) в граничні умови (1.27).

Автором було розглянуто діапазон тривалостей імпульсів від 1.5 до 7 мкс, що не характерно для сучасних генераторів технологічного струму.

Таким чином, розглянуті моделі формоутворення поверхні при електроерозійній обробці розроблені і дають добрі результати для імпульсів,

що характерні генераторам технологічного струму, розроблених у 1980-х роках, в кожній моделі приймаються певні припущення щодо характеру руйнування, форми одиначної лунки та певного діапазону зміни технологічних параметрів. Отже, задачі математичного моделювання теплових процесів для імпульсів, характерних сучасним генераторам технологічного струму, формування електроерозійної поверхні лунками, форма яких не є сферичною залишаються на сьогодні нерозв'язаними і потребують вирішення.

### 1.3 Оцінка впливу коливань ДЕІ на процес та результати електроерозійного дротяного вирізання

В умовах електроерозійного дротяного вирізання на дротяний електрод-інструмент діють сили різного фізичного походження, які спричиняють його коливання. До основних із них відносять [62]:

- електростатичні сили;
- електродинамічні сили;
- відтискаючі сили, що виникають внаслідок тиску в каналі розряду;
- магнітний тиск, що впливає на характеристики каналу розряду.

**Електростатичні сили** виникають внаслідок наявності ємності між електродами. Для оцінки лінійної густини електростатичних сил, що діють на дротяний електрод, використовують рівняння [62]

$$F_{el} \approx \frac{C_{мен} \cdot U^2}{2a} = \frac{\pi \varepsilon_c}{2a^2} r_{dp} U^2, \quad (1.31)$$

де  $C_{мен}$  – лінійна ємність міжелектродного проміжку;  $U$  – миттєве значення напруги між електродами;  $a$  – величина міжелектродного проміжку;  $\varepsilon_c$  – діелектрична проникність робочої рідини;  $r_{dp}$  – радіус ДЕІ.

Електростатична сила може змінюватись в широких межах процесу обробки і найбільшого значення набуває при холостому ході, коли напруга максимальна.

За умов, характерних для електроерозійного дротяного вирізання, максимальне значення лінійної щільності електростатичних сил притягання не перевищує  $6 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}$ .

**Електродинамічні сили** виникають внаслідок взаємодії струмів в ДЕІ та в заготовці.

Враховуючи технологічні та конструктивні особливості схеми електроерозійного дротяного вирізання, можна припустити, що електродинамічні сили не складають суттєвого впливу на положення ДЕІ, оскільки струм в заготовці спрямований по нормалі до торцевої поверхні різку. Електродинамічна сила впродовж одного розряду визначається за залежністю [66]:

$$F_{\text{дин}} \approx \frac{\mu \cdot i^2}{4\pi r_{\text{к.р.}}^2}, \quad (1.32)$$

де  $\mu = 16,56 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – магнітна проникність робочої рідини (вода);  
 $i = 45 \text{ А}$  – струм розряду;  $r_{\text{к.р.}} = 0,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$  – радіус каналу розряду.

Електродинамічні сили змінюються від нуля до свого максимального значення і діють тільки впродовж розряду.

При типових умовах обробки значення електродинамічних сил не перевищує  $2,02 \cdot 10^{-4} \text{ Н}$ .

**Відтискаючі сили**, що створюються тиском в каналі розряду, діють на дротяний електрод як впродовж робочого розряду, так і після його припинення (рис. 1.7).

На розширення каналу розряду витрачається певна частина потужності, що виділяється в міжелектродному проміжку (МЕП). Відразу після пробою, робоча рідина нерухома, внаслідок своєї інерційності, тому, на першій стадії, канал розряду розширюється лише за рахунок стискування робочого середовища. При цьому, в рідині радіально розходиться ударна хвиля. На

поверхні ущільнення (фронті ударної хвилі) тиск середовища стрибкоподібно змінюється від вихідного в рідині  $P_p$  до максимального значення на фронті  $P_\phi$ . На даній стадії розширення каналу, його межі рухаються разом із фронтом ударної хвилі.

При енергії розряду 2 – 10 мДж, тиск в каналі розряду, за оцінками різних дослідників [63, 64], становить  $10^7 - 10^8$  Па. На другій стадії відбувається бурхливе розширення каналу розряду, фронт ударної хвилі відділяється від каналу і розпочинається гідродинамічне виштовхування робочої рідини з проміжку. По мірі розширення каналу, тиск у ньому різко спадає, зростає електропровідність і струм. При досягненні струмом максимального значення радіус каналу практично стабілізується.

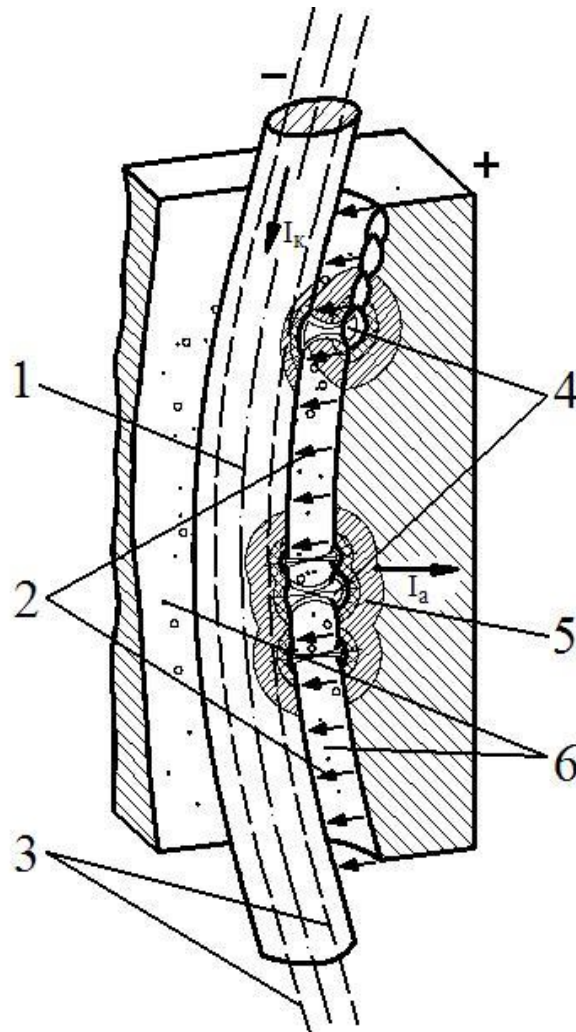


Рис. 1.7 – Схема силового впливу на дротяний електрод фізичних процесів в міжелектродному проміжку:

1 – вісь вигнутого дротяного електроду; 2 – еюра розподіленого навантаження, що діє на дротяний електрод, внаслідок суперпозиції сил, викликаних тиском в каналах робочих розрядів; 3 – межі відхилення вісі дротяного електроду в процесі коливань; 4 – точки пробою МЕР та утворення і розвитку каналу розряду; 5 – зона термічного впливу розрядів на ділянках їх концентрації; 6 – робоча рідина.

Для найбільш типового режиму електроерозійної обробки значення відтискаючого зусилля від дії одиничного розряду становить 35 Н.

Крім тиску середовища, необхідно взяти до уваги магнітний тиск, що виникає внаслідок відомого пінч-ефекту. Вплив пінч-ефекту призводить до примусового звуження каналу розряду, внаслідок чого зростає тиск в каналі.

Величина магнітного тиску, для типових умов обробки, параметри яких наведено вище, становить приблизно  $4,04 \cdot 10^{-4}$  Н.

Таким чином, основним фактором, що призводить до виникнення коливань дротяного електроду в процесі ЕЕДВ, є силова дія тиску в каналі розряду. Даний силовий вплив є комплексною величиною, що визначається рядом фізико-технологічних показників умов обробки:

- значення струму розряду та енергії, що виділяється в проміжку;
- стан робочого середовища (в'язкість рідини, наявність в ній газових бульбашок, продуктів ерозії тощо);
- форма імпульсів струму;
- конфігурація та величина міжелектродного проміжку.

З огляду на складний комплексний характер факторів, що обумовлюють коливання дроту, аналітичний опис даного процесу виконувався попередніми дослідниками [62-69] з певними спрощеннями, які не дозволяють говорити про повну відповідність аналітичних моделей реальним умовам обробки.

В літературі практично відсутні дані про експериментальні дослідження силового впливу робочих розрядів на дротяний електрод-інструмент.

Проведення досліджень коливань ДЕІ безпосередньо в умовах обробки ускладнене, внаслідок незначних розмірів каналу розряду і самого міжелектродного проміжку, а також великої швидкості протікання процесу.

В роботі Є.В. Хижняка [70] проведено аналіз впливу параметрів коливань дротяного електрода на шорсткість поверхні. Для аналізу було обрано три типових режими генератора технологічного струму ГКІ 300-200А.

Крім того, показано, що спектр коливань дротяного електрода може бути показником стабільності процесу електроерозійного різання.

Коливання дротяного електрода під час обробки зміщують вісь ДЕІ від лінії різання. При цьому миттєве зміщення призводить до зміни величини міжелектродного проміжку, а інтегральне – до похибок форми деталі.

Періодична зміна величини МЕР, в процесі коливань дротяного електрода, призводить до нерівномірного зйому металу заготовки і спотворення форми оброблюваного контуру.

В роботі [71] В.І. Осипенко, отримані закономірності впливу величини МЕР на розподіл енергії розряду між електродами і, відповідно, на ефект ерозії. Встановлено, що для всіх ЕР існує вузька (2 – 4 мкм) зона оптимальних величин МЕР, при яких за незмінних параметрів режиму роботи генератора спостерігається максимальна ерозійна руйнація анода (рис. 1.8). Зазначено, що вплив МЕР може бути настільки суттєвим, що при зміні величини МЕР від максимального до мінімального значення, ерозія анода змінюється в 1,5 – 2,5 рази.

Встановлено, що відхилення величини МЕР в процесі ЕЕДВ від її постійного значення викликано рядом факторів:

1) забруднення МЕР продуктами ерозії, що викидаються з лунки у вигляді розплаву, та утворення газопарових бульбашок внаслідок випаровування та піролізу робочої рідини навколо каналу розряду та лунок;

2) люфт дротяного електрода в напрямних, викликаний неточністю їх виготовлення та подальшим зносом контактної поверхні в процесі експлуатації;

3) прогин дроту під дією розподіленого навантаження в зоні обробки через низьку жорсткість дроту;

4) коливання ДЕІ, що виникають внаслідок відтискаючого силового впливу робочих розрядів.

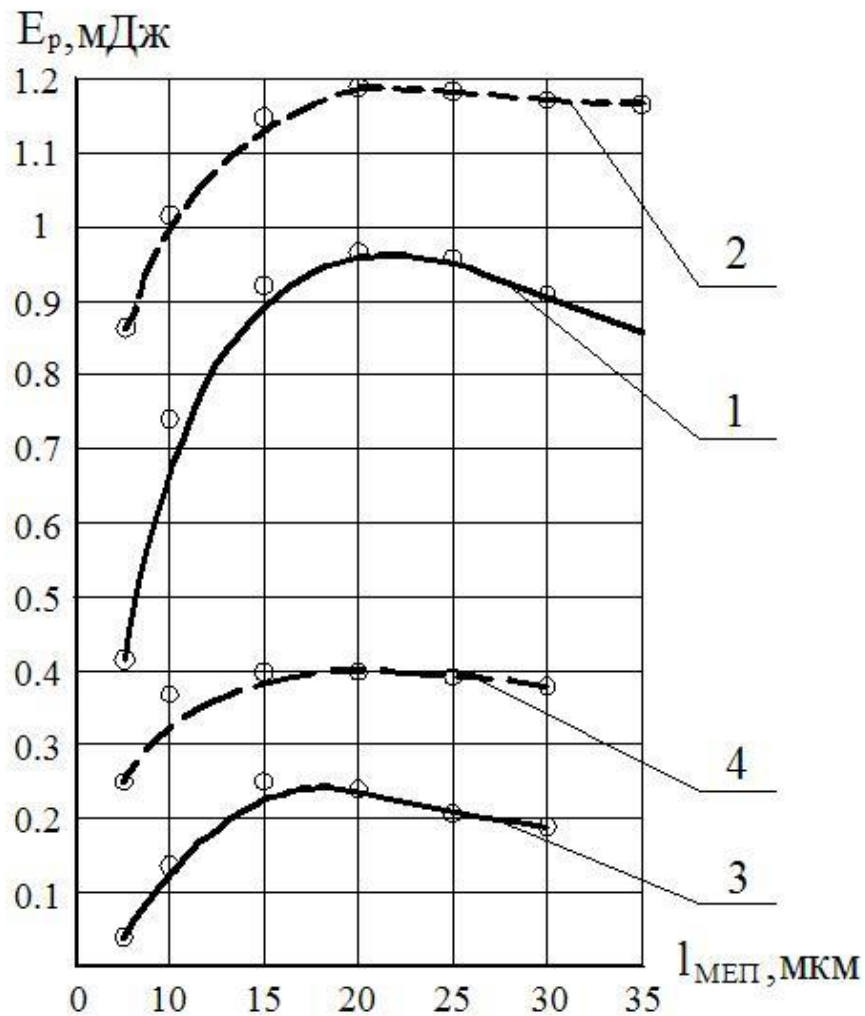


Рис. 1.8 – Залежність енергій розряду, витрачених на руйнування аноду (1–3), катоду (2–4), та величини МЕР при дії одиничних розрядів.

Анод – Сталь 45, Катод – латунь Л63:

1, 2 –  $E_i = 10,5$  мДж,  $t_i = 3,2$  мкс; 3, 4 –  $E_i = 4,3$  мДж,  $t_i = 3,2$  мкс

В процесі ЕЕДВ величина МЕР постійно змінюється внаслідок коливань ДЕІ.

Перші три з наведених факторів достатньо вивчені [72,73], розроблені відповідні методики та рекомендації щодо мінімізації їх впливу на процес

обробки. При цьому, в світовій науково-технічній літературі, вкрай обмежені дослідження, як самих коливань ДЕІ, так і їх впливу на процес ЕЕДВ та безпосередньо на результат обробки.

Розглянемо можливі види відхилень форми поверхні деталі внаслідок впливу коливань ДЕІ на процес ЕЕДВ.

В результаті поперечної складової коливань ДЕІ, поверхня оброблюваної деталі набуває хвилястої форми (рис. 1.9).

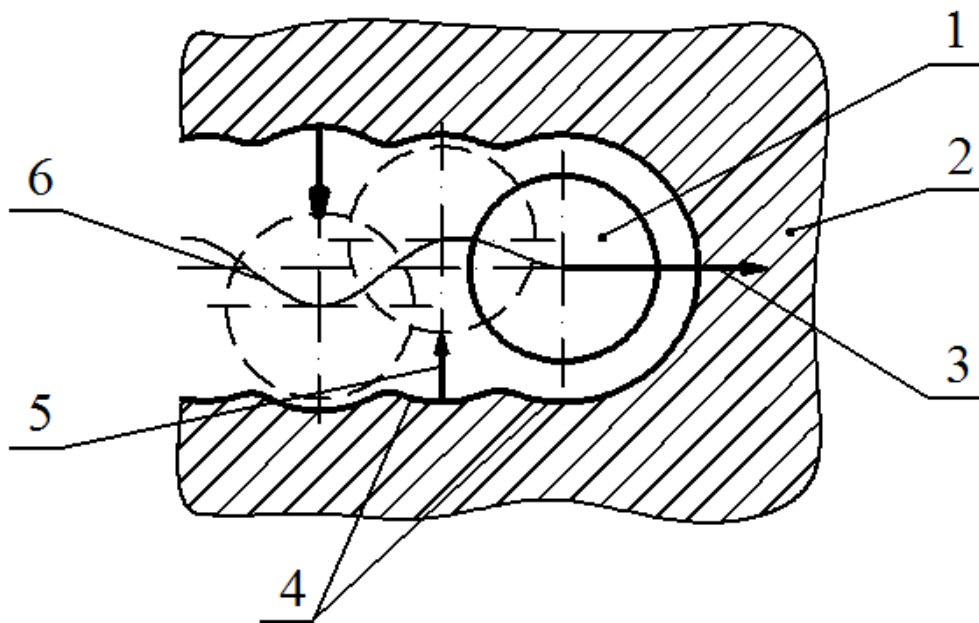


Рис. 1.9 – Схема утворення хвилястості на поверхні деталі при електроерозійному вирізанні:

1 – дротяний електрод-інструмент; 2 – оброблювана деталь; 3 – напрямок подачі дротяного електроду; 4 – спотворення форми оброблюваної поверхні; 5 – поперечна складова силового впливу робочих розрядів; 6 – реальна траєкторія руху вісі дротяного електроду в перерізі.

При збільшенні амплітуди коливань відповідно збільшується величина виступів макрорельєфу оброблюваної поверхні. При збільшенні частоти коливань величина виступів зменшується завдяки більш рівномірному розподілу впливу робочих розрядів на поверхню оброблюваної деталі.



Вказаний дефект форми суттєво впливає на експлуатаційні характеристики відповідальних деталей, до яких висуваються високі вимоги щодо якості та точності робочої поверхні (матриці, пуансони).

Таким чином, коливання ДЕІ справляють безпосередній вплив на формування мікро- та макрогеометрії оброблюваної поверхні, умови за яких виникає пробій та баланс енергії одиничного іскрового розряду.

#### **1.4 Особливості формування структури поверхневих шарів сталей при електроерозійній дротяній обробці**

Характер і швидкості фізико-хімічних процесів на електродах визначаються енергією імпульсу електричного розряду  $E_i$ , що виділяється за досить короткий проміжок часу в міжелектродному просторі. У результаті видалення металу з оброблюваної деталі супроводжується *піролізом робочої рідини*, зміною структури і властивостей поверхневого шару, іншими фізичними явищами.

На поверхні деталі часто спостерігається утворення зон з елементами матеріалу електрода-інструмента в результаті переносу парів його матеріалу. Як правило вона утворюється при підключенні ДЕІ до негативного полюса джерела живлення. Матеріал ДЕІ не тільки концентрується на поверхні заготовки, але й може дифундувати в більш глибокі шари. Утворення зони проникнення матеріалу ДЕІ в оброблюваний матеріал суттєво впливає на властивості поверхневого шару, а отже, на експлуатаційні властивості виготовлених деталей.

Для електроерозійного дротяного вирізання характерними є тривалості імпульсів до 1 мкс і густина струму  $10^7$ - $10^9$  Вт/м<sup>2</sup>. При таких режимах структури, що утворюються в поверхневих шарах деталі близькі до структур, що утворюються при лазерній обробці матеріалів та іншими концентрованими потоками енергії.

В поверхневих шарах деталі досить часто спостерігається структурно змінений шар. Його товщина залежить від величини  $q$ , а також від

температуропровідності матеріалу заготовки. При обробці сталей на м'яких режимах (прошивна обробка) (при  $Ei < 0,1$  Дж  $\tau < 1000$  мкс) «білий шар» розташовується на поверхні заготовки окремими ділянками товщиною до 40 мкм і довжиною до 250 - 260 мкм. На грубих режимах цей шар суцільно покриває оброблювану поверхню, максимальна товщина шару становить 165 до 310 мкм.

На м'яких режимах обробки вуглецевих сталей зона термічного впливу має малі розміри, що викликане близькими по величині швидкостями охолодження всіх ділянок розглянутої зони.

В зоні дії електричних розрядів відбувається зміна структури та властивостей поверхні, викликане швидким розплавленням, кристалізацією й швидкісним загартуванням мікрообсягів матеріалу. На окремих зразках можна розглядити зони стовпчастих кристалів, рельєф від дендритних кристалітів і усадочні поглиблення.

У поперечному перерізі зразків на поверхні спостерігаються "білі" зони й зони з перехідними структурами неповного загартування.

Утворення залишкових напружень у поверхневих шарах деталей після електроерозійної обробки, можна пояснити високими швидкостями нагрівання й охолодження, значними структурними змінами металу. Поширення тепла в тіло заготовки під час імпульсу струму і відвід теплоти в тіло заготовки після закінчення імпульсу відбувається симетрично відносно осі, що проходить через центр одиничної лунки. У зв'язку із цим нормальні напруження будуть постійно стискаючими, а дотичні - рівні між собою і можуть бути як стискаючі, так і розтягуючі. Протягом дії імпульсу хвиля розтягуючих теплових напружень іде перед стискаючими напруженнями вглиб поверхневого шару. Очевидно, що за певних умов це може привести до утворення сітки мікротріщин усередині поверхневого шару без виходу їх на поверхню оброблюваної заготовки. З боку поверхні вони можуть бути закриті зоною розплавленого металу заготовки.

Після закінчення дії імпульсу відбувається охолодження поверхні одиничної лунки, хвиля стискаючих теплових напружень йде поперед

розтягуючих вглиб поверхневого шару. Крім того, у процесі нагрівання та охолодження оброблюваної поверхні утворюються структурні напруження, викликані істотною зміною структури поверхневого шару. Ці напруження в комбінації з тепловими, компенсуючи або підсилюючи один одного, утворюють залишкові внутрішні напруження. Таким чином, в остаточному підсумку величина залишкових внутрішніх напружень визначається режимом обробки, матеріалом заготовки, властивостями робочої рідини й умовами обробки. Експериментальні дані [74] свідчать, що визначальний вплив на величину напружень має тривалість імпульсу, меншою мірою енергія імпульсу. Величина залишкових напружень, при певних режимах обробки, може перевищити межу міцності матеріалу та привести до утворення сітки мікротріщин.

Структура, названа "*білим шаром*", має аномально високу твердість, що перевищує твердість мартенситу (11-13 ГПа), відрізняється високою міцністю та підвищеним опором руйнуванню при стиску. Шар має високу корозійну стійкість, втомну міцність і зносостійкість при сухому терті або в абразивних середовищах.

Уявлення про структуру «білого шару» досить суперечливі - безструктурний (гарденіт) або дрібноголковий мартенсит, аустенітно-мартенситна структура, карбіди й т.п. Різноманітність структурних станів його шару пов'язана зі складністю й специфікою протікання процесів його формування. Високі швидкості пластичної деформації, деформування мікрообсягів, як у холодному, так і в гарячому стані, швидкості нагрівання й охолодження набагато вище критичних для мартенситного перетворення, баро- і термоциклювання і т.д. сприяють формуванню незвичайних властивостей поверхні.

Підведення енергії від теплового джерела в задану точку поверхні відбувається при послідовному нагріванні сусідніх точок, відносному переміщенні теплового пучка та заготовки. Швидкісне охолодження нагрітого шару відбувається кондуктивним тепловідводом у внутрішні шари заготовки. Теплофізика концентрованих потоків енергії має багато загального для різних

технологій, тому що при щільності теплової потужності  $10^7 \text{Вт/см}^2$  відбувається оплавлення, випаровування або сублимація матеріалу з поверхні заготовки

В (табл. 1.3) узагальнені дані по впливу вмісту вуглецю в нелегованих сталях на твердість обробленої зони безпосередньо після загартування розплаву та наступного відпуску. При оплавленні сталей, що містять менш 0,4% С, підвищення твердості не може відбутися. Це пов'язане зі збереженням у структурі поверхні  $\delta$ -фериту. Однак у технічного заліза (0,04% С), за даними просвічувальної електронної мікроскопії, тонка структура зони розплавлювання являє собою рейковий мартенсит з кубічними ґратками та розміром рейок мартенситу 0,4-0,6 мкм. Наявність мартенситної структури показує, що  $\delta \rightarrow \gamma$ -перетворення не було подавлено, тому низькі значення мікротвердості низьковуглецевих сталей можна зв'язати просто з малим вмістом вуглецю.

В інтервалі концентрацій вуглецю 0,4 - 0,9% мікротвердість зростає, мікроструктура при цьому складається з мартенситу й залишкового аустеніту. Подальше підвищення концентрації вуглецю приводить до зниження мартенситної точки, збільшення об'ємної частки залишкового аустеніту, що й обумовлює падіння твердості в інтервалі 0,8-1,5% С.

Таблиця 1.3

**Вплив вмісту вуглецю на структуру та твердість поверхневих шарів  
нелегованих сталей**

Вміст С, %	Тип первинної структури	Отримана мікроструктура	Твердість, НВ, Мпа	
			після обробки	після відпуску
0,1	$\delta$ -ферит	$\delta$ -ферит		
0,1-0,4	$\delta$ -ферит, великі стовбчасті кристали із дендритною структурою	$\delta$ -ферит, бейніт, мартенсит	2000-4000	2000-9000
0,4-0,9	великі кристали $\gamma$ -фази з дендритною сегрегацією	мартенсит, залишковий аустеніт	4000-7000	9000-10000
0,9-1,4	великі кристали $\gamma$ -фази	залишковий аустеніт, мартенсит	5000-6000	9000

Поверхні вуглецевих сталей з вмістом вуглецю 0,4-1,0%, що оброблялись електронно-променевим методом з розплавленням при швидкостях переміщення променя по поверхні до 2600 см/с (обробка "глазуванням") мали шари із мікротвердістю 11000 МПа, структура яких *не виявлялася*.

У сталі У10А після імпульсного лазерного розплавлення (4-6 мс) мікротвердість зони розплавлення склала  $\approx 8200$  МПа, причому спостерігалось приблизно лінійне зниження кількості залишкового аустеніту від 30% на поверхні до 10-12% на глибині 60 мкм. При цьому лінійно знижувався і період грат аустеніту, пропорційний концентрації вуглецю. Величина періоду гратки залишкового аустеніту на опроміненій поверхні відповідала вмісту вуглецю 1,3-1,4%, що перевищує його середній вміст у сталі. Це пояснюється науглецюванням з поглинаючої графітної обмазки. Після стандартного загартування цієї сталі кількість залишкового аустеніту склала  $\sim 10\%$ . Методом просвітлюваної електронної мікроскопії встановлено, що двійчаста морфологія мартенситу в зоні лазерного розплавлення якісно подібна такій при стандартному загартуванні високовуглецевих сталей - двійники мали ширину  $30-50\text{Å}$ , площа двійникування (211)<sub>a</sub>.

***Властивості поверхневих шарів металів і сплавів після обробки концентрованими потоками енергії.***

Промислове використання лазерної та електроерозійної обробки металів і сплавів неможливе без оцінки рівня властивостей, які досягаються при такій обробці. Першочерговий інтерес представляють опір зношування та корозії, втомна міцність. Цікавим для машинобудування результатом поверхневої променевої термообробки є підвищення опору зовнішнім впливам, яке складним чином залежить від численних параметрів обробки, складу оброблюваного сплаву, його вихідної структури, подальшої термічної обробки. Приведемо найбільш характерні результати дослідження властивостей після обробки матеріалів висококонцентрованими енергетичними пучками, що ілюструють найбільш важливі і загальні

тенденції.

Обробка концентрованими потоками енергії може бути без розплавлювання поверхні та з розплавлюванням. У першому випадку переваги обробки зв'язані, головним чином, не з металургійними, а з технологічними і економічними факторами: мінімальним викривленням геометрії поверхні, локальним зміцненням ділянок деталі (у тому числі важкодоступних), включенням операції термообробки в технологічну лінію механічної обробки та (або) складання, автоматизацією процесу, зниженням забруднення навколишнього середовища, поліпшення умов праці, тощо.

Перевагою обробки поверхні з розплавлюванням є збільшення числа циклів до руйнування в 10-20 разів. Ефект зміцнення зберігається і після відпуску при 500° С, 2 год.

Рентгенографічний аналіз залишкових напружень у зоні імпульсного лазерного загартування сталей 45 і У8 (метод  $\sin^2\psi$ ) показав, що в центрі одиничної плями лазерного загартування існують залишкові напруження стискання з амплітудою 800-1000 МПа, а по краях напруження розтягу.

Відомі дослідження [75] розподілу мікротвердості в поверхневих шарах сталі EN X210Cr12 при електроерозійному дротяному вирізання. Проведений аналіз для чорнового та фінішного режимів обробки на електроерозійному комплексі AGIECUT 270HSS.

Авторами проведено ряд дослідів. Аналіз поперечного шліфу показав наявність трьох зон (рис. 1.10). Перша зона – ерозійна поверхня, на якій крім матеріалу деталі присутня латунь та її похідні перенесені з дротяного електроду. Друга зона – зона термічного впливу, яка в свою чергу складається з «відбіленого» шару та проміжного шару. Третя зона – зона основного матеріалу. Авторами проаналізовано температурні режими, за яких можливе утворення «відбіленого» шару. Показано, що температура матеріалу в процесі обробки складала 940-960°С.

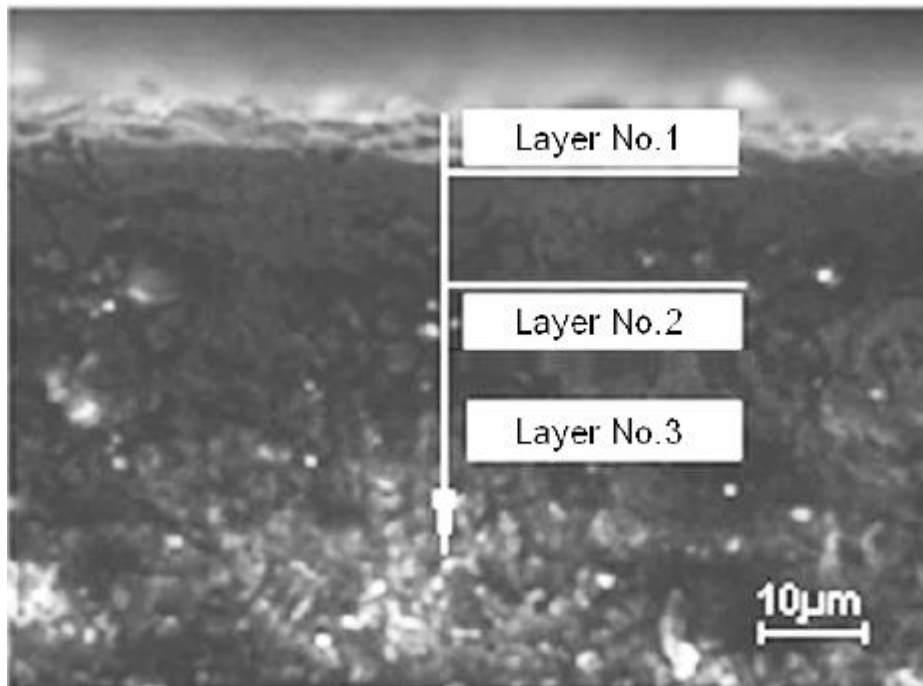


Рис. 1.10 – Структура поверхневого шару сталі після електроерозійної обробки

## 1.5 Концепція, технічні та технологічні основи керування формуванням параметрів поверхневих шарів сталей

### 1.5.1 Багатопрхідне електроерозійне дротяне вирізання

Зв'язок шорсткості поверхні після ЕЕДВ з енергією імпульсів, що використовуються при різанні (див. формулу 1.3), означає, що для зменшення шорсткості необхідно використовувати менш потужні імпульси для обробки. Крім того, зменшення енергії імпульсів зменшує силовий вплив на електрод-інструмент, що підвищує точність ЕЕДВ. Тому для отримання високоточних деталей з низькою шорсткістю поверхні використовується багатопрхідна обробка [76, 77], при якій енергія імпульсів для кожного наступного проходу зменшується. Відповідно до зменшення енергії робочих імпульсів на кожному наступному проході, як наслідок, зменшується шорсткість поверхні та товщина зміненого шару. Для досягнення кінцевої шорсткості на рівні  $Ra=0,04$  мкм проводиться 10-16 проходів.

Така методика набула широкого використання в теперішній час і використовується провідними виробниками електроерозійного обладнання.

Згідно [78] зв'язок між шорсткістю та тривалістю імпульсу має вигляд, приведений на (рис. 1.1). З (рис. 1.11) видно, що досягнення низької шорсткості вимагає використання імпульсів тривалістю до одиниць мікросекунд та імпульсів наносекундного діапазону.

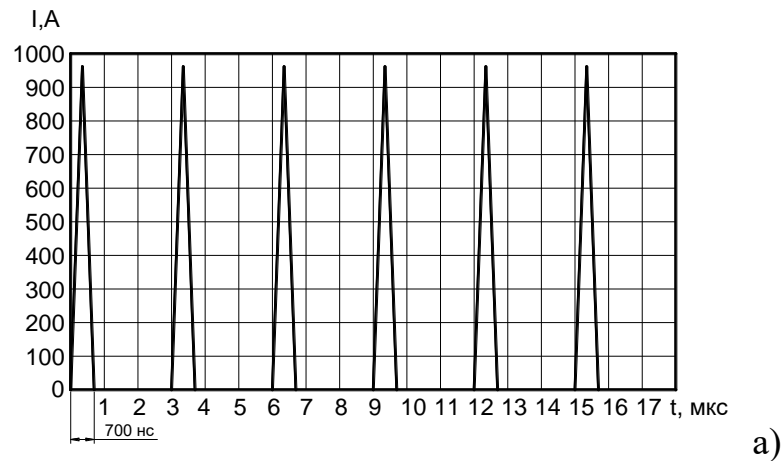
Згідно з [79], режими високопродуктивного вирізання ( $100 - 200 \text{ мм}^2/\text{хв}$ ) забезпечують шорсткість  $R_a = 2,2 \dots 4,2 \text{ мкм}$ . Ці режими відповідно до отриманих номограм реалізуються розрядами, що мають тривалість одиниці-частки мікросекунд і амплітуди струму  $100 - 400 \text{ А}$ .

За даними [80] фірма Sodick реалізувала революційну систему електроерозійного різання – систему Super BS. Дана система на першому проході генерує імпульси з тривалістю всього  $700 \text{ нс}$  при піковому струмі більше  $950 \text{ А}$  (рис. 1.11 а). На 2-му проході генеруються імпульси тривалістю до  $100 \text{ нс}$  при струмі  $90 \text{ А}$ . Такі короткі, але потужні імпульси забезпечують отримання поверхні з шорсткістю  $R_a = 0,17 \text{ мкм}$  вже на 2-му проході. Починаючи з 3-го проходу використовуються схеми коротких повністю біполярних імпульсів струму (рис. 1.11). При цьому досягається на 4-му проході  $R_a 0,08 \text{ мкм}$ .

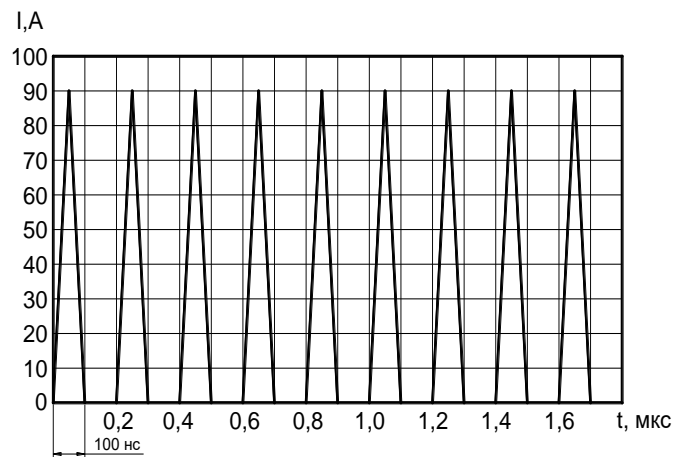
Така якість досягається за рахунок відсутності електролітичної ерозії, відомої також, як анодне окислення.

Перевагою системи Super BS є висока продуктивність процесу та висока якість поверхні, відсутність корозійних ушкоджень. Однак використання спеціального генератора зі складною системою керування суттєво збільшує вартість обладнання і, як наслідок, собівартість обробки.

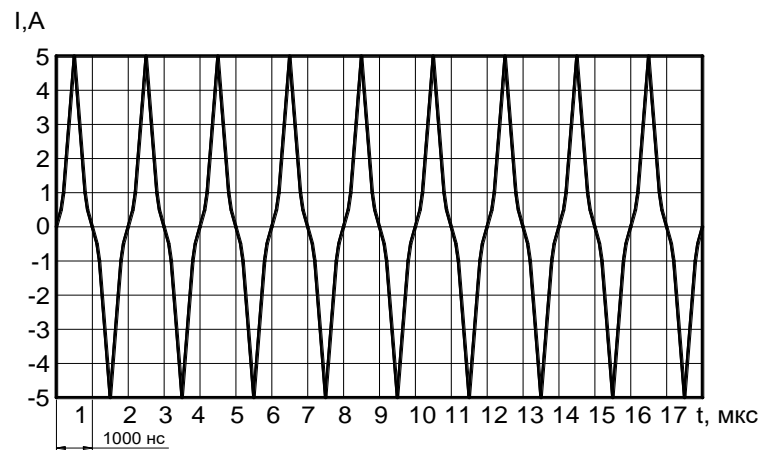




а)



б)



в)

Рис. 1.11 – Форми імпульсів при ЕЕДВ із застосуванням системи Super

BS: а – 1-й прохід, б – 2-й прохід, в – 3-й прохід

Підсумовуючи можна констатувати, що:

- додаткові проходи забезпечуючи високу точність і якість обробленої поверхні суттєво збільшують час обробки, тому що вони в зв'язку з низькою жорсткістю дротяного електрода-інструмента фізично не можуть бути високопродуктивними;

- багатопрохідне електроерозійне дротяне вирізання принципово не дозволяє усунути наявність зони термічного впливу на поверхні деталі;
- надсучасні системи для багатопрохідної обробки є надзвичайно вартісними (Super BS та його аналоги).

### 1.5.2 Обробка із застосуванням водних розчинів поверхнево-активних речовин

В теперішній час поверхнево-активні речовини широко застосовують в різних галузях промисловості. Їх використання обумовлено рядом важливих властивостей. Адсорбція молекул ПАР на границі поділу фаз повітря-рідина та рідина-тверде тіло призводить до кількісної та якісної зміни процесів міжфазної взаємодії. Адсорбційні шари ПАР на твердій поверхні захищають метал від корозії, володіють гідрофобізуючими властивостями, сприяють очищенню поверхні від відкладень і т.д.

За хімічною природою всі ПАР поділяють на чотири класи:

1) амфолітні (АмПАР), які дисоціюють в водному розчині з утворенням сполук, що в залежності від характеру середовища володіють аніонно- та (або) катіонним характером;

2) аніоактивні (АПАР), які дисоціюють в водному розчині з утворенням негативно заряджених поверхнево-активних іонів;

3) катіоактивні (КПАР), які дисоціюють в водному розчині з утворенням позитивно заряджених поверхнево-активних іонів;

4) неіоногенні, які не утворюють іонів в водних розчинах.

Перші три класи відносяться до іоногенних ПАР.

ПАР виконують стабілізуючу, емульгуючу, змочувальну та миючу дію, покращуючи цим умови ЕЕДВ.

При наявності ПАР знижується поверхневий натяг розчину, тим самим покращується змочування матеріалу миючою рідиною (рідина проникає в капіляри забрудненої поверхні). Молекули ПАР, адсорбуючись на поверхні та

частках забруднень, створюють добре гідратований адсорбційний шар. Це сприяє відриву часток забруднень від поверхні та переходу їх в миючу рідину. Адсорбційні шари ПАР на поверхні часток забруднень надають їм високу агрегатну стійкість та перешкоджають їх повторному налипанню. При ЕЕДВ поверхня деталі, що піддається постійним циклам нагрівання-охолодження в місцях проходження розрядів покривається шаром окалини. Наявність плівок ПАР буде частково перешкоджати утворенню окалини та налипанню продуктів ерозії на поверхні ДЕІ та деталі. Це суттєво сприятиме підвищенню теплообміну із РР та зниженню гідродинамічного опору в МЕР.

При цьому покращується процес очищення поверхні при ЕЕДВ, чим досягається більш рівномірне розповсюдження розрядів вздовж електрода-інструмета та у напрямку його руху, що зменшує результуючу шорсткість поверхні та товщину модифікованого шару.

Введення ПАР в міжелектродне середовище супроводжується утворенням на поверхні електродів адсорбційних шарів з високою міцністю та в'язкістю. На гідрофільній поверхні електродів утворюється моношар з орієнтацією полярної групи до твердої фази, а вуглеводневим радикалом – до води. При зростанні концентрації ПАР в розчині (табл. 1.4) вище певного значення ( $c_1$ ) на цьому гідрофобному шарі утворюється другий шар, полярні групи якого орієнтовані до води, а неполярні – до першого шару. Максимальна товщина адсорбційного шару ПАР ( $\beta$ ) на поверхні електродів (рис. 1.13) спостерігається при концентрації ПАР ( $c_2$ ), за якої повністю встановлюється другий шар. Третій шар на гідрофільній поверхні не утворюється.

Таблиця 1.4

#### Характерні концентрації ПАР у водному розчині

Показник	АмПАР, %	АПАР, %	КПАР, %	Неіоногенні ПАР, %
$c_1$	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$47,6 \cdot 10^{-2}$
$c_2$	$5 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^{-2}$	$5,4 \cdot 10^{-2}$	$60,4 \cdot 10^{-2}$
Критична концентрація міцелоутворення	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$	$5,8 \cdot 10^{-2}$	$110 \cdot 10^{-2}$

Крім того у [5] виявлено, що при обробці сталі в середовищі водних розчинів поверхнево-активних речовин (ВР ПАР) спостерігається суттєве зменшення кількості викривлень дна лунки та розмірів, а також збільшення відношення діаметру до глибини лунки, що істотно впливає на шорсткість поверхні. Топографія поверхні була однорідною, з меншою кількістю напливів (рис. 1.12). В результаті цього шорсткість поверхні сталі зменшиться з  $Ra$  4,3 до  $Ra$  2,3-2,5, що дає можливість досягти необхідної шорсткості за меншу кількість технологічних проходів.

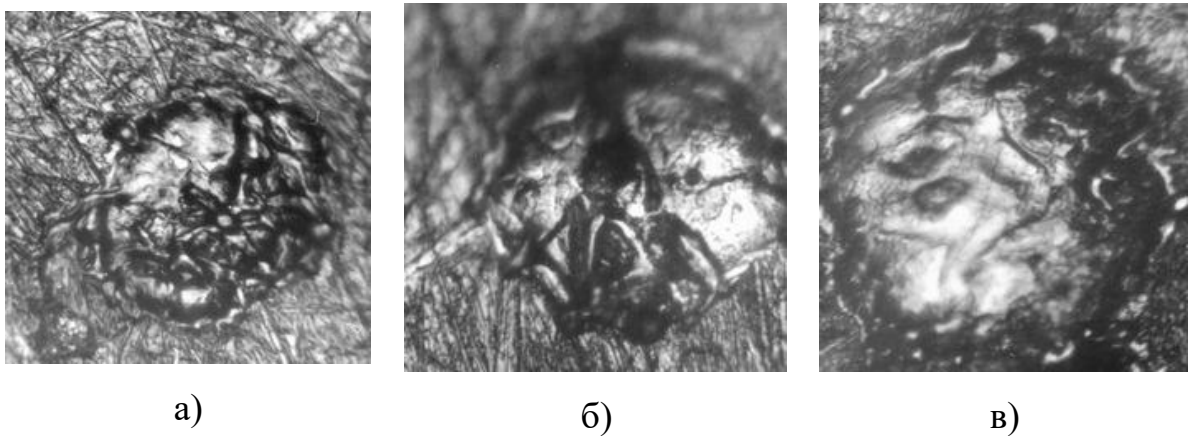
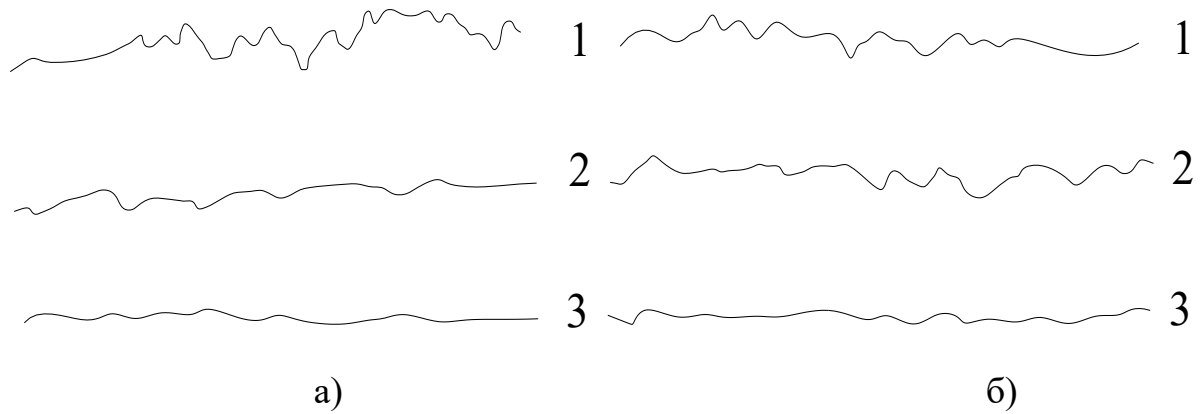


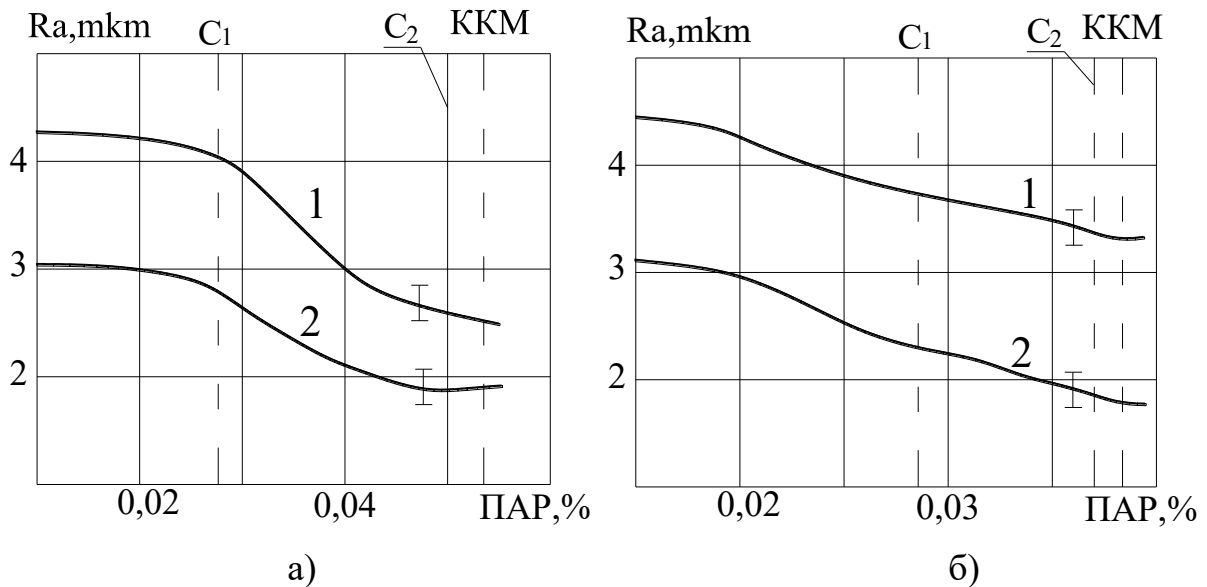
Рис. 1.12 – Фотознімки одиничних ерозійних лунок (x500)

Використання ПАР зменшує шорсткість поверхні, отриману при використанні однакових енергетичних режимів. На (рис. 1.13) показані профілограми поверхонь отриманих при однакових енергетичних параметрах, але з використанням води та водних розчинів ПАР різної концентрації. На (рис. 1.14) наведено залежності шорсткості поверхні від концентрації та виду ПАР.



а – ВР АмПАР, б – ВР АПАР;

Рис. 1.13 – Профілограми поверхонь сталі після обробки в водних розчинах ПАР: 1 – вода, 2 – водний розчин ПАР ( $c = c_2$ ), 3 – водний розчин ПАР ( $c =$  критичній концентрації міцелуутворення)



а – АмПАР, б – АПАР;

Рис. 1.14 – Залежність шорсткості поверхні від концентрації ПАР у водному розчині: 1 –  $E = 4$  мДж, 2 –  $E = 2$  мДж

Підсумовуючи можемо констатувати, що застосування в якості РР водних розчинів ПАР дозволяє на етапі чорнового ЕЕДВ зменшити шорсткість отриманих поверхонь в 1,5...1,7 рази, що зменшує кількість додаткових проходів (в окремих технологічних випадках взагалі усувається необхідність

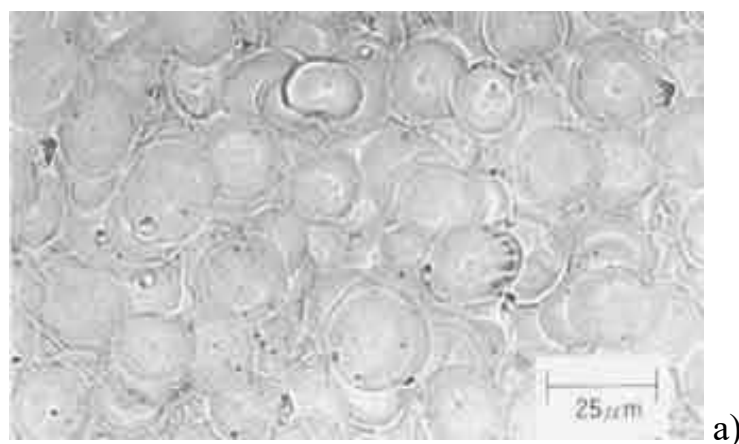
додаткового проходу). В цілому використання водних розчинів ПАР не дозволяє при багатопрохідній обробці скоротити загальних час більше, ніж на 10-15%.

### 1.5.3 Використання робочих рідин з порошковими присадками

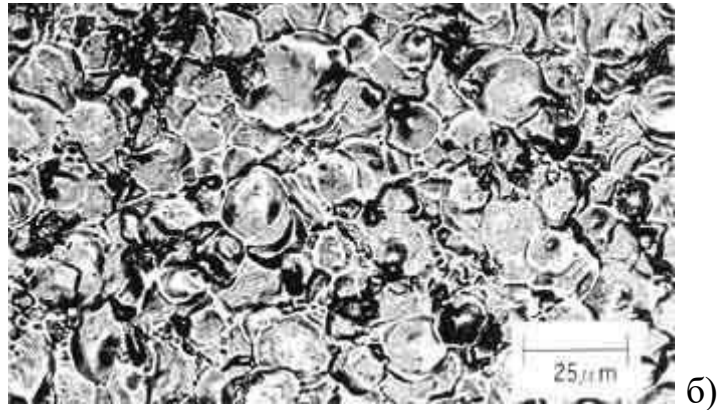
Одним із сучасних напрямків пошуку методів підвищення якості поверхні без втрати продуктивності є використання комбінованих методів обробки. Згідно [81] фірма Sodick розробила систему РІКА, що призначена для дзеркальної обробки на електроерозійних верстатах.

Чорнова обробка і фінішування до шорсткості  $Ra = 1,2 - 1,5$  мкм виконуються в маслі, а потім масло зливають. На місце, в пази днища стола ерозійного верстата ставлять огороження і в отриману ванну заливають спеціальним маслом VITOL-10 с 3%-ю порошковою присадкою РІКАGEN, що містить субмікронні металеві частинки.

Таким чином при подальшій обробці за допомогою спеціального генератора РІКА-1 відбувається комплексна дія на заготовку низькопотужних електроерозійних імпульсів та механічного впливу абразивних частинок на макрорівні під дією ударних хвиль розрядів (рис. 1.15).



a)



а – з використанням системи РІКА  $R_a$  0,08, б – в маслі VITOL-2  $R_a$  0,33

Рис. 1.15 Оброблена поверхня заготовки

Даний метод вимагає використання обладнання з високою вартістю, та має низьку продуктивність.

## 1.6 Висновки за розділом 1

1. Проведено детальний аналіз параметрів сучасних генераторів технологічного струму електроерозійних вирізних верстатів та механізми їх впливу на формування одиничної ерозійної лунки, продуктивність процесу різання та якість сформованих поверхонь.

2. Розглянуто відомі моделі формоутворення поверхні при електроерозійній обробці та особливості формування структури поверхневих шарів сталей за умов ЕЕДВ.

3. Проаналізовано переваги та недоліки технічних та технологічних методів керованого впливу на процеси формування мікрогеометричних та фізико-механічних властивостей поверхневих шарів сталей за умов ЕЕДВ

Аналіз літературних джерел показав, що за умов використання енергетичних параметрів сучасних генераторів технологічного струму, технологічні можливості керованого формування заданих властивостей поверхневих шарів сталевих деталей вичерпані далеко не повністю. Виходячи

з наведеного сформульовано мету, об'єкт, предмет і основні завдання дослідження.

**Мета і завдання дослідження.** Мета роботи: підвищення ефективності технологічного забезпечення прогнозування та керованого формування мікрогеометрії та фізико-механічних властивостей поверхневих шарів сталей при електроерозійній обробці дротяним електродом

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі вирішуються наступні завдання:

1. Провести аналіз сучасних підходів, технічних та технологічних засад керування формуванням параметрів поверхневих шарів сталей при електроерозійній обробці дротяним електродом

2. Підібрати та розробити комплекс методик, приладів та обладнання для проведення системних експериментальних досліджень мікрогеометрії та фізико-механічних властивостей поверхневих шарів сталей при електроерозійній обробці дротяним електродом

3. За результатами комплексу теоретичних та експериментальних досліджень розробити методику, яка на основі врахування основних технологічних параметрів процесу дозволяє розрахувати мікрогеометричні характеристики сформованих поверхонь, при електроерозійній обробці дротяним електродом сталей з відомими теплофізичними характеристиками.

4. Виявити та оцінити вплив коливань дротяного електрода на стабільність процесу різання та мікрогеометрію утворених поверхонь

5. Встановити закономірності керованого впливу на фізико-механічні властивості, характер їх зміни та однорідність, структуру та товщину зони термічного впливу при обробці сталей за технологією ЕЕДВ з різними енерго-часовими параметрами імпульсів.

**Об'єкт дослідження.** Фізичні і технологічні процеси, що визначають формування параметрів поверхневих шарів сталей при електроерозійній обробці дротяним електродом.



**Предмет дослідження.** Закономірності керованого впливу часо-енергетичних, механічних та теплофізичних параметрів у МЕР на формування необхідних для тих чи інших умов експлуатації мікрогеометрії, фізико-механічних властивостей, структури та товщини зони термічного впливу сталей при їх обробці за технологією ЕЕДВ.

## РОЗДІЛ 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ І МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Експериментальна база досліджень та оцінка достовірності результатів

Дослідження параметрів коливань дротяного електроду-інструменту, а також їх вплив на перебіг процесу електроерозійного вирізання була проведена на серійному електроерозійному вирізному комплексі СЕЛД-02.

Подача технологічного струму в міжелектродний проміжок забезпечувалась за допомогою генератора ГКІ-300-200А. При дослідженнях використовувалось додаткове спеціальне обладнання та прилади. Їх використання дало можливість з високою точністю контролювати та фіксувати параметри електроерозійного дротяного вирізання, які супроводжують виникнення та перебіг коливань ДЕІ. Контролювання показників струму та напруги, визначення яких необхідне для дослідження умов обробки, здійснювалося за допомогою цифрового запам'ятовуючого осцилографа Tektronix DPO4032. Оптична (візуальна) інформація дослідних процесів фіксувалася цифровою фотокамерою Sony F-907 та відеокамерою Panasonic HDC-SD1.

Аналіз отриманих осцилограм проводився за допомогою персонального комп'ютера в середовищі системи автоматизованого проектування AutoCAD 2011 та програмного пакету MathCAD 15. Шорсткість поверхні зразків оброблених деталей досліджувалась за допомогою профілографа TIME 3221 з програмним забезпеченням DataView TIME3R Series.

Для оцінки результатів на достовірність застосовувалися стандартні методики визначення похибки, як при прямих, так і непрямих вимірюваннях, які проведені за допомогою приладів із заданими межами похибок. Кожний експеримент був проведений не менше 5 разів.

## 2.2 Методики експериментальних досліджень

### 2.2.1 Методи оцінки достовірності результатів вимірювань

Враховуючи нормальне розподілення результатів вимірювань, доцільно використовувати методику визначення похибки за критерієм Стьюдента [82, 83]. При обробці результатів досліджень виконують наступні операції:

1. Визначають середнє з  $n$  вимірювань:

$$\langle x \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i . \quad (2.1)$$

2. Обчислюють середньоквадратичну похибку середнього арифметичного:

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\langle x \rangle - x_i)^2}{n(n-1)}} . \quad (2.2)$$

3. Задають надійну ймовірність  $a$  і визначають з табличних даних коефіцієнт Стьюдента  $t_{a,n}$ . Для надійної ймовірності  $a=0.95$  і кількості виконаних вимірювань  $n=5$ , коефіцієнт Стьюдента становить  $t_{a,n}=2.776$ .
4. Визначають напівширину надійної ймовірності (абсолютна похибка результату вимірювань):

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{\text{сист}}^2 + \Delta x_{\text{вим}}^2} , \text{ де } \Delta x_{\text{вим}} = t_{a,n} S . \quad (2.3)$$

5. Оцінюють відносну похибку результату вимірювань

$$\delta = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle} . \quad (2.4)$$

### 2.2.2 Методика визначення шорсткості поверхні та мікронерівностей при електроерозійному дротяному вирізанні

Для визначення залежності мікрорельєфу поверхні обробленої деталі від параметрів коливань ДЕІ необхідне дослідження шорсткості зразків, при виготовленні кожного з яких зафіксовано відповідні параметри коливань дротяного інструменту.

До параметрів шорсткості відносяться висота нерівностей профілю  $R$ , висота нерівностей профілю по десяти точках  $R_z$ , середнє арифметичне відхилення профілю  $R_a$ , радіуси скруглення виступів  $\rho_v$  і впадин  $\rho_{en}$  профілю, радіус скруглення вершин виступів  $r_v$ , кут нахилу бічної поверхні нерівності до середньої лінії профілю  $\alpha$ , середній крок нерівностей профілю по вершинах  $s$  і по середній лінії  $s_m$ , число перетинів профілю із середньою лінією на одиницю довжини профілю  $n_0$ , число виступів на одиницю довжини профілю  $m_p$  і таких що піднімаються над середньою лінією  $m_0$ , коефіцієнт заповнення профілю порожнинами  $k_n$  і металом  $k_m$ , відносна опорна довжина профілю  $t_p$ , що визначаються на базовій довжині  $l$ . На рис. 2.1 представлено ділянку профілограми, на якій показано ряд перерахованих параметрів шорсткості.

При вимірюванні шорсткості найбільш розповсюдженими є оптичні та щупові методи.

При виборі методу дослідження шорсткості необхідно враховувати деякі специфічні особливості стану поверхні після електроерозійної обробки.

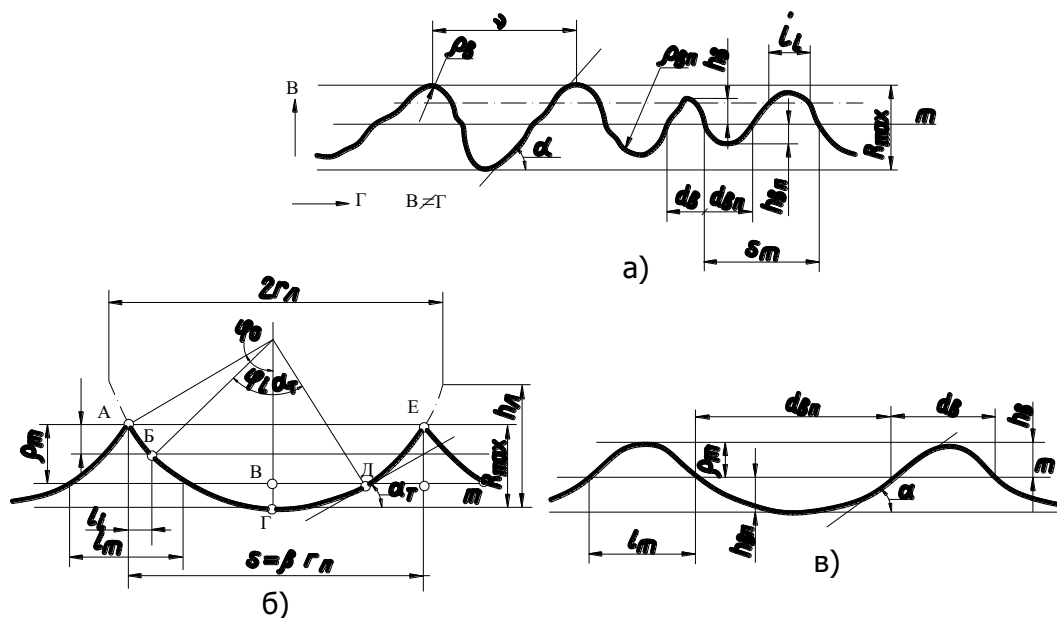


Рис. 2.1 – Основні параметри мікрорельєфу поверхні зразку отриманого методом ЕЕДВ

Вплив розрядів, робочої рідини, електрохімічних процесів, що відбуваються в МЕРП призводить до того, що на поверхні металу утворюються різноманітні осади, мікродефекти. В результаті, отримана поверхня має неоднорідний колір, відбиваючу здатність, що варіюється в дуже широких межах. Вказані дефекти неминуче призведуть до виникнення істотної похибки показників оптичного профілометра.

При щуповому (контактному) методі виміру нерівностей поверхні як щуп використовують гостро заточену голку, яка поступально переміщується по визначеній траєкторії щодо поверхні. Вісь голки розташовують по нормалі до поверхні. Опускаючись в западини, а потім піднімаючись на виступи під час руху голівки, голка коливається відповідно профіля поверхні, що досліджується. Механічні коливання голки перетворюються, як правило, в електричні за допомогою електромеханічного перетворювача того чи іншого типу.

У щупових приладах для виміру параметрів шорсткості поверхні застосовуються перетворювачі механічних коливань голки в електричні сигнали індукційного, індуктивного типу, а також електронні і п'єзоелектричні.

Точність, розміри і технічні умови експлуатації профілографів-профілометрів регламентовані ГОСТ 19300-86. Перевіряються профілографи відповідно до ГОСТ 8.241 - 77 і ГОСТ 8.242 - 77.

Для дослідження показників шорсткості зразків, отриманих електроерозійною вирізною обробкою використано профілограф-профілометр блокової конструкції (моделі 250) [84]. Прилад має мале вимірювальне зусилля (не більш 1 мН при градієнті зусилля до 5 мкН/мкм), завдяки чому можна вимірювати параметри шорсткості деталей з покриттями без пошкодження їх поверхні, деталей з кольорових металів, пластмас і інших неметалічних матеріалів. Прилад оцінює параметр шорсткості  $Ra$  в межах від 0,04 до 8 мкм на базових довжинах від 0,08 до 2,5 мм і записує профіль з висотою нерівностей від 0,05 до 20 мкм на прямолінійних трасах поверхонь.

Похибка показів приладу не перевищує  $\pm 10\%$ , а похибка запису -  $\pm 4\%$ . Прилад дозволяє робити запис профілю плоскої і циліндричної поверхонь вздовж утворюючої на довжині до 40 мм; в отворах діаметром 8-20 мм - на глибині до 10 мм, а в отворах діаметром 20-45 мм - до 100 мм. Прилад забезпечується пристосуванням для запису хвилястості поверхні. По профілограмам, записуваним на електротермічному папері шириною 80 мм, можна визначити всі нормовані ГОСТ 2789-73 параметри шорсткості поверхні заданих поверхонь.

Вимірювання показників шорсткості виконувалось у наступній послідовності:

**1. Попередня підготовка:**

- а) механічна очистка поверхні;
- б) знежирювання поверхні спиртом;

**2. Виготовлення зразку методом ЕЕВО.** Для об'єктивного визначення залежності шорсткості обробленої поверхні від параметрів коливань ДЕІ виготовлено ряд дослідних зразків. При виготовленні кожного зразка фіксувалися енергетичні характеристики режиму обробки, гідродинамічні умови в МЕР, а також відповідні параметри коливань ДЕІ;

**3. Очистка зразку від продуктів ерозії.** Очистку необхідно виконувати, уникаючи пошкодження поверхні деталі, оскільки це може спотворити мікрорельєф обробленої поверхні;

**4. Дослідження показників шорсткості деталі.** Дослідження мікрорельєфу поверхні деталі виконувались за допомогою профілографів-профілометрів моделі TIME 3221 з програмним забезпеченням DataView TIME3R Series та профілометра-профілометра моделі 250. Аналіз мікрорельєфу кожного зразка виконувався по трьох паралельних лініях в напрямку, що співпадає з рухом ДЕІ під час обробки.

Шорсткість поверхні досліджувалась на ділянці зразку довжиною 10 мм. Для кожного зразку було виконано не менше 5 вимірів. Результати досліджень фіксувалися на термоелектричному папері.

Шорсткість поверхні деталей визначалась згідно ДСТУ ISO 4287:2012.

Стандартом визначено ряд параметрів, що характеризують нерівності поверхні.

$l$  – базова товщина

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx - \text{середнє арифметичне відхилення профіля}$$

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx} - \text{середнє квадратичне відхилення профіля}$$

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \left( \frac{1}{l} \int_0^l Z^3(x) dx \right) - \text{асиметричність профіля}$$

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \left( \frac{1}{l} \int_0^l Z^4(x) dx \right) - \text{гостровершинність профіля}$$

$Rp = \max(Zp_j)$  - максимальна висота над середньою лінією профіля

$Rv = \max(Zv_j)$  - максимальна висота під середньою лінією профіля

$Rz = Rp + Rv$  - висота нерівностей профіля по 10 точках

$s$  – середній крок нерівностей профіля

Дослідження шорсткості зразків також проводилось за допомогою HOMMEL TESTER T500. Це мобільний полуавтоматичний пристрій класу точності 1 за DIN 4772 (похибка 5% від меж вимірювання). Цей прилад дозволяє визначати  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rt$ ,  $R_{\max}$ ,  $Rq$ ,  $R_{3z}$ ,  $Rk$ ,  $R_{pk}$ ,  $R_{vk}$  за нормами DIN, ISO, JIS.

При математичній обробці теоретично отриманих профілів використовувалися функційні можливості пакету MathCad. Профіль поверхні описувався кривою з кроком 0,375 мкм.

### 2.2.3 Методика дослідження мікротвердості зразків

Для визначення стану матеріалу зразків було проведено ряд експериментів по дослідженню на мікротвердість.

Твердість поверхневих та внутрішніх шарів зразків визначали методом Віккерса на поверхнях зразків та в поперечному перерізі (на шліфах) [85-87].

Методика вимірювання твердості по Віккерсу зображена на (рис. 2.2) і полягає у вдавлюванні в зразок алмазного індентора у формі правильної піраміди з квадратом в основі та кутом між протилежними гранями  $2\gamma_1 = 136^\circ 30'$ .

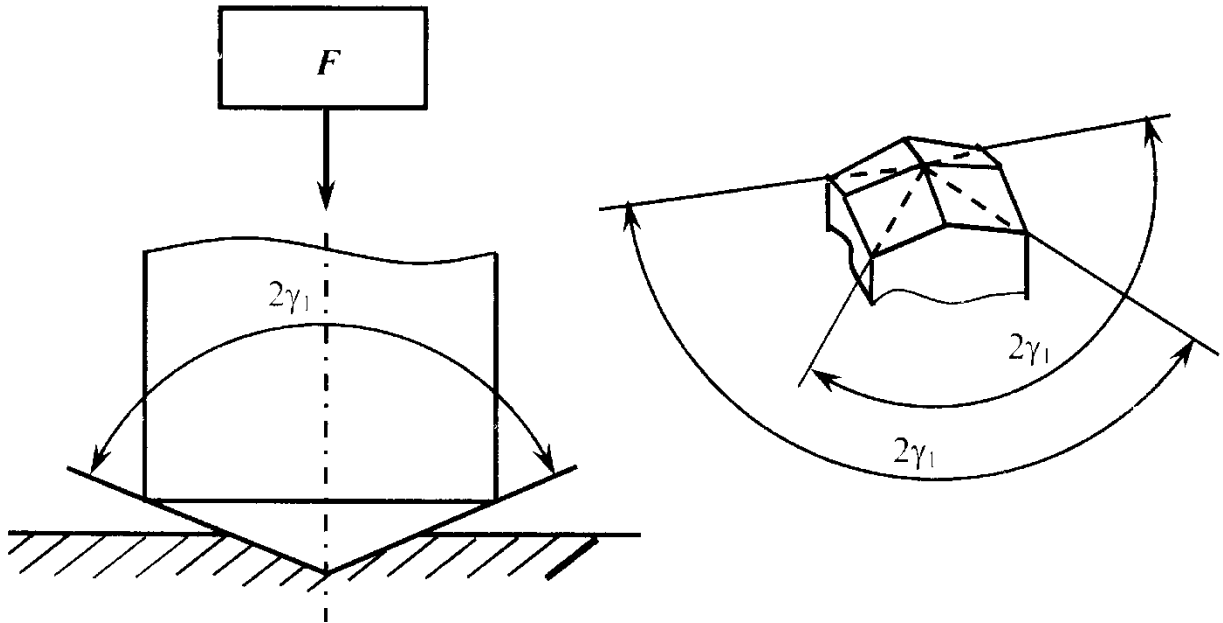


Рис. 2.2 – Індентор Віккерса

Загальний вигляд відбитку індентора Віккерса, який отримано на поверхні зразків після розвантаження, показаний на рис. 2.3.

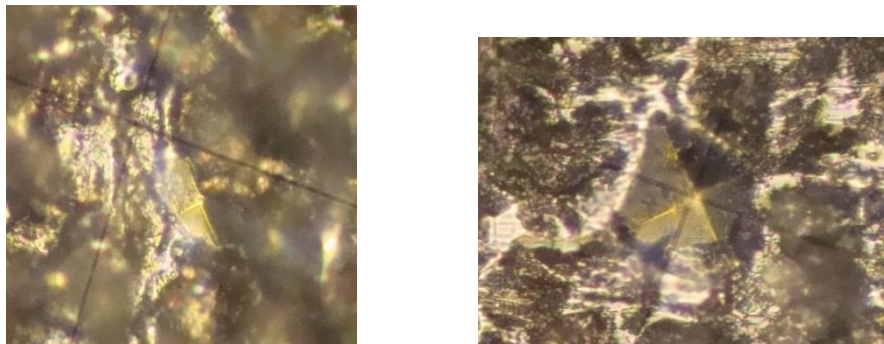


Рис. 2.3 – Відбиток індентора на поверхні зразка

Твердість за Віккерсом, розраховують як частку від ділення сили  $F$  на площу  $S$  бокової поверхні відбитка індентора за формулою:

$$HV = \frac{F}{S}. \quad (2.5)$$



Число твердості за Віккерсом у ГПа розраховують за формулою:

$$HV = \frac{2 \sin \gamma_1}{d^2} \cdot 10^{-3} = 1,8544 \frac{F_1}{d} \cdot 10^{-3}, \quad (2.6)$$

де  $F$  – навантаження на індентор, Н;  $2\gamma_1$  – кут при вершині відбитка після розвантаження, який приймають рівним куту між протилежними гранями

індентора, що дорівнює  $136^\circ 30'$ ;  $S = \frac{d^2}{2 \sin \gamma_1}$  – площа бокової поверхні відбитка

індентора;  $d$  – довжина діагоналі відбитка індентора у мм, за яку приймають середнє арифметичне результатів вимірювань довжини двох діагоналей індентора  $d_1$  і  $d_2$  (рис. 2.4).

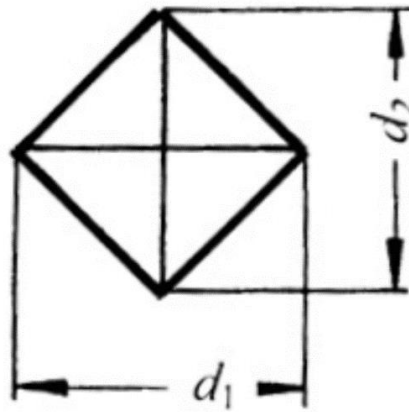


Рис. 2.4 – Схема визначення розмірів відбитка

Вимірювання проводились на приладі ПМТ-3. Даний прилад забезпечує попереднє зусилля 1 Н згідно рекомендацій [88].

При вимірюванні твердості використовувались сталеві зразки товщиною не менше 20 мм. Зразки, що пройшли ЕЕДВ перед дослідженням на твердість піддавались хімічній обробці для зняття продуктів корозії.

Попередніми дослідженнями [89] встановлено, що на режимах повного зйому ширина зони термічного впливу може сягати 0,1 мм. Через малу ширину зони визначення розподілу мікротвердості доцільно поводити методом косого шліфу (зрізу) згідно ГОСТ 9450-76.

Після проведення електроерозійного проходу необхідно прошліфувати поверхню під невеликим кутом. Чим менше кут нахилу, тим більша довжина

поверхні відповідатиме одиниці глибини. Так, кут нахилу в  $5,73^\circ$  забезпечить збільшення в 10 разів.

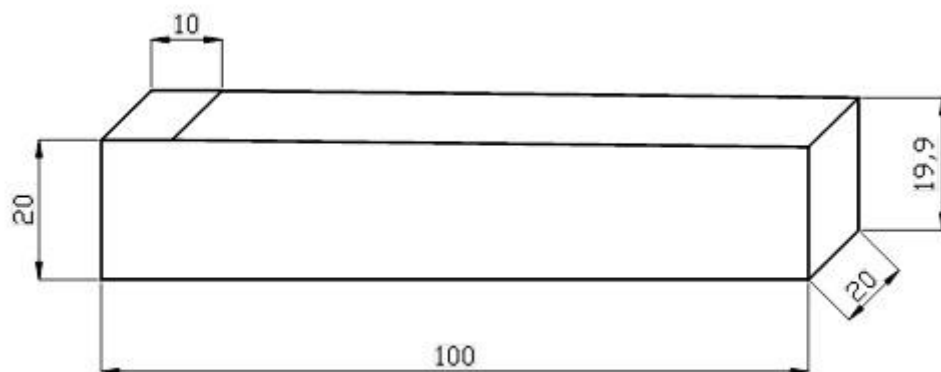
На косому зрізі рівномірно проводять досліди, враховуючи вимогу відстані між сусідніми відбитками та краями зразка. За розмірами відбитків будуюмо залежність мікротвердості по товщині зразка.

Зразки з досліджуваного матеріалу виготовляємо у вигляді бруска з розмірами  $100 \times 20 \times 20$  мм. На обробленій стороні необхідно шліфуванням зробити косий зріз. З обох боків поверхні розміром  $100 \times 10$  мм залишимо неробочими по 10 мм. Решта довжини повинна мати такий нахил, щоб гарантовано відкрити основний матеріал. Кут нахилу для шліфування має дорівнювати

$$\alpha = \arctg \frac{0.080}{80} = 0.0573^\circ \quad (2.7)$$

Для отримання такого нахилу при шліфуванні зразок необхідно закріпити таким чином, щоб один край зразка спирався на плиту, а інший був піднятий на 0,1 мм.

Отримана робоча ділянка  $80 \times 20$  мм дозволяє провести не менше 20 вимірювань мікротвердості з повтором кожного вимірювання 5 разів (рис. 2.5, 2.6).



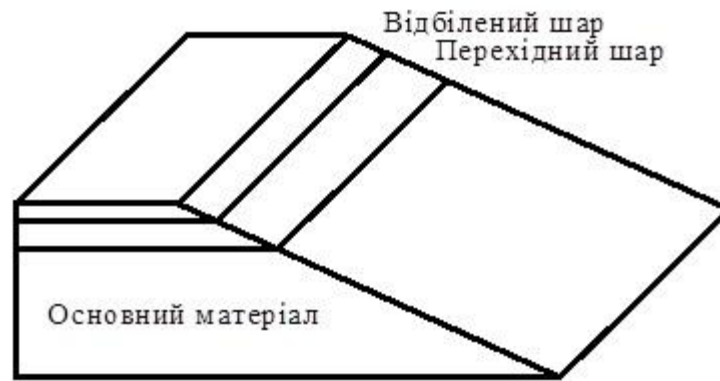


Рис. 2.5 – Схема методу косого шліфу

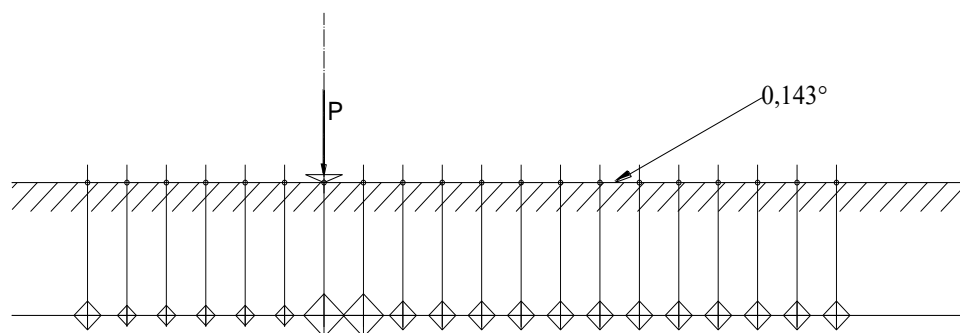


Рис. 2.6 – Схема розміщення точок виміру мікротвердості при використанні методу косого шліфу

#### 2.2.4 Методика реєстрації коливань ДЕІ

Існують роботи [90-94], у яких викладений теоретичний аналіз коливань ДЕІ. Проте, представленим дослідженням притаманний ряд суттєвих недоліків, які ускладнюють коректний аналіз процесів, що відбуваються в сучасних електроерозійних верстатах виробництва країн СНД і моделей світових лідерів електроерозійних технологій (Agie, CharmilleTechnologie, Sodick, Fanuk та інші).

В математичних моделях допущена велика кількість спрощень та не враховано деякі важливі принципові фактори, супутні електроерозійному вирізанню (нехтування зміною радіальних координат проходження робочих розрядів, випадковий характер розподілення робочих розрядів по довжині дотягнутого електроду, зміна жорсткості ДЕІ внаслідок локальних перегрівів тощо), також не проводились експериментальні дослідження амплітудно-

частотних характеристик коливань дротяного електроду і факторів, що на них впливають.

Складність практичного дослідження параметрів коливань дротяного електроду визначається насамперед малими величинами розмірів дротяного електроду (діаметр до 0.25 мм) а також амплітуди його коливань (до 0.05 мм). Згідно теоретичних розрахунків, частотний спектр коливань ДЕІ знаходиться в межах 600-7000 Гц [94].

Для визначення параметрів коливань ДЕІ при стабільному режимі різання, а також у передобливному стані проведено ряд експериментів.

Для експериментальних вимірювань коливань ДЕІ була розроблена система, принципова схема якої представлена на (рис. 2.7). Система складається з блоку випромінювачів (1), блоку датчиків інтенсивності випромінювання (5), цифрового запам'ятовуючого осциллографа (ЦЗО) *Tektronix DPO4032*(6), персонального комп'ютера (7) для аналізу отриманих даних, і безпосередньо блоку вимірювань (2), що встановлюється на визначеній ділянці дротяного електроду.

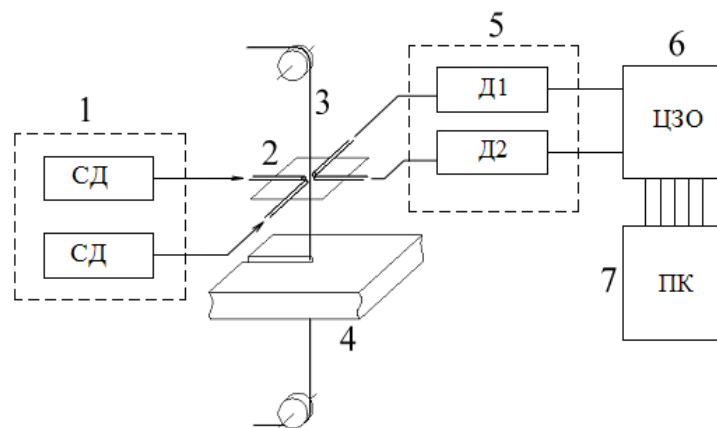


Рис. 2.7 – Принципова схема системи реєстрації коливань

У процесі вимірювань коливань дротяного електроду, блок випромінювачів, що складається з двох інфрачервоних світлодіодів (СД) і системи живлення, генерує світло інфрачервоного діапазону, яке по двох взаємно перпендикулярних каналах подається до блоку вимірювань. Блок

вимірювань, встановлений на дослідній ділянці дротяного електроду (3) і призначений для позиціонування каналів випромінювачів і каналів приймачів відносно ДЕІ. Дротяний електрод-інструмент, який коливається в процесі обробки деталі (4), відповідно перекриває перетин оптичних волокон (рис. 2.8), що ведуть до блоку датчиків випромінювання. У залежності від положення ДЕІ щодо перетину оптоволокна, змінюється площа, через яку проходить світловий потік, при цьому відповідно змінюється інтенсивність світлового потоку. Реєструючи за допомогою осциллографа електричні коливання, що надходять від оптичних датчиків, можна визначати частоту коливань дротяного електроду. При цьому мінімальний електричний сигнал свідчить про центральне положення дроту щодо перетину оптоволокна, максимальний сигнал – про відхилення дроту за межі перетину дротяного електроду.

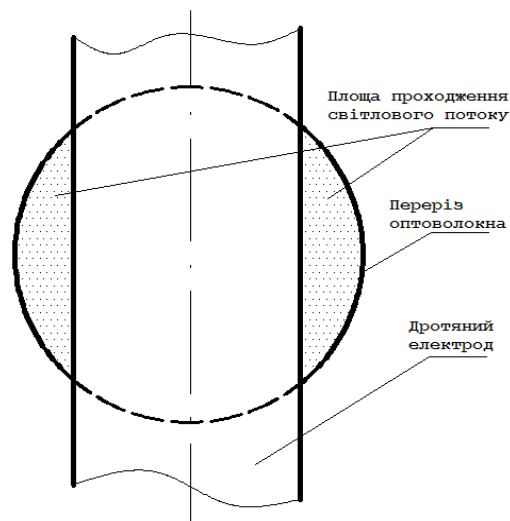


Рис. 2.8 – Позиціонування дротяного електроду відносно перерізу оптоволокна.

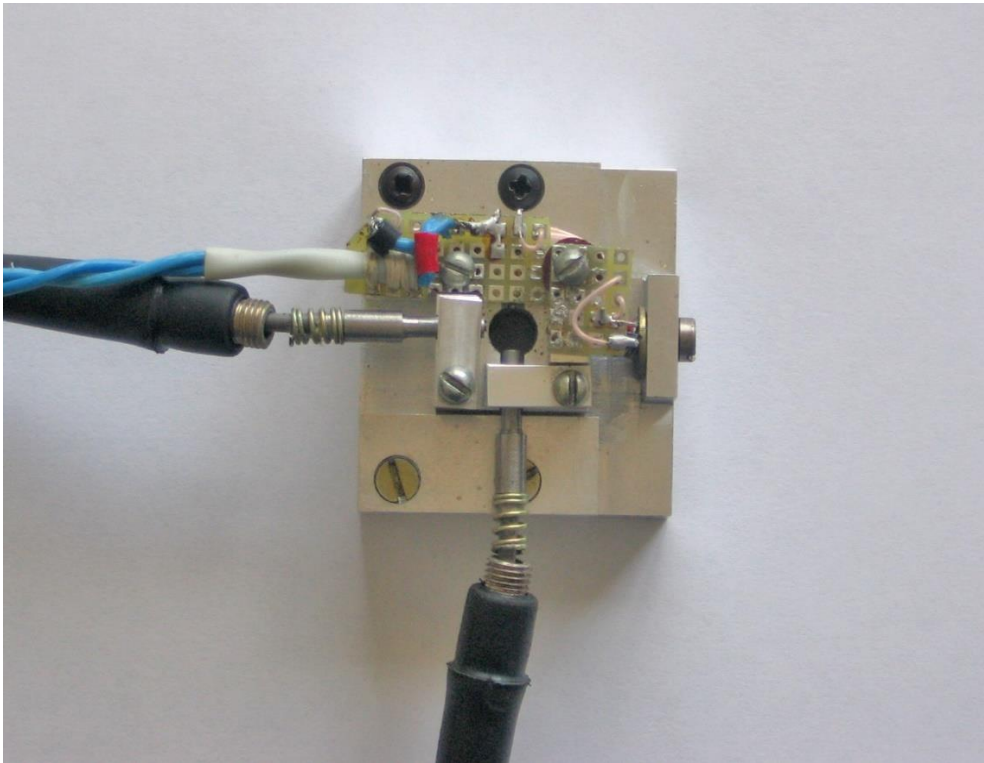


Рис. 2.9 – Модуль оптичних датчиків для прецизійного позиціонування світлодіодів на дослідній ділянці дротяного електроду

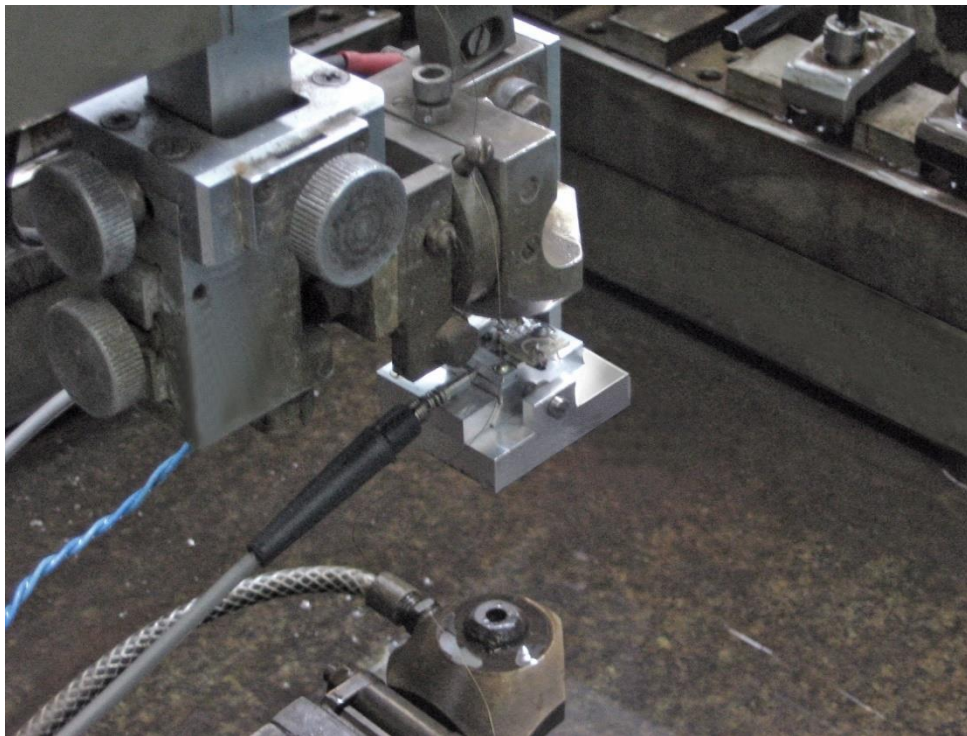


Рис. 2.10 – Монтаж дослідної установки на верхній скобі електроерозійного комплексу СЕЛД-02

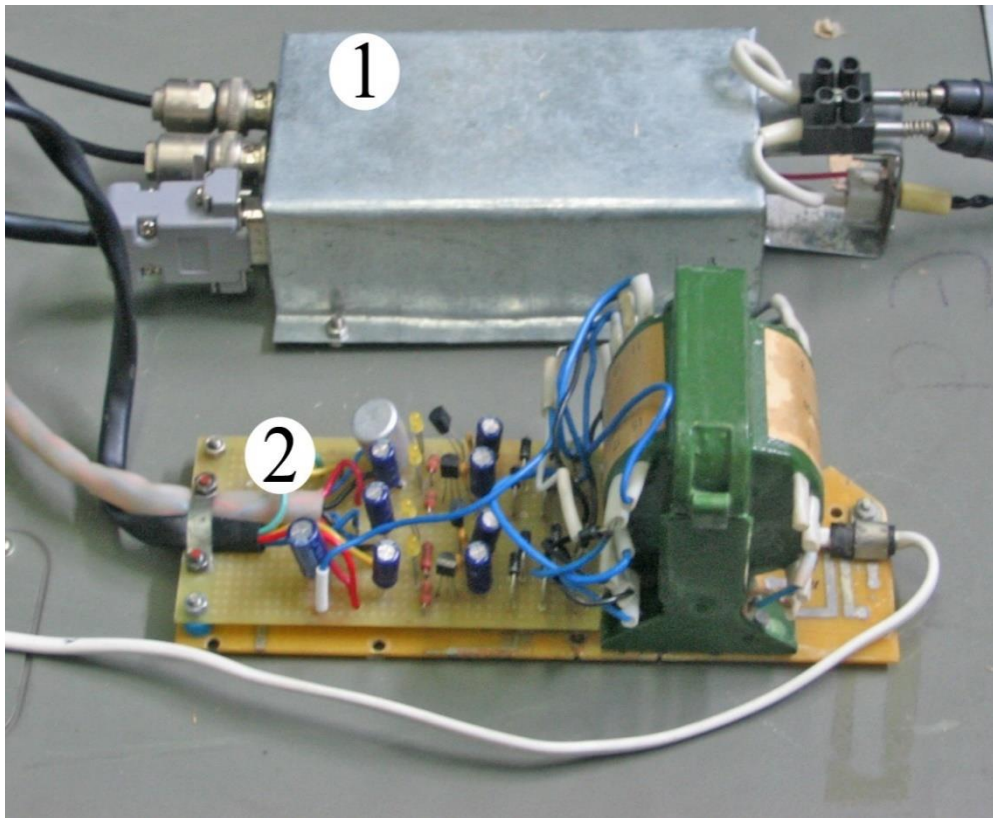


Рис. 2.11 – Апаратна частина дослідної установки

У результаті проведених досліджень буде отримано осцилограми коливань струму, які є графічним представленням положення дротяного електроду в часі.

Перед проведенням досліджень дослідна установка повинна бути відповідним чином відтарована. При таруванні встановлювалась залежність величини струму, що надходить з оптичних датчиків, від ступеня перекриття перерізу датчика дротяним електродом. На рис. 2.12 наведено побудований тарувальний графік, який використовується при обробці результатів досліджень.



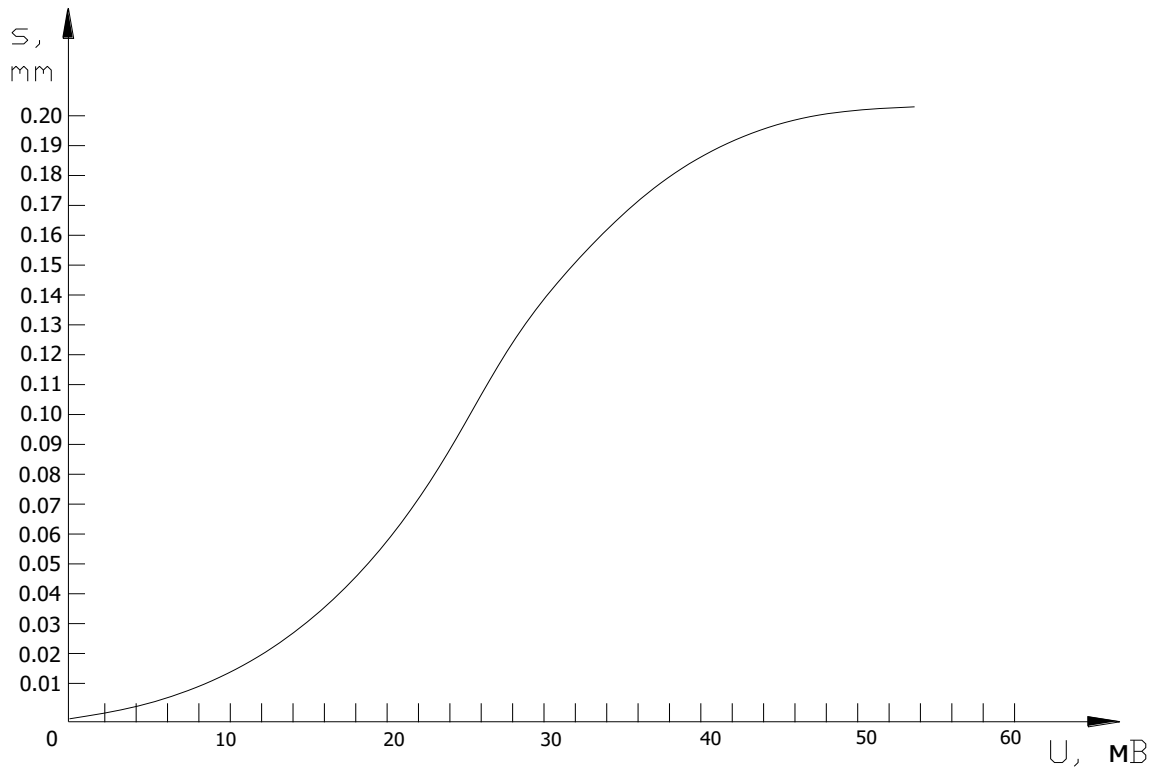


Рис. 2.12 – Тарувальний графік для визначення реального значення відхилення дротяного електроду в залежності від сигналу оптичних датчиків.

Фіксуючи в режимі реального часу зміну інтенсивності випромінювання в двох напрямках і застосовуючи тарувальний графік, можливо в довільний момент часу визначити положення обраної ділянки ДЕІ.

Загальна похибка вимірювань віброзміщення з урахуванням похибки градування складає не більш 5 %.

### 2.2.5 Методика визначення розподілу напружень в поверхневому шарі деталі після електроерозійної обробки

Знання величини та характеру розподілу залишкових напружень є важливою сполучною ланкою між проектуванням технологічного процесу, виробничим процесом і кінцевою якістю заготовки. Рівень та характер розподілу залишкових термонапруг впливає на стабільність розмірів, параметри втомної міцності та схильність оброблених поверхонь до корозії [96, 97]. З врахуванням важливості цього, розроблена експериментально-



розрахункова методика оцінки рівня та характеру розподілу залишкових термонапруг, що виникають в поверхневих шарах сталевих деталей отриманих за технологіями електроерозійного дротяного вирізання, через наявність структурно змінених шарів в зоні термічного впливу. В силу особливостей формування, залишкові термонапруги при ЕЕДВ є напругами 1-го роду тобто вони присутні в макроскопічних масштабах і проходять поперек зерна [97], що і покладено в основу методики.

Схема виконання експерименту представлена на рис. 2.13. Характер зміни деформації пластини в залежності від змінної точно контрольованої товщини структурно зміненого шару  $\delta$  на рис. 2.14. Рівняння (2.8), описує зв'язок між кривизною зразка і залишковою напругою для одновимірного напруженого стану [98, 99].

$$\sigma_{1p}(\delta) = -\frac{1}{6} \cdot E \cdot (H - \delta)^2 \cdot \frac{dR(\delta)}{d\delta} + \frac{2}{3} \cdot E \cdot (H - \delta) \cdot R(\delta) + \frac{1}{3} \cdot E \cdot R(0) \cdot (3 \cdot \delta - 2 \cdot H) - \frac{1}{3} \cdot E \cdot \int_0^{\delta} R(\delta) \cdot d\delta, \quad (2.8)$$

де  $\sigma_{1p}(\delta)$  – напруження 1 роду на глибині  $\delta$ , Н/мм<sup>2</sup>;  $E$  – модуль пружності Н/мм<sup>2</sup>;  $H$  – товщина досліджуваної пластини, мм;  $\delta$  – глибина структурно зміненого шару, мм;  $R(\delta)$  – радіус кривизни досліджуваної пластини, мм.

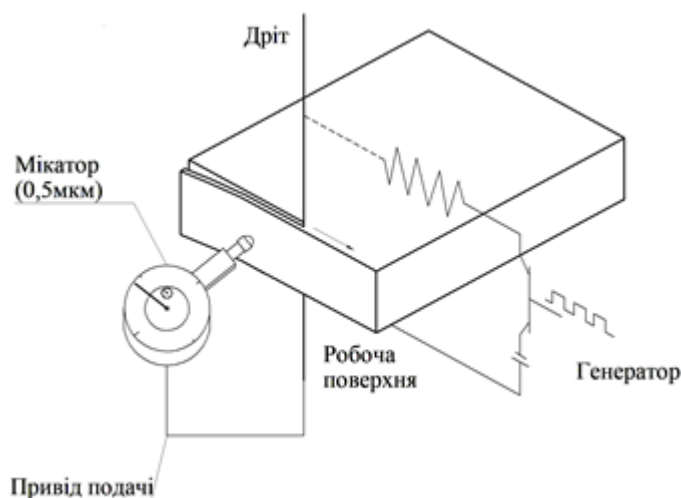


Рис. 2.13 – Схема різання та вимірювання деформації зразків в робочій ванні електроерозійного верстату СЕЛД-02М.

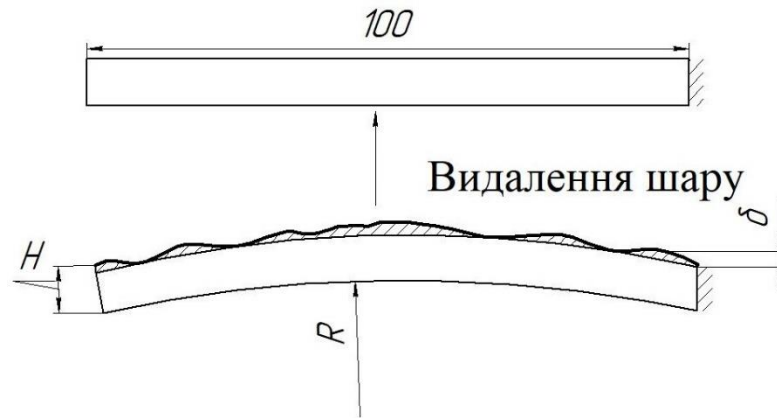


Рис. 2.14 – Зміна вигину оброблюваної пластини при видаленні зони термічного впливу

Товщина структурно зміненої зони формувалася на режимі різання повного зйому та режимах додаткових проходів. Після кожної електроерозії установка перемикалася в режим електрохімічної обробки поверхні [104] в електроліті (хлорид натрію) NaCl 15% і виконувалося пошарове знімання матеріалу ЗТВ на високоточних контрольованих режимах. За один технологічний прохід знімалося  $20^{+3}$  мкм структурно зміненого шару, після чого контролювався реальний залишковий прогин деталі та за рівнянням (2.8) розраховувалися напруження в конкретній зоні структурно зміненого шару.

### 2.3 Висновки за розділом 2

1. Запропонована загальна концепція проведення комплексу експериментальних досліджень керованого впливу основних параметрів електроерозійного дротяного вирізання на формування мікрогеометрії, структури та фізико-механічних властивостей поверхневих шарів сталей.

2. Розроблено та підібрано методики та обладнання для реалізації запропонованої концепції проведення експериментальних досліджень.

3. Розроблено та адаптовано оригінальну методику визначення напруг у ЗТВ після електроерозійного дротяного різання у відомих простих технологічних схемах.

### РОЗДІЛ 3

## ФОРМУВАННЯ МІКРОГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ПРИ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНІЙ ОБРОБЦІ ДРОТЯНИМ ЕЛЕКТРОДОМ

### 3.1 Фізико-технологічні особливості формування одиничної лунки при електроерозійній обробці дротяним електродом

#### 3.1.1 Енергетичні параметри одиничних імпульсів при використанні сучасних генераторів технологічного струму

Поверхня деталей, отримана електроерозійним способом має характерні ознаки. Вона формується послідовним накладанням одиничних лунок, отриманих одиничним розрядом. Як було показано в розділі 1 форма та геометричні розміри лунок суттєво залежать від ряду технологічних параметрів обробки. Так, теплофізичні характеристики матеріалу аноду (деталі) визначають швидкість поширення тепла вглиб матеріалу, кількість енергії, що має бути витрачена на нагрівання матеріалу та фазові перетворення. Про важливість даного показника говорить той факт, що одним з перших критеріїв ерозійної стійкості матеріалу є критерій Палатника [105]:

$$K = C \cdot \rho \cdot \lambda \cdot T, \quad (3.1)$$

де  $C$  – теплоємність матеріалу;

$\rho$  – густина матеріалу;

$\lambda$  – теплопровідність матеріалу;

$T$  – температура плавлення.

Також на розміри лунки впливають енергетичні параметри імпульсу [14, 22, 43, 54, 106]. В роботах Ставіцького Б.І. було показано, форма одиничної ерозійної лунки може відрізнятись від шарового сегменту [107–108]. Визначено чотири форми лунок: круговий циліндр, напівеліпсоїд обертання, параболоїд обертання, конус (рис. 3.1).

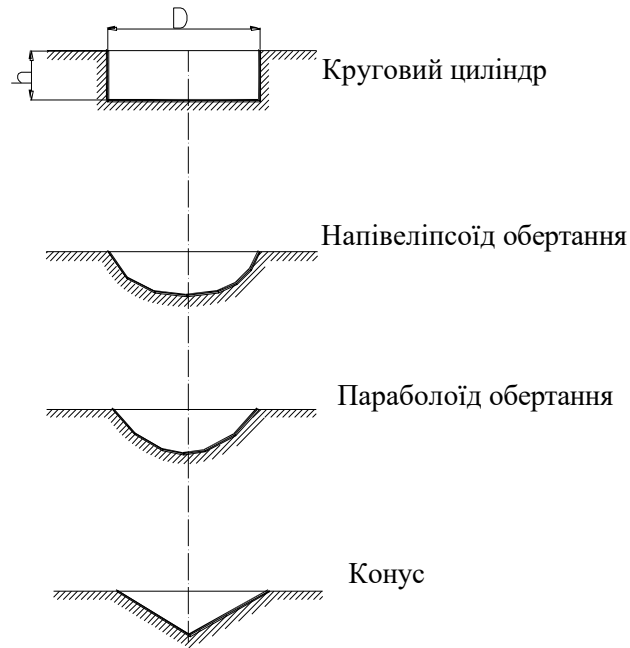


Рис. 3.1 – Можливі форми лунок на аноді

В роботах Калейнікова Г.Є. доведено, що діаметр каналу розряду суттєво залежить від характеристики робочої рідини. Так, використання різних типів поверхнево-активних речовин (ПАР) може збільшити діаметр каналу розряду майже в два рази, відповідно в чотири рази зменшується густина потужності в каналі розряду [109].

В роботах Осипенка В.І. показано, що крім енергії імпульсу та густини потужності важливим показником є також крутизна заднього фронту імпульсу струму. Вона визначає швидкість схлопування каналу розряду, а, відповідно, і величину сил, що призводять до викиду розплаву із дна лунки [89].

Розвиток елементної бази дозволяє навіть у відносно дешевих верстатах реалізувати режими з максимальним струмом до 1000А та тривалістю імпульсу від 0,05 мкс. Розглянемо параметри типового генератора технологічного струму електроерозійних комплексів середнього цінового діапазону (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

**Типові параметри генератора технологічного струму електроерозійного комплексу AccuteX GE-43SA**

№ з/п	Параметр	Розмірність	Значення	
			мінімальне	максимальне
1	Тривалість імпульсу струму	мкс	0,05	1,2
2	Амплітудне значення імпульсу струму	А	33	800
3	Тривалість паузи між імпульсами	мкс	4	50
4	Енергія імпульсу	мДж	0,025	36
5	Крутизна фронтів струму	А/с	$1 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^9$

Типова форма напруги між електродами наведена на осцилограмі (рис. 3.2). Імпульс робочого струму відповідає IV ділянці осцилограми і має трикутну рівнобічну форму.

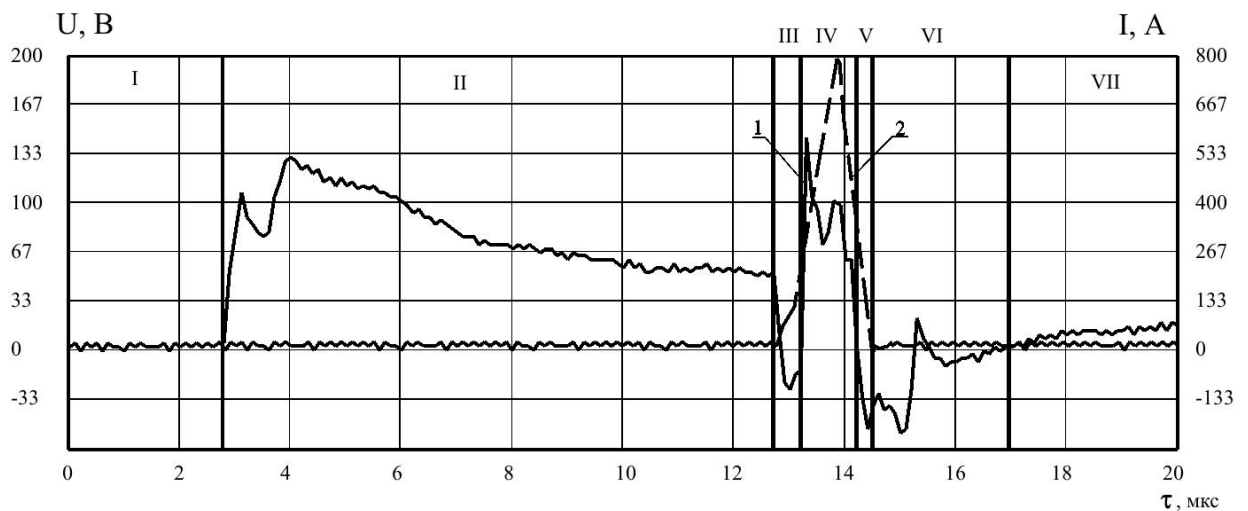


Рис. 3.2 – Осцилограма напруги на міжелектродному проміжку:

I – пауза перед імпульсом напруги; II – напруга пробую проміжку; III – визначення наявності пробую і комутація потужного джерела струму; IV – імпульс робочого струму; V – закриття каналу розряду; VI – електричні збурення від припинення розряду; VII – пауза між імпульсами.

Для забезпечення високих показників шорсткості і швидкості обробки електроерозійне вирізання проводиться в кілька проходів з різними енергетичними режимами від чорнових режимів з високою швидкістю руйнування матеріалу та низькими показниками шорсткості поверхні до фінішних режимів з низькою швидкістю руйнування, але високими показниками шорсткості (табл. 3.2).

Таблиця 3.2

### Енергетичні показники режимів обробки

№ з/п	Тривалість імпульсу, мкс	Амплітудне значення струму, А	Енергія, що реалізується на аноді, Еа, мДж	Діаметр лунки, мкм	Густина потужності, $q$ , $10^{12}$ Вт/м <sup>2</sup>
1	0,05	33	0,02	20	1,27
2	0,1	67	0,08	23	1,96
3	0,15	100	0,204	27	2,37
4	0,2	133	0,383	32	2,62
5	0,25	167	0,631	34	2,78
6	0,3	200	0,955	38	2,88
7	0,35	233	1,364	41	2,95
8	0,4	266	1,865	45	3,00
9	0,45	300	2,467	48	3,03
10	0,5	333	3,176	52	3,05
11	0,55	367	4,001	55	3,06
12	0,6	400	4,95	58	3,07
13	0,65	433	6,03	62	3,07
14	0,7	467	7,249	66	3,07
15	0,75	500	8,616	69	3,07
16	0,8	533	10,138	73	3,07
17	0,85	567	11,822	76	3,07
18	0,9	600	13,677	80	3,06
19	0,95	633	15,711	83	3,06
20	1	667	17,931	86	3,05
21	1,05	700	20,345	90	3,05
22	1,1	733	22,961	94	3,04
23	1,15	767	25,787	97	3,03
24	1,2	800	28,831	101	3,03

Виробники електроерозійних комплексів найчастіше в технічній документації надають рекомендації по вибору параметрів проходів для досягнення заданих показників якості поверхні. Так, для обробки сталі 45

досягнення шорсткості  $R_a=0,8$  мкм забезпечується послідовним використанням режимів 24-14-10-4-1. Тож детальніше будемо розглядати ці режими.

Імпульсні розряди струму, що протікають між електродами викликають їх нагрівання. Експериментально визначити розподіл температур в часі від одиничного імпульсу неможливо. Отже, для визначення розподілу температур застосуємо математичне моделювання. Як показано в роботі [89] для розрахунку теплових полів необхідно розв'язати осе симетричну квазітрифазну нелінійну задачу теплопровідності з рухомими границями фаз (задача Стефана). В циліндричній системі координат вихідна система рівнянь має такий вигляд:

$$\rho C_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \lambda_1(T) r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial z} \right], \quad \xi(t) < r, z; \quad (3.2)$$

$$\rho C_2(T) \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \lambda_2(T) r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda_2(T) \frac{\partial T_2}{\partial z} \right], \quad \eta(t) < r, z < \xi(t),$$

де  $T_1(r, z, t)$  – температурне поле твердої фази електрода;

$T_2(r, z, t)$  – температурне поле рідкої фази електрода;

$\rho$  – густина матеріалу електрода;

$C_1(T), \lambda_1(T)$  – питома теплоємність та коефіцієнт теплопровідності твердої фази матеріалу електрода;

$C_2(T), \lambda_2(T)$  – питома теплоємність та коефіцієнт теплопровідності рідкої фази матеріалу електрода;

$\xi(t)$  – положення рухомої границі між рідкою та твердою фазами матеріалу електрода;

$\eta(t)$  – рухома границя випаровування матеріалу електрода.

Тепловий потік, що надходить від каналу розряду до поверхні аноду може бути записаний у вигляді [89]:

$$q(r, t) = 4,5 q_\tau(t) e^{-4,5 \frac{r^2}{r_0^2}}, \quad (3.3)$$

де  $q_{\tau}(t)$  – залежність густини теплового потоку від часу впродовж тривалості розряду;

$r_0$  – радіус одиничної ерозійної лунки;

$r$  – поточна відстань від центру симетрії джерела тепла.

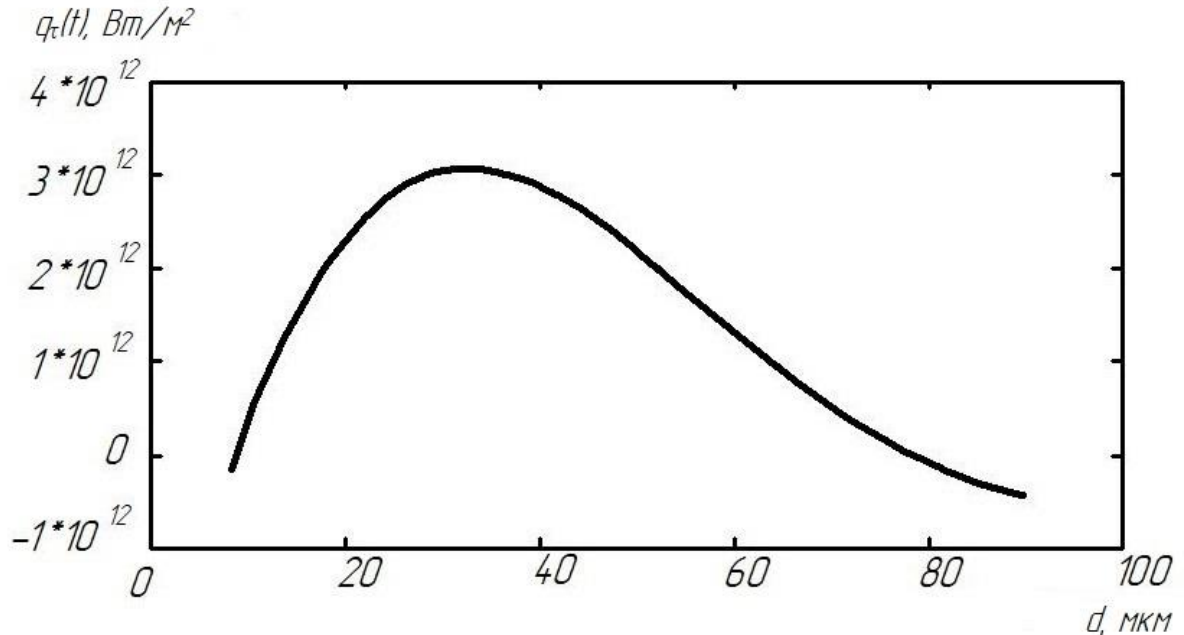


Рис. 3.3 – Розподілення густини теплового потоку по діаметру каналу розряду ( $d=2r_0$ )

Залежність  $q_{\tau}(t)$  визначається для кожного режиму окремо. Так, для імпульсу тривалістю 0,7 мкс вона може бути описана таким чином:

$$q_{\tau}(t) = 4,3q_0(-\sin(45 \cdot 10^5 t + 2,76)) \cdot e^{-24 \cdot 10^5 t - 0,56},$$

$$\begin{cases} 0 < t < 8,5 \cdot 10^{-8} c \rightarrow q_{\tau}(t) = 0, \\ 8,5 \cdot 10^{-8} c < t < 7,85 \cdot 10^{-7} c \rightarrow q_{\tau}(t), \\ 7,85 \cdot 10^{-7} c < t < \infty \rightarrow q_{\tau}(t) = 0. \end{cases} \quad (3.4)$$

де  $q_0$  – амплітудне значення густини потужності.

На рис. 3.3 представлено розподіл густини теплового потоку, розрахований за рівнянням (3.4).

Початкові та граничні умови, а також розв'язок задачі описані в роботі Осипенка В.І. [89].

$$\text{Початкові умови: } T_1|_{t=0} = T_2|_{t=0} = T_0. \quad (3.5)$$



$$\text{Граничні умови: } \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=0} = \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0; \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=r_{N1}} = 0; \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=\eta(t)} = q(r, t); \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=z_{N2}} = 0,$$

де  $q(r, t)$  – функція розподілу інтенсивності теплового потоку від дії плазми каналу одиничного іскрового розряду.

Умови на рухомих границях фаз:

при  $r, z = \xi(t) : T_1(r, z) = T_2(r, z) = T_{\text{пл}}$ ;

$$\lambda_1 \left( \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial T_1}{\partial z} \right) - \lambda_2 \left( \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial T_2}{\partial z} \right) = \rho L_{\text{пл}} \frac{\partial \xi}{\partial t}; \quad (3.7)$$

при  $r, z = \eta(t) : T_2(r, z) = T_{\text{вип}}$ ;

$$\lambda_2 \left( \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial T_2}{\partial z} \right) = \rho L_{\text{вип}} \frac{\partial \eta}{\partial t}, \quad (3.8)$$

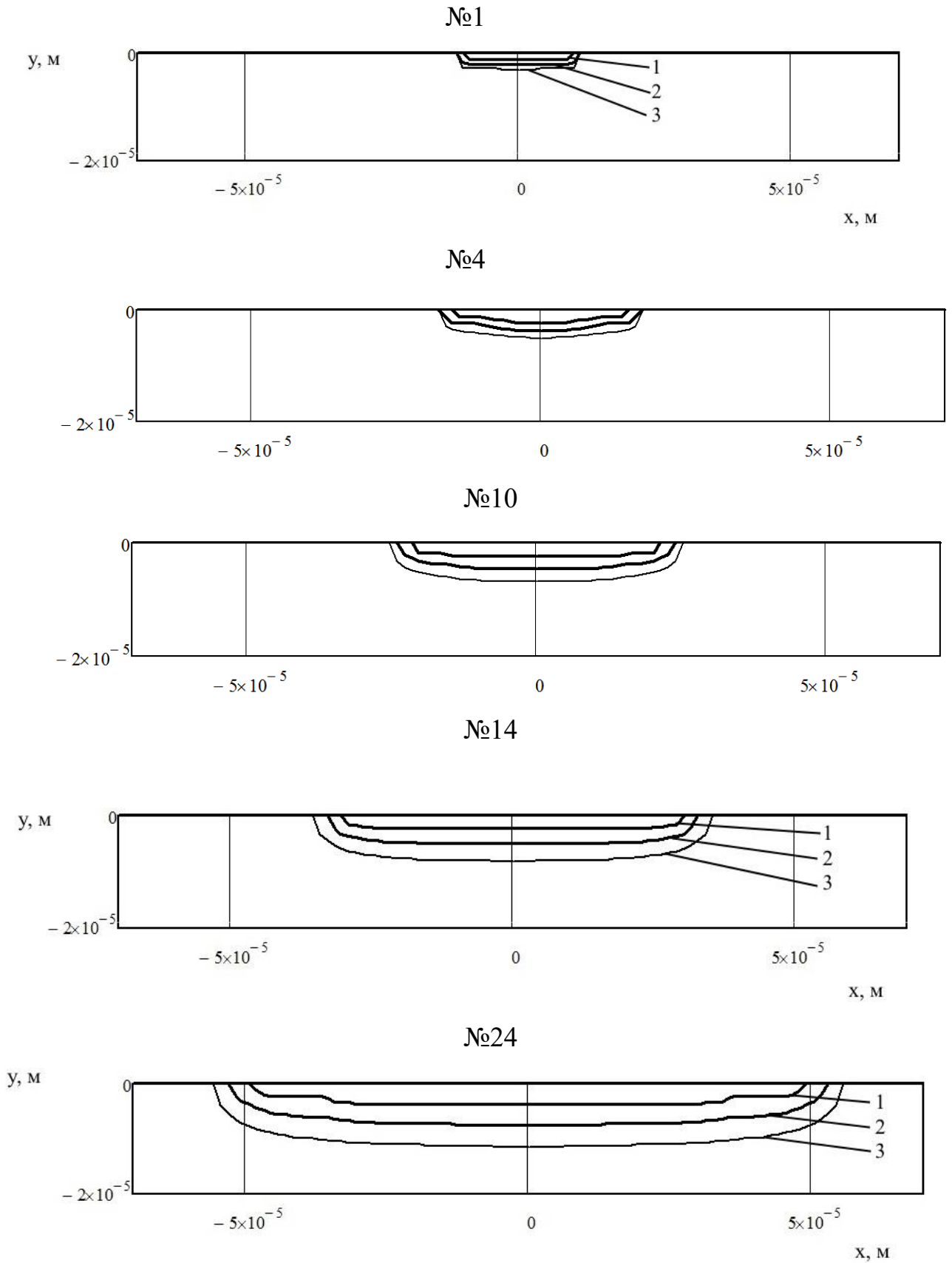
де  $T_{\text{пл}}, T_{\text{вип}}$  – температури випаровування матеріалу електрода та плавлення;  
 $L_{\text{пл}}, L_{\text{вип}}$  – випаровування матеріалу електрода та питома теплота плавлення.

Слід зазначити, що в даній моделі теплофізичні властивості матеріалу змінюються від температури і є перервними в точках фазових перетворень.

### 3.1.2 Результати математичного моделювання теплофізичної дії одиничного розряду на поверхню анода

При розв'язку задачі враховано, що теплофізичні параметри матеріалу змінюються при зміні фаз і при зміні температури.

На рис. 3.4 наведено розраховані форми границі випаровування, плавлення та ізотерми  $727^\circ\text{C}$  (матеріал анода Сталь 45) на момент закінчення дії імпульсу струму для режимів 1-4-10-14-24 (табл. 3.2).



Враховуючи, що лунка є осе симетричною можна розрахувати об'єми, маси матеріалу та енергії, що витрачені на фазові перетворення та нагрівання розплаву до температури випаровування. Отримані дані зведені в таблицю 3.3.

Таблиця 3.3

**Розраховані об'єми фазових перетворень матеріалу аноду та мінімальна кількість енергії, що витрачена на них (Сталь 45)**

№ з/п	Енергія, що виділяється на аноді, Еа, мДж	Глибина прогрівання вище 727 °С, мкм	Об'єм розплавленого матеріалу, 10 <sup>-18</sup> м <sup>3</sup>	Енергія, витрачена на розплавлення, мДж	Енергія, витрачена на нагрівання розплаву, мДж	Об'єм випарованого матеріалу, 10 <sup>-18</sup> м <sup>3</sup>	Енергія, витрачена на випаровування, мДж	Мінімальна енергія фазових перетворень, мДж
1	0,02	3,16	881	0,0014	0,0038	414	0,022	0,026
2	7,249	8,36	15400	0,0253	0,0634	6940	0,360	0,448
3	28,831	11,67	53800	0,0890	0,215	23400	1,220	1,500

Як видно з таблиці збільшення енергії імпульсу призводить до збільшення енергії, що витрачена на руйнування матеріалу. Однак у відносному значенні ця доля енергії зменшується зі 100% для чистового режиму до 5% для чорнового режиму. Тобто модель показує, що реальне збільшення енергії імпульсу призводить до суттєвого зниження енергетичної ефективності процесу різання (рис. 3.5). Окрім того, вимога збіжності математичної моделі вимагає певного співвідношення між розмірами сітки за координатою і часом. При менш потужних режимах збільшується похибка визначення об'ємів матеріалу і енергій.

Після закінчення дії імпульсу канал розряду схлопується і частина розплаву викидається в робочу рідину, частина утворює буртик навколо лунки, а частина залишається на дні лунки і кристалізується. Відношення об'єму викинутого матеріалу до розплавленого називають коефіцієнтом викиду (*Квик*), а його значення залежно від режиму обробки змінюється від

20% до 80%. Отже, реальна глибина лунки буде знаходитись між межею зони плавлення та межею зони випаровування. Це необхідно враховувати при оцінці товщини зони термічного впливу. Товщина термічно зміцненого шару буде складати  $\approx 2$  мкм для режиму 1 (табл. 2),  $\approx 5$  мкм для режиму 2 і  $\approx 6$  мкм для режиму 3.

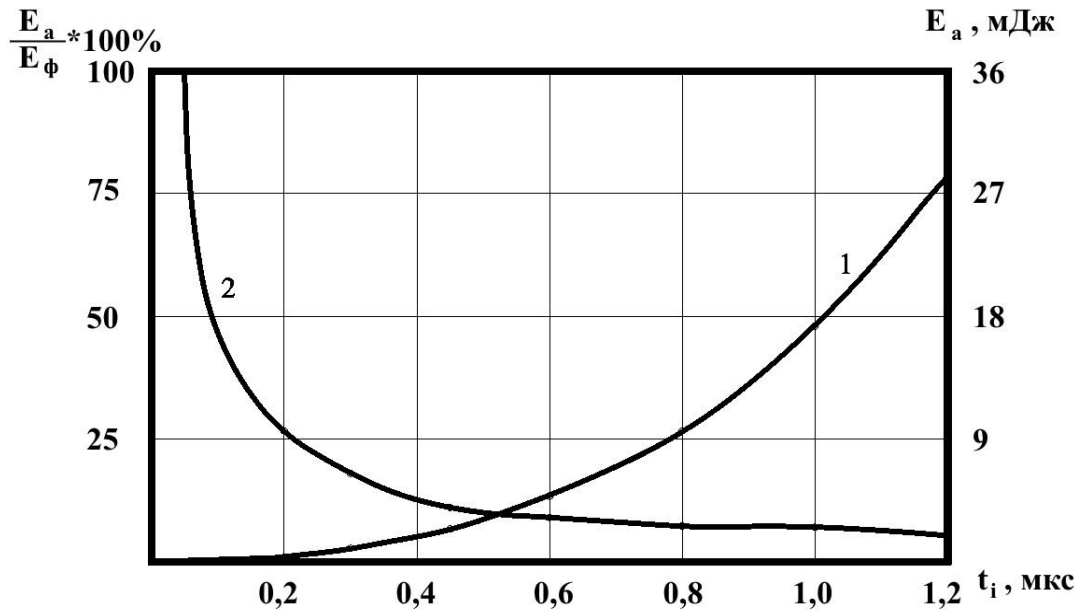


Рис. 3.5 – Ефективність використання енергії, що виділяється на аноді:  
 1 – абсолютне значення енергії; 2 – частина енергії, що витрачена на фазові перетворення

Для перевірки адекватності побудованої моделі та прийнятих припущень порівняємо отримані дані з експериментом. Продуктивність обробки визначається інтегральними показниками – середньою енергією імпульсу та коефіцієнтом використання імпульсів. Сумарний об'єм видаленого матеріалу можна встановити виходячи з продуктивності обробки та ширини міжелектродного проміжку. Середній розмір одиначної лунки можна порахувати за формулою:

$$V_{сер} = \frac{V_{HS} \cdot h \cdot (2 \cdot \Delta + d_{эл})}{f \cdot t \cdot \eta}, \quad (3.9)$$

де  $V_{HS}$  – швидкість різання,  $h$  – висота заготовки,  $\Delta$  – величина міжелектродного проміжку,  $d_{el}$  – діаметр дротяного електроду,  $f$  – частота імпульсів,  $t$  – час обробки,  $\eta$  – коефіцієнт використання імпульсів.

Розраховані та експериментальні дані зведені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4

**Порівняння розрахованих об'єми фазових перетворень матеріалу  
аноду з експериментальними**

№ з/п	$V_{HS}$ , мм/хв	$h$ , мм	$\Delta$ , мм	$d_{el}$ , мм	$f$ , кГц	$t$ , с	$\eta$	$V_{сер}$ , $10^{-18}$ м <sup>3</sup>	$V_p$ , $10^{-18}$ м <sup>3</sup>	$K_{вик}$ , %
1	0,6	40	0,01	0,15	247	60	0,7	393	414...881	8
2	1,4	40	0,015	0,25	38	60	0,75	9170	6940...15400	26
3	2,9	40	0,03	0,3	20	60	0,8	48750	23400...53800	83

Об'єм реальної лунки  $V_p$  буде знаходитись в межах між визначеним об'ємом випаруваного матеріалу та об'ємом розплавленого матеріалу. Експериментально встановлено [1], що за умов, близьких до модельного експерименту, з лунки видаляється від 40 до 60% розплавленого і не випаруваного матеріалу.

Визначене за формулою (3.9) значення середнього об'єму лунки для кожного з проаналізованих режимів знаходиться в межах між розрахованими за математичною моделлю об'ємами випаруваного та розплавленого матеріалів. Менше значення середнього об'єму для фінішного режиму зумовлено вибором кроку сітки для розрахункової моделі. Подрібнення сітки збільшує точність, але суттєво збільшує час розрахунку. Враховуючи стохастичний характер процесу, точність прогнозування і те, що подібний результат проявився лише в одному найменш потужному з усіх прорахованих режимів вважатимемо дані отримані за математичною моделлю близькими до експериментальних.

### 3.1.3 Формування одиничної лунки з врахуванням процесів утворення облямовуючого буртика

Відомо, що розряд між електродами в діелектричній рідині відбувається в кілька стадій [89]. З точки зору руйнування матеріалу деталі та видалення продуктів ерозії цікавими є етап проходження струму та етап схлопування парогазової бульбашки. В першому з них формується розплав металу та частково випарюється з зони обробки, в другому – за рахунок різкого зменшення тиску відбувається викид розплаву з лунки в робоче середовище та формування буртиків навколо лунки.

Дослідниками [89] вважається, що розподіл енергії по площі контакту каналу розряду з поверхнею деталі відповідає нормальному (Гауссовому) розподілу (рис. 3.6):

$$y = \frac{A}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{x^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (3.10)$$

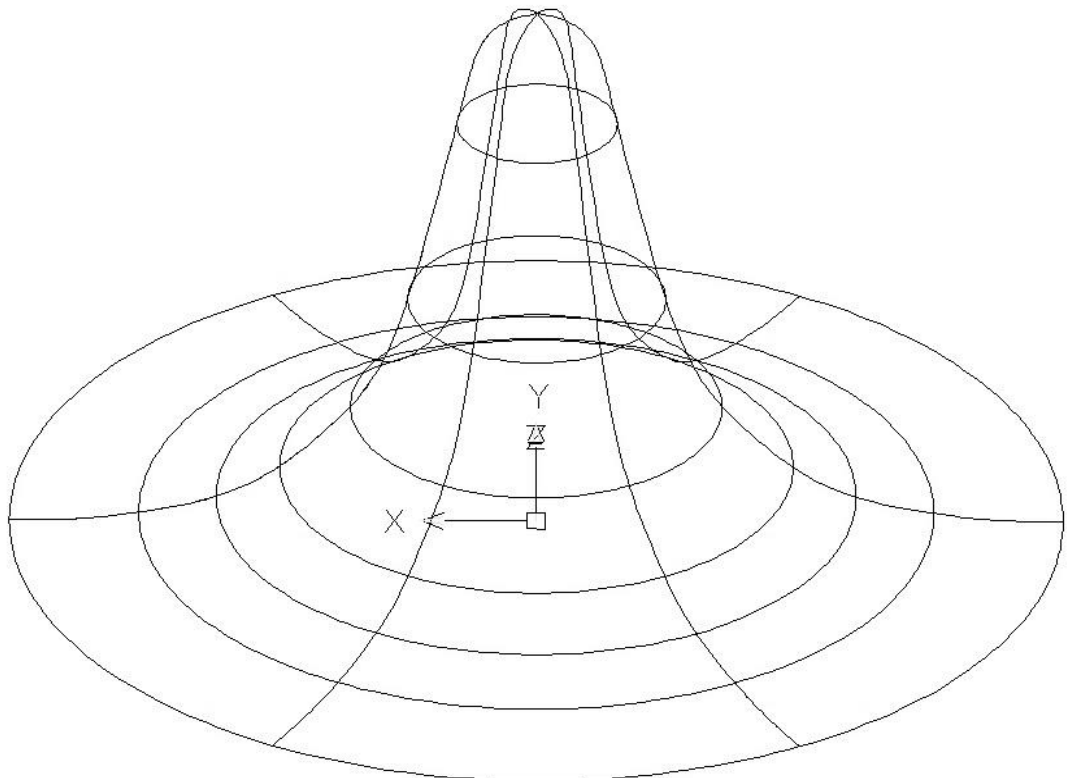


Рис. 3.6 – Об'ємний нормальний розподіл

Розподіл енергії в часі визначається за формулою (3.11).

Для того, щоб встановити константи для чисельного моделювання теплових процесів на поверхні деталі проведемо кілька допоміжних дій.

Щоб визначити висоту нормального розподілу необхідно розрахувати об'єм фігури, що буде отримана обертанням функції Гауса навколо вісі  $OY$  (рис. 3.6).

З точки зору математики [110], щоб визначити об'єм фігури, що отримана обертанням навколо осі  $OY$ , необхідно виразити  $x$  як функцію від  $y$ , а потім взяти інтеграл виду:

$$V = \pi \cdot \int_a^b f^2(y) dy \quad (3.11)$$

Функція Гауса (3.12) може бути представлена у вигляді:

$$x = \sigma \cdot \sqrt{-2 \cdot \ln\left(\frac{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}}{A} \cdot y\right)}. \quad (3.12)$$

Підставивши (3.11) в (3.12) отримаємо:

$$V = \pi \cdot \int_{min}^{max} \left( \sigma \cdot \sqrt{-2 \cdot \ln\left(\frac{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}}{A} \cdot y\right)} \right)^2 dy. \quad (3.13)$$

Математично межі інтегрування мають бути від 0 до амплітудного значення функції Гауса. Однак, якщо друге значення знаходиться достатньо просто, то при значенні  $y=0$  функція нормального розподілу наближається до нескінченності. Проведеними розрахунками було встановлено, що при значенні нижньої межі інтегрування на рівні  $1/300 \dots 1/400$  від амплітудного значення зміна об'єму отриманої фігури змінюється в межах 1%.

Коефіцієнт  $A$ , що визначатиме амплітудне значення функції нормального розподілу можна виразити з формули (3.14):

$$A = e^{\frac{V}{\ln(\sigma \cdot \sqrt{2\pi})} - 1 + \frac{\frac{V}{(\sigma \cdot \sqrt{2\pi})^2} + \frac{\ln(300 \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi})}{300 \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} - \frac{\ln(\sigma \cdot \sqrt{2\pi})}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}}}{\frac{299}{300 \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}}}}. \quad (3.14)$$

Формула (3.14) залежить лише від показника  $\sigma$ . Чисельно він дорівнює  $1/3 Rп$  ( $Rп$  - радіус плями контакту).

Отже, знаючи діаметр плями контакту (діаметр одиничної лунки) та загальну енергію, яка витрачена на руйнування аноду (табл. 3.2), можна розрахувати показники нормального розподілу енергії в плямі контакту як за часом так і за положенням.

Енергія, що виділяється на аноді розподіляється у певному співвідношенні на нагрівання металу, плавлення, нагрівання розплаву, випаровування рідини. В умовах, коли щільність потужності сягає  $(1...4) \cdot 10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup> також існує вибуховий або сублимаційний механізми руйнування. В момент обрушення заднього фронту струму імпульсу плазмовий канал між дротяним електродом і деталлю схлопується. В даний момент часу тиск в зоні проходження імпульсу практично миттєво знижується з  $10^7$  Па до  $10^5$  Па. Робоча рідина займає місце газового пузиря, що оточував плазмовий канал і «вимиває» розплавлений матеріал із дна лунки на краї. При повільному спаді струму на проміжку плазмовий канал схлопується не так швидко. При цьому матеріал, що на момент закінчення дії імпульсу струму, знаходився в рідкому стані застигає на дні лунки. Тим самим енергія розряду витрачається не ефективно. Збільшення ефективності електроерозійної обробки пов'язане з максимальним видаленням із лунки розплавленого матеріалу в робочу рідину та утворення буртика навколо лунки. Дослідниками [89] встановлено, що кількість матеріалу, що в рідкому стані видаляється з лунки завдяки згаданому ефекту одразу після схлопування каналу розряду в середньому становить 40-60% від об'єму розплаву.

Частина цього об'єму підхоплюється робочою рідиною, а частина застигає навколо лунки у вигляді буртика. Враховуючи відомі дані про видалення розплаву [89] в розрахунках вважатимемо, що кількість матеріалу який сформував буртик становить  $\approx 52\%$ , від об'єму розплаву в лунці.

Вважаючи, лунка в плані є круглою можна стверджувати, що форма буртика є половиною тора (рис. 3.7).



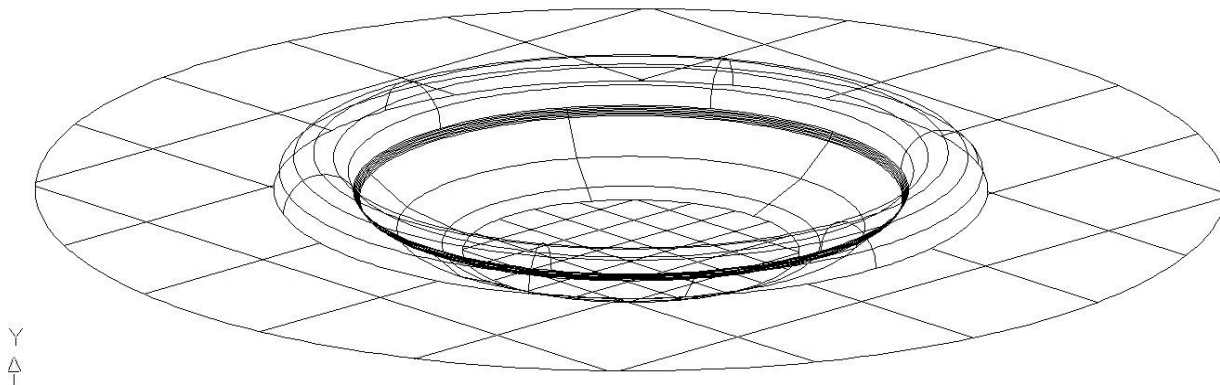


Рис. 3.7 – Форма лунки з буртиком

Об'єм фігури, що охоплена тором визначається за формулою:

$$V = 2 \cdot \pi^2 \cdot R \cdot r^2, \quad (3.15)$$

де  $R$  – радіус центру тора,

$r$  – радіус кіл, які формують тор.

Буртик формується по краю лунки, отже  $R = R_{\text{л}} + r$ . Враховуючи, що буртик – це половина об'єму, що охоплюється тором, рівняння (3.15) можна записати у вигляді:

$$V_{\text{бурт}} = \pi^2 \cdot (R_{\text{л}} + r) \cdot r^2. \quad (3.16)$$

Знаходження радіусу кола, що утворює тор зводиться до розв'язку кубічного рівняння вигляду:

$$r^3 + R_{\text{л}} \cdot r^2 - \frac{V_{\text{бурт}}}{\pi^2} = 0. \quad (3.17)$$

Визначити корені рівняння (3.17) можливо будь-яким з відомих методів, в тому числі і за допомогою пакету MathCAD.

Таблиця 3.5

## Геометричні показники лунки

№ режиму	Об'єм матеріалу буртика, мкм <sup>3</sup>	Радіус лунки, мкм	Радіус буртика, мкм	№ режиму	Об'єм матеріалу буртика, мкм <sup>3</sup>	Радіус лунки, мкм	Радіус буртика, мкм
1	244	10,0	1,64	2	455	11,8	1,71
3	788	13,5	2,07	4	1030	15,3	2,28
5	1152	17,0	2,34	6	1699	18,8	2,66
7	2056	20,5	2,85	8	2633	22,3	3,08
9	2886	24,0	3,20	10	3055	25,8	3,22
11	4138	27,5	3,51	12	4633	29,3	3,64
13	4920	31,0	3,63	14	5983	32,8	3,98
15	6633	34,5	4,06	16	7433	36,3	4,22
17	8889	38,0	4,47	18	9785	39,8	4,62
19	11596	41,5	4,88	20	12418	43,3	4,92
21	13913	45,0	5,14	22	15075	46,8	5,28
23	15443	48,5	5,34	24	16151	50,3	5,4

Сумарна енергія, що виділяється при пробіі міжелектродного проміжку в загальному випадку може бути розрахована за формулою:

$$A_i = \int_0^{\tau_i} U \cdot I \cdot dt \quad (3.18)$$

Для такого розрахунку необхідно мати осцилограми напруги та струму кожного імпульсу. Через те, що умови виникнення пробією міжелектродного проміжку в кожному випадку дещо відрізняються, енергетичні параметри розряду можуть несуттєво відрізнитись. В паспортних даних до генератора технологічного струму зазвичай вказують усереднене значення енергії імпульсу для кожного розряду.

Інтегральним показником електроерозійного процесу є коефіцієнт використання імпульсів. За нормального перебігу технологічного процесу цей

показник знаходиться в межах 0,7-0,85. Виходячи з коефіцієнту використання імпульсів та енергії імпульсу для відповідного режиму можна визначити енергію, яка надійшла в проміжок протягом тривалого часу, а знаючи швидкість подачі та ширину різання можливо встановити об'єм видаленого за цей час матеріалу і середній об'єм, що видалений за один імпульс.

Співвідношення енергій, що витрачаються на аноді і катоді, в каналі розряду, на теплові потоки та фазні перетворення залежить від тривалості імпульсу, співвідношення теплофізичних характеристик матеріалів анода і катода та величини міжелектродного проміжку.

Енергія, що витрачена безпосередньо на руйнування матеріалу електродів може бути розрахована через об'єми лунок та теплофізичні характеристики матеріалу:

$$\begin{aligned} Q_{\text{нагр}} &= c \cdot m \cdot \Delta T; \\ Q_{\text{плавл}} &= \lambda \cdot m; \\ Q_{\text{вип}} &= L \cdot m. \end{aligned} \quad (3.19)$$

Співвідношення між  $Q_{\text{нагр}}$ ,  $Q_{\text{плавл}}$ ,  $Q_{\text{вип}}$  визначаються параметрами імпульсів (тривалістю імпульсу, швидкість наростання та спадання фронту струму). Об'єми, та відповідно, маси матеріалу, енергії, що витрачені на фазові перетворення та нагрівання розплаву до температури випаровування можна знайти з розрахункової моделі (табл. 3.6).

Таблиця 3.6

**Розраховані об'єми фазових перетворень матеріалу аноду та мінімальна кількість енергії, що витрачена на них**

№ з/п	Енергія, що реалізується на аноді, Еа, мДж	Об'єм розплавленого матеріалу, $10^{18}$ м <sup>3</sup>	Енергія, витрачена на розплавлення, мДж	Енергія, витрачена на нагрівання розплаву, мДж	Об'єм випаровуваного матеріалу, $10^{18}$ м <sup>3</sup>	Енергія, витрачена на випаровування, мДж	Мінімально витрачена енергія, мДж
1	0,02	881	0,0014	0,0038	414	0,022	0,026
2	0,08	1520	0,0025	0,0067	728	0,038	0,047
3	0,204	2630	0,0043	0,0108	1190	0,062	0,077
4	0,383	3435	0,0056	0,0146	1600	0,083	0,103
5	0,631	3840	0,0063	0,0182	1990	0,100	0,127
6	0,955	5662	0,0093	0,0248	2710	0,140	0,174
7	1,364	6855	0,0112	0,0297	3250	0,170	0,210
8	1,865	8880	0,0145	0,0378	4140	0,210	0,267
9	2,467	9620	0,0157	0,0387	4240	0,220	0,274
10	3,176	10200	0,0167	0,0418	4580	0,240	0,296
11	4,001	13800	0,0226	0,0572	6260	0,320	0,405
12	4,95	15400	0,0253	0,0634	6940	0,360	0,448
13	6,03	16400	0,0269	0,0682	7470	0,390	0,482
14	7,249	19900	0,0327	0,0761	8330	0,430	0,541
15	8,616	22100	0,0362	0,0860	9410	0,490	0,610
16	10,138	24800	0,0406	0,1000	11400	0,590	0,737
17	11,822	29600	0,0486	0,0130	13700	0,710	0,887
18	13,677	32600	0,0534	0,0140	15100	0,780	0,973
19	15,711	38700	0,0633	0,0160	17700	0,920	1,142
20	17,931	41400	0,0678	0,0180	19200	1,000	1,241
21	20,345	46400	0,0760	0,0190	20700	1,080	1,340
22	22,961	50200	0,0823	0,0200	22400	1,160	1,450
23	25,787	51500	0,0840	0,210	22760	1,180	1,470
24	28,831	53800	0,0890	0,215	23400	1,220	1,500

В дані таблиці не внесені енергії, що витрачені на нагрівання матеріалу до температури плавлення (до 0,2% від енергії, що реалізована на аноді), енергія, що витрачена на нагрівання деталі навколо лунки та енергія, що витрачена на перегрівання випаруваного матеріалу (обмеження розрахункової моделі).

Отримані розрахунково дані експериментально можливо перевірити за макроскопічним аналізом геометрії поверхні. Як видно з (табл. 3.6) радіус буртика є співставним з глибиною лунки для кожного режиму обробки. Жодна з відомих моделей формування поверхні при електроерозійній обробці [111-112] не враховує буртика. Відповідно актуальною є проблема створення моделі формування поверхні, отриманої електроерозійним методом, з врахуванням не лише викиду матеріалу з лунки, але і застигання рідкого матеріалу по краях лунки у вигляді буртика.

### **3.2 Засади формування мікрогеометрії поверхні при електроерозійному дротяному вирізанні**

Мікрогеометричні характеристики поверхні при електроерозійній обробці формуються внаслідок перекриття лунок, що утворюються від одиничного імпульсу. Одним з показників електроерозійної обробки є коефіцієнт перекриття лунок  $\beta$ , що дорівнює відношенню радіусу лунки до відстані між лунками. Експериментальним шляхом встановлено, що  $\beta$  знаходиться в межах від 1 до 1,25 (найбільш ймовірне значення 1,1) [55].

Вважатимемо, що при електроерозійній обробці при формуванні поверхні лунки формуються при практично однакових умовах і коефіцієнт перекриття лунок, в межах обробки на одному режимі із постійною швидкістю руху дротяного електроду і швидкістю його перемотування, є сталою величиною. В цьому випадку поверхню можемо змодельовати рівномірним накладанням лунок, як показано на схемі наведеній на рис. 3.8.

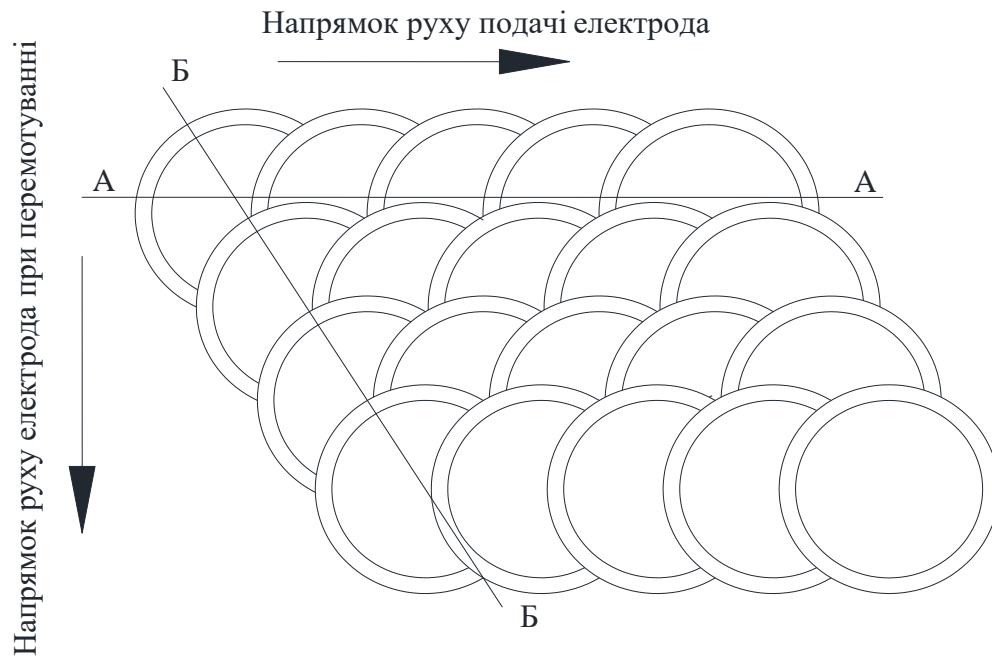


Рис. 3.8 – Схема утворення поверхні, характерної для електроерозійної обробки

На рис. 3.8 позначено напрям подачі електрода та напрям його руху при перемотуванні. Лініями А-А та Б-Б показано напрями, за якими показники шорсткості будуть максимальними.

На рис. 3.9 наведено фотографію поверхні, отриманої електроерозійним вирізанням. На ній наведені лінії А-А та Б-Б, в напрямку яких шорсткість буде максимальною.

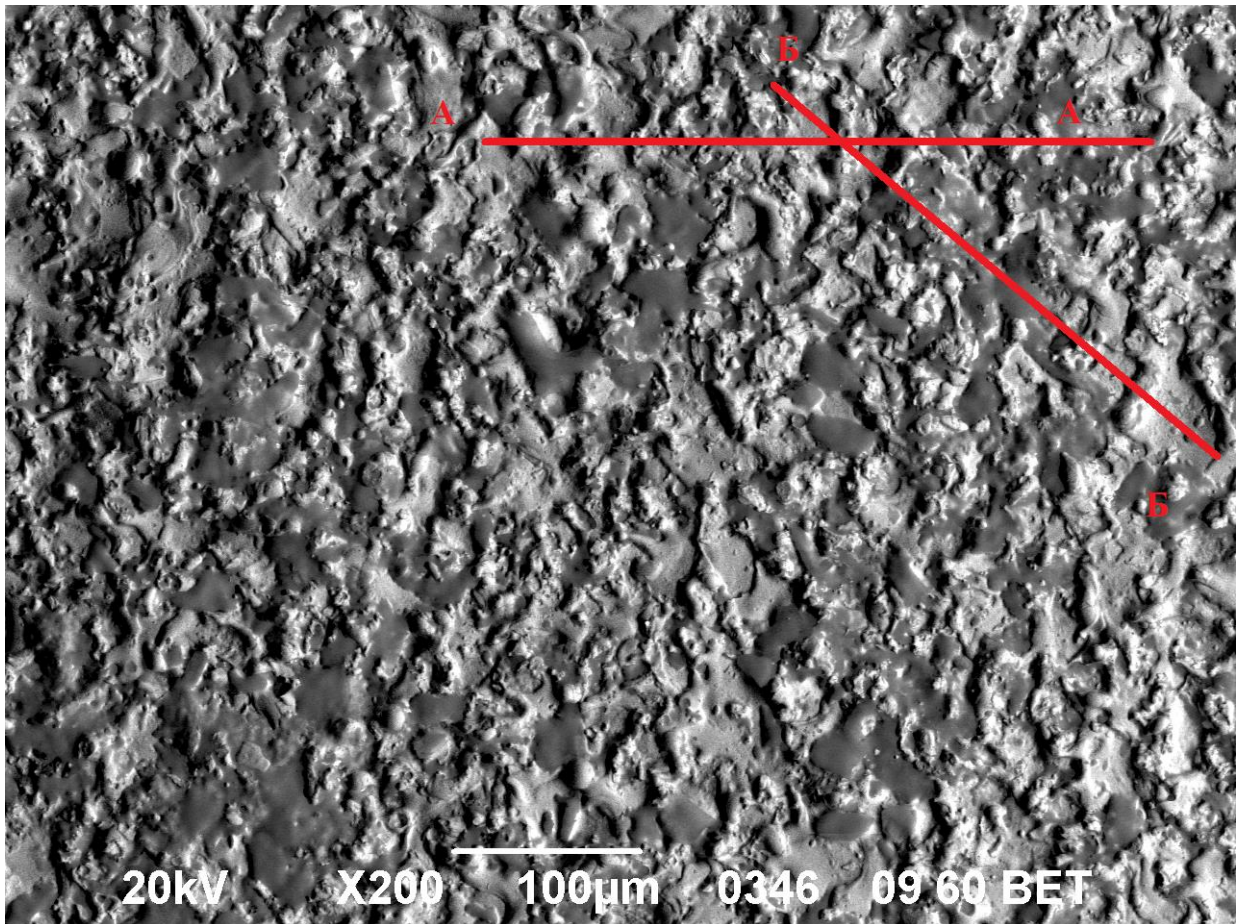


Рис. 3.9 – Фотографія поверхні деталі (Сталь 45) після електроерозійної обробки з нанесеними лініями А-А та Б-Б

Кут нахилу лінії Б-Б відносно лінії А-А залежить від коефіцієнту перекриття лунок, швидкостей подачі та перемотування дротяного електрода, тощо.

З даних розрахункової моделі видно (рис. 3.4), що форма лунки може бути приведена до трьох виглядів – циліндру, циліндру з заокругленими кряями та шарового сегменту. Крім того, на показник шорсткості впливає також буртик, що утворюється при викиді розплавленого матеріалу з лунки при схлопуванні газового пухиря. Виходячи з розрахункових даних (табл. 3.4), які підтверджуються аналізом фотографій та профілограм, висота буртика є співставною з глибиною лунки, а отже він не може бути проігнорованим в розрахунках шорсткості.

### 3.3 Методика прогнозування параметрів шорсткості при обробці сталей

Отримані результати чисельного моделювання та розрахунків, дозволяють побудувати профіль поверхні вздовж ліній А-А або Б-Б (рис. 3.9). На рис. 3.10 наведено розрахункову профілограму для режиму 1 (табл. 3.2) з врахуванням коефіцієнтів перекриття  $\beta=1,1$  (а) та  $\beta=1,2$  (б) без врахування буртика. Як видно з графіків, характер профілограми є періодичним. Отже, для розрахунку шорсткості можна розглядати лише один період з профілограми.

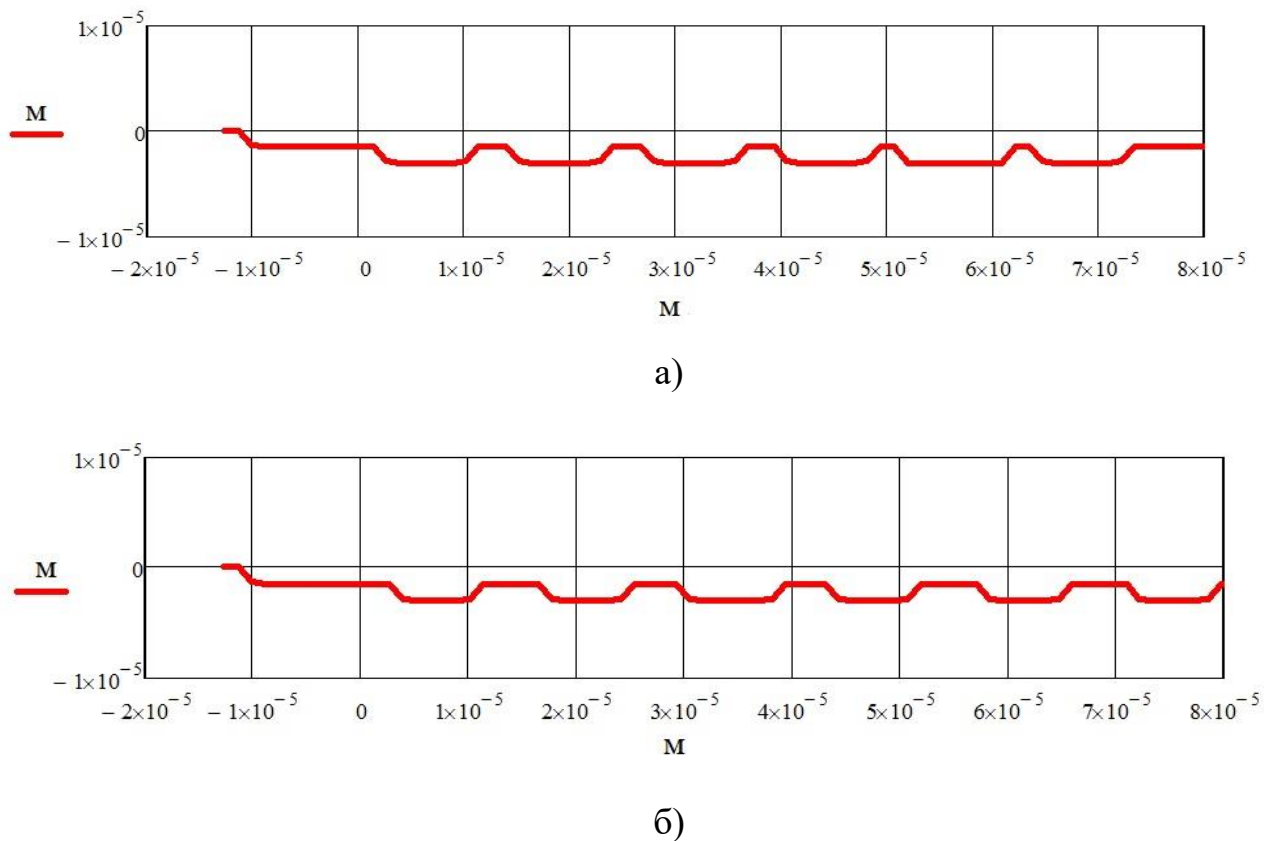


Рис. 3.10 – Форма розрахункової профілограми вздовж лінії А-А для режиму 1 (табл. 3.2): а)  $\beta=1,1$ ; б)  $\beta=1,2$

На рис. 3.11 наведено частину профілограми в межах періоду з буртиком для режимів 1 та 24,  $\beta=1,2$ .



Розрахунок показників шорсткості отриманого профілю поверхні можна провести за ДСТУ ISO 4287:2012.

Середня лінія профілю – це базова довжина, яка ділить профіль так, що суми площі обмежених лінією профілю цією лінією однакові по обидва боки.

Параметр шорсткості  $R_z$  визначається як сума середніх арифметичних абсолютних відхилень точок п'яти мінімумів та п'яти максимумів. Враховуючи періодичність профілю, цей параметр розраховують за максимумом і мінімумом в межах періоду профілю.

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}|}{5} \quad (3.20)$$

Параметр шорсткості  $R_a$  визначається як середнє арифметичне відхилення профілю і може бути визначений по точках в межах одного періоду профілю.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (3.21)$$

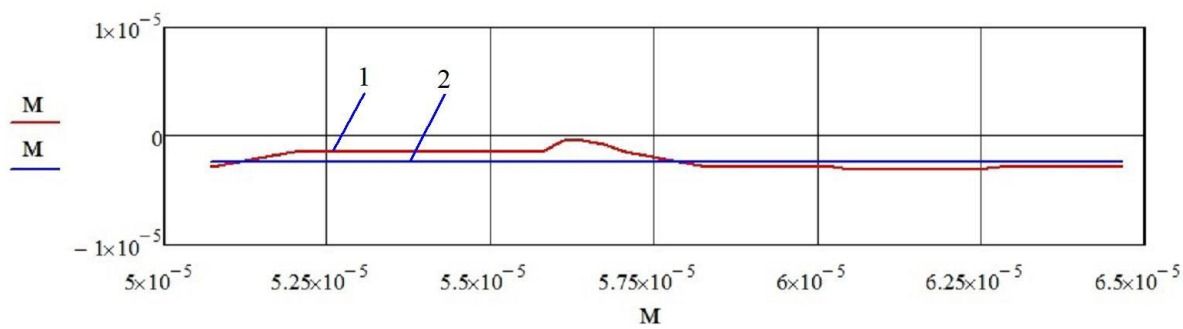
Параметр шорсткості  $R_{max}$  визначається як відстань між лінією виступів та лінією впадин профілю.

$$R_{max} = R_p + R_v \quad (3.22)$$

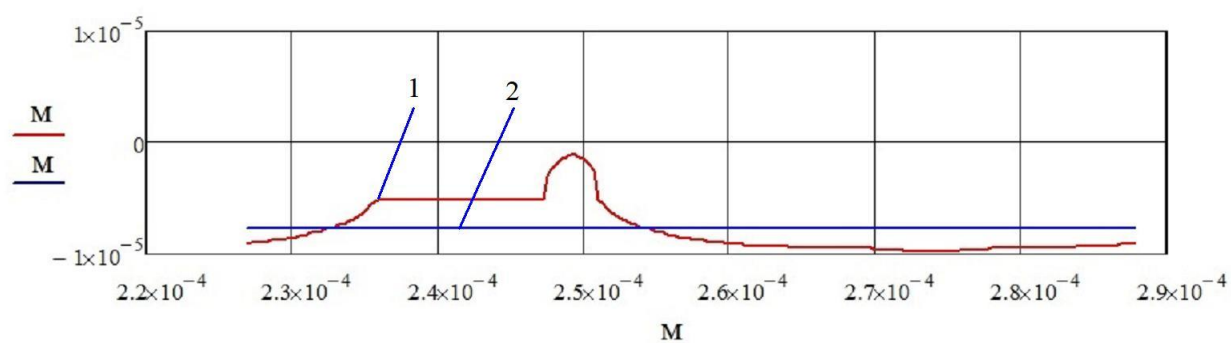
Середнє квадратичне відхилення профілю  $R_q$  визначається за формулою:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \cdot \int_0^l y^2(x) dx} \quad (3.23)$$

В таблиці 3.7 зведено розраховані за моделлю шорсткості  $R_z$ ,  $R_a$ ,  $R_q$  та дані, отримані математичною обробкою експериментальних даних по шорсткості поверхонь отриманих на різних режимах ЕЕДВ (матеріал анода Сталь 45, Сталь 48, 40X, У10, Х12М з відомими та достатньо близькими теплофізичними характеристиками, найбільш ймовірне значення коефіцієнта перекриття лунок  $\beta \approx 1,1$  ).



а)



б)

Рис. 3.11 – Розрахункова частина профілограми (1) та середня лінія профілограми (2) для режимів 1 (а) та 24 (б),  $\beta=1,2$

Таблиця 3.7

Шорсткість поверхні деталі ( $\beta \approx 1,1$ )

	$E, Дж$	$t_i, мкс$	$r_0, мкм$	$Rz$					$Ra$					$Rq$					$S$
				Результати моделювання	$f(E_0)$	Середнє квадратичне відхилення	$f(t_i)$	Середнє квадратичне відхилення	Результати моделювання	$f(E_0)$	Середнє квадратичне відхилення	$f(t_i)$	Середнє квадратичне відхилення	Результати моделювання	$f(E_0)$	Середнє квадратичне відхилення	$f(t_i)$	Середнє квадратичне відхилення	
1	2E-05	0,05	10	2,59	2,06766	0,27284	3,02747	0,19138	0,55	0,3448	0,0421	0,5864	0,0013	0,75	0,501	0,062	0,819	0,0048	11
2	8,5E-05	0,1	11,75	2,78	2,76304	0,00029	3,29316	0,26333	0,55	0,4608	0,008	0,624	0,0055	0,74	0,669	0,005	0,878	0,0189	12,9
3	0,0002	0,15	13,5	3,23	3,28847	0,00342	3,55885	0,10814	0,37	0,5484	0,0318	0,6615	0,085	0,68	0,796	0,014	0,936	0,0656	14,9
4	0,00038	0,2	15,25	3,94	3,7312	0,0436	3,82454	0,01333	0,62	0,6222	5E-06	0,6991	0,0063	0,99	0,903	0,007	0,995	2E-05	16,8
5	0,00063	0,25	17	4,04	4,12318	0,00692	4,09023	0,00252	0,89	0,6876	0,041	0,7367	0,0235	1,14	0,998	0,02	1,053	0,0076	18,7
6	0,00096	0,3	18,75	4,55	4,48014	0,00488	4,35592	0,03767	0,76	0,7471	0,0002	0,7742	0,0002	1,13	1,085	0,002	1,111	0,0003	20,6
7	0,00136	0,35	20,5	4,94	4,81111	0,01661	4,62161	0,10137	0,86	0,8023	0,0033	0,8118	0,0023	1,23	1,165	0,004	1,17	0,0036	22,6
8	0,00187	0,4	22,25	5,32	5,12184	0,03927	4,88731	0,18722	0,89	0,8541	0,0013	0,8493	0,0017	1,34	1,24	0,01	1,228	0,0125	24,5
9	0,00247	0,45	24	4,97	5,41622	0,19911	5,153	0,03349	0,83	0,9032	0,0054	0,8869	0,0032	1,23	1,311	0,007	1,287	0,0032	26,4
10	0,00318	0,5	25,75	5,79	5,69703	0,00864	5,41869	0,13787	1,05	0,9501	0,01	0,9244	0,0158	1,48	1,379	0,01	1,345	0,0182	28,3
11	0,004	0,55	27,5	6,12	5,96634	0,02361	5,68438	0,18977	1,12	0,995	0,0156	0,962	0,025	1,57	1,445	0,016	1,404	0,0277	30,3
12	0,00495	0,6	29,25	6,22	6,22572	3,3E-05	5,95007	0,07286	1,12	1,0382	0,0067	0,9996	0,0145	1,58	1,507	0,005	1,462	0,0139	32,2
13	0,00603	0,65	31	6,13	6,47642	0,12	6,21576	0,00736	1,32	1,08	0,0576	1,0371	0,08	1,65	1,568	0,007	1,52	0,0168	34,1
14	0,00725	0,7	32,75	6,51	6,71944	0,04386	6,48145	0,00081	0,98	1,1206	0,0198	1,0747	0,009	1,51	1,627	0,014	1,579	0,0047	36
15	0,00862	0,75	34,5	6,79	6,95558	0,02742	6,74714	0,00184	1,18	1,1599	0,0004	1,1122	0,0046	1,71	1,684	7E-04	1,637	0,0053	38
16	0,01014	0,8	36,25	7,02	7,18554	0,0274	7,01284	5,1E-05	1,18	1,1983	0,0003	1,1498	0,0009	1,71	1,74	9E-04	1,696	0,0002	39,9
17	0,01182	0,85	38	7,36	7,40988	0,00249	7,27853	0,00664	1,13	1,2357	0,0112	1,1873	0,0033	1,73	1,794	0,004	1,754	0,0006	41,8
18	0,01368	0,9	39,75	7,61	7,62907	0,00036	7,54422	0,00433	1,12	1,2722	0,0232	1,2249	0,011	1,75	1,847	0,009	1,813	0,0039	43,7
19	0,01571	0,95	41,5	7,79	7,84353	0,00287	7,80991	0,0004	1,22	1,308	0,0077	1,2625	0,0018	1,86	1,899	0,002	1,871	0,0001	45,6
20	0,01793	1	43,25	8,02	8,05363	0,00113	8,0756	0,00309	1,33	1,343	0,0002	1,3	0,0009	1,94	1,95	1E-04	1,93	0,0001	47,6
21	0,02034	1,05	45	8,21	8,25968	0,00247	8,34129	0,01724	1,36	1,3774	0,0003	1,3376	0,0005	1,97	2	9E-04	1,988	0,0003	49,5
22	0,02296	1,1	46,75	8,54	8,46195	0,00609	8,60698	0,00449	1,28	1,4111	0,0172	1,3751	0,009	1,98	2,049	0,005	2,046	0,0044	51,4
23	0,02579	1,15	48,5	8,69	8,66069	0,00086	8,87268	0,03337	1,28	1,4443	0,027	1,4127	0,0176	2,02	2,097	0,006	2,105	0,0072	53,4
24	0,02883	1,2	50,25	8,83	8,85612	0,00068	9,13837	0,09509	1,45	1,4769	0,0007	1,4502	5E-08	2,1	2,144	0,002	2,163	0,004	55,3

Математична обробка отриманих даних дозволила встановити залежність величини шорсткості поверхні від енергії, що витрачена на аноді та тривалості імпульсів. Розрахунки проведені для конструкційних та інструментальних сталей Сталь 45, Сталь 48, 40Х, У10, Х12М з відомими та достатньо близькими теплофізичними характеристиками.

$$R_{max} = R_z = k_\beta \cdot \sqrt[5]{E_a}. \quad (3.24)$$

Залежність  $R_z$  від тривалості імпульсу в межах похибки 3% можна описати рівнянням:

$$R_{max} = R_z = -2,36 \cdot t_i^2 + 9,07 \cdot t_i + 2,46. \quad (3.25)$$

Слід зазначити, що спостерігається залежність  $R_z$  від  $\beta$ . Якщо показники шорсткості для  $\beta=1,1$  прийняти за  $k_\beta=1$ , то для  $\beta=1,15$  відповідні значення необхідно помножити на  $k_\beta=0,992$ , для  $\beta=1,2-k_\beta=0,981$ , для  $\beta=1,25-k_\beta=0,97$ . Це пояснюється самим визначенням  $R_z$  – це середнє арифметичне суми 5 максимальних виступів і 5 максимальних впадин. З точки зору даної побудови від  $\beta$  вони не залежать. Незначне відхилення пов'язане з тим, що дно лунки не горизонтальне і при накладанні одиничних лунок одна на іншу глибина впадин зменшується.

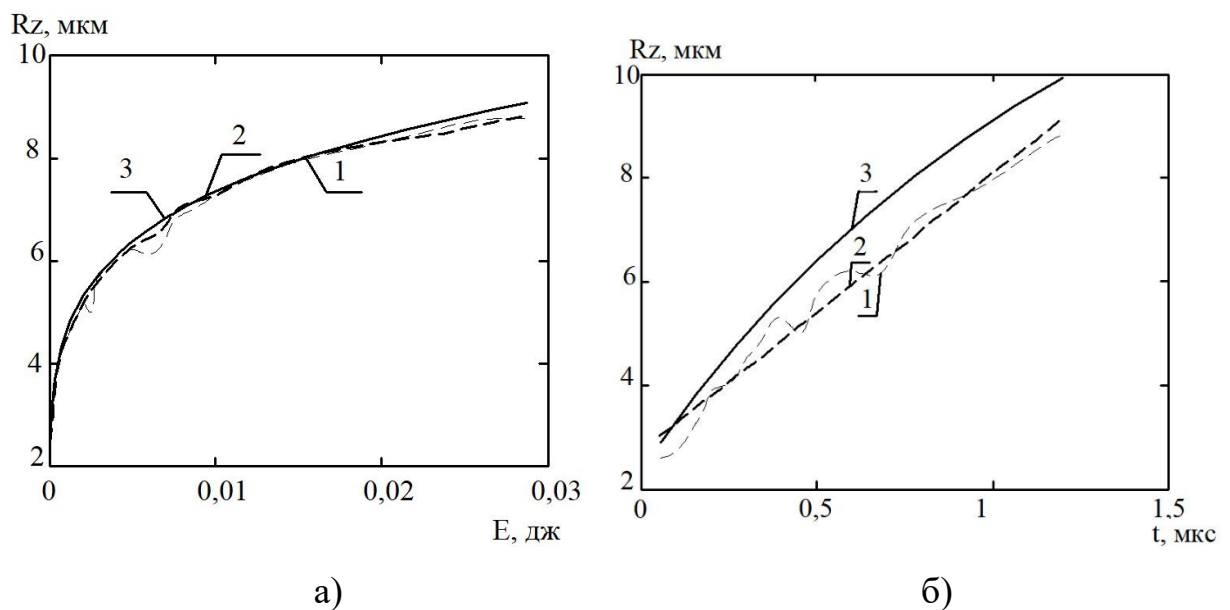


Рис. 3.12 – Залежність параметра шорсткості  $R_z$  від енергії розряду, що реалізується на аноді (а) та тривалості імпульсу (б):

1 –  $R_z$  за моделлю; 2 –  $R_z$  за експериментальними даними; 3 –  $R_z$  за рівняннями (3.24) та (3.25); (матеріал анода Сталь 45, Сталь 48, 40X, У10, Х12М)

Залежність показника шорсткості  $R_a$  від енергії, що витрачена на аноді може бути описана формулою:

$$R_a = 20,7 \cdot k_a \cdot k_\beta \cdot \sqrt[5]{E_a}, \quad (3.26)$$

де  $k_a$  – коефіцієнт, що пов'язує параметри шорсткості  $R_z$  та  $R_a$  з коефіцієнтом перекриття (5,73 - при  $\beta=1,1$ ; 5,05 - при  $\beta=1,15$ ; 4,77 - опθ  $\beta=1,2$ ; 4,69 - при  $\beta=1,22$ ).

Залежність  $R_a$  від тривалості імпульсу та коефіцієнту перекриття лунок можна описати загальною формулою:

$$\begin{aligned} R_a = & (3,81 \cdot \beta^2 - 9,87 \cdot \beta + 5,66) \cdot t_i^2 + \\ & + (-14,2 \cdot \beta^2 + 36,87 \cdot \beta - 21,7) \cdot t_i + \\ & (-6,79 \cdot \beta^2 + 16,5 \cdot \beta - 9,47), \end{aligned} \quad (3.27)$$

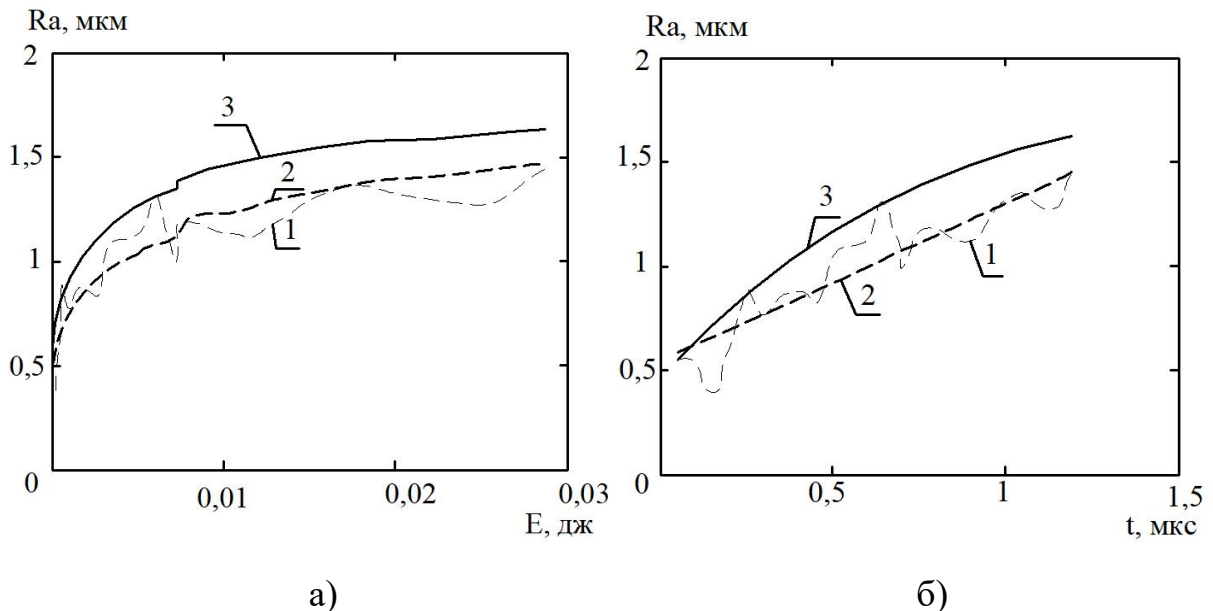


Рис. 3.13 – Залежність параметра шорсткості  $R_a$  від енергії розряду, що реалізується на аноді (а) та тривалості імпульсу (б):

1 –  $R_a$  за моделлю; 2 –  $R_a$  за експериментальними даними; 3 –  $R_a$  за рівняннями (3.26) та (3.27); (матеріал анода Сталь 45, Сталь 48, 40X, У10, Х12М)

Залежність показника шорсткості  $R_q$  від енергії, що витрачена на аноді може бути описана формулою:

$$R_q = 20,7 \cdot k_q \cdot k_\beta \cdot \sqrt[5]{E_a}, \quad (3.28)$$

де  $k_q$  - коефіцієнт, що пов'язує параметри шорсткості  $R_z$  та  $R_q$  з коефіцієнтом перекриття (0,256 - при  $\beta=1,1$ ; 0,2625 - при  $\beta=1,15$ ; 0,26 - при  $\beta=1,2$ ; 0,27 - при  $\beta=1,25$ ).

Залежність  $R_q$  від тривалості імпульсу можна описати загальною формулою:

$$R_q = -0,76 \cdot t_i^2 + 2,46 \cdot t_i + 0,7, \quad (3.29)$$

Залежності показника шорсткості  $R_q$  від коефіцієнту перекриття лунок не виявлено.

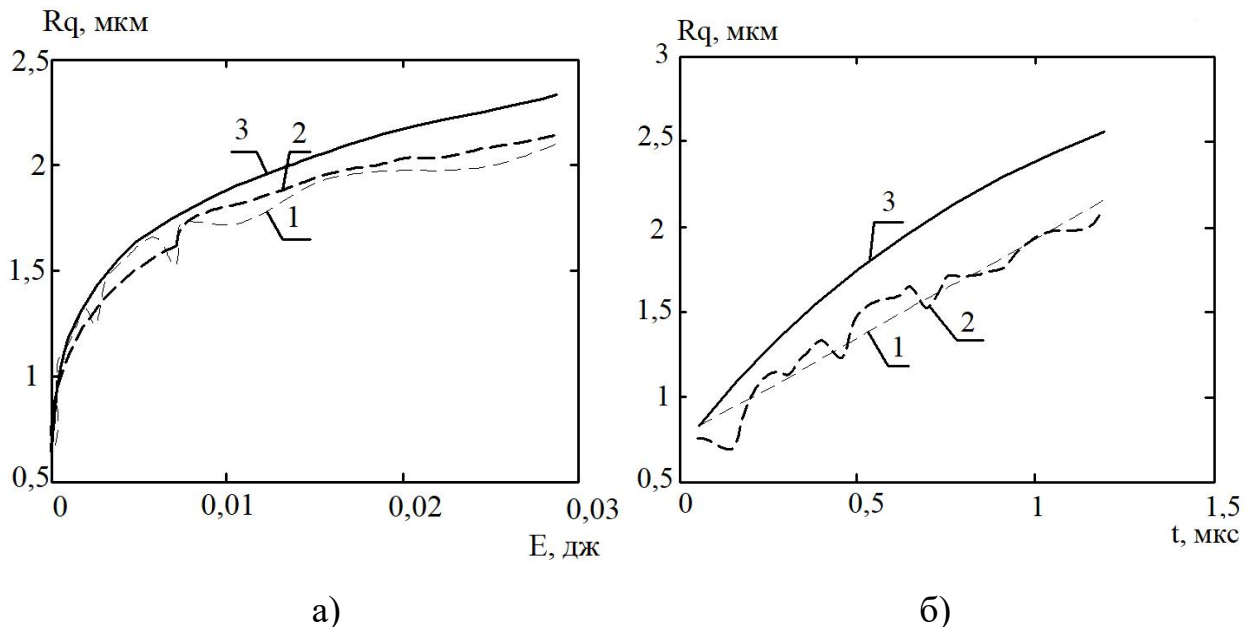


Рис. 3.14 – Залежність параметра шорсткості  $R_q$  від енергії розряду, що реалізується на аноді (а) та тривалості імпульсу (б):

1 –  $R_q$  за моделлю; 2 –  $R_q$  за експериментальними даними; 3 –  $R_q$  за рівняннями (3.28) та (3.29); (матеріал анода Сталь 45, Сталь 48, 40X, У10, Х12М)

Як видно з отриманих формул, залежності показників шорсткості  $R_z$ ,  $R_a$ ,  $R_q$  від енергії, що виділилась на аноді можна за допомогою коефіцієнтів до однієї формули:

$$R_R = 20,7 \cdot k_R \cdot k_\beta \cdot \sqrt[5]{E_a}, \quad (3.30)$$

де  $R - \{z, a, q\}$  (вважатимемо, що  $k_z = 1$ ).

Всі формули, що описують залежність шорсткості від тривалості імпульсу носять квадратичний характер з відповідними коефіцієнтами.

### **3.4 Вібрації дротяного електрода як окремий чинник впливу на формування мікрогеометрії оброблених поверхонь**

Теоретичний аналіз та експериментальні дослідження загальної картини силового навантаження дротяного електрода в умовах електроерозійного вирізання, дозволили визначити вплив фізико-технологічних умов обробки на характер деформації дротяного електрода, зокрема на параметри його коливань. Припускається, що вирішальним чинником збурення коливань дротяного електрода, являється силова дія тиску в каналах робочих розрядів.

Таким чином, керований вплив на силові характеристики робочих розрядів, дозволить досягти найбільш вигідних параметрів коливань дротяного електрода, з метою досягнення високих показників точності та якості обробки. При цьому, необхідно більш детально підійти до вивчення характеру коливань ДЕІ в умовах обробки у відкритому пазу, зважаючи на наступні фактори:

1. Обробка у відкритому пазу проводиться на фінальних, доводочних операціях і характеризується підвищеними вимогами щодо точності формоутворення та якості обробленої поверхні.

2. Як видно з рис. 3.15, силове навантаження на ДЕІ, при обробці у відкритому пазу, є несиметричним. Відповідно, умови силового навантаження більш сприяють поперечним коливанням ДЕІ, які в кінцевому випадку і визначають характер формоутворення поверхні деталі.

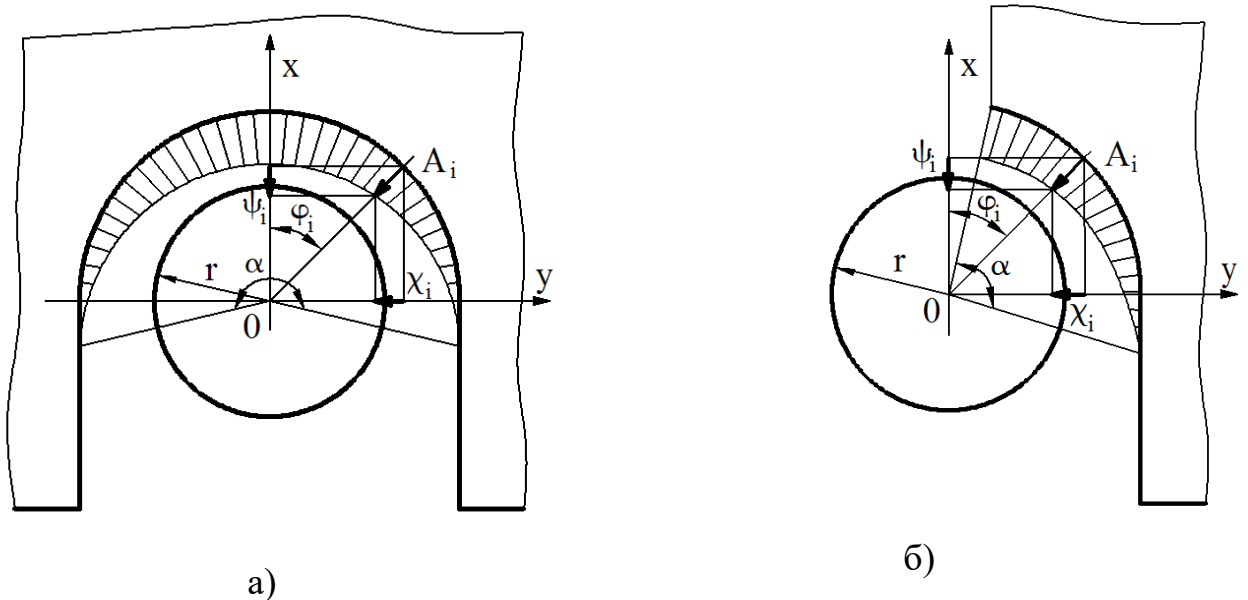


Рис. 3.15 – Схема силової дії розрядних імпульсів струму ДЕІ за використання режимів (а) повного та (б) неповного зйому

До теперішнього часу, дослідження, присвячені визначенню кількісного та якісного впливу параметрів силової дії робочих розрядів на характер деформації дротяного електроду, проводились лише в контексті виникнення прогину дротяного електроду. Навантаження дротяного електроду від дії робочих розрядів розглядалось при цьому як середньо-інтегральне зусилля.

Необхідно зазначити, такий підхід не дозволяє в повній мірі описати характер поведінки дротяного електроду в умовах ЕЕДВ. Робочі розряди існують лише короткий проміжок часу, в порівнянні з періодом імпульсів. Типовим співвідношенням є довжина імпульсів 2 мкс, при періоді імпульсів 50 мкс. Таким чином, періодичне силове навантаження ДЕІ, внаслідок дії робочих розрядів, стимулює вимушені коливання дротяного електроду. При



цьому, параметри коливань ДЕІ, насамперед амплітуда коливань, залежать від характеру силового навантаження, від дії робочих розрядів.

Основними факторами, які визначають силову дію робочих розрядів є потужність і тривалість робочих імпульсів, а також величина міжелектродного проміжку. Важливим технологічним параметром, який визначає рівень енергетичного навантаження в МЕП, є швидкість подачі. Швидкість подачі в процесі обробки регулюється оператором за рахунок варіювання величини коефіцієнту використання імпульсів, в межах 0,3 - 0,7.

Для більш повного визначення кількісних і якісних залежностей параметрів коливань дротяного електроду, від енергетично-часових характеристик робочих імпульсів, необхідне проведення досліджень в процесі електроерозійного вирізання.

Експериментальні дослідження впливу силового навантаження робочих розрядів на параметри коливань ДЕІ, виконувались на верстаті СЕЛД-02 при обробці дослідної деталі. При цьому, фіксувались показники частоти, напруги та струму робочих імпульсів, амплітуда та частота коливань дротяного електроду.

Враховуючи неможливість безпосередньої реєстрації в процесі обробки, показники тиску в каналі розряду, а також величина силового впливу робочих розрядів, розраховувались за допомогою математичної моделі (п.3.1.), на основі експериментальних даних про енергетичні та часові параметри робочих імпульсів.

В процесі виконання експериментальних досліджень, здійснено ряд різів, при цьому варіювались енергетичні режими генератора, що дозволило встановити принципові особливості впливу енергетичних параметрів імпульсів на умови виникнення та перебігу коливань дротяного електроду. Дослідження параметрів коливань ДЕІ, проводились за методикою наведеною в п. 2.2.5. Похибка вимірювань оцінювалась за критерієм Стюдента (п. 2.2.1.) і становить 4.8 %. Результати комплексних досліджень наведено в табл. 3.8.

Результати досліджень дозволяють стверджувати, що енергетичні параметри робочих розрядів, впливають, в більшій мірі, на амплітуду коливань дротяного електроду. Частота коливань, при всіх енергетичних режимах генератора імпульсів, залишалась практично незмінною і знаходилась в межах, що визначаються властивостями самого дротяного електроду, його довжиною та натягом.

Таблиця 3.8

**Вплив амплітудно-частотних характеристик розрядів та рівнів виділення енергії в МЕП на параметри коливань ДЕІ та мікрогеометрію утворених поверхонь  
(CobraCutB Ø 0.15 мм, розхил скоби 40 мм, зусилля натягу ДЕІ 6 Н)**

Прохід №	Код режиму	Тривалість імпульсу	Частота слідування імпульсів, кГц	Амплітудне значення струму, А	Енергія імпульсуЕі, мДж	Тиск в каналі розряду, МПа	Силоне навантаження від дії тиску в каналі одиночного розряду, Н	Частота коливань дротяного електроду, Гц при різних значеннях коефіцієнту використання імпульсів (k <sub>i</sub> )			Середня амплітуда коливань дротяного електроду, мкм при різних значеннях коефіцієнту використання імпульсів (k <sub>i</sub> )			Шорсткість обробленої поверхні Ra, мкм при різних значеннях коефіцієнту використання імпульсів (k <sub>i</sub> )		
								k <sub>i</sub> =0.3	k <sub>i</sub> =0.5	k <sub>i</sub> =0.7	k <sub>i</sub> =0.3	k <sub>i</sub> =0.5	k <sub>i</sub> =0.7	k <sub>i</sub> =0.3	k <sub>i</sub> =0.5	k <sub>i</sub> =0.7
2	21	3,2	22	60	8,53	54,38	15,56	670	680	680	17	20	23	3.0	3.3	3.5
3	34	2,5	44	50	7,88	43,25	12,36	720	720	720	15	17	19	2.4	2.6	2.9
4	32	2,5	44	30	4,37	35,82	9,51	710	710	720	12	14	16	2.1	2.4	2.6
5	54	1,2	200	20	1,88	20,75	6,08	700	700	710	9	11	13	1.7	1.8	2.0
6	52	1,2	200	12	1,13	13,62	4,22	690	690	700	8	9	10	1.1	1.3	1.5
7	51	1,2	200	10	0,75	8,20	2,54	690	700	700	7	8	9	0.8	1.0	1.1

Отримані результати дозволяють стверджувати, що збільшення енерговиділення в МЕП призводить до підвищення амплітуди коливань ДЕІ. Частота коливань, на досліджених режимах енерговиділення, залишалась

практично незмінною і знаходилась в межах, що визначаються фізико-механічними та геометричними властивостями самого ДІЕІ.

На рис. 3.16. представлено експериментальні графіки залежності впливу силового навантаження від дії тиску в каналі одиничного розряду та рівня енерговиділення в МЕП на амплітуди коливань дротяних електродів.

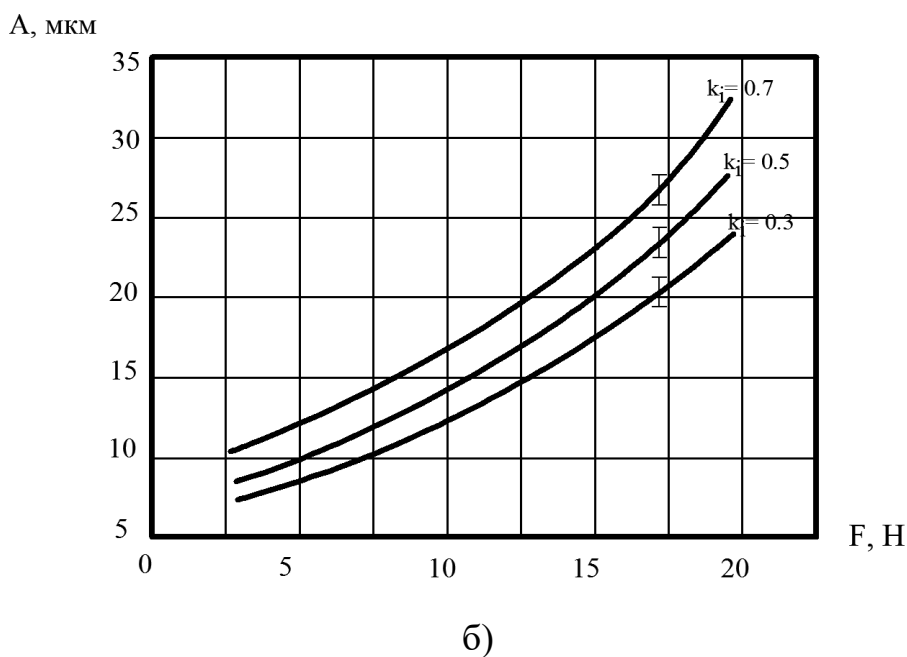
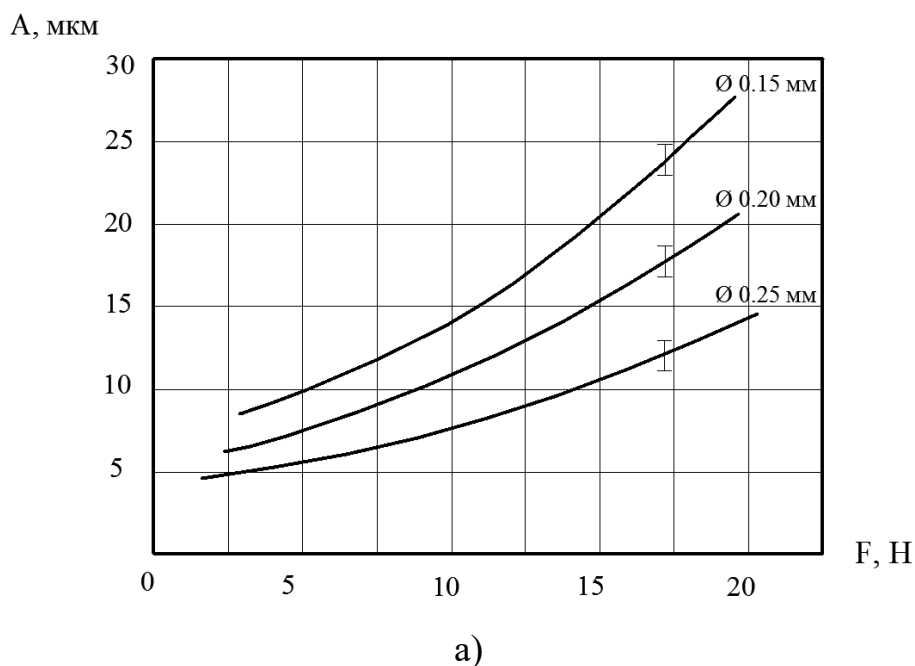


Рис. 3.16 – Вплив силового навантаження від дії тиску в каналі одиничного розряду та рівня енерговиділення в МЕП на амплітуди коливань дротяних електродів (ДІЕІ CobraCut В): а) при варіюванні

діаметру ДЕІ, за умов фіксованого коефіцієнта використання імпульсів  $k_i=0.5$ ; б) при варіюванні коефіцієнта використання імпульсів (ДЕІ Ø 0.15мм).

Враховуючи отримані результати, можливо зробити висновок, що для мінімізації впливу коливань ДЕІ на формування мікрогеометрії поверхонь, варто (зберігаючи необхідний для продуктивності процесу рівень енерговиділення в МЕП) орієнтуватися на більш високочастотні режими з меншою енергією одиничного розряду.

### **3.5 Вплив коливань дротяного електрода на стабільність процесу різання та мікрогеометрію утворених поверхонь**

Однією з характерних особливостей формоутворення поверхні при електроерозійному дротяному вирізанні, є виникнення так званої «хвилястості» – послідовності паралельних боріздок. Шляхом теоретичних досліджень встановлено, що виникнення спотворень обробленої поверхні подібного типу, можливе лише внаслідок нестабільного характеру умов ЕЕДВ. На рис. 3.17. показано фотознімок поверхні деталі, отриманої методом ЕЕДВ, на якому видно характерну картину мікронерівностей поверхні.



Рис. 3.17 – Фотознімок поверхні деталі, отриманої методом ЕЕДВ. ( $\times 10$ )

Для визначення шляхів підвищення якості обробленої поверхні, необхідно розглянути основні фактори, що негативно впливають на стабільність процесу електроерозійного руйнування металу при ЕЕДВ.

1. *Нестабільність енергетичних параметрів обробки.* Генератор імпульсів, є основним каналом регулювання енергетичних й часових параметрів імпульсів. Керування процесом виділення енергії відбувається за рахунок застосування адаптивних систем керування. Оскільки, параметри одиничного імпульсу визначають шорсткість поверхні та знос інструмента і деталі, то середній струм обробки регулюють шляхом зміни пауз між імпульсами. Існуючі технічні рішення дозволили значно підвищити ККД сучасних генераторів, для керування якими використовують швидкодіючі мікропроцесорні блоки, що контролюють амплітуду й тривалість імпульсу, та значно підвищують стабільність енергетичних параметрів в процесі ЕЕДВ.

Крім того, енергетичні умови в МЕР, безпосередньо, потужність робочих розрядів, залежить від відстані між електродами. В умовах швидкоплинних процесів коливань ДЕІ, відбувається періодична, короткочасова зміна величини міжелектродного проміжку. При цьому, адаптивна система керування електроерозійним верстатом не встигає своєчасно реагувати на зміну величини МЕР. Відповідно, періодичні зміни величини МЕР призводять до нестабільності умов протікання процесу електроерозійного руйнування матеріалу заготовки, насамперед нестабільності балансу енергії одиничного іскрового розряду.

Так, при зближенні дротяного електроду з деталлю, зменшується кількість холостих імпульсів, проте спадає середня напруга розрядів. При віддаленні ДЕІ, зменшується частка робочих розрядів, проте зростає їх напруга [48].

$$U = E \cdot \delta, \quad (3.31)$$

де  $E$  – напруженість електричного поля в МЕР;  $\delta$  – величина МЕР.

2. *Колівання ДЕІ внаслідок люфту напрямних.* У вирізних електроерозійних дротяних верстатах великий вплив на продуктивність і точність обробки мають параметри системи направлення ДЕІ. Функція напрямних – утримання натягнутого з заданим зусиллям ДЕІ у строго

визначеному положенні, мінімізація коливань дроту, стабілізація його положення в просторі, при напрямку вирізання, що змінюється.

Виходячи з наведеного, до системи направлення ДЕІ ставляться такі вимоги: стабільна фіксація з мінімальною амплітудою коливань; мінімальна величина сили тертя при переміщенні дроту. Мінімізація похибок утворення геометрії стінок паза, за рахунок модернізації системи напрямних, детально досліджена в роботах [113-118]. Велике розмаїття конструктивних та технологічних рішень в розробках сучасних систем направлення, дозволило в значній мірі мінімізувати люфт ДЕІ.

*3. Коливання дротяного електроду, зумовлені відтискаючою дією робочих розрядів.* Силовий вплив іскрових розрядів на дротяний електрод виступає у вигляді зосередженої (через незначну величину розмірів каналу розряду у порівнянні з довжиною електрода), імпульсної (через незначний термін часу дії розрядів в порівнянні з мінімальним періодом коливань дротяного електроду), періодичної в часі, сили з періодом, обумовленим частотою, що задає генератор робочих імпульсів. В процесі коливань, дротяний електрод з певною періодичністю наближається і віддаляється від стінок пазу. Відповідно, рівень ерозії матеріалу оброблюваної деталі залежить від положення дротяного електроду, що підтверджує попередні дослідження [13, 118-120].

Таким чином, можна припустити, що вирішальний вплив на утворення «хвилястості» стінок пазу, справляють коливання дротяного електроду. Встановлення кількісних і якісних закономірностей впливу коливань ДЕІ, на формування мікрорельєфу обробленої поверхні, дозволить ще на етапі обробки прогнозувати шорсткість поверхні деталі і, в разі необхідності, своєчасно приймати відповідні заходи з метою покращення результатів обробки.

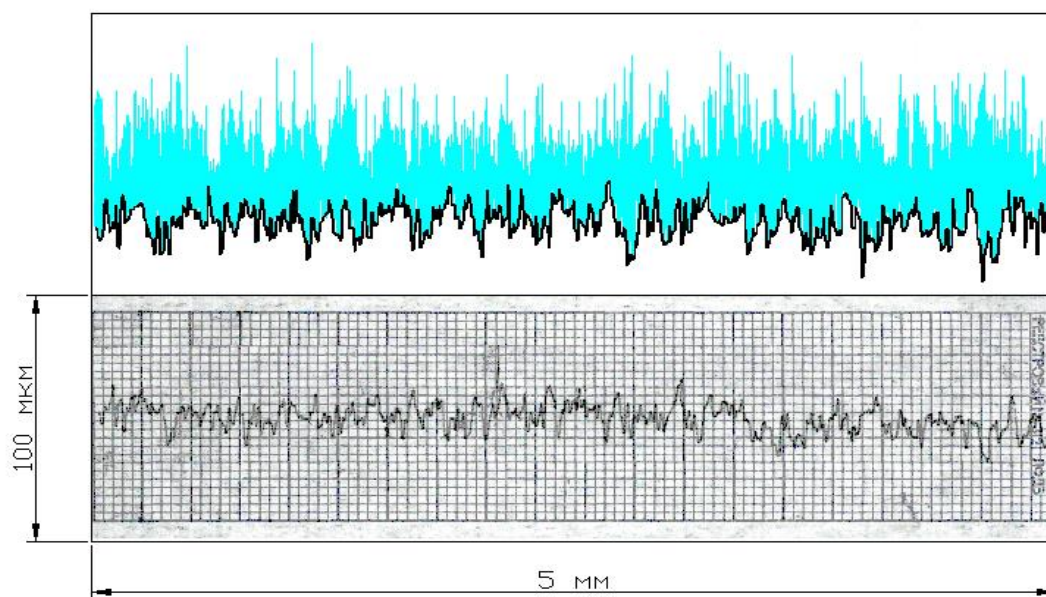
### **3.6 Результати експериментальних досліджень впливу частоти та амплітуди коливань дротяного електрода на шорсткість оброблених поверхонь**

Для визначення залежності якості обробленої поверхні від параметрів коливань, виконано ряд дослідних різів.

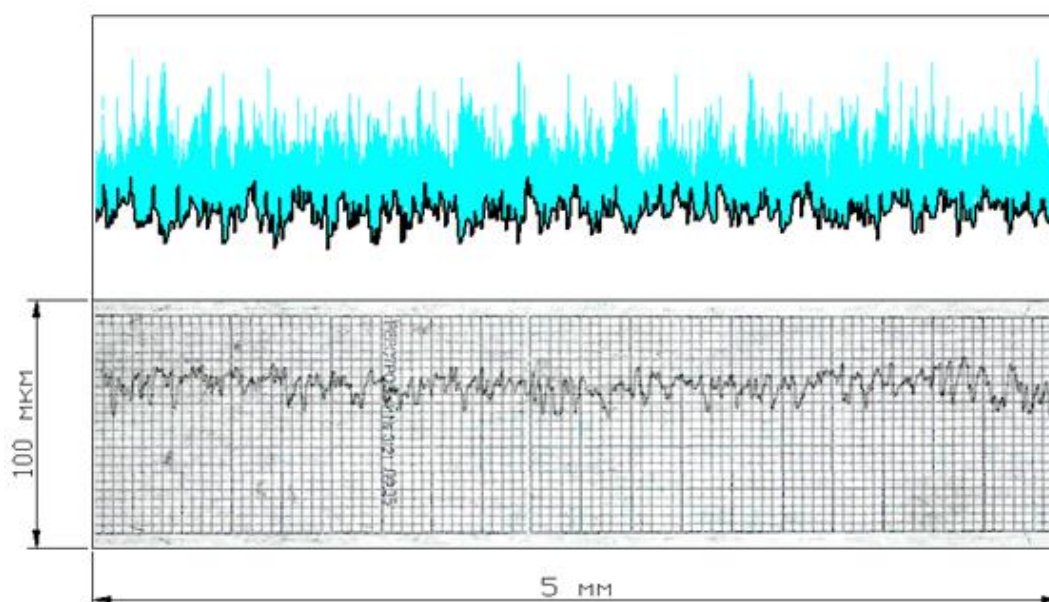
Експериментальне дослідження впливу коливань дротяного електроду на формування макрорельєфу поверхні оброблюваної деталі, проводилося за методикою, представленою у п.2.2.5. В результаті досліджень, отримані співвідношення часового розподілу амплітуди коливань дротяного електроду та макрорельєфу поверхонь досліджуваних зразків, для найбільш типових технологічних режимів обробки та геометрії різання.

На рис. 3.18. представлено найбільш характерні зразки кореляції профілограм рельєфу обробленої поверхні і осцилограм коливань дротяного електроду.

Співставлення осцилограм, що описують коливання дротяного електроду в процесі вирізання, з профілографами оброблених поверхонь, дозволяє встановити кореляційний зв'язок між траєкторією руху ДЕІ і характером формоутворення стінок пазу. Зі збільшенням амплітуди коливань дротяного електроду, відповідним чином зростає висота виступів та середній крок макронерівностей оброблюваної поверхні. Зі збільшенням частоти коливань, висота виступів та середній крок макронерівностей зменшується завдяки більш рівномірному розподілу впливу робочих розрядів на оброблювану поверхню.



а)



б)

Рис. 3.18 – Зразки осцилограм коливань ДЕІ в процесі обробки і відповідні профілограми отриманої поверхні:

а) технологічний режим 2.2; б) технологічний режим 3.4.

Основні експериментальні залежності шорсткості обробленої поверхні від частоти та амплітуди коливань ДЕІ для різних технологічних режимів наведено в табл. (3.9 –3.11).



Таблиця 3.9

**Залежність шорсткості поверхні деталі (Ra, мкм), від параметрів  
коливань дрютяного електроду в умовах ЕЕДВ.**

Код режиму 2-1

Частота коливань ДЕІ, Гц Амплітуда коливань ДЕІ, мкм	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
	Шорсткість обробленої поверхні, Ra, мкм								
5	3.5	2.4	2.2	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
10	3.9	3.1	2.7	2.5'	2.3	2.1	2.0	2.0	2.0
15	4.5	3.9	3.8	3.0	3.1	2.8	2.2	2.2	-
20	5.4	4.6	4.2	3.6	3.5	3.2	2.9	2.8	-
25	6.5	5.5	5.2	4.5	3.9	3.3	3.0	-	-
30	7.0	6.1	5.9	5.3	4.3	3.8	3.4	-	-

Таблиця 3.10

**Залежність шорсткості поверхні деталі (Ra, мкм), від параметрів  
коливань дрютяного електроду в умовах ЕЕДВ.**

Код режиму 3-4

Частота коливань ДЕІ, Гц Амплітуда коливань ДЕІ, мкм	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
	Шорсткість обробленої поверхні, Ra, мкм								
5	2.8	2.4	2.1	1.8	1.7	1.6	1.5	1.5	1.5
10	3.3	2.7	2.3	2.1	2.0	1.8	1.7	1.7	1.6
15	3.7	3.2	2.9	2.7	2.3	2.0	1.9	1.9	-
20	4.6	3.9	3.4	3.1	2.8	2.4	2.3	2.2	-
25	5.2	4.8	4.2	3.9	3.4	3.1	3.0	-	-
30	5.4	5.2	4.9	4.6	3.9	3.4	3.3	-	-

Таблиця 3.11

**Залежність шорсткості поверхні деталі (Ra, мкм), від параметрів  
коливачь дротяного електроду в умовах ЕЕДВ.**

Код режиму 5-2

Частота коливачь ДЕІ, Гц Амплітуда коливачь ДЕІ, мкм	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
	Шорсткість обробленої поверхні, Ra, мкм								
5	1.5	1.3	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7
10	2.0	1.8	1.7	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.1
15	2.7	2.4	2.2	1.9	1.7	1.6	1.5	1.4	1.4
20	3.1	2.8	2.5	2.3	2.1	1.9	1.8	1.7	1.6
25	3.5	3.2	2.9	2.6	2.4	2.2	2.1	2.0	1.9
30	3.7	3.4	3.1	2.8	2.6	2.3	2.2	2.1	2.1

Експериментальні дослідження показали, що при зростанні середньої амплітуди коливачь, шорсткість поверхні зростає. Погіршення якості поверхні зумовлено тим, що при збільшенні амплітуди коливачь, дротяний електрод віддаляється від оброблюваної поверхні, збільшуючи частку холостих імпульсів. Таким чином, при періодичних віддаленнях дротяного електроду на максимальну відстань, в процесі коливачь, ефективність ерозійного руйнування значно знижується, призводячи до виникнення виступів і впадин рельєфу стінок пазу.

При зростанні частоти коливачь, якість поверхні покращується. Зменшення шорсткості обробленої поверхні, при зростанні частоти коливачь дротяного електроду, пояснюється наступними причинами :

1. При зростанні частоти коливачь, зменшується швидкість затухання коливачь, відповідно знижуючи складову хвилястості поверхні, що викликана непостійністю амплітуди коливачь.
2. При зростанні частоти коливачь, збільшується рівномірність електроерозійного руйнування металу стінок пазу. В процесі

досліджень встановлено, що при цьому також спостерігається зменшення впливу величини амплітуди коливань на шорсткість поверхні.

3. З аналізу попередніх досліджень [122-127], можна зробити припущення, що збільшення частоти коливань дротяного електроду сприяє покращенню умов промивки, які позитивно впливають на якість обробки.

### **3.7 Математична статистична модель для розрахунку впливу коливань дротяного електроду на шорсткість оброблених поверхонь**

Таким чином, завдяки результатам проведених досліджень, можна зробити висновок про безпосередній вплив коливань дротяного електроду на формування рельєфу оброблюваної поверхні. Відповідно, існує можливість, впливаючи на умови виникнення коливань ДЕІ, мінімізувати негативний вплив коливань на точність та шорсткість поверхні оброблених деталей.

Для практичного використання результатів досліджень, необхідно розробити методику математичного розрахунку і прогнозування якості обробленої деталі, на основі наявних даних про параметри коливань дротяного електроду.

Розробка математичної моделі формоутворення поверхні при електроерозійному дротяному вирізанні ускладнена, внаслідок неможливості адекватного опису всіх фізичних процесів, що супроводжують електроерозійне руйнування металу, і безпосередньо впливають на мікрорельєф стінок пазу.

Таким чином, для аналізу і практичного застосування результатів досліджень, доцільно використати статистичні методи опису залежності

шорсткості обробленої поверхні, від параметрів коливань дрютяного електроду.

Відомо, що практично будь-яка функціональна залежність може бути описана поліномом достатньо високого ступеню  $n$  [87]:

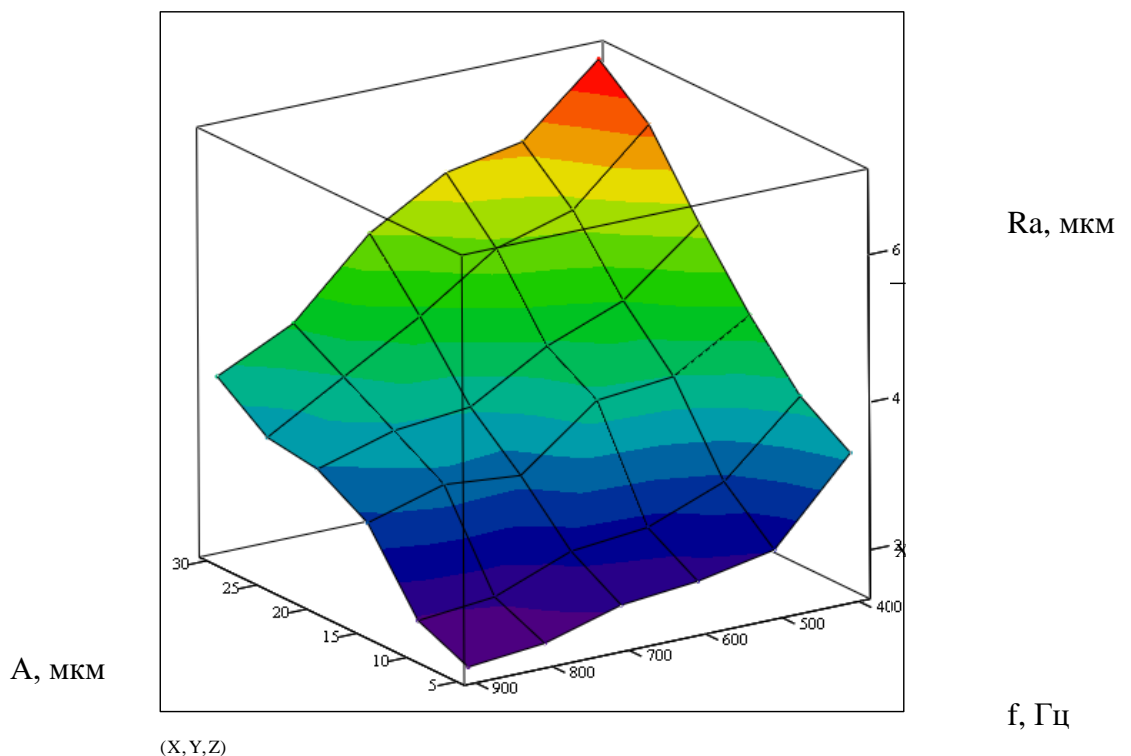
$$\Delta P_{\text{пр}}(h) = a_0 + a_1 h + \dots + a_n h^n \quad (3.32)$$

При цьому, точність відповідності функціональної залежності експериментальним даним, залежить від ступені поліному.

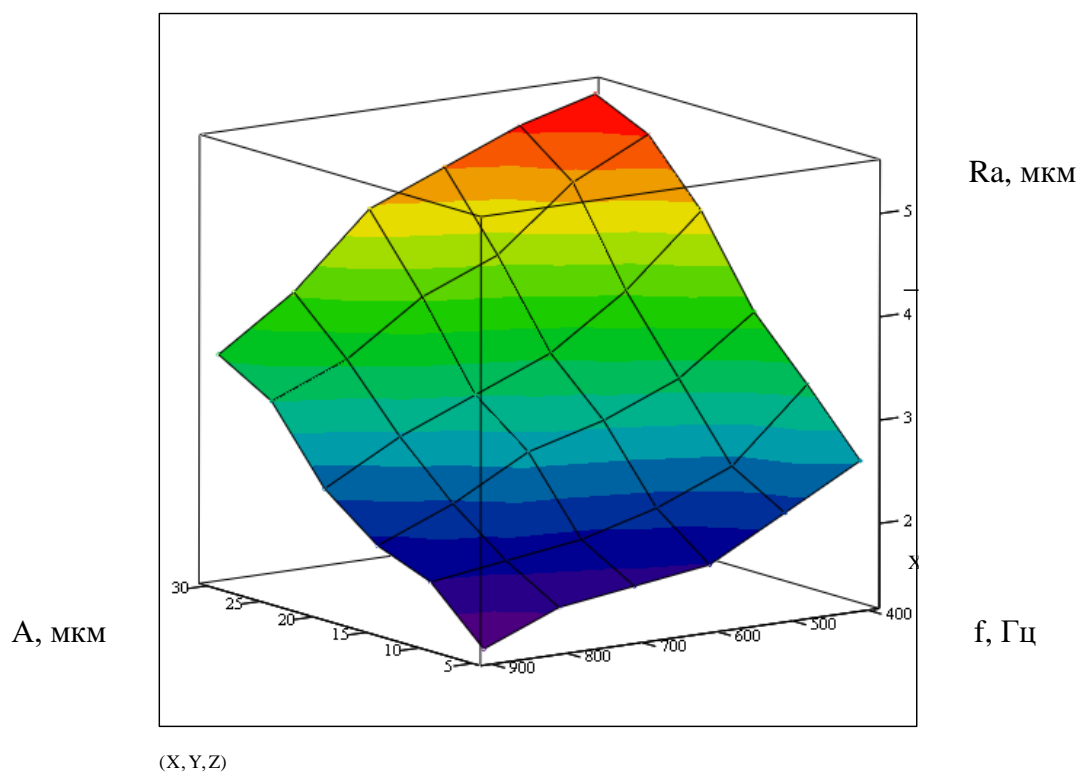
Складність поставленого завдання підвищується з огляду на те, що функціональна залежність є двомірною: аргументами виступають частота та амплітуда коливань, функцією є шорсткість отриманої поверхні.

Оскільки, функція є двомірною, в графічному вигляді її представлено тривимірним графіком (рис. 3.19.).

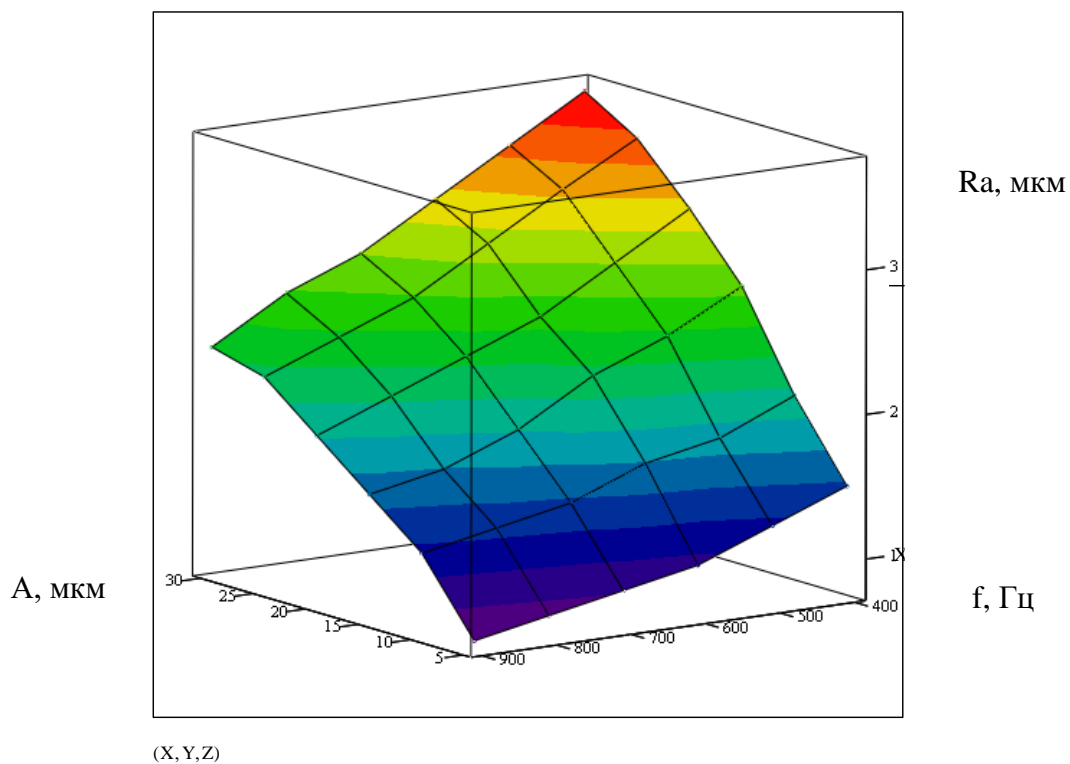
Незначні неоднорідності, що спостерігаються на графіку, побудованому на основі експериментальних даних, пояснюються деяким розкидом експериментальних результатів, що виникли внаслідок непостійності умов обробки. Тому допустимо вважати, що функцію, яка описує експериментальні залежностей, доцільно представити поліномом не вище третього порядку.



a)



б)



в)

Рис. 3.19 – Візуалізація результатів експериментального визначення впливу АЧХ коливань ДЕІ на мікрогеометрію оброблених поверхонь

- а) технологічний режим 2-1;
- б) технологічний режим 3-4;
- в) технологічний режим 5-2.

Зважаючи на складність практичних розрахунків, визначення коефіцієнтів поліному для описання двомірної функції залежності якості поверхні від амплітуди та частоти коливань ДЕІ, виконувалось в середовищі програмного пакету MathCAD 15, який дозволяє проведення програмного розрахунку поліноміальної регресії.

Mathcad дозволяє описати масив точок  $Z_{ij}$  ( $x_i, y_j$ ) поверхнею, яка визначається багатовимірною поліноміальною залежністю. В якості аргументів вбудованих функцій, для побудови поліноміальної регресії повинні стояти відповідні матриці.

Матриця  $M_{xy}$  визначає пари значень аргументу (стовпці матриці відповідають значенням амплітуди (мкм) та частоти (Гц) коливань дротяного електроду і має вигляд:

$$M_{xy} := \begin{pmatrix} 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 10 & 10 & 10 & 10 & 10 & 10 & 15 & 15 & 15 & 15 & 15 & 20 & 20 & 20 & 20 & 20 & 20 & 25 & 25 & 25 & 25 & 25 & 25 & 30 & 30 & 30 & 30 & 30 & 30 \\ 400 & 500 & 600 & 700 & 800 & 900 & 400 & 500 & 600 & 700 & 800 & 900 & 400 & 500 & 600 & 700 & 800 & 900 & 400 & 500 & 600 & 700 & 800 & 900 & 400 & 500 & 600 & 700 & 800 & 900 & 400 & 500 & 600 & 700 & 800 & 900 \end{pmatrix}^T$$

Вектор дійсних даних  $VZ$  визначає значення шорсткості обробленої поверхні (Гц) для технологічних режимів 2-1, 3-4 та 5-2 відповідно:

$$VZ := (3.3 \ 2.2 \ 2.0 \ 1.9 \ 1.6 \ 1.5 \ 3.7 \ 2.8 \ 2.4 \ 2.3 \ 1.9 \ 1.8 \ 4.5 \ 3.9 \ 3.8 \ 3.0 \ 3.1 \ 2.8 \ 5.4 \ 4.6 \ 4.2 \ 3.6 \ 3.5 \ 3.2 \ 6.5 \ 5.5 \ 5.2 \ 4.5 \ 3.9 \ 3.3 \ 7.0 \ 6.1 \ 5.9 \ 5.3 \ 4.3 \ 3.8)^T$$

$$VZ := (2.6 \ 2.2 \ 1.8 \ 1.7 \ 1.6 \ 1.3 \ 3.2 \ 2.5 \ 2.2 \ 2.0 \ 1.9 \ 1.8 \ 3.7 \ 3.2 \ 2.9 \ 2.7 \ 2.3 \ 2.0 \ 4.6 \ 3.9 \ 3.4 \ 3.1 \ 2.8 \ 2.4 \ 5.2 \ 4.8 \ 4.2 \ 3.9 \ 3.4 \ 3.1 \ 5.4 \ 5.2 \ 4.9 \ 4.6 \ 3.9 \ 3.4)^T$$

$$VZ := (1.5 \ 1.3 \ 1.1 \ 1.0 \ 0.9 \ 0.8 \ 2.0 \ 1.8 \ 1.7 \ 1.5 \ 1.4 \ 1.3 \ 2.7 \ 2.4 \ 2.2 \ 1.9 \ 1.7 \ 1.6 \ 3.1 \ 2.8 \ 2.5 \ 2.3 \ 2.1 \ 1.9 \ 3.5 \ 3.2 \ 2.9 \ 2.6 \ 2.4 \ 2.2 \ 3.7 \ 3.4 \ 3.1 \ 2.8 \ 2.6 \ 2.3)^T$$

Вектор коефіцієнтів для побудови поліноміальної регресії даних описується в середовищі MathCAD спеціальним оператором *regress*. За допомогою вказаного оператора визначаємо вектор інших похідних  $VS3$ , який включає в себе коефіцієнти поліному:

$$VS3 := \text{regress} (M_{xy}, VZ, 3),$$

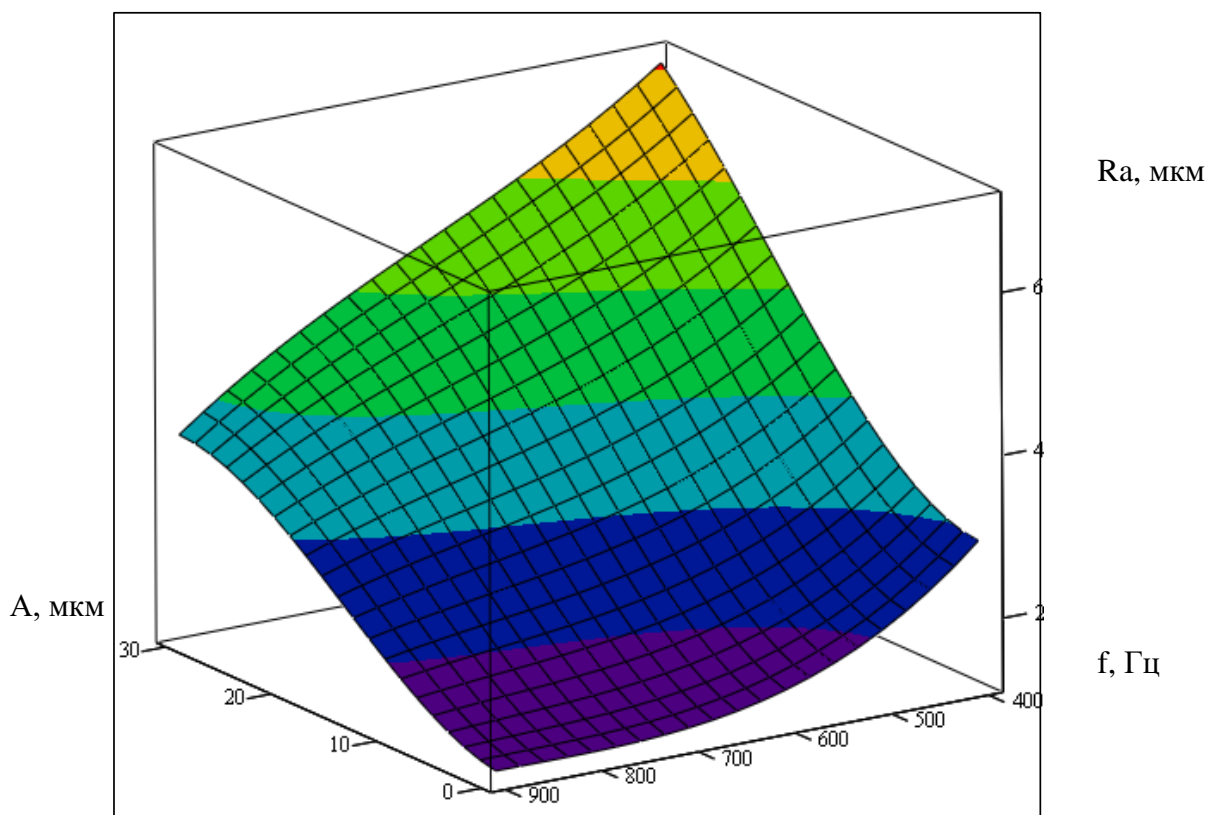
де 3 – ступінь поліному.

Для апроксимації функції по експериментальним даним скористаємось вбудованим оператором MathCAD – *interp*:

$$Z3(x, y) := \text{interp} \left[ VS3, Mxy, VZ, \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \right]$$

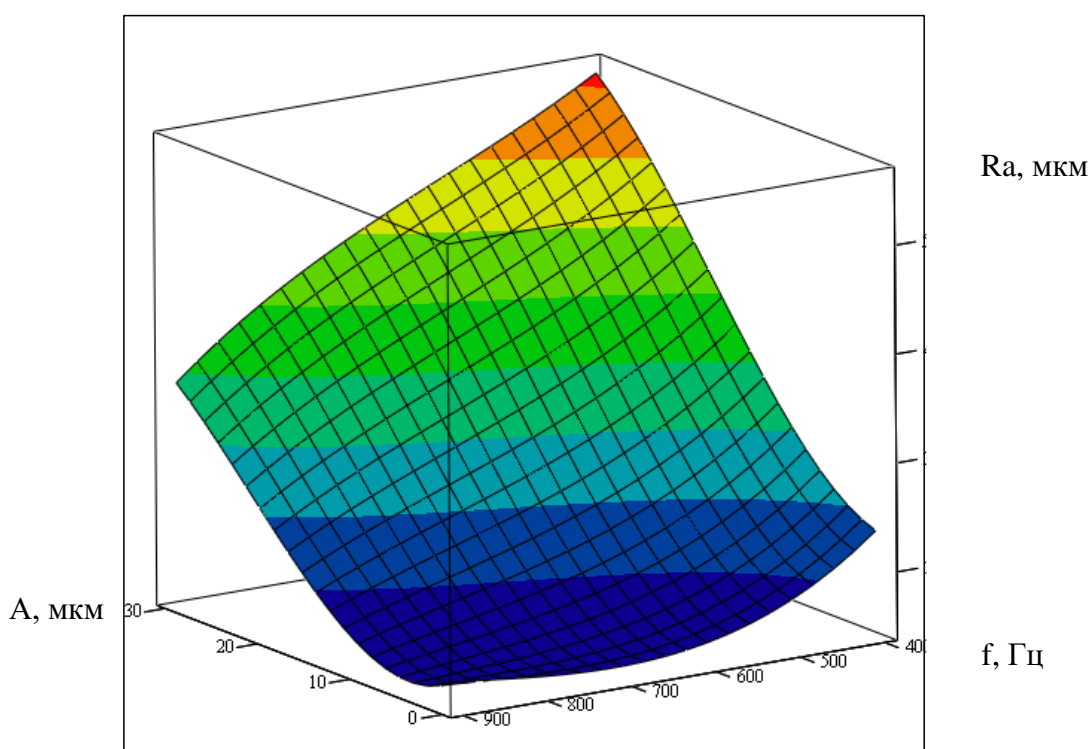
Визначена функція  $Z3(x, y)$  описує залежність шорсткості від амплітуди ( $x, \text{мкм}$ ) та частоти ( $y, \text{Гц}$ ) коливань ДЕІ.

Графік функції  $Z3(x, y)$  для різних технологічних режимів представлено на рис 3.20.



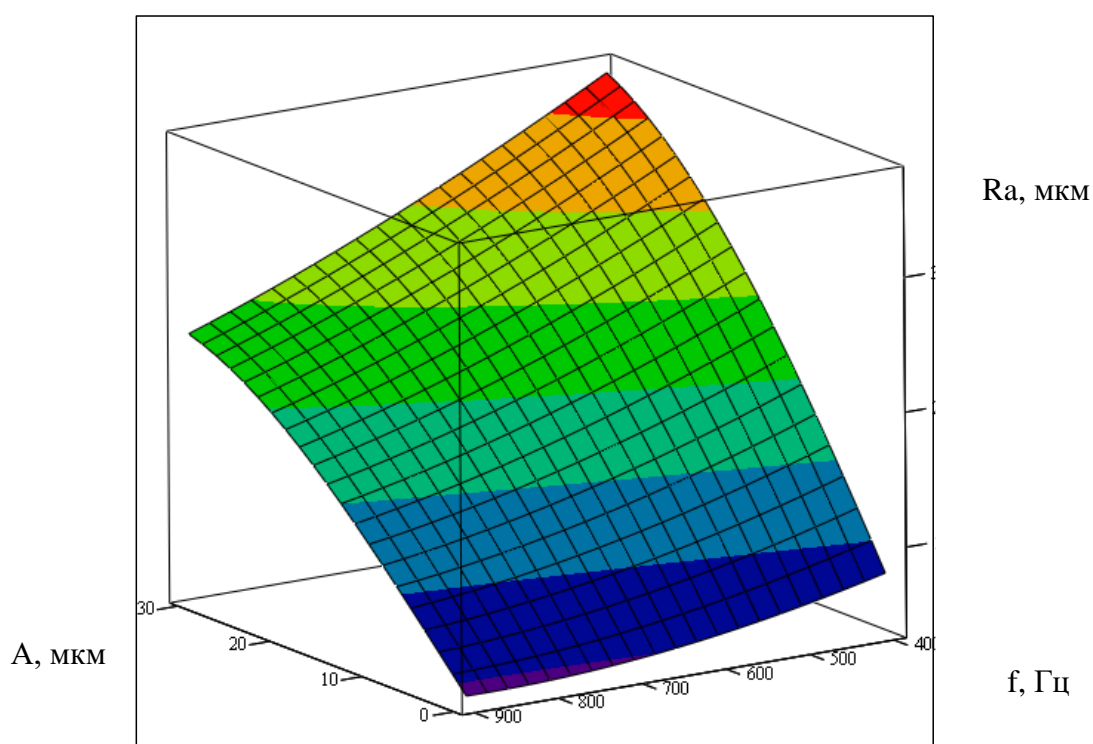
Z3

a)



Z3

б)



Z3

в)

Рис. 3.20 – Візуалізація результатів визначення залежності мікрогеометрії обробленої поверхні від АЧХ коливальних ДЕІ шляхом апроксимації експериментальних даних



- а) технологічний режим 2-1;
- б) технологічний режим 3-4;
- в) технологічний режим 5-2.

Для визначення коефіцієнтів поліному скористаємось оператором *submatrix*, який дозволяє вилучити субматрицю з матриці VS3:

$$\text{coeffs3} := \text{submatrix}(\text{VS3}, 3, \text{length}(\text{VS3}) - 1, 0, 0)$$

В результаті розрахунків отримано ряд значень коефіцієнтів поліному для різних технологічних режимів:

Код режиму 2-1		Код режиму 3-4		Код режиму 5-2	
	0		0		0
0	$-3.796 \cdot 10^{-7}$	0	$-3.163 \cdot 10^{-7}$	0	$-1.429 \cdot 10^{-8}$
1	$-1.667 \cdot 10^{-8}$	1	$-1.019 \cdot 10^{-8}$	1	$3.086 \cdot 10^{-10}$
2	$4.337 \cdot 10^{-5}$	2	$2.724 \cdot 10^{-5}$	2	$1.017 \cdot 10^{-6}$
3	-0.038	3	-0.023	3	$-2.478 \cdot 10^{-3}$
4	$5.261 \cdot 10^{-4}$	4	$2.221 \cdot 10^{-4}$	4	$-8.886 \cdot 10^{-5}$
5	$-4.959 \cdot 10^{-6}$	5	$3.061 \cdot 10^{-6}$	5	$1.306 \cdot 10^{-6}$
6	12.081	6	7.983	6	1.61
7	-0.144	7	-0.012	7	0.174
8	0.011	8	$5.042 \cdot 10^{-3}$	8	$-1.076 \cdot 10^{-3}$
9	$-1.494 \cdot 10^{-4}$	9	$-1.185 \cdot 10^{-4}$	9	$-2.469 \cdot 10^{-5}$

Таким чином, після розрахунків двомірної поліноміальної регресії, отримано наступні поліноми третього ступеня для кожного з технологічних режимів, які опишуть частоти коливань дротяного електроду та функціональну залежність шорсткості обробленої поверхні від амплітуди:

$$\begin{aligned} Ra(2-1) = & 12.081 + [(-1.667 \cdot 10^{-8} \cdot f^3 + 4.337 \cdot 10^{-5} \cdot f^2 - 0.038 \cdot f) + \\ & + (-3.796 \cdot 10^{-7} \cdot a \cdot f^2 + 5.261 \cdot 10^{-4} \cdot a \cdot f - 4.959 \cdot 10^{-6} \cdot a^2 \cdot f) + \\ & + (-0.144 \cdot a + 0.011 \cdot a^2 - 1.494 \cdot 10^{-4} \cdot a^3)] \quad (3.33) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Ra(3-4) = & 7.983 + [(-1.019 \cdot 10^{-8} \cdot f^3 + 2.724 \cdot 10^{-5} \cdot f^2 - 0.023 \cdot f) + \\ & + (-3.163 \cdot 10^{-7} \cdot a \cdot f^2 + 2.221 \cdot 10^{-4} \cdot a \cdot f - 3.061 \cdot 10^{-6} \cdot a^2 \cdot f) + \\ & + (-0.012 \cdot a + 5.042 \cdot 10^{-3} \cdot a^2 - 1.185 \cdot 10^{-4} \cdot a^3)] \quad (3.34) \end{aligned}$$

$$Ra(5 - 2) = 1.610 + [(3.086 \cdot 10^{-10} \cdot f^3 + 1.017 \cdot 10^{-6} \cdot f^2 - 2.478 \cdot 10^{-3} \cdot f) + (-1.429 \cdot 10^{-8} \cdot a \cdot f^2 - 8.886 \cdot 10^{-5} \cdot a \cdot f + 1.306 \cdot 10^{-6} \cdot a^2 \cdot f) + (0.174 \cdot a - 1.076 \cdot 10^{-3} \cdot a^2 - 2.469 \cdot 10^{-5} \cdot a^3)] \quad (3.35)$$

Для оцінки кореляції поліномів і функцій  $Z3(x,y)$  обчислено стандартні відхилення для поліномів 1-5 порядків. Встановлено, що при зростанні порядку поліному вище 3, відхилення зменшується незначно. Крім того, ускладнюється сам поліном, що ставить певні труднощі для його практичного використання. Таким чином, підтверджено початкове припущення про доцільність опису даної залежності поліномом третього порядку.

На основі представленого алгоритму, розраховано функціональні залежності шорсткості обробленої поверхні від параметрів коливань ДЕІ, для більшості розповсюджених типорозмірів дротяних електродів для основних технологічних режимів. Отримані результати можуть бути сформовані в базу даних для перспективних систем керування електроерозійних комплексів. Це дозволить ще в процесі обробки прогнозувати шорсткість обробленої поверхні і, за необхідності, коректувати технологічний режим.

### 3.8 Висновки за розділом 3

1. У рамках теплової гіпотези шляхом розрахунків за запропонованою математичною моделлю побудовано форми границь фазових переходів, що формуються одиничним розрядом при обробці якісної конструкційної сталі 45 (ГОСТ 1050-88) за використання енергетичних параметрів імпульсів, характерних для фінішного, напівчистового та чорнового режимів різання сучасного електроерозійного комплексу AccuteX GE-43SA.

2. Виявлено закономірності зміни енергоефективності процесу руйнування конструкційної Сталі 45 (ГОСТ 1050-88) в обраному діапазоні режимів роботи генератора.

3. Порівняння розрахованих об'ємів фазових перетворень матеріалу анода з експериментальними даними підтвердило в цілому задовільну точність прогнозування форми границь фазових переходів.

4. Для групи сталей з відомими та достатньо близькими теплофізичними характеристиками (Сталь 45, Сталь 48, 40Х, У10, Х12М) отримана система рівнянь, які дозволяють на етапі проектування технологічного процесу електроерозійного дротяного вирізання для відомих енергії розряду, що виділяється на аноді, тривалості розряду та коефіцієнта перекриття лунок розраховувати три базові параметри шорсткості –  $R_z$ ,  $R_a$ ,  $R_q$

5. Отримано закономірності виникнення та впливу вібрацій ДЕІ на формування мікрогеометрії оброблених поверхонь.

6. Розроблено математичну статистичну модель для розрахунку впливу вібрацій ДЕІ на мікрогеометрію оброблених поверхонь.

7. Отримані теоретичні та експериментальні результати та їх аналіз, по суті, відкривають перспективний шлях до мінімізації енергетичних затрат на обробку тієї чи іншої марки сталі та керування характеристиками оброблених поверхонь, як з точки зору формування мікрогеометрії, так і глибини зміни структури в зоні термічного впливу.

## РОЗДІЛ 4

### ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ СТАЛЕЙ ПРИ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНІЙ ОБРОБЦІ ДРОТЯНИМ ЕЛЕКТРОДОМ

#### 4.1 Гартувальні структури, що утворюються в поверхневих шарах вуглецевих та легованих сталей при електроерозійній обробці

Характерною особливістю впливу на матеріали електричного імпульсу при електроерозійному вирізанні, на відміну від гартування струмами високої частоти, електронагрівання, гартування з розплаву та інших відомих процесів, є локальність впливу теплового джерела з високою густиною потужності, що забезпечує формування жорсткого термічного циклу. Формування мікроструктури в цих умовах призводить до отримання характерних структурних та фазових станів, що визначають експлуатаційні властивості оброблених матеріалів.

Експериментально доведено [128], що деталі отримані електроерозійним вирізанням в багатьох технологічних випадках мають кращі експлуатаційні властивості, ніж деталі, отримані традиційними методами обробки. Так, шестерні за рахунок характерної структури поверхневого шару мають в 2,3 рази більшу навантажувальну здатність.

Для забезпечення заданих експлуатаційних параметрів деталі першочерговим завданням є визначення теплового стану металу в процесі ЕЕДВ. Ця інформація є вихідною для аналізу геометрії зони термічного впливу, характеру та ступеню фазових перетворень, остаточної структури металу, експлуатаційних властивостей загартованої поверхні.

Припущення, щодо параметрів джерела тепла описані в розділі 3. Згідно з фізичною моделлю, наведеною в [129], джерелом тепла є плазмовий канал розряду, що утворюється при протіканні струму розряду між деталлю та

дротяним електродом-інструментом. Він проходить в газовому пухирі, утвореному з парів робочої рідини, іонів випаруваного з поверхонь електродів матеріалу, тощо. Дослідниками встановлено, що розподіл густини потужності в просторі є осе симетричним з нормальним розподілом [129]. В часі зміна густини потужності може бути описана як функція пропорційна силі струму в кожний момент часу. Для різних генераторів технологічного струму та режимів обробки форма імпульсу струму може змінюватись від прямокутної або трапецієвидної уніполярної до трикутної одно- або біполярної.

Густина потужності для різних режимів коливається в межах  $(1...3) \cdot 10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup>. При такій густині потужності окрім плавлення присутнє вибухоподібне випаровування або сублимація матеріалу. Джерело тепла вважається поверхневим.

В процесі поверхневого нагрівання вглиб матеріалу поширюються теплова хвиля. Її швидкість приблизно можна визначити за формулами [121]:

$$v_h \approx \sqrt{a/t_i}, \quad (4.1)$$

де  $a$  – коефіцієнт температуропровідності сталі ( $a = 0,21$  см<sup>2</sup>/с);

$t_i$  – тривалість імпульсу струму (0,05...1,2 мкс);

де  $q$  – щільність теплового потоку,  $1...3 \cdot 10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup>;

$L_g$  – питома теплота випаровування сталі ( $6,3 \cdot 10^6$  Дж/кг);

$\rho$  – щільність сталі (7800 кг/м<sup>3</sup>).

Оцінимо глибину прогрівання матеріалу. Для найпотужнішого режиму генератора технологічного комплексу AccuteX GE-43SA з тривалістю імпульсу 1,2 мкс -  $v_h \approx \sqrt{0,21 * 10^{-4} / 1,2 \cdot 10^{-6}} = 4,2$  м/с. Тобто за час дії імпульсу струму матеріал встигне прогрітись не більше ніж на 5 мкм. Враховуючи, що для електроерозійного вирізання тривалість паузи між імпульсами для різних режимів не перевищує  $5^{-10}$  тривалостей імпульсу струму, максимальна відстань на яку теоретично може поширитись теплова хвиля становить 50 мкм. Але, оскільки, зона нагрітого матеріалу нескінченно

мала у порівнянні з ненагрітим матеріалом можна припустити, що теплова хвиля пошириться на глибину дещо меншу від 50 мкм.

Аналогічні припущення для найменш потужного режиму з тривалістю імпульсу 0,05 мкс –  $v_h = 20,5\text{м/с}$ , глибина – до 1 мкм за час дії імпульсу струму і до 10 мкм до початку дії наступного імпульсу.

Можливість утворення гартувальних структур визначається наявністю аустеніту. За діаграмою стану [130] аустеніт присутній в сталі при температурах вище лінії GPSK (рисунок 4.1).

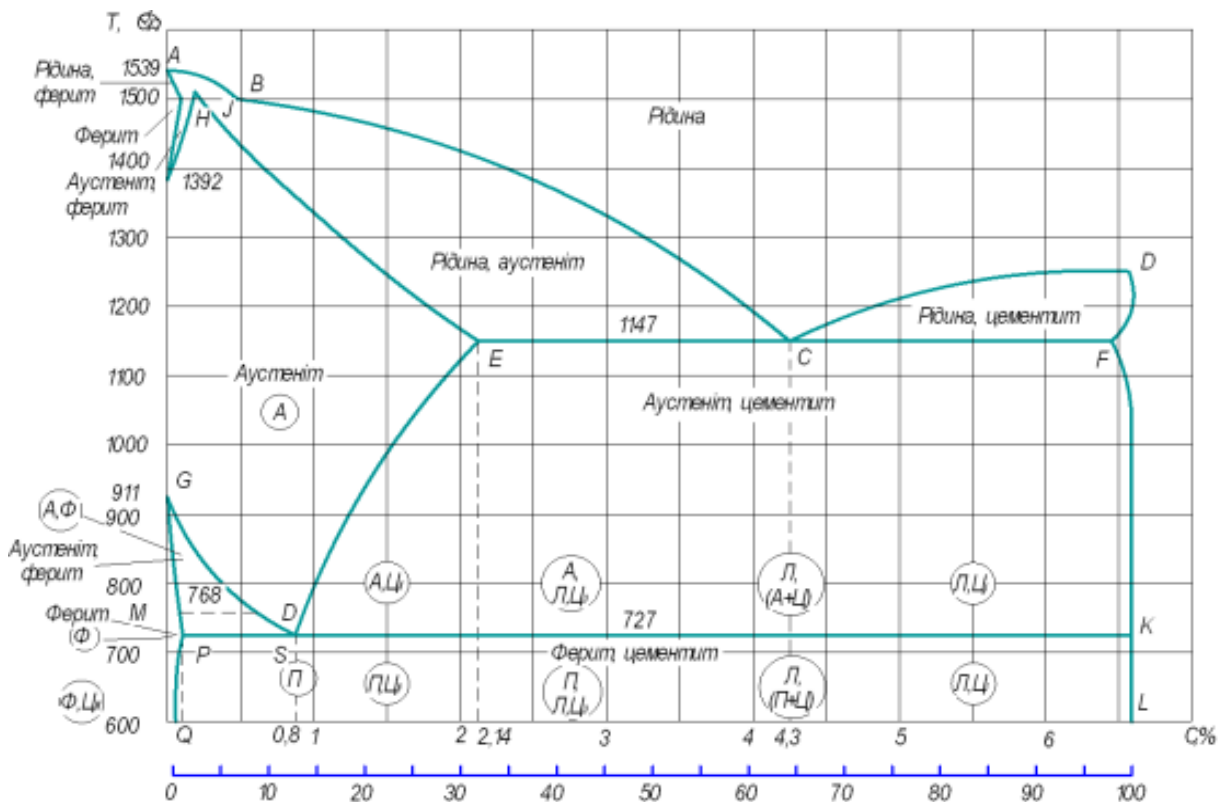


Рис. 4.1 – Діаграма стану системи залізо-цементит

Завдяки локальності зони нагріву з високою густиною потужності, швидкості охолодження матеріалу завжди вище критичних швидкостей мартенситного перетворення аустеніту.

В структурі поверхневих шарів сталей після ЕЕДВ перехідний шар від білого шару до основного металу (зона термічного впливу) нагрівається із високою швидкістю, як електричним розрядом, так і теплопровідністю. Імпульсна кристалізація перегрітих високо вуглецевих розчинів з утворенням ударних хвиль, подібних до вибуху з інтенсивністю більше ніж 10 ГПа, формує

структури зони термічного впливу в умовах, аналогічним високотемпературній термомеханічній обробці.

Структура різних ділянок ЗТВ при ЕЕДВ наведена на рисунку 4.2.

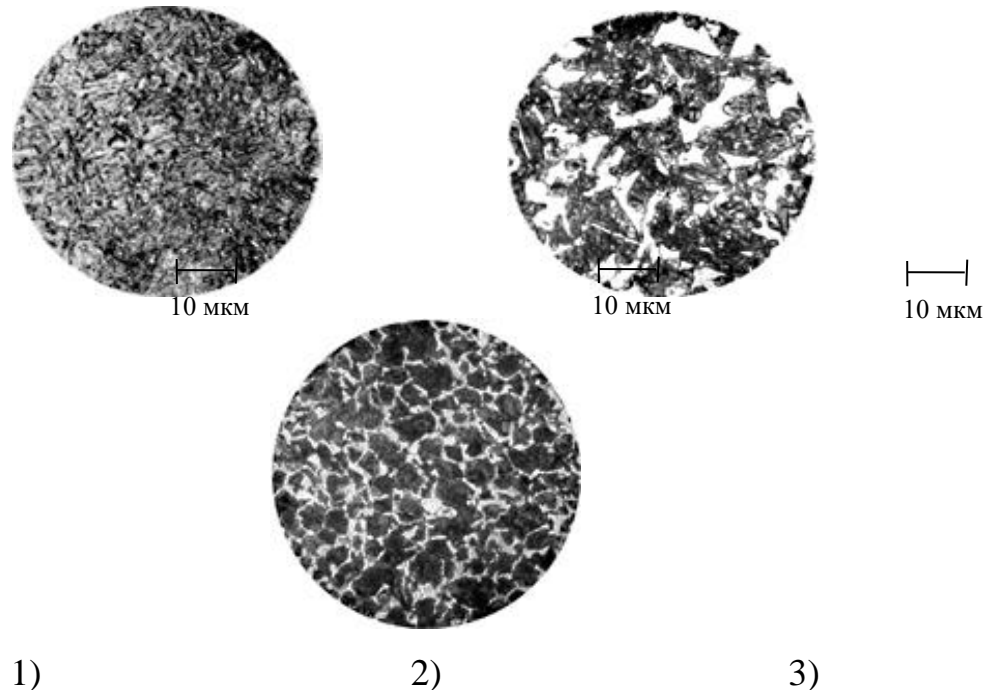


Рис. 4.2 – Ділянки шліфів зразків зі Сталі 45 при електроерозійній чорновій обробці (1-й прохід): 1) поверхневий шар, 2) перехідний шар, 3) основний матеріал у відпаленому стані)

Збільшення розміру зерна можна пояснити процесами рекристалізації аустеніту при температурах вище 900°C. При цьому фазова перекристалізація відбувається зі збереженням орієнтаційного співвідношення та об'ємними змінами у дві стадії – дифузійне  $\alpha \rightarrow \gamma$  – перетворення та рекристалізація високотемпературної  $\gamma$  - фази при 1100-1200 °С.

У загальному випадку поверхневий шар після електроерозійної обробки умовно можна розділити на наступні зони (рис. 4.3):

- 1 - зону насичення елементами робочої рідини;
- 2 - зону відкладення матеріалу електрода-інструменту;
- 3 - білий шар, утворений з розплавленого матеріалу-заготовки;
- 4 - зону термічного впливу;
- 5 - зону пластичної деформації.

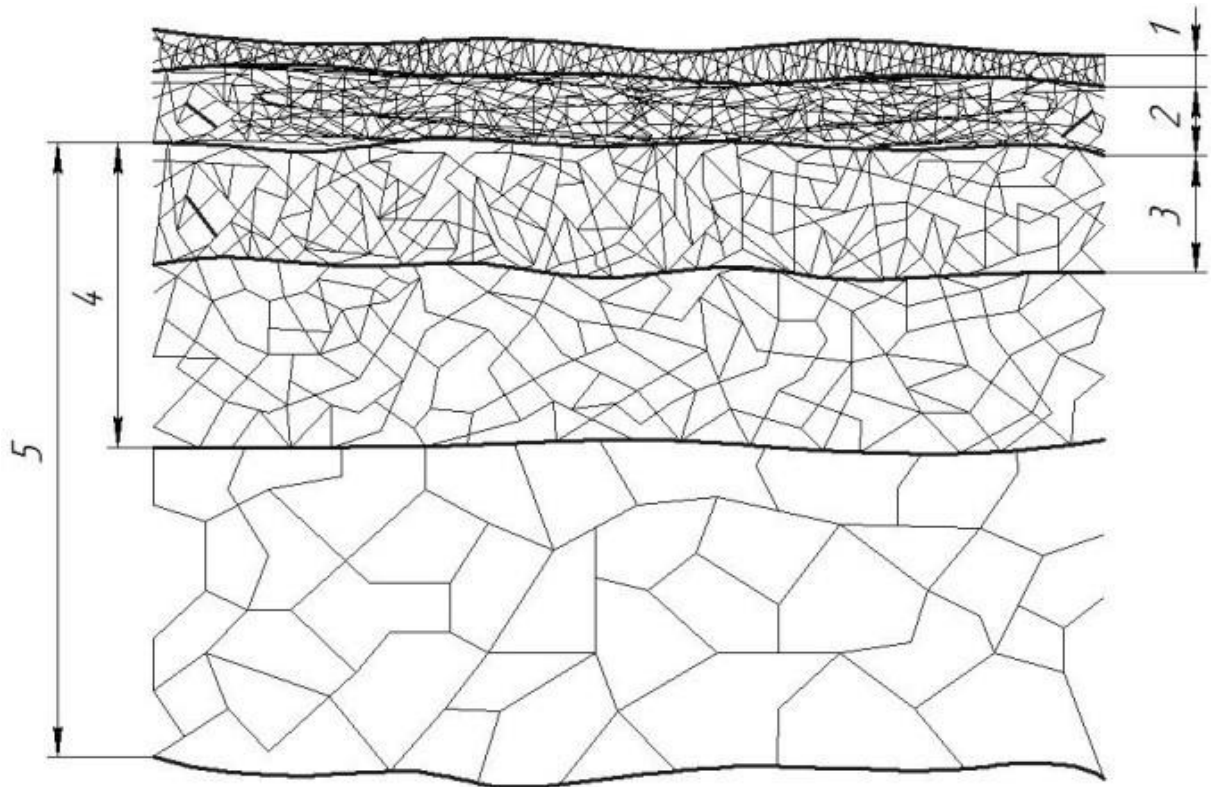


Рис. 4.3 - Схематичне розташування зон поверхневого шару, що піддався електроерозійній обробки

Між зонами немає чіткої межі. У більшості випадків зони перекривають одна іншу. Кожна зона має свої особливості. При цьому кожна зона, навіть незначної товщини, грає дуже важливу роль.

Зона 1 - зона насичення елементами робочої рідини.

Внаслідок потужного теплового впливу при виділенні електричної енергії робоча рідина (РР) розкладається. Окремі її елементи проникають в поверхневий шар, дифундують в нього і утворюють хімічні сполуки.

Внаслідок крихкості і нерівномірної щільності поверхневий шар може бути дефектним. Він є причиною зниження міцності властивостей основного металу. При механічних знакозмінних навантаженнях саме в поверхневому шарі виникають тріщини, які можуть поширюватися в глиб деталі.

При виготовленні деталей, що працюють з великими навантаженнями, цей шар необхідно видаляти одним із способів додаткової обробки.



Зона 2 - зона відкладення матеріалу електрода-інструменту. Утворення цієї зони викликано перенесенням частинок матеріалу електрода заготовки парами на поверхню виробу. Матеріал електрода-інструменту може не тільки концентруватися на поверхні виробу, а й дифундувати в більш глибокі шари і утворювати там різні фази - тверді розчини, з'єднання і т. д.

При використанні латунних електрод-інструментів поверхня може бути покрита тонким шаром латуні. Крім того, латунь може проникати в зону розплавленого матеріалу, утворюючи окремі включення.

Зона 3 - білий шар. Після видалення мікропорцій металу на поверхні заготовки залишається зона зі структурою, що різко відрізняється від вихідної. Білий шар має дрібнозернисту структуру, яка має велику хімічну стійкість. На мікрошліф цей шар має вигляд білих смуг, звідки він і отримав свою назву. Товщина шару залежить від конкретних умов обробки.

Зона 4 - зона термічного впливу значно за розмірами перевищує білий шар. На її структуру значний вплив робить матеріал оброблюваної заготовки, його початковий стан, властивості робочого середовища, а так само режим обробки. Глибина структурних змін визначається товщиною шару металу заготовки, температура в якій перевищує температуру структурних змін. Зона термічного впливу має загартовані ділянки з дрібнозернистою структурою, ділянки вторинного гарту, які часто чергуються з ділянками відпустки.

Зона 5 - зона пластичної деформації. В процесі електроерозійної обробки поверхня металу зазнає значного ударного впливу, це пов'язано з переміщенням хвилі напружень від розширення і стиснення металу при нагріванні і охолодженні заготовки під впливом електричного розряду; від тиску газу, що утворився в результаті випаровування робочої рідини; від виникаючих електростатичних і електромагнітних сил, а так само від протікання структурних змін та інших факторів.

Зона пластичної деформації проявляється у вигляді подрібнення зерен, утворення великих дислокацій, а так само зміни параметрів кристалічної

решітки. Глибина зони пластичної деформації залежить так само від хімічного складу.

**Мікротвердість поверхневого шару.** Розглянуті зміни структури поверхневого шару і пов'язані з ним пластичні деформації істотно впливають на ступінь наклепу і мікротвердість. На зміну мікротвердості поверхневого шару, а також товщини наклепу значний вплив мають властивості робочої рідини, що охолоджує поверхню лунки після проходження імпульсу струму. Встановлено, що з ростом в'язкості робочої рідини зменшується швидкість відводу тепла від охолоджувальної поверхні.

#### **4.2 Експериментальні дослідження розподілу мікротвердості в поверхневих шарах деталі за різних енергетичних режимів електроерозійного дротяного вирізання**

Товщина зони термічного впливу забезпечує з одного боку технологічні властивості поверхні деталі, з другого боку вона є тим фактором, що визначає величину припуску для наступного електроерозійного проходу. Зона термічного впливу характеризується наявністю гартувальних структур, що мають високі показники мікротвердості.

Товщина зони термічного впливу залежить від розподілу тепла в заготовці під час обробки. В свою чергу, розподіл тепла можна визначити за допомогою рівняння Фур'є, які для задачі Стефана можуть бути записані у вигляді (3.2). Теплове поле, таким чином залежить від теплофізичних показників матеріалу (щільність, теплоємність, теплопровідність) з врахуванням їх зміни при підвищенні температури, від тривалості дії імпульсу, густини потужності і її розподілу по плямі контакту та в часі.

Очевидно, що більші значення коефіцієнту теплопровідності  $\lambda$  матеріалу деталі відповідатимуть більшій товщині зони термічного впливу. Більші значення теплоємності визначають більші витрати енергії на нагрівання матеріалу. Питома теплота плавлення та випаровування визначає можливість зміни фази матеріалу, кількість розплавленого та випарованого матеріалу

(більші значення питомої теплоти відповідають меншій кількості матеріалу, який перейшов з однієї фази в іншу).

Ефективно керувати зміною конфігурації теплового поля можливо параметрами генератора технологічного струму. Так, тривалість дії імпульсу струму визначає час, за який теплота буде поширюватись вглиб деталі. Більша тривалість імпульсів відповідає більшій товщині зони термічного впливу.

Верстати, що оснащені генераторами технологічного струму з накопиченням енергії в конденсаторах (1970-1980 рр. випуску) дозволяють отримати тривалості імпульсів до десятків мілісекунд. Відповідно товщина зони термічного впливу сягала 0,3 мм [62]. Тиристорні генератори технологічного струму дозволили отримати імпульси тривалістю 1-10 мкс, відповідно товщина зони термічного впливу зменшилась до 0,1 мм. Сучасні генератори, що розроблені на швидкодіючих елементах дозволяють отримати імпульси тривалістю від 0,05 мкс до 1 мкс, а товщина зони термічного впливу при цьому зменшується до 3-15 мкм [131].

Визначити товщину зони термічного впливу можливо за допомогою безпосереднього вимірювання розподілу мікротвердості по глибині деталі. Оскільки товщина зони термічного впливу співставна з розміром відбитка при вимірюванні мікротвердості за методом Віккерса виміряти її безпосередньо на шліфі деталі неможливо. Використаємо відому методику косоного зрізу описану в п.2.2.3. Після формування косоного зрізу для видалення крихких окислів і окремих включень латуні, перед проведенням вимірювань мікротвердості, поверхні промивали водним розчином аміаку та ретельно протирали жорсткими серветками. Реальний стан поверхні перед проведенням досліджень контролювався за допомогою мікроскопії (рис. 4.7а).

Для отримання поверхонь сформованих за технологією ЕЕДВ було використано сучасний електроерозійний верстат моделі AccuteX GE-43SA. На основі багаторічних досліджень та розрахунків енергетичних характеристик режимів обробки сталей з використанням даного верстату, співробітники лабораторії електрофізичних та електрохімічних методів обробки матеріалів

Черкаського державного технологічного університету отримали дані про набір параметрів основних енергетичних режимів роботи генератора даного верстата.

При використанні латунного дроту AdvaCut діаметром 0.2 мм, для реалізації технічних вимог, що висуваються до переважної більшості деталей авіаційного та приладобудівного призначення достатньо послідовної обробки двома, трьома або п'ятьма проходами, що реалізуються з використанням режимів, параметри яких зведені в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1

**Енергетичні параметри найбільш вживаних режимів електроерозійного  
вирізного комплексу AccuteX GE-43SA**

№ пр	Шифрований код режиму	Тривалість імпульсу струму $\tau_i$ , мкс	Амплітудне значення струму $I$ , А	Енергія, що виділяється на аноді, $E_a$ , мДж	Діаметр лунки $d$ , мкм	Середня густина потужності в каналі розряду, $q$ , $10^{12}$ Вт/м <sup>2</sup>
1	NQ0024	1,2	800	28,831	101	3,03
2	NQ0018	0,9	600	13,677	80	3,06
3	NQ0014	0,7	467	7,249	66	3,07
4	NQ0010	0,5	333	3,176	52	3,05
5	NQ0007	0,35	233	1,364	41	2,95

Для дослідження розподілу мікротвердості було виготовлено 6 зразків з якісної конструкційної сталі 45 розмірами 100x20x20мм.

Зразки виготовляються чорновим фрезеруванням кінцевою фрезою діаметром 25 мм. Шорсткість поверхні  $Ra=12$  мкм, відхилення від площинності не більше 0,13 мм. На кожному зразку було пошліфовано три базові поверхні 100x20 мм (для закріплення на верстаті та як база для косоного шліфування). Похибка площинності на цих поверхнях контролювалася за допомогою координатно-виміральної машини 3D CMM AXIOM CNC ABERLINK (using the coordinate measuring machine 3D CMM AXIOM CNC ABERLINK) і не перевищувала 0,003 мм. Одну поверхню 100x20 мм після фрезерування (з пластично деформованим шаром товщиною до 0,1 мм) залишали для електроерозійної обробки.

Один зразок залишено без електроерозійної обробки як еталонний. Фрезеровані поверхні 5-ти інших зразків оброблені на режимах генератора технологічного струму, наведених в таблиці 4.1. Кількість проходів та величини припусків, що видалялися на кожному зразку, наведено в таблиці 4.2 та на рисунку 4.4.

Таблиця 4.2

**Значення параметрів обробки при виготовленні зразків**

№ з/п	Зразок	Номер проходу	Коди режимів різання (табл. 4.1)	Товщина шару, що знімається за прохід, мкм
1	1	Без електроерозійної обробки		
2	2	1	NQ0024	50
3	3	1	NQ0024	50
		2	NQ0018	30
4	4	1	NQ0024	50
		2	NQ0018	30
		3	NQ0014	20
5	5	1	NQ0024	50
		2	NQ0018	30
		3	NQ0014	20
		4	NQ0010	12
6	6	1	NQ0024	50
		2	NQ0018	30
		3	NQ0014	20
		4	NQ0010	12
		5	NQ0007	5

При визначенні мікротвердості для кожного зразка проведено 20 дослідів з кроком 1,5 мм, що відповідає кроку по глибині 1,5 мкм. Для кожного дослідів було проведено три вимірювання (по центру зразка, на 0,15 мм вище та нижче). Для підвищення достовірності отриманих результатів визначалося середнє з трьох значень (див. табл. 4.3).

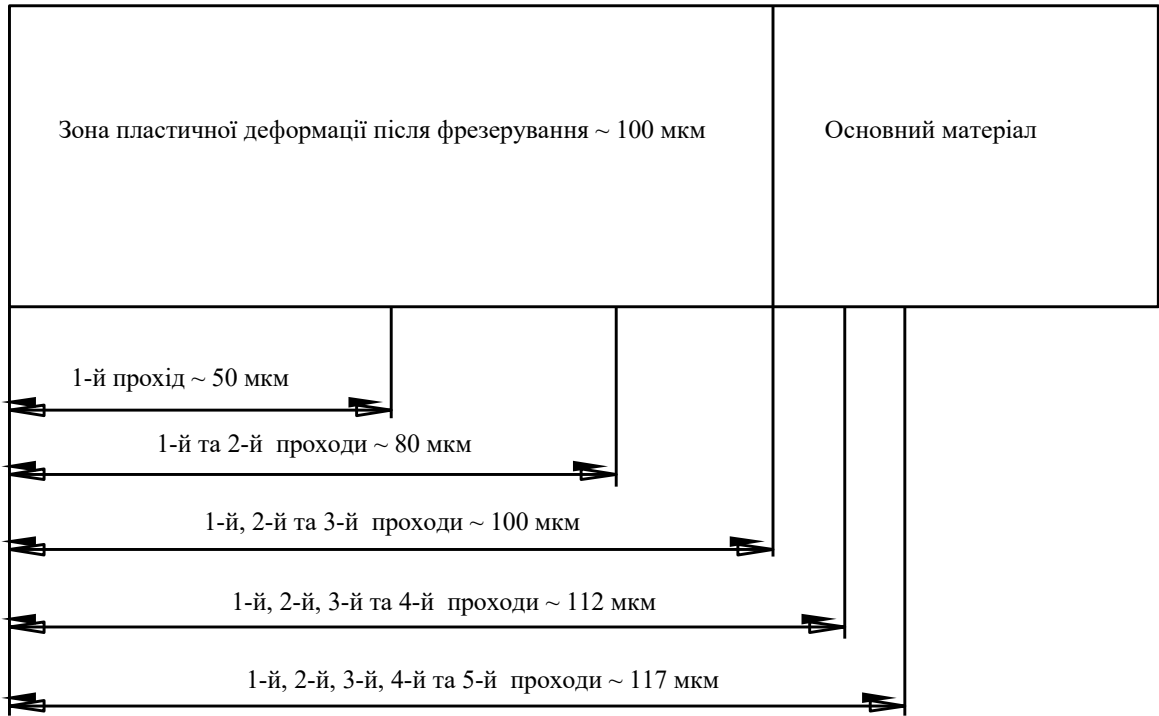
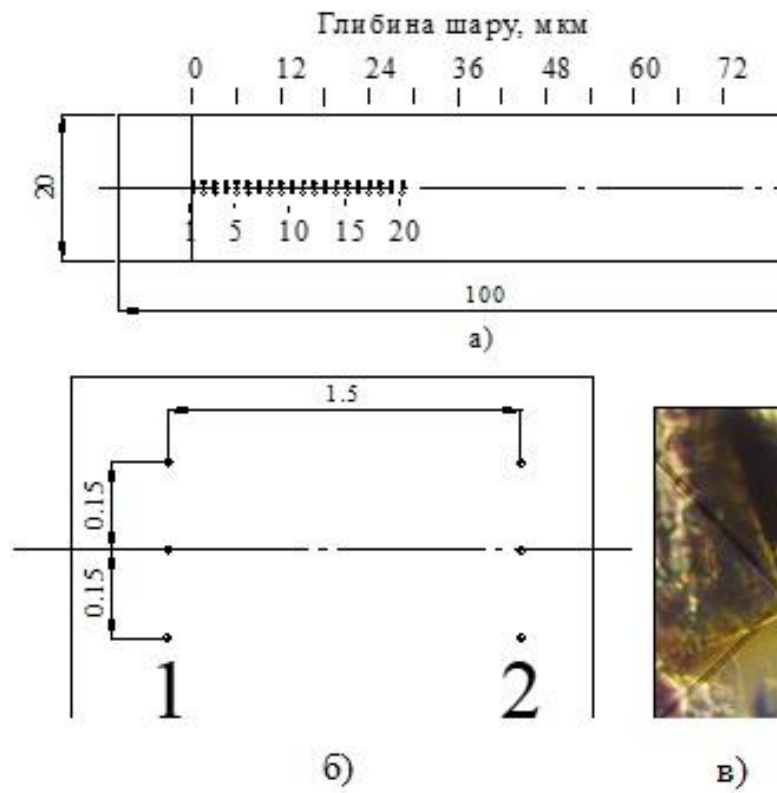


Рис. 4.4 – Схема розміщення поверхонь сформованих багатопрхідною ЕЕДВ по відношенню до поверхні, отриманої фрезеруванням





г)

Рис. 4.5 – Схема дослідження розподілу мікротвердості по товщині зразка:

- а) загальна схема вимірювання; б) розташування точок вимірювання;  
в) відбиток індентора; г) поверхня зразка ( $\times 1.3$ ) після ЕЕДВ (режим 24)

Таблиця 4.3

**Результати експериментальних досліджень розподілу мікротвердості по товщині поверхневих шарів зразків**

№ досліджу	Глибина поверхні вимірювання, мкм	Зразок 1 (без WEDM)		Зразок 2		Зразок 3	
		Діагоналі, мм	HV	Діагоналі, мм	HV	Діагоналі, мм	HV
1	0	0,0234	338,6095	0,019	513,5983	0,0175	605,4171
2	1,5	0,0233	341,5222	0,017	641,5536	0,0164	689,3553
3	3	0,0233	341,5222	0,0165	681,0248	0,0162	706,4815
4	4,5	0,0235	335,7338	0,0168	656,9196	0,0167	664,8105
5	6	0,0235	335,7338	0,0166	672,8444	0,0168	656,9196
6	7,5	0,0237	330,0913	0,0164	689,3553	0,017	641,5536
7	9	0,0235	335,7338	0,0168	656,9196	0,0295	213,0526
8	10,5	0,0234	338,6095	0,03	206,01	0,025	296,6544
9	12	0,0237	330,0913	0,0265	264,0214	0,0238	327,3233
10	13,5	0,0233	341,5222	0,0237	330,0913	0,0287	225,0956
11	15	0,0235	335,7338	0,0236	332,8946	0,0285	228,2659
12	16,5	0,0238	327,3233	0,0233	341,5222	0,0281	234,8109
13	18	0,0236	332,8946	0,0237	330,0913	0,029	220,4625
14	19,5	0,0235	335,7338	0,0238	327,3233	0,0284	229,8763
15	21	0,0235	335,7338	0,0236	332,8946	0,0288	223,5352
16	22,5	0,0234	338,6095	0,0236	332,8946	0,027	254,3333
17	24	0,0235	335,7338	0,0235	335,7338	0,0279	238,1894
18	25,5	0,0237	330,0913	0,0236	332,8946	0,0283	231,5037
19	27	0,0233	341,5222	0,0234	338,6095	0,0281	234,8109
20	28,5	0,0233	341,5222	0,0237	330,0913	0,0284	229,8763

## Продовження таблиці 4.3

№ досліду	Глибина поверхні вимірювання, мкм	Зразок 4		Зразок 5		Зразок 6	
		Діагоналі, мм	HV	Діагоналі, мм	HV	Діагоналі, мм	HV
1	0	0,0188	524,5841	0,0185	541,7356	0,019	513,5983
2	1,5	0,0168	656,9196	0,0165	681,0248	0,0168	656,9196
3	3	0,0168	656,9196	0,0174	612,396	0,0172	626,7205
4	4,5	0,0163	697,8396	0,0177	591,8127	0,029	220,4625
5	6	0,017	641,5536	0,0275	245,1689	0,0285	228,2659
6	7,5	0,0285	228,2659	0,0277	241,6414	0,0288	223,5352
7	9	0,029	220,4625	0,0279	238,1894	0,0284	229,8763
8	10,5	0,0294	214,5044	0,0284	229,8763	0,0289	221,9909
9	12	0,028	236,4911	0,028	236,4911	0,0292	217,4529
10	13,5	0,0287	225,0956	0,0281	234,8109	0,0287	225,0956
11	15	0,029	220,4625	0,0278	239,9061	0,0275	245,1689
12	16,5	0,0285	228,2659	0,029	220,4625	0,0279	238,1894
13	18	0,0291	218,9499	0,0286	226,6725	0,0285	228,2659
14	19,5	0,0294	214,5044	0,0284	229,8763	0,0281	234,8109
15	21	0,0284	229,8763	0,0294	214,5044	0,0286	226,6725
16	22,5	0,0288	223,5352	0,0287	225,0956	0,0289	221,9909
17	24	0,0288	223,5352	0,0285	228,2659	0,0283	231,5037
18	25,5	0,0292	217,4529	0,0291	218,9499	0,0286	226,6725
19	27	0,029	220,4625	0,0294	214,5044	0,029	220,4625
20	28,5	0,0287	225,0956	0,029	220,4625	0,0287	225,0956

Отримані результати можна представити у вигляді графіків (рис. 4.6).



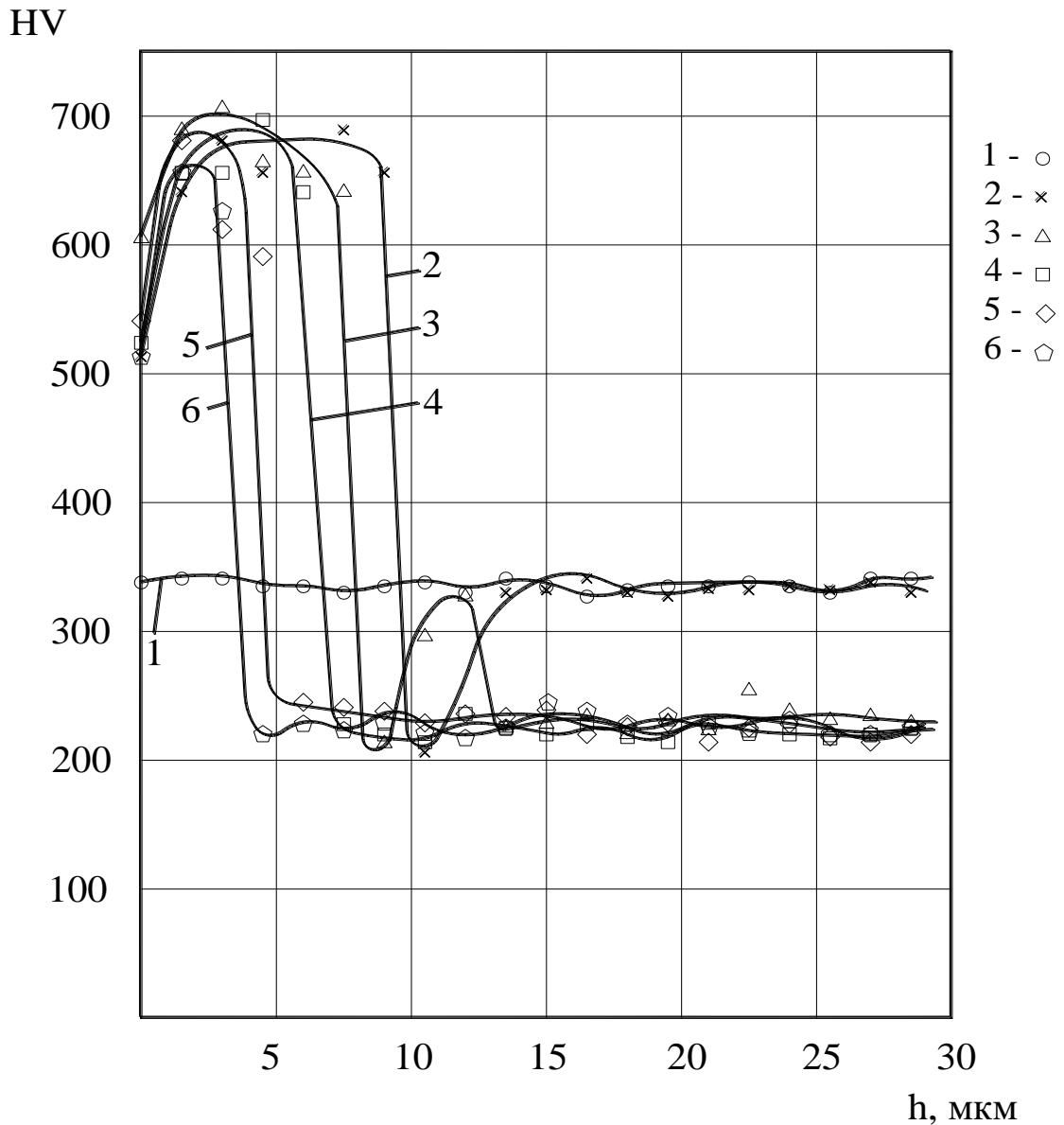


Рис. 4.6 – Розподіл мікротвердості по глибині зразка: 1 – еталонний зразок після механічної обробки; 2-6 – зразки після електроерозійної обробки на режимах 1-5 (таблиця 4.1)

Крива 1 відповідає еталонному зразку, який оброблено лише фрезеруванням. При чорновій фрезерній обробці внаслідок значних пластичних деформацій твердість поверхні зростає  $\sim 1.3$  рази. Коливання твердості від HV 327 до 343 ( $<5\%$ ) можна пояснити похибкою вимірювання діагоналей відбитку та певною нерівномірністю структури. В цілому поверхневий шар можна вважати однорідним з твердістю  $\sim$  HV335.

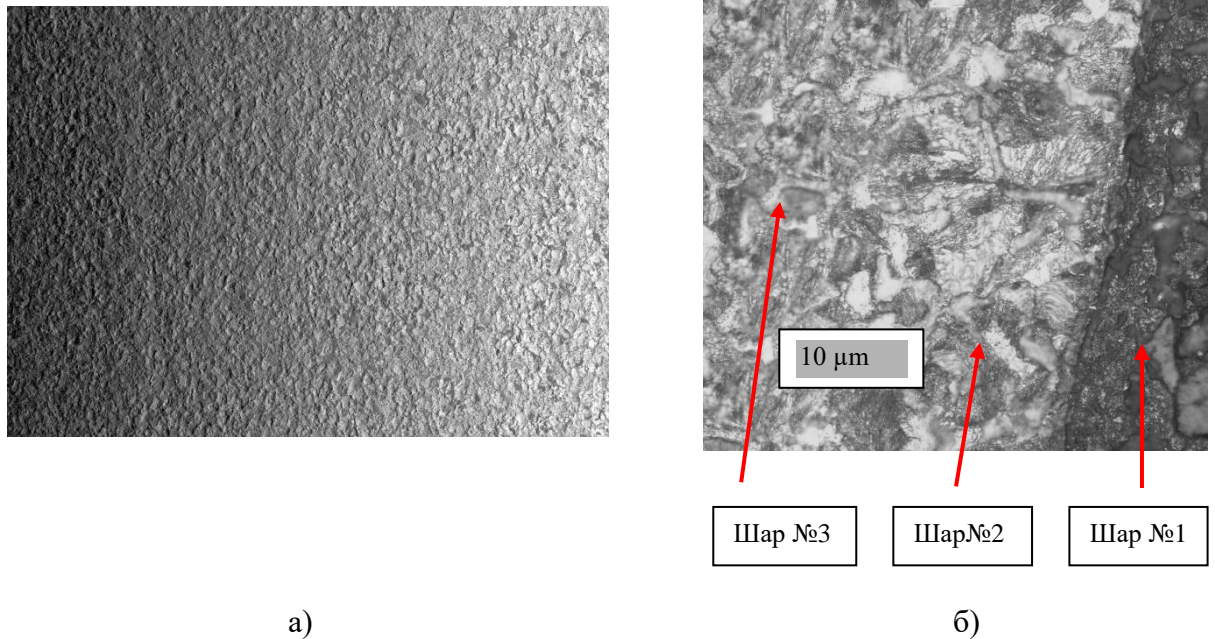


Рис. 4.7 – Контрольний знімок поверхні зразка ( $\times 50$ ), (а) перед проведенням вимірювань мікротвердості (нешліфована ділянка, режим NQ0024); шліф поперечного перерізу зразка (б), що ілюструє товщину та структуру поверхневих шарів після ЕЕДВ (режим NQ0024)

Криві 2-6 відповідають варіантам багатопрхідної обробки, наведеним в таблицях 4.1 та 4.2. Зазначимо, що кожен електроерозійний прохід створює на поверхні термічно змінену зону, яка видаляється наступним проходом або залишається на поверхні, якщо даний прохід був останнім.

Проаналізуємо криві 2-6. З отриманих значень видно, що порівняно з необробленим зразком, поверхневі шари після електроерозійної обробки мають термічно зміцнену зону. Ширина цієї зони збільшується із збільшенням тривалості та енергії імпульсу. Мікротвердість матеріалу в термічно зміцненому шарі близька до твердості мартенситних структур. На поверхні зразків у всіх випадках мікротвердість менша, ніж у наступному шарі. Це можна пояснити присутністю на ній невеликої кількості латуні, що була перенесена із дротяного електроду та перемішалася з розплавленим матеріалом зразка.

Крива 2, яка відповідає однопрохідній електроерозійній обробці на режимі NQ0024 (табл. 4.1), показує, що ширина термічно зміцненого шару складає ~ 9.5 мкм. Зі шліфа поперечного перерізу зразка (рис. 4.7 б) видно, що частину даного шару (шар №1), складає переплавлений матеріал зразка. Причому екстремальні значення мікротвердості в даній зоні, перевищують максимально досяжні при стандартному гартуванні цієї марки сталі. Даний факт швидше за все пояснюється надзвичайно високими швидкостями нагріву та охолодження, недосяжними в стандартних умовах гартування. В результаті в зоні дії розряду формуються вкрай нерівноважні структури з високою гетерогенністю за складом і структурою, які надають залізовуглецевим сплавам такі унікальні властивості як надвисока твердість. Однак питання ефективного використання подібних вторинних структур в металознавстві не розглядаються і структурно-кінетичний підхід до досліджень процесів вторинних фазових і структурних перетворень, що викликають суттєве збільшення експлуатаційних характеристик поверхневих шарів сталі, не розроблений. Варто також відзначити, що за факту фіксації надвисокої для Сталі 45 твердості в умовах експерименту наявності мікротріщин не виявлено. Товщина шару №1 достатньо стабільна з чіткою границею. Після шару №1 мікротвердість матеріалу різко зменшується до HV 206 і за наступні 5 мкм плавно збільшується до HV 335. Ці коливання мікротвердості фактично означають, що матеріал на даній глибині не встиг прогрітись до температур, за яких можливе мартенситне перетворення, а відбувся процес відпуску. На шліфі поперечного перерізу це зона шар №2. Починаючи з глибини 15 мкм матеріал знаходиться в тому ж стані, що був до початку електроерозійної обробки (шар №3). Між шаром №2 та шаром №3 немає чіткої межі. По суті вони перекривають один одного.

Крива 3, яка відповідає електроерозійній обробці двома проходами на NQ0024 та NQ0018, показує, що ширина термічно зміцненої зони не перевищує 8 мкм. За цією зоною відбувається відпуск матеріалу, твердість

збільшується, але починаючи з глибини 13 мкм мікротвердість падає до HV220. Фактично це означає, що на даній глибині знаходиться межа пластично зміцненого шару, під яким знаходиться матеріал у відпущеному стані.

Крива 4 відповідає електроерозійній обробці трьома проходами на режимах 24, 18, 14. Товщина термічно зміцненого шару не перебільшує 6 мкм, після чого мікротвердість знижується до HV220. В даному випадку зона пластичної деформації відсутня, а отже збільшення мікротвердості із збільшенням глибини на цьому і подальших режимах не виявлено.

Криві 5 та 6 відповідають обробці на режимах NQ0024, NQ0018, NQ0014, NQ0010 (для 4-х проходів) і NQ0024, NQ0018, NQ0014, NQ0010, NQ0007 (для 5-ти проходів). Ширина термічно зміцненого шару складає  $\sim 4$  і  $3$  мкм відповідно, нижче яких матеріал знаходиться у відпущеному стані.

Таким чином, обираючи необхідну кількість електроерозійних проходів з різним енергетичними режимами, ми не лише поступово зменшуємо шорсткість, але і керуємо товщиною термічно - або пластично - зміцненого шару на поверхні деталі, що в свою чергу впливає на її експлуатаційні властивості.

З графіків (рис. 4.6) видно, що зі збільшенням тривалості імпульсу струму та енергії розряду, виділеної на аноді, товщина термічно зміцненої зони зростає. Середня густина потужності в каналі розряду в дослідженому діапазоні режимів при цьому практично не змінюється (табл. 4.1). Виходячи із закономірностей фізики теплових процесів руйнації матеріалу розрядами малої енергії та тривалості з середньою густиною, потужності на рівні  $1-3 \cdot 10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup>, при обробці вуглецевих сталей між твердою фазою і газоподібною завжди існує зона розплаву, температура якого коливається в межах від 1530°C до 2700 °C [143], а отже переважну частину тривалості розряду плазмовий канал безпосередньо не взаємодіє з матеріалом у твердій фазі (крім моменту пробую). Геометричне співвідношення між діаметром та глибиною лунки

[143] дає можливість припустити, що в центральній частині лунки, прогрівання матеріалу вглиб відбувається достатньо рівномірно. Спираючись на наведене, нами висунута гіпотеза про те, що при використанні технологій ЕЕДВ для обробки вуглецевих сталей домінуючими факторами, які визначають процес поширення тепла в зоні дії плазми каналу розряду і, відповідно, формують різношарову зону термічного впливу є тривалість імпульсу та теплофізичні характеристики матеріалу деталі. Енергія розряду, що виділяється на аноді в межах досліджених режимів (середня густина, потужності в каналі розряду  $\sim 3 \cdot 10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup>) відіграє в формуванні шарів зони термічного впливу достатньо другорядну роль. На рис. 4.8 представлена побудована за отриманими результатами залежність товщини термічно зміцненої зони  $h_{\delta}$  від тривалості імпульсу струму  $\tau_i$ .

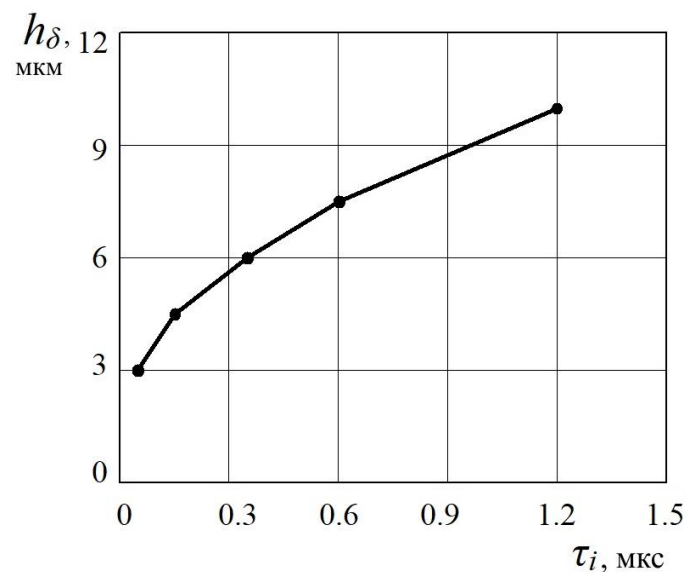


Рис. 4.8 – Залежність ширини термічно зміцненої зони від тривалості імпульсу струму (Сталь 45)

Якщо дана гіпотеза відповідає реальності, можемо припустити, що за ЕЕДВ вуглецевих сталей на електроерозійних комплексах з іншими типами генераторів товщина термічно зміцнених шарів буде корелювати з результатами представленими на рис. 4.8 (відмінності величин теплофізичних характеристик в групі конструкційних та інструментальних вуглецевих сталей не перевищують 10%).

Для перевірки висунутої гіпотези додаткові три контрольні зразки зі Сталі 45 були виготовлені за такою ж методикою на трьох інших моделях електроерозійних вирізних верстатів на режимах, енергетичні параметри одиничних імпульсів які також добре досліджені співробітниками лабораторії електрофізичних та електрохімічних методів обробки матеріалів Черкаського державного технологічного університету. Виходячи з наведених міркувань, для порівняння було обрано електроерозійний верстат моделі СЭЛД-02 з генератором технологічного струму ГКИ–300-200, в якому силові ключі реалізовані на тиристорах. Дана модель розроблена у 90-х роках минулого століття, але багато зразків верстатів і нині успішно працюють на підприємствах України. Другим верстатом стала модель СЭЛД-04 фірми «Араміс» з більш сучасним генератором технологічного струму, виконаним на швидкодіючих транзисторах. Третім верстатом стала модель AgieCharmilles CUT 20P швейцарської фірми AgieCharmilles, яка є одним із світових лідерів у виробництві електроерозійних верстатів. Енергетичні характеристики режимів та результати визначення максимальних товщин термічно зміцнених шарів наведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

**Товщина зони термічного впливу при обробці Сталі 45 на  
електроерозійних комплексах різних типів**

№ з/п	Виробник, модель	Шифрований код режиму	Енергія, що виділяється на аноді, $E_a$ , мДж	Амплітудне значення струму $I$ , А	Тривалість імпульсу струму $\tau_i$ , мкс	Глибина термічно зміцненої зони $h_\delta$ , мкм
1	НВО «Ротор», СЭЛД-02	2–2	2,45	85	7,1	28
2	«Араміс», СЭЛД-04	4	4,78	125	1,85	14
3	AgieCharmilles CUT 20P	M6	26,3	800	1,2	11

В межах отриманої кількості даних прослідковуються чітка кореляція між тривалістю імпульсу і товщиною термічно зміцненого шару, чого вже не можна стверджувати по відношенню до енергії розряду в обраному діапазоні режимів. Так найпотужніший режим з енергією імпульсу 26,3 мДж, амплітудним значенням робочого струму 800 А, але із тривалістю імпульсу 1,2

мкс створює на поверхні термічно зміцнений шар товщиною 11 мкм, а імпульс з енергією 2,45 мДж, але розтягнений у часі на 7,1 мкс призводить до утворення такого ж шару товщиною 28 мкм. Отримані результати контрольних досліджень в цілому слугують підтвердженням висунутої гіпотези і в межах можливих похибок не суперечать даним, отриманим при використанні електроерозійного вирізного верстату AccuteX GE-43SA і представленим на рис. 4.8 [142].

### **4.3 Математичне моделювання розподілу тепла в поверхневих шарах деталі при електроерозійній обробці**

Товщина зони термічного впливу не лише характеризує теплові процеси в поверхневих шарах заготовки, але і є технологічним параметром, який впливає як на експлуатаційні характеристики деталі, так і на визначення величини припуску для наступного проходу.

Для встановлення залежності між енергетичними показниками імпульсів струму та тепловими процесами, що відбуваються в поверхневих шарах деталі проведемо чисельне моделювання за методикою, описаною в розділі 3.1.1.

Метою моделювання є визначення ширини зони термічного впливу за двома ознаками – температурою, необхідною для аустенітних перетворень, та швидкістю охолодження матеріалу.

Так, для аустенітних перетворень необхідно, щоб температура в точці була вище лінії GPSK (рисунок 4.1) [121]. Швидкість охолодження матеріалу після завершення дії імпульсу вище критичної  $v_{кр}$ , відповідно структура загартованого шару буде містити дрібнозернистий мартенсит та аустеніт, що відповідає експериментальним даним по твердості поверхні [121].

Побудуємо теплові поля, що виникають в деталі від дії імпульсів на режимах 24, 14, 10 розглянутих в розділі 4.2 та режимах 4 і 1, які відносять до групи режимів суперфінішної обробки (табл. 3.2).

Для побудови теплових полів згідно моделі необхідні такі початкові дані: загальна енергія, що реалізована на аноді, тривалість імпульсу струму, діаметр плазмового каналу. Всі фізичні характеристики матеріалу, їх зміна від температура, закон розподілу енергії по площі і в часі занесені в програму для обрахунків у вигляді констант або функцій.

На рисунках 4.9 - 4.13 наведені ізотерми в такі моменти часу: час закінчення дії імпульсу струму, часи, кратні тривалості імпульсу  $2t$ ,  $4t$ ,  $6t$ ,  $8t$ .

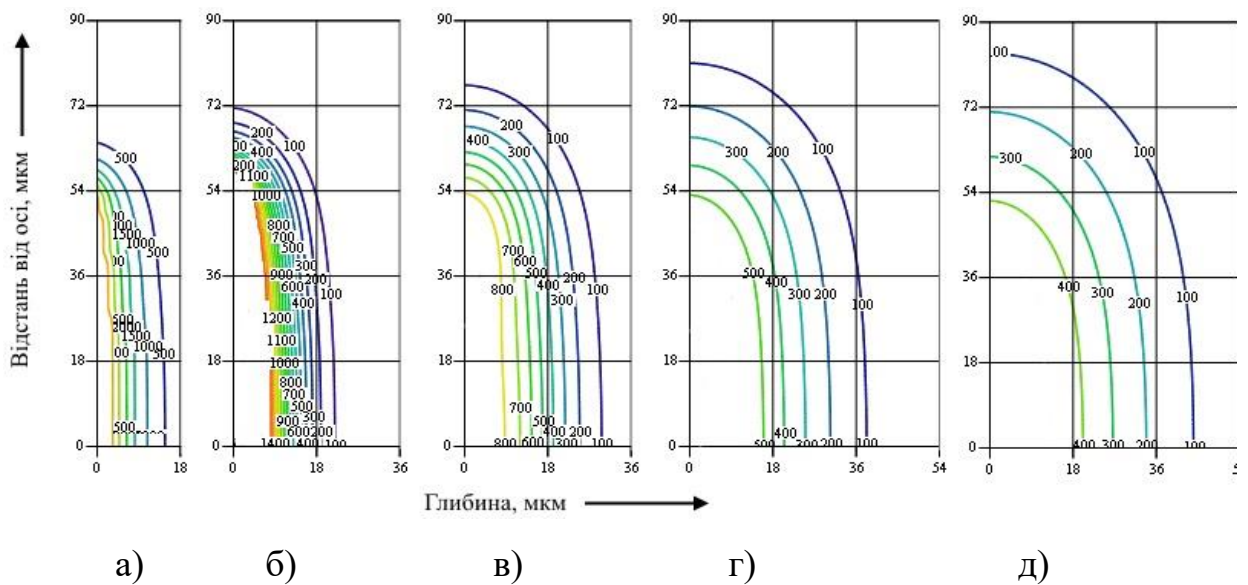


Рис. 4.9 – Ізотерми, побудовані для режиму 24 в моменти часу кратні тривалості імпульсу струму: а –  $t$ , б –  $2t$ , в –  $4t$ , г –  $6t$ , д –  $8t$

Для найпотужнішого з розглядуваних режимів в момент закінчення дії імпульсу струму температура розплавленого металу може сягати  $3300^{\circ}\text{C}$ . Враховуючи, що глибина утвореної лунки складає  $\approx 5-6$  мкм, можемо встановити, що за розглянутий проміжок часу ширина зони, яка нагрівається вище  $727^{\circ}\text{C}$  (разом з розплавом, що залишився в лунці) складає 6-8 мкм. Таким чином, ширина зони на поверхні деталі, в якій можливе утворення гартувальних структур не перевищує 9 мкм, що добре корелює з експериментально отриманими результатами (рис. 4.6, 4.8).

В подальшому завдяки теплопровідності теплове поле навколо лунки вирівнюється і в момент часу 9,6 мкс після початку дії імпульсу струму тепло встигає поширитись на глибину  $\sim 60$  мкм. (на рис. 4.9 не показано через



проблеми масштабування) Таким чином середня швидкість поширення тепла вглиб матеріалу знаходиться на рівні 7 м/с, що має один порядок з результатами, отриманими за формулою (4.1).

Оскільки, поверхневий шар може мати попередньо термо- або пластично зміцнений шар, розглянемо також можливість протікання відпуску матеріалу. Низький відпуск – це термічна операція, яка полягає в нагріванні матеріалу до 400°C і повільному охолодженні. Тож розглянемо на якій глибині матеріал прогрівається до такої температури. Згідно отриманих ізотерм ширина такої зони відповідає  $\approx 20$  мкм (від початкової поверхні).

Враховуючи, що матеріал видаляється на глибину 5-6 мкм, товщина зони з гартувальними структурами буде знаходитись в межах 9 мкм, ширина зони із матеріалом, в якому відбувся відпуск металу становитиме  $\approx 5-6$  мкм, що відповідає експериментальним результатам, отриманим в розділі 4.2 (рис. 4.6).

На рис. 4.10 наведено ізотерми отримані при моделюванні дії імпульсу струму режиму 14 (табл. 4.1) для моментів часу, кратних тривалості імпульсу струму -  $t$ ,  $2t$ ,  $4t$ ,  $6t$ ,  $8t$ .

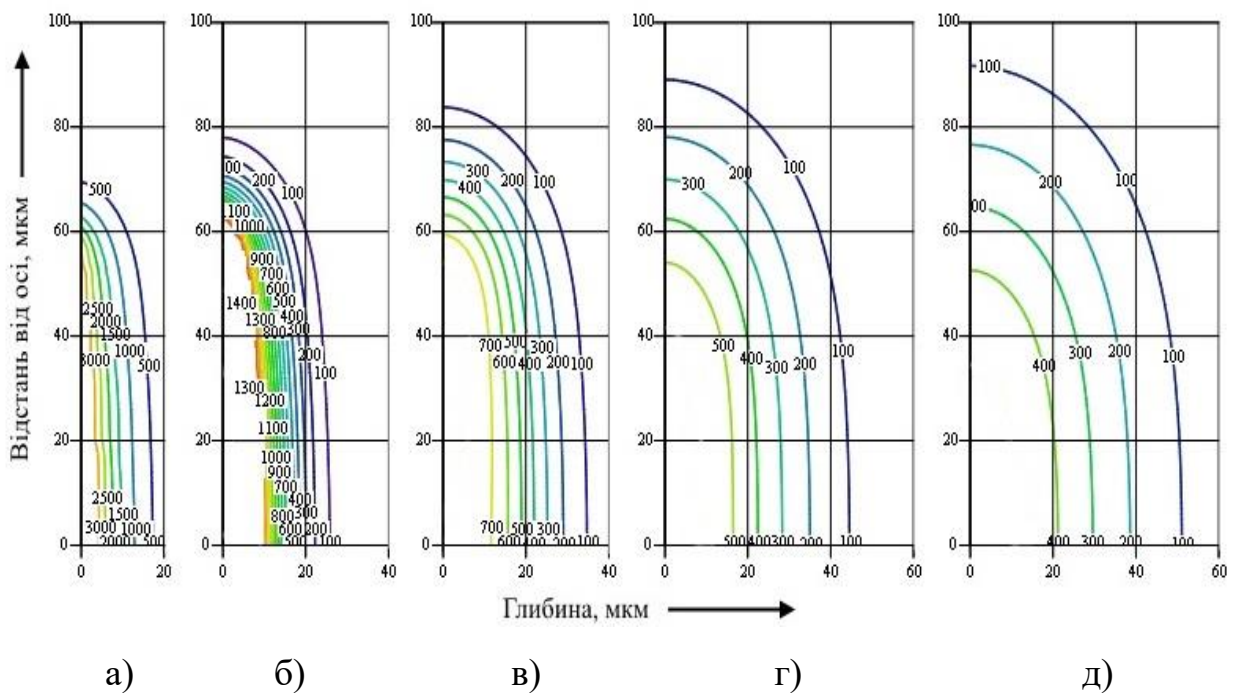


Рис. 4.10 – Ізотерми, побудовані для режиму 14 в моменти часу кратні тривалості імпульсу струму: а –  $t$ , б –  $2t$ , в –  $4t$ , г –  $6t$ , д –  $8t$

Враховуючи, що глибина утвореної лунки складає  $\approx 3 - 4$  мкм, можемо встановити що за розглянутий проміжок часу ширина зони, яка нагрівається вище  $727^\circ\text{C}$  (разом з розплавом, що залишився в лунці) складає 6-7 мкм. Відповідно ширина зони на поверхні деталі, в якій можливе утворення гартувальних структур не перевищує 7 мкм.

Ширина зони, в якій відбувається відпуск матеріалу обмежена ізотермою  $400^\circ\text{C}$ . Згідно отриманих ізотерм ширина такої зони відповідає  $\approx 20$  мкм (від початкової поверхні).

Враховуючи, що матеріал видаляється на глибину 3-4 мкм, товщина зони з гартувальними структурами буде знаходитись в межах 7 мкм, ширина зони із матеріалом, в якому відбувся відпуск металу становитиме  $\approx 7-8$  мкм,

Ізотерми, побудовані при моделюванні обробки на режимі 10 (та), для моментів часу  $t, 2t, 4t, 6t, 8t$  наведені на рис. 4.11.

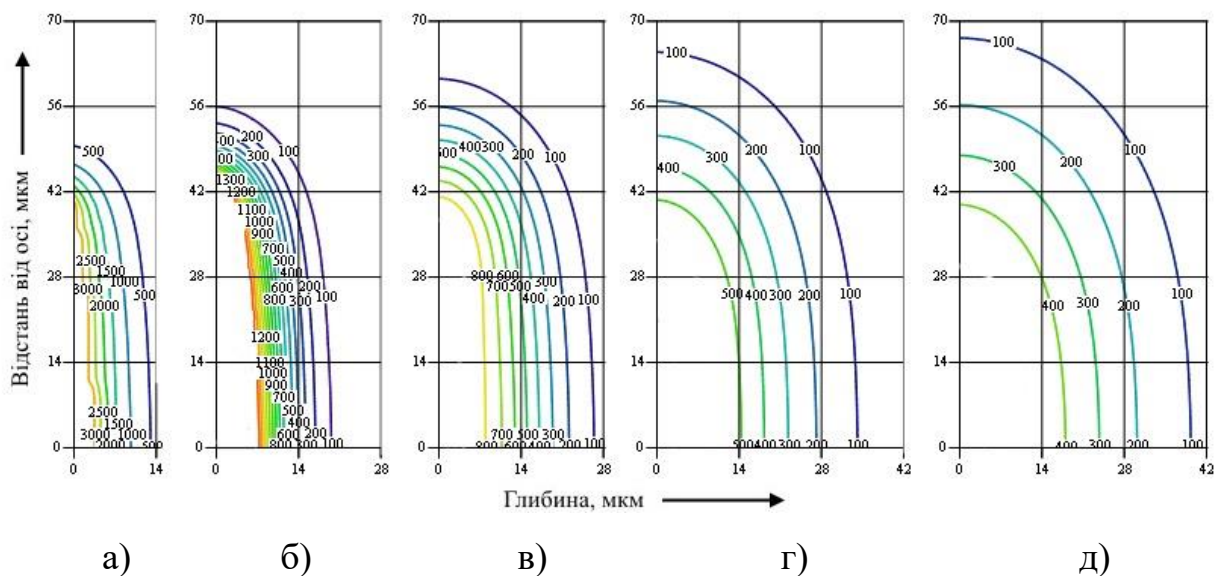


Рис. 4.11 – Ізотерми, побудовані для режиму 10 в моменти часу кратні тривалості імпульсу струму: а –  $t$ , б –  $2t$ , в –  $4t$ , г –  $6t$ , д –  $8t$

Враховуючи, що глибина утвореної лунки складає  $\sim 3$  мкм, можемо встановити, що за розглянутий проміжок часу ширина зони, яка нагрівається

вище  $727^{\circ}\text{C}$  складає 8 мкм. Відповідно ширина зони на поверхні деталі, в якій можливе утворення гартувальних структур не перевищує  $\sim 5$  мкм.

Ширина зони, в якій відбувається відпуск матеріалу обмежена ізотермою  $400^{\circ}\text{C}$  ( $\sim 16$  мкм). В розглянутому діапазоні часу, з врахуванням зони  $727^{\circ}\text{C}$ , ширина цієї зони складає до 8 мкм.

Ізотерми, побудовані при моделюванні обробки на режимі 4 (табл. 3.2), для моментів часу  $t, 2t, 4t, 6t, 8t$  наведені на рис. 4.12.

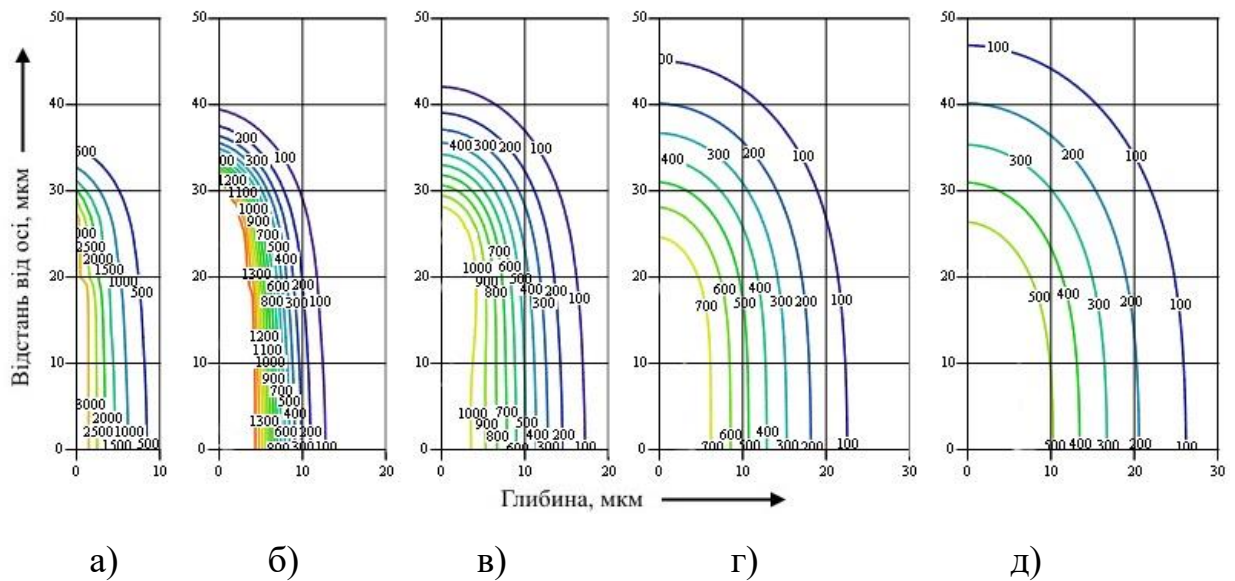


Рис. 4.12 – Ізотерми, побудовані для режиму 4 в моменти часу кратні тривалості імпульсу струму: а –  $t$ , б –  $2t$ , в –  $4t$ , г –  $6t$ , д –  $8t$

Враховуючи, що глибина утвореної лунки складає  $\sim 2.5$  мкм, можемо встановити, що за розглянутий проміжок часу ширина зони, яка нагрівається вище  $727^{\circ}\text{C}$  складає 5 мкм. Відповідно ширина зони на поверхні деталі, в якій можливе утворення гартувальних структур не перевищує  $\sim 3$  мкм.

Ширина зони, в якій відбувається відпуск матеріалу обмежена ізотермою  $400^{\circ}\text{C}$ . В розглянутому діапазоні часу, з врахуванням видалення матеріалу з лунки, ширина цієї зони складає до 7 мкм.

Ізотерми, побудовані при моделюванні обробки на режимі 1 (табл. 3.2), для моментів часу  $t, 2t, 4t, 6t, 8t$  наведені на рис. 4.13.

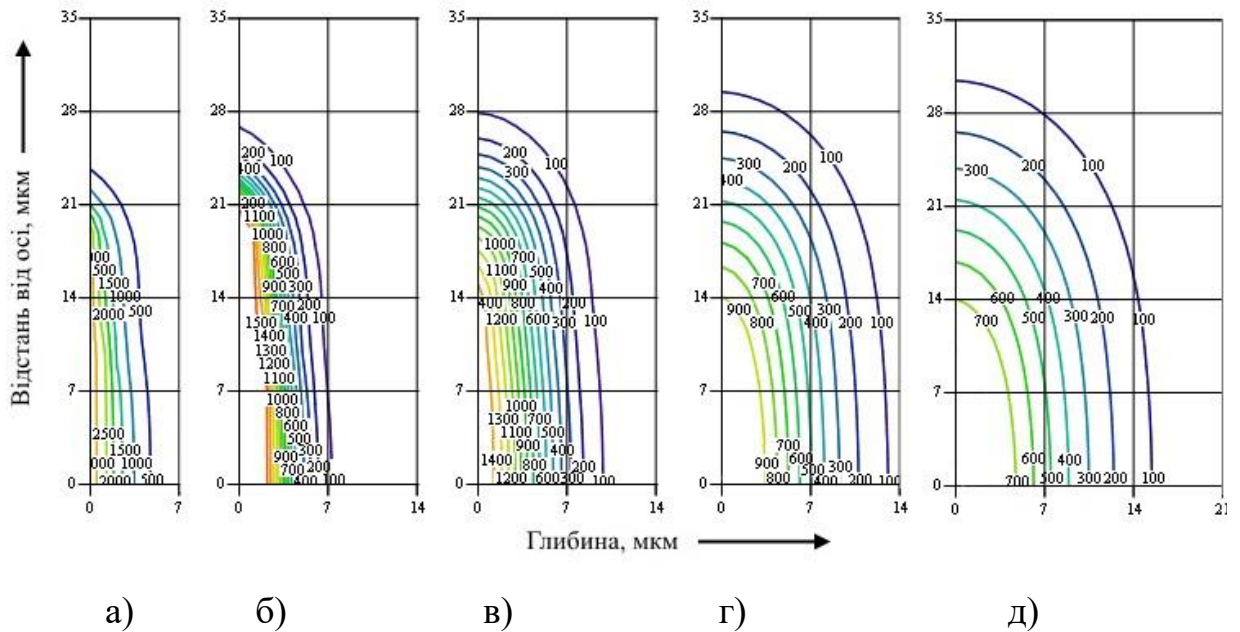


Рис. 4.13 – Ізотерми, побудовані для режиму 1 в моменти часу кратні тривалості імпульсу струму: а –  $t$ , б –  $2t$ , в –  $4t$ , г –  $6t$ , д –  $8t$

Враховуючи, що глибина утвореної лунки складає  $\sim 1,5$  мкм, можемо встановити, що за розглянутий проміжок часу ширина зони, яка нагрівається вище  $727^{\circ}\text{C}$  складає 3,5 мкм. Відповідно ширина зони на поверхні деталі, в якій можливе утворення гартувальних структур не перевищує 2 мкм.

Ширина зони, в якій відбувається відпуск матеріалу обмежена ізотермою  $400^{\circ}\text{C}$ . В розглянутому діапазоні часу, з врахуванням видалення матеріалу з лунки, ширина цієї зони складає до 6 мкм.

Результати математичного моделювання процесу розповсюдження тепла в зоні дії одиничного іскрового розряду в цілому підтверджують результати експериментальних досліджень і висунуту гіпотезу. Відповідно експериментальну залежність (рис. 4.8) можливо використовувати для прогнозування товщини термічно зміцненої зони при обробці на сучасних ЕЕВС широкого спектру інструментальних та конструкційних вуглецевих сталей.

#### 4.4 Оцінка рівня залишкових напружень, що виникають в зоні термічного впливу інструментальної сталі

Відомо, що електроерозійна обробка викликає залишкові напруження розтягу, що утворюються у верхньому шарі оброблюваної поверхні за рахунок термічного формування суттєвих змін у структурі матеріалу деталі у ЗТВ [62].

Функціональна ефективність широкого класу інструментів і деталей суттєво визначається властивостями поверхневих шарів і втому числі характером розподілу та величиною залишкових напружень поблизу робочих поверхонь. В силу особливостей формування, залишкові термонапруги при ЕЕДВ є напругами 1-го роду тобто вони присутні в макроскопічних масштабах і проходять поперек зерна [98]. Рівень та характер розподілу залишкових термонапруг впливає на стабільність розмірів, параметри втомної міцності та схильність оброблених поверхонь до корозії. При цьому у деяких випадках після дротяної електроерозії на чорнових режимах (різання повного зйому), спостерігаються великі деформації окремих частин деталі, що робить подальшу обробку неможливою [9].

Незважаючи на широке розповсюдження електроерозійної обробки в сучасному виробництві, робіт присвячених проблемам залишкових термонапруг досить мало, особливо по відношенню до технологій електроерозійного дротяного вирізання (ЕЕДВ). В роботі [135] автори встановили негативний вплив залишкових напружень, викликаних електроерозійною технологією формування поверхонь, на втомну міцність деталей медичної апаратури. Клінк та ін. [136] вивчали розподіл залишкової напруги в поверхневих шарах інструментальної сталі ASP 23 отриманих за технологією ЕЕДВ. При дослідженнях використовувалися точні, але дорогі методи дифракції рентгенівських променів та нейтронної дифракції. Ці прямі методи дозволяють виміряти залишкові напруги 1-го роду і 2-го роду. Отримані результати показали високу зону залишкової напруги в межах 30 мкм від верхньої поверхні. Антар та ін. [137] виявили подібні тенденції. В

роботі [138] також показано, що деталі після ЕЕДВ мали високі залишкові напруження в ЗТВ. Їх термін експлуатації за показниками втомної міцності суттєво поступався аналогічним деталям виготовленим класичним фрезеруванням, які мали в поверхневих шарах стискаючі напруги. В роботі [139] запропонована математична модель формування залишкових напруг в ЗТВ при масовій дії високочастотних розрядів. Результати чисельних експериментів задовільно узгоджуються з експериментальними даними. При цьому для зменшення максимальних значень залишкових напружень, автори пропонують використовувати розряди з мінімальною енергією, що на практиці з різник міркувань складно реалізувати.

В даному підрозділі, використовуючи запропоновану методику (див. роз. 2.2.7) виконана оцінка залишкових термонапруг в сталі У7А в залежності від глибини зони структурних змін при електроерозійному дротяному вирізанні, шляхом механічного вимірювання залишкових деформацій та розрахунків напружень за рівнянням (2.8), що описує зв'язок між залишковою напругою для одновимірного напруженого випадку та кривизною зразка.

В пластині зі сталі У7А товщиною 20 мм виконувалися пластинчаті надрізи шириною  $H=0.5$  мм та довжиною 100 мм, як різанням повного зйому, так і додатковими проходами на енергетичних режимах різання, що наведені в таблиці 4.5. Електричні параметри розрядів на кожному режимі записувалися на цифровий осцилограф, дані з якого оброблялися в системі автоматизованого проектування (САПР) AutoCAD 2010 (рис. 4.14) Після кожного проходу за допомогою мікатора (рис. 2.13) визначалися величини відхилення в заданих координатах бічної поверхні пластини надрізу від прямолінійного положення. Отримані дані вносилися в AutoCAD 2010, за допомогою якого визначався реальний радіус кривизни пластини. Після електроерозії установка перемикалася в режим електрохімічної обробки поверхні [140] в електроліті (хлорид натрію) NaCl 15%) і виконувалося пошарове знімання матеріалу ЗТВ на високочастотних контрольованих режимах (див. роз. 2.2.7).

**Електричні параметри генератора технологічного струму ГКІ 300– 200  
для різання повного зйому та додаткових проходів**

Параметри	Режими				
	№1пз (22 КГц)	№2дп (22 КГц)	№3дп (88 КГц)	№4дп (200 КГц)	№5дп (200 КГц)
$\tau_U$ , мкс	7,48	7,32	1,7	1,26	1,1
$\tau_I$ , мкс	9,48	7,32	2,44	1,1	0,95
$\tau_{xx}$ , мкс	9,2	5,22	1,99	1,22	1,1
$U_{np}$ , В	51,8	52,5	41,6	41,7	38,5
$U_p$ , В	66,5	65,3	50,65	43,1	40,2
$U_{xx}$ , В	158,2	108,2	108,1	60,3	55,7
$I$ , А	111,1	84,7	29,7	12,12	9,8
$E_a$ , мДж	3,3	2,18	0,70	0,434	0,28

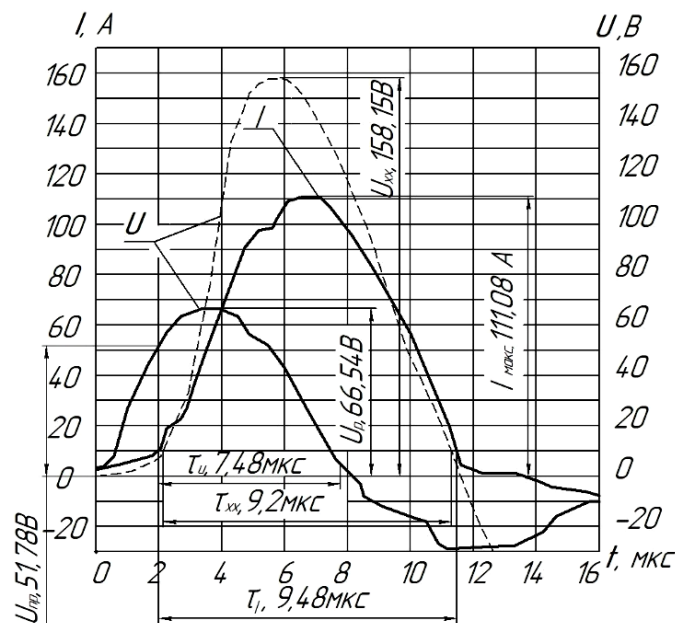


Рис. 4.14 – Осцилограми струму ( $I$ ) та напруги ( $U$ ) одиничного розряду режиму №1пз (табл. 4.5)

За один технологічний прохід знімалося  $15^{+3}$  мкм структурно зміненого шару, після чого кожного разу знову контролювався реальний залишковий прогин деталі. В кожному технологічному випадку (як після різання повного зйому так і після додаткових проходів) процес продовжувався до повного



видалення ЗТВ. Використовуючи отриману базу даних за рівнянням (2.8) розраховувалися напруження в конкретній зоні структурно зміненого шару. На рисунку 4.15 показані розраховані напруження в ЗТВ відразу після різання повного зйому.

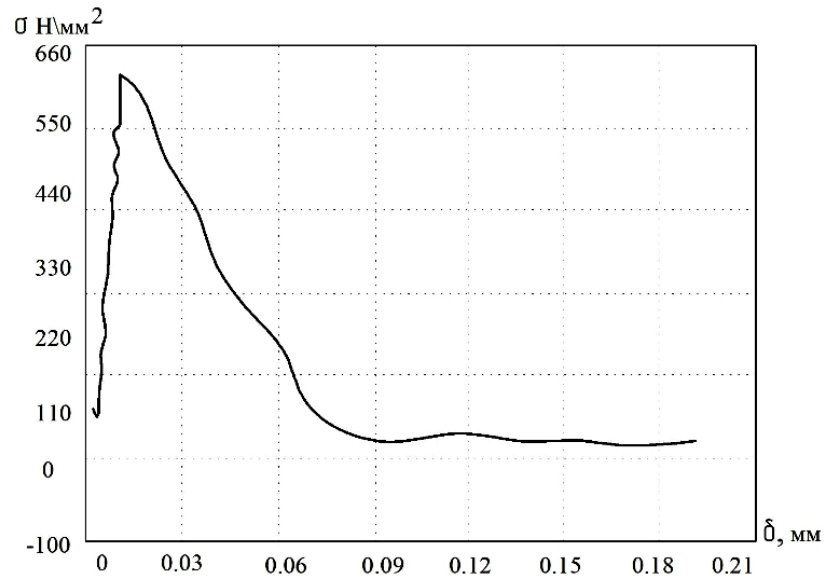
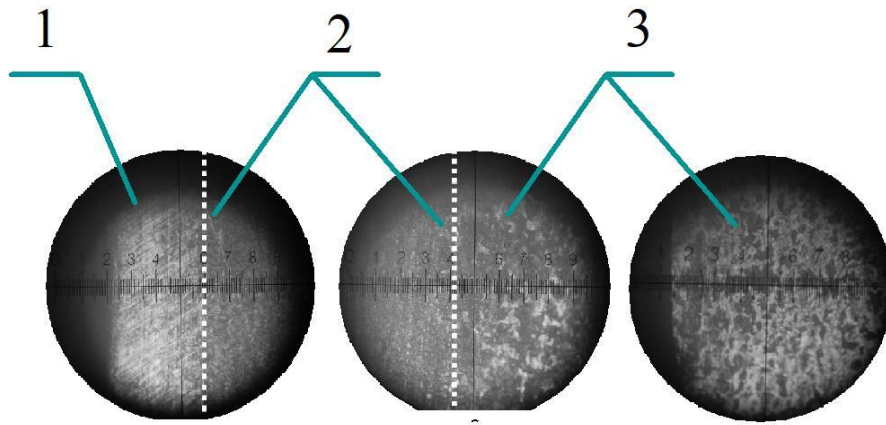


Рис. 4.15 – Профіль залишкових напружень після різання повного зйому

Для чорнової обробки, пік напруження не перебуває на поверхні, але трохи нижче. Це можна пояснити тим, що білий шар має багато пустот і мікротріщин, які викликають розслаблення залишкових напружень. Після досягнення піку напруження, розтягуюча напруження зменшується практично до нуля за межами ЗТВ. Отримані результати задовільно узгоджуються з даними по структурі поверхневих шарів сталі, які отримані за допомогою мікрошліфів (рис. 4.16).





1 – поверхневий (білий) шар  $\sim 20$  мкм; 2 – перехідний (структурно змінений шар)  $\sim 54$  мкм; 3 – основний матеріал після повного видалення за технологією електрохімічної розмірної обробки (ЕХРО) ЗТВ

Рис. 4.16 – Мікрошліфи зразків після різання повного зйому та ЕХРО

На рисунку 4.17 показані напруження після різання повного зйому і чотирьох додаткових проходів. Як і слід було очікувати, в обох випадках залишкові напруги розтягнення присутні в шарі ЗТВ.

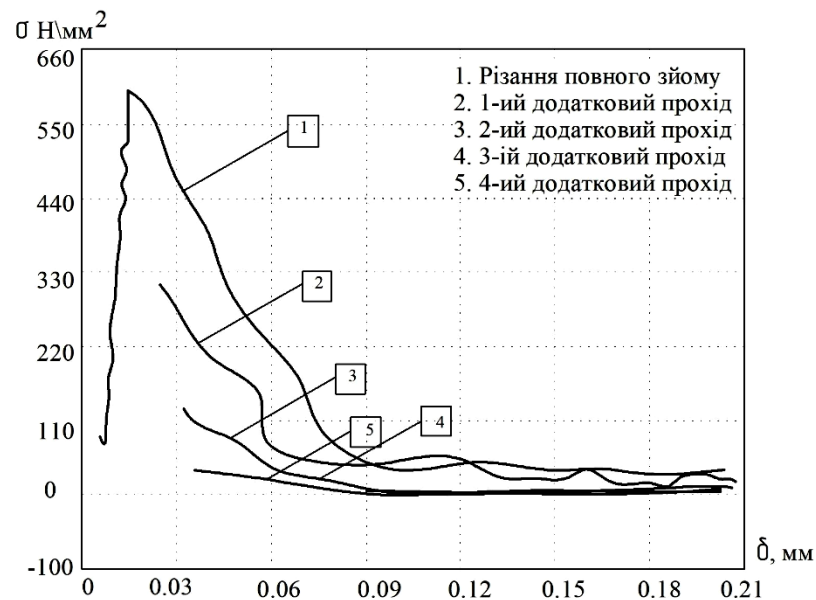


Рис. 4.17 – Профілі залишкових напруг для різання повного зйому та наступних проходів на режимах наведених в табл. 4.5

Після чотирьох додаткових проходів залишкова напруга значно нижче, а наявність напруг, що розтягують обмежується меншою глибиною (рис. 4.17).

Проте максимальна напруга розтягу спостерігається на верхній поверхні сформованій конкретним проходом. Там немає ніяких ознак релаксації.

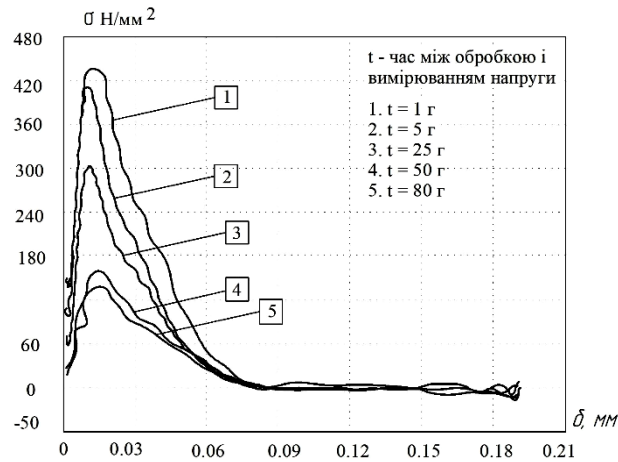


Рис. 4.18 – Релаксація залишкових напруг в ЗТВ в часі після різання повного зйому

На рис. 4.18 показані профілі напруг для зразків після чорнового різання зі змінним часом між фактичною обробкою електроерозією і вимірюванням деформацій та розрахунків напруги. Максимальна напруга знижується в часі, в той час, як глибина максимального напруження і глибина проникнення розтягуючої напруги залишаються тими ж.

#### 4.5 Висновки за розділом 4

1. Виконано системний комплекс досліджень по визначенню мікротвердості та товщини зони термічного зміцнення в якісній вуглецевій конструкційній Сталі 45 після ЕЕДВ. Отримані результати забезпечують поповнення бази даних та розширення уявлень про закономірності впливу часово-енергетичних характеристик імпульсів технологічного струму на формування термічно зміцненого шару за ЕЕДВ якісних вуглецевих сталей. Доведена можливість ефективно впливати на формування необхідних для тих чи інших умов експлуатації фізико-механічних властивостей поверхневих

шарів деталей з вуглецевих сталей часовими параметрами одиничного іскрового розряду.

2. В зоні термічного зміцнення Сталі 45 після ЕЕДВ виявлені екстремальні значення мікротвердості, які перевищують максимально досяжні при стандартному гартуванні цієї марки сталі. Даний факт пояснюється надзвичайно високими швидкостями нагріву та охолодження, недосяжними в стандартних умовах гартування. В результаті в зоні дії розряду формуються вкрай нерівноважні структури з високою гетерогенністю за складом і структурою, які надають залізовуглецевим сплавам такі унікальні властивості, як надвисока твердість.

3. Висунуто, обґрунтовано та експериментально підтверджено гіпотезу про те, що при ЕЕДВ якісних вуглецевих сталей за використання розрядних імпульсів струму з енергетичними та часовими параметрами характерними для сучасних електроерозійних вирізних верстатів домінуючий вплив на формування товщини термічно зміцненого шару має тривалість імпульсу струму. Величина енергії розряду, яка виділяється на аноді в межах параметрів проведених експериментів на даний процес має другорядний вплив.

4. Проведена серія чисельних експериментів в цілому підтвердила отримані експериментальні результати, що дозволяє з похибкою, що не перевищує 15% використовувати їх для прогнозування товщини термічно зміцненого шару при ЕЕДВ широкої групи конструкційних та інструментальних вуглецевих сталей.

5. Вимірювання залишкової напруги в ЗТВ сталі У7А після дротяного електроерозійного різання повного зйому та додаткових проходів показали, що максимальна напруга розтягу скорочується зі збільшенням кількості додаткових проходів.

6. Для чорнової електроерозії спостерігається релаксація залишкових напружень у часі, що зменшує максимальне залишкове напруження розтягу.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Сукупність представлених у дисертації результатів експериментальних та теоретичних досліджень становить нове вирішення актуальної науково-технічної задачі підвищення ефективності технологічного забезпечення прогнозування та керованого формування мікрогеометрії та фізико-механічних властивостей поверхневих шарів сталей при електроерозійній обробці дротяним електродом. Найбільш істотні наукові результати і висновки дисертаційної роботи полягають у такому:

1. Проведеним аналізом стану проблеми формування якості поверхневих шарів при електроерозійній обробці дротяним електродом встановлено, що за умов використання енергетичних параметрів сучасних генераторів технологічного струму, технологічні можливості керованого формування заданих властивостей поверхневих шарів сталевих деталей вичерпані далеко не повністю.

2. Запропонована загальна концепція, розроблено та підібрано методики та обладнання для реалізації комплексу експериментальних досліджень керованого впливу основних параметрів електроерозійного дротяного вирізання на формування мікрогеометрії, структури та фізико-механічних властивостей поверхневих шарів сталей.

3. У рамках теплової гіпотези шляхом розрахунків за запропонованою математичною моделлю побудовано форми границь фазових переходів, що формуються одиничним розрядом при обробці якісної конструкційної сталі 45 (ГОСТ 1050-88) за використання енергетичних параметрів імпульсів, характерних для фінішного, напівчистового та чорнового режимів різання сучасного електроерозійного комплексу AccuteX GE-43SA.

4. Для групи сталей з відомими та достатньо близькими теплофізичними характеристиками (Сталь 45, Сталь 48, 40X, У10, Х12М) отримана система рівнянь, які дозволяють на етапі проектування технологічного процесу електроерозійного дротяного вирізання для відомих енергій розряду, що

виділяється на аноді, тривалості розряду та коефіцієнта перекриття лунок розраховувати три базові параметри шорсткості –  $R_z$ ,  $R_a$ ,  $R_q$

4. Отримано закономірності виникнення та впливу вібрацій ДЕІ на формування мікрогеометрії оброблених поверхонь. Розроблено математичну статистичну модель для розрахунку впливу вібрацій ДЕІ на мікрогеометрію оброблених поверхонь.

5. Виконано системний комплекс досліджень по визначенню мікротвердості та товщини зони термічного зміцнення в якісній вуглецевій конструкційній Сталі 45 після ЕЕДВ. Отримані результати забезпечують поповнення бази даних та розширення уявлень про закономірності впливу часово-енергетичних характеристик імпульсів технологічного струму на формування термічно зміцненого шару за ЕЕДВ якісних вуглецевих сталей. Доведена можливість ефективно впливати на формування необхідних для тих чи інших умов експлуатації фізико-механічних властивостей поверхневих шарів деталей з вуглецевих сталей часовими параметрами одиничного іскрового розряду.

6. Висунуто, обґрунтовано та експериментально підтверджено гіпотезу про те, що при ЕЕДВ якісних вуглецевих сталей за використання розрядних імпульсів струму з енергетичними та часовими параметрами характерними для сучасних електроерозійних вирізних верстатів домінуючий вплив на формування товщини термічно зміцненого шару має тривалість імпульсу струму. Величина енергії розряду, яка виділяється на аноді в межах параметрів проведених експериментів на даний процес має другорядний вплив.

7. Проведена серія чисельних експериментів в цілому підтвердила отримані експериментальні результати, що дозволяє з похибкою, що не перевищує 15% використовувати їх для прогнозування та керування формуванням необхідної за умовами експлуатації товщини термічно зміцненого шару при ЕЕДВ широкої групи конструкційних та інструментальних вуглецевих сталей.

8. Результати комплексу експериментальних досліджень залишкової напруги в ЗТВ сталі У7А після дротяного електроерозійного різання повного зйому та додаткових проходів показали, що максимальна напруга розтягу скорочується зі збільшенням кількості додаткових проходів. Для чорної електроерозії спостерігається релаксація залишкових напружень у часі, що зменшує максимальне залишкове напруження розтягу.

9. Отримані результати, по суті, відкривають перспективний шлях до мінімізації енергетичних затрат на обробку тієї чи іншої марки сталі та керування характеристиками оброблених поверхонь як з точки зору формування мікрогеометрії, так і глибини зміни структури в зоні термічного впливу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Штирнеман К., Тенги Ф., Маттей С. Прогрессивные разработки в области электроэрозионной обработки. Современное применение для различных целей. Технология – лидер будущего // Тезисы докладов Международного юбилейного симпозиума по электроэрозионной обработке. М.: – “НПО “Техномаш”. – 1993. – С. 9–10.
2. Зингерман А.С., Лившиц А.Л., Сосенко А.Б. О физических факторах, определяющих производительность электроимпульсной обработки металлов // “Электроимпульсный и электроконтактный способы обработки металлов”:Сб. – М.: ЭНИМС, 1962. – С. 85 – 97.
3. Левит М.Л., Парадизова М.В. Аналитическая оценка постоянной составляющей температурного поля электрода–проволоки // Электронная обработка материалов. – 1988. – №3. – С. 12-15.
4. Коренблюм В.М., Бихман Б.М., Алексеев Г.А. Методика расчета параметров режима высокопродуктивного вырезания на электроэрозионных станках с проволочным электродом. // Электронная обработка материалов. – 1988. – №6. – С. 6-11.
5. Осипенко В.И., Калейников Г.Е., Поляков С.П. Экспериментальное исследование влияния поверхностно-активных веществ на процесс электроэрозионного проволочного вырезания // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2003. – №1. – С. 93–97.
6. Золотых Б.Н., Постановов В.Х., Батьков А.А. Электроэрозионная обработка – основа создания уникальных деталей летательных аппаратов // Электронная обработка материалов. – 2000. - №5, С. 4-16.
7. Коваленко В.С. Нетрадиционные методы обработки материалов в Японии // Электронная обработка материалов. – 2000. - №3, С. 4-12.
8. Коваленко В.С. Машиностроение в новом тысячелетии // Электронная обработка материалов. – 2001.- №3, С. 60-68.

9. Золотых Б.Н. 50 лет электроэрозионной обработки (ЭЭО): пройденный путь и перспективы дальнейшего прогресса //Тезисы докладов международного юбилейного симпозиума по электроэрозионной обработке. – М.: НПО Техномаш. - 1993. - С. 5-8.
10. Experience of the best. Technical magazine of the AGIE Company. – №9, January 1996 С. 15.
11. Зингерман А.С., Лившиц А.Л., Сосенко А.Б. О физических факторах, определяющих производительность электроимпульсной обработки металлов // “Электроимпульсный и электроконтактный способы обработки металлов”: Сб. – М.: ЭНИМС, 1962. – С. 85 – 97.
12. Коренблюм В.М., Бихман Б.М., Алексеев Г.А. Методика расчета параметров режима высокопродуктивного вырезания на электроэрозионных станках с проволочным электродом // Электронная обработка материалов. – 1988. – №6. – С. 6–11.
13. Коренблюм М.В. О связи величины шероховатости поверхности с длительностью и амплитудой импульсов разрядного тока при электроэрозионной обработке // Физика и химия обработки материалов. – 1972. – № 4. – С. 135–138.
14. Золотых Б.Н., Мельдер Р.Р. Физические основы электроэрозионной обработки. – М.: Машиностроение, 1977. – 41 с.
15. Иоффе В.Ф., Коренблюм М.В., Шавырин В.А. Автоматизированные электроэрозионные станки. – Л.: Машиностроение, 1984. – 227 с.
16. Кохановская Т.С. Разработка математической модели бокового зазора для чистовых и получистовых режимов ЭЭО // Электрофизические и электрохимические методы обработки. – 1978.–Вып. №10. – С. 3 – 10.
17. Кохановская Т.С. К вопросу о линейном сервоприводе // ”ИТО”. – 2000. – №3. – С. 12 – 14.
18. Ставицкий Б.И., Безрук А.И. Влияние величины межэлектродного промежутка на эффект эрозии и распределение энергии между катодом и анодом // Электронная обработка материалов. – 1969. – №5. – С. 7–14.



19. Немилев Е.Ф. Справочник по электроэрозионной обработке материалов. –Л.: Машиностроение, 1989.– 164 с.
20. Отто М.Ш., Шестеркин В.А. К вопросу о расчете эрозионной стойкости электродов–инструментов при электроэрозионной обработке // Электронная обработка материалов.– 1986.– №6.– С. 18–20.
21. Ступак Д.О. Оптимізація процесу енерговиділення в міжелектродному проміжку для умов електроерозійного дротяного різання: Дис. канд. техн. наук: 05.03.07. – К., 2002. – 144 с.
22. Намитоков К.К. Электроэрозионные явления. – М.: Энергия, 1977. – 153 с.
23. Золотых Б.Н., Гиоев К.Х. Роль факелов импульсного разряда в передаче энергии и эрозии электродов // Физические основы электроискровой обработки материалов. – М.: Наука, 1966. – С. 16 – 32.
24. Девойно И.Г. Проблемы износа электродов-инструментов при электроэрозионной обработке // Электронная обработка материалов. – 1989. –№6. – С. 3–7.
25. Левит М.Л. Влияние структурных свойств композиционных электродных материалов на механизм электрической эрозии //Электрофизическая обработка. Технология, оборудование, станочные системы: Сб. науч. тр. Под ред. Б.Х. Мечетнера. – М., 1987. – С. 13 – 31.
26. Левит М.Л., Падалко О.В., Арнольдин Н.М. Электроэрозионные характеристики электродов-инструментов из углеграфитовых материалов //Электрофизические и электрохимические методы обработки: Науч.-техн. реф. сб. – 1978. – №2. – С. 4–8.
27. Pandit S.M., Rajurkar K.R., Shaw M.C. Analysis of electrodischarge machining of cemented carbides //GIRP Ann. – 1981.– 30, №1.– P. 111–116.
28. Erden A. Effect of material on the mechanism of electrodischarge machining //Trans of ASMEIJ Eng. Mater and Technol.– 1993. – №2. – P. 132 –138.

29. Heuvelman C.I. Summary report of the CIRP cooperative research of the spark erosion machining of cemented carbides // GIRP Ann.– 1990. – 29,-N2. – P.541–544.
30. Мицкевич М.К., Девойно И.Г. Особенности чистовой электроэрозионной обработки на небольших площадях // Тез. док. к зон. конф. “Электрофизикохимические и комбинированные методы обработки металлов”. – Пенза. – 1984. – С.6–7.
31. Девойно И.Г. Исследование особенностей электроэрозионной обработки закаленных инструментальных сталей //Тез. докл 2 Всесоюзной науч.-техн. конф. “Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения прочности и долговечности изделий”. – Запорожье. – 1983. – С.89.
32. Левит М.Л., Падалко О.В. Технологические характеристики ЭЭО пористыми медными электродами // Станки и инструмент. – 1984. – №2. – С.20–21.
33. Шмаков Г.С. Влияние сотовой структуры материала электрода-инструмента на повышение производительности ЭЭО //Электронная обработка материалов. – 1979. –№5. – С. 27–28.
34. Розе А.В. Основные пути радикального снижения износа электрода-инструмента при электроэрозионной обработке //Пути повышения эффективности применения электрофизических и электрохимических методов обработки. – Л., 1983. – С. 52–56.
35. Вероман В.Ю. Способы уменьшения износа электрода-инструмента при высококачественной электроискровой обработке //Станки и инструмент. – 1962.–№6. – С. 15–17.
36. Отто М.Ш. Анализ эрозионной стойкости однородных и двухслойных электродов. Электрофизические и электрохимические методы обработки: / Науч.-техн.реф. сб. НИИ маш. – 1968. –Вып.1. – С. 35 – 42.
37. Халдеев В.Н. Факельная защита электрода-инструмента от износа // Электронная обработка материалов. – 1988.–№6. – С. 5 – 7.

38. Падалко О.В., Левит М.Л. Методика определения показателей качества электродов-инструментов для электроэрозионной обработки /Электрофизические и электрохимические методы обработки: Науч.-техн. реф. сб. – 1969. –№1. – С. 8–17.
39. Виллистер В.П., Седова М.Л. Процесс образования защитных пленок на электроде-инструменте при электроискровой обработке металлов// Физика и химия обработки материалов. – 1967. –№2. – С. 7–9.
40. Рейбах С.Ю. Выбор электрода-проволоки для электроэрозионных вырезных станков// Станки и инструмент. – 1984. – № 8. – С. 25.
41. Шмаков Г.С. Разработка материалов электродов-инструментов с повышенными электроэрозионными технологическими характеристиками// Электронная обработка материалов. – 1987. – №4. – С. 18.
42. Осипенко В.И. Повышение производительности и точности размерной электроэрозионной обработки на вырезных станках с ЧПУ: Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.07. – К., 1999. – 144 с.
43. Золотых Б.Н. Физические основы электрофизических и электрохимических методов обработки. – М.: МВИССО РСФСР, 1975. – 104 с.
44. Лившиц А.Л. и др. Электроимпульсная обработка металлов. – М.: Машиностроение, 1967. – 296 с.
45. Коренблюм М.В., Полуянов В.С. Автоматизированные электроэрозионные станки // Итоги науки и техники. ВИНТИ. Сер. Резание металлов. Станки и инструменты. – 2000. – №11. – 140 с.
46. Experience of the best // Technical magazine of the AGIE Company.– 1996. January.– №9, – P. 12 – 14.
47. Experience of the best // Technical magazine of the AGIE Company. – 1995. January. – №6, – P. 9 – 10.

48. Синкай М., Сида С., Ятоми Т. Тенденции развития электроэрозионных вырезных станков // Кикайгидзюцу. Мес. Eng. – 1995. – 33, №2. – Р. 62 – 68.
49. Хаякава Д. Современные тенденции в проектировании прецизионной техники. Электроэрозионные станки для высокоточной обработки // Кикайсэккей. Mach. Des. – 1999. – 33, №6. – Р. 81 – 85.
50. Бихман Б.М., Зорин Ю.А., Златкин Я.И. О механизме обрыва проволоки при электроэрозионном вырезании// Электронная обработка материалов.–1984.–№3. – С. 8–11.
51. Хаякава Д. Современные тенденции в проектировании прецизионной техники. Электроэрозионные станки для высокоточной обработки // Кикайсэккей. Mach. Des. – 1999. – 33, №6. – Р. 81 – 85.
52. Коренблюм М.В., Полуянов В.С. Автоматизированные электроэрозионные станки // Итоги науки и техники. ВИНТИ. Сер. Резание металлов. Станки и инструменты. – 2000. – №11. – 140 с.
53. Синкай М., Сида С., Ятоми Т. Тенденции развития электроэрозионных вырезных станков // Кикайгидзюцу. Мес. Eng. – 1995. – 33, №2. – Р.62 – 68.
54. Коваленко В.С. Технология и оборудование электрофизических и электрохимических методов обработки материалов. – К.: Вища школа, 1983. – 176 с.
55. Съянов С. Ю. 55. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя деталей при электроэрозионной обработке :дис. канд. техн. наук : 05.02.08 / Съянов Сергей Юрьевич – Брянск, 2002. – 157 с.
56. Математические методы в технологических исследованиях / Рыжов Э.В., Горленко О.А Отв. Ред. Гавриш А.Г.; АН УССР. Ин-т сверхтврд. Материалов. Киев: Наука. Думка, 1990. – 184 с. ISBN 5 – 12 – 001622-7

57. 10, 68, 70, 71 Бишутин С.Г., Сьянов С.Ю. «Теоретический расчет параметров шероховатости поверхности при шлифовании и электроэрозионной обработке.» – Обработка металлов №1 (12), 2001г.
58. Суслов А.Г. Качествоповерхностногослоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с..
59. Сьянов С.Ю. Факторы, влияющие на формирование параметров шероховатости при электроэрозионной обработке. Тез. Докл. Молодежной научно-технической конференции «Славянских государств»/ Под ред. О.А. Горленко. – Брянск: БГТУ, 2000. – с. 74 – 76.
60. Сьянов С.Ю. Связь параметров электрическо эрозии с показателями шероховатости поверхности. Молодежная научно-техническая конференция вузов приграничных регионов славянских государств, 23 – 24 окт. 2001 г., г. Брянск: Тез. Докл./Под ред. Горленко О.А. – Брянск: БГТУ, 2001. – с. 50 – 52.
61. Инютин В.П., Сьянов С.Ю. Микрогеометрические показатели качества поверхности при электроэрозионной обработке. Качество машин: Сб. тр. 4-й междунар. Науч.-техн. Конф., 10 – 11 мая 2001 г.: В 2т./Под общ. Ред. А.Г. Сулова – Брянск: БГТУ, 2001. – Т.2. – с. 50 – 51.
62. Фотеев Н.К. Технология электроэрозионной обработки. – М.: Машиностроение, 1980. – 184 с.
63. Вячеславов А.В. О формировании поверхностных источников тепла при электроэрозионной обработке // Исследования в области технологии механической обработки и сборки. – Тула: ТПИ, 1991. – С. 3 – 6.
64. Золотых Б.Н., Трофимова Н.Б. Экспериментальное исследование пробоя жидкостей в условиях электроискровой обработки // Электронная обработка материалов. – 1969. – №4. – С. 33–36.
65. A.V. Puri, B. Bhattacharyya. Modeling and analysis of the wire-tool vibration in wire-cut EDM // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – №141 – P. 295–301.

66. C. Arunachalam, M. Aulia, B. Bozkurt, P. T. Eubank. Wire Vibration, Bowing and Breakage in Wire EDM // VDI BERICHTE – 1998. – №1405 – P. 109–118.
67. Sthioul H., Delpretti R., Tricarico C., Dauw D. Improvemen to the wire EDM cutting precision by vibration analysis and control // Proceeding sofI SEM – – 1999. – 9, Nagoya. P. 214 – 218.
68. Исследование механизма гидродинамических процессов в межэлектродном промежутке под воздействием ультразвуковых колебаний, приложенных к электроду-инструменту // Электронная обработка материалов, 1988, №6, С. 52-54.
69. Г.Г. Позняк, В.А. Рогов. Динамическая составляющая погрешности вырезного электроэрозионного станка // СТИН – 2003. – №4 – С. 35 – 38.
70. Хижняк Є. В. Закономірності виникнення та впливу коливань дротяного електроду на точність обробки та процеси формування мікрогеометрії поверхні при електроерозійному вирізанні : дис. канд. техн. наук : 05.03.07 / Хижняк Є. В. – Черкаси, 2014.
71. Осипенко В.І. Аналітична оцінка впливу просторово-енергетичних характеристик іскрового розряду на об'єм ерозійної лунки на сталевому аноді // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2003. – №4. – С. 28–31.
72. Гамоу Г., Хирамото О., Тономура М. Повышение точности электроэрозионных вырезных станков // Кикай то когу. Tool. Eng. – 1995. – 29, №10. – P.71 – 74.
73. Рейбах С.Ю. Влияние технологических условий электроэрозионного вырезания на точность обработки // Станки и инструмент. – 1988. – №12. –С.19–21.
74. Kawata A., Okada A., Okamoto Y., Kurihara H. Influence of Nozzle Jet Flushing on Wire Breakage in 1st-Cut Wire EDM from Start Hole // Key Engineering Materials. – V. 749–Trans Tech Publ, 2017. – P. 130–135.

75. Ľuboslav S., Ivan Ā., Ján P. Properties Evaluation of Thin Microhardened Surface Layer of Tool Steel after Wire EDM // DOI-10.3390/met6050095, Published 2016, P. 15.
76. Японія, патент № JP 2997380, C23H7/02, опубл. 05.07.1993
77. Митрюшин Е. А., Моргунов Ю. А., Саушкин С. Б. Унифицированные технологии изготовления штампов с применением электрофизических методов обработки. // Металлообработка. 2010. № 2. С. 42-45.
78. Коренблюм В.М., Бихман Б.М., Алексеев Г.А. Методика расчета параметров режима высокопродуктивного вырезания на электроэрозионных станках с проволочным электродом. // Электронная обработка материалов. – 1988. – №6. – С. 6-11.
79. Коренблюм М.В., Полуянов В.С. Автоматизированные электроэрозионные станки // Итоги науки и техники. ВИНТИ. Сер. Резание металлов. Станки и инструменты. – 2000. – №11. – 140 с.
80. Революционная система электроэрозионной резки - Super BS [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.sodick-euro.ru/technologies/superbs/superBS.html> від 10.05.2009р.
81. Быстрые электроискровые зеркальные системы "ПИКА" [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://sodick.sodicom.biz/ru/pika-finishing/> від 10.05.2009р.
82. Тойберт П. Оценка точности результатов измерений / Перевод с нем. В. Н. Храменкова; Под ред. Е.И. Сычева. – М.: Энергоатомиздат. – 1988 – 88 с.
83. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат. – 1991. – 301 с.
84. Техническая инструкция профилографа-профилометра мод. 250
85. Золотых Б.Н., Любченко Б.М. Инженерные методы расчета технологических параметров электроэрозионной обработки: Учебное пособие для слушателей заочных курсов повышения квалификации ИТР

- по электрофизической и электрохимической обработке в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1977. – 52 с.
86. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
87. Осипенко В.И., Ступак Д.О., Поляков С.П. Математическая модель для оценки теплового состояния локального участка проволочного электрода при электроэрозионном вырезании // *Электронная обработка материалов*. – 2004. – №3. – С. 13 – 16.
88. De Bruyn H.E., Pekelharing A.J. Comparison of Various erosion systems with rectangular and trapezoidal Pulse forms // *Annals of the CTRP*. – 1994. – Vol. 29, №1. – P. 103–106.
89. Осипенко В. І. Фізико-технологічні основи електроерозійного дротяного вирізання : дис. докт. техн. наук : 05.03.07 / Осипенко Василій Іванович – Київ, 2006. – 364 с.
90. A.V. Puri, B. Bhattacharyya. Modeling and analysis of the wire-tool vibration in wire-cut EDM // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2003. – №141 – P. 295–301.
91. C. Arunachalam, M. Aulia, B. Bozkurt, P. T. Eubank. Wire Vibration, Bowing and Breakage in Wire EDM // *VDI BERICHTE* – 1998. –№1405 – P. 109–118.
92. Sthioul H., Delpretti R., Tricarico C., Dauw D. Improvement of the wire EDM cutting precision by vibration analysis and control // *Proceeding soft SEM* – – 1999. – 9, Nagoya. P. 214 – 218.
93. Исследование механизма гидродинамических процессов в межэлектродном промежутке под воздействием ультразвуковых колебаний, приложенных к электроду-инструменту // *Электронная обработка материалов*, 1988, №6, С. 52-54.
94. Г.Г. Позняк, В.А. Рогов. Динамическая составляющая погрешности вырезного электроэрозионного станка // *СТИН* – 2003. – №4 – С. 35 – 38.



95. Ступак Д.О., Осипенко В.І., Калейніков Г.Є., Поляков С.П. Дослідження механізмів виникнення обриву дротяного електрода при електроерозійному різанні // Вісник ЧІТІ. – 2000. – №4. – С. 105 – 109.
96. Brinksmeier E., Cammett J.T., König W., Leskovar P., Peters J., Tönshoff H.K., Residual Stresses - Measurement and Causes in Machining Processes, Annals of the CIRP, Vol. 31/2/1982, P. 491-510.
97. Kockelmann H., Mechanical methods of determining residual stresses. Residual stresses: measurement, calculation, evaluation. Papers presented at the Int. conf. on residual stresses, 1990 Darmstadt, Ed. V. Hauk, H. Hougardy, E.Macherauch, Germany, 1991, P. 37-52.
98. Macherauch E., Introduction to residual stress, Advances in surface treatments: 4. Residual stresses, Pergamon Oxford 1987 pp. 1-35
99. Macherauch E., Kloos K.H., Origin, measurement and evaluation of residual stresses. Residual stresses in science and technology. Papers presented at the Int. Conf. on residual stresses, 1986 Garmisch-Partenkirchen, Ed. E. Macherauch and V. Hauk, Germany, 1987, P. 3-26.
100. Minnen T., Moors W., Experimental determination of residual stresses caused by wire-EDM (in Dutch), thesis, K.U.Leuven, 1998 P. 34.
101. Siegel R., Funkenerosives Feintschneiden: Verfahrenseinflüsse auf die Oberflächen- und Randzonenausbildung, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2 Nr. 323, Düsseldorf: VDI Verlag, 1994 P. 24.
102. Stäblein F., Spannung smessungen in einseitigab geloschten Knüppeln, Kruppsche Monatshefte, 12 Jahrgang, Mai 1931 P. 93-99.
103. Vansevenant E., A subsurface integrity model in grinding, doct. thesis, K.U.Leuven, 1987, P. 21.
104. Білан А. В. Послідовна електроерозійна та електрохімічна обробка сталей незмінним дротяним електродом : дис. канд. техн. наук : 05.03.07 / Білан Анатолій Валентинович – Черкаси, 2013. – 133 с.
105. Палатник Л.Д. Эрозионная стойкость материалов // ДАИ СССР. – 1953. – №8. – С. 16–23.

106. Могорян Н.В. Электрические методы обработки материалов. – Кишинев: Штиинца, 1982. – 220 с.
107. Ставицкий Б.И., Ставицкая Н.Б. Исследование форм и размеров эрозионных лунок, образованных на различных материалах искровыми разрядами // Электронная обработка материалов. – 1980. – № 1. – С. 9–13.
108. Ставицкий Б.И. Электроискровая прецизионная обработка материалов. Научные основы особо точных методов формообразования поверхностей // Электронная обработка материалов. – 2002. – № 1. – С. 5–32.
109. Калейніков Г.Є. Дослідження впливу поверхнево-активних речовин (ПАР) на параметри технологічного процесу електроерозійного дротяного вирізання // Матеріали Междунар. конф. „Современные материалы, технологии, оборудование и инструмент в машиностроении”. – К.: – 2000. – С. 32–33.
110. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисление: в 2 т./ Н.С. Пискунов. – М.: Наука, 1978. Т.2. – 575 с.
111. Авраменко В.Е. Фазовый анализ поверхностного слоя инструментальных сталей, образованного электроискровой обработкой непрофилированным электродом. В кн.: Физико-механические и эксплуатационные свойства инструментальных и конструкционных материалов. Вып. 3. Красноярск, 1974.
112. Александров В.П. Исследование технологических характеристик электроэрозионной обработки жаропрочных металлов. М.: Наука, 1964 – 145 с.
113. Коваленко Н.П., Полоцкий В.Е., Чаликов В.М. Системы направления электрода-проволоки. Кн. Электрофизические и электрохимические методы обработки. – М.: НИИмаш, 1975. Вып. 6. – С. 22-26.

114. Massuzawa T., Fujino M., Kobayashi K., Suzuki T. Wire Electro-Discharge Grinding For Micromachining, Annals of the CIRP. Vol. 34/1. 1985. P.131-134.
115. AGIE Experience of the best. – №13, 1998 P. 27.
116. Experience of the best. Technical magazine of the AGIE Company. – №10, July 1997, - P. 19.
117. Осипенко В.І., Поляков С.П., Ступак Д.О. Підвищення продуктивності електроерозійного вирізання // Вісник Черкаського інженерно-технологічного інституту. – 1998. – №1. – С. 77-82.
118. Ставицкий Б.И. Условия, обеспечивающие электроискровое прецизионное изготовление деталей в обычной воде. // Электронная обработка материалов. – 2002. – № 2. – С. 5–11.
119. Осипенко В.І., Хижняк Є.В., Ступак Д.О., Мамаєнко Н.В. Дослідження коливань дротяного електрода при електроерозійному вирізання // Вісник Черкаського державного-технологічного університету. – 2004. – №2. – С. 86 – 89.
120. Осипенко В.І. Покращення технологічних параметрів електроерозійної вирізної обробки шляхом керованої зміни просторово-енергетичних характеристик одиничного іскрового розряду // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2004. – №2. – С. 127 – 133.
121. Плошкин В.В. Формирование поверхности при электроэрозионной обработке сталей // СТИН. – 2004. – №3. – С. 22 – 28.
122. Осипенко В.І., Хижняк Е.В., Ступак Д.О. Методика исследования колебаний проволочного электрода при электроэрозионной вырезной обработке // Вісник Черкаського державного-технологічного університету. – 2005. – №3. – С. 278 – 280.
123. Прочность, устойчивость, колебания: Справочник: В 3 т. / Под ред. И.А. Биргера, Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968. С. 1. – 831 с.
124. Калейніков Г.Є., Поляков С.П., Осипенко В.І. Вплив поверхнево-активних речовин на параметри промивання міжелектродного

- проміжку// Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2002. – №1. – С. 50–55.
125. Деклараційний патент на винахід. 71472 А UA МПК 7В23Н1/18. Спосіб керування зазором іскрового проміжку при електроерозійній обробці / В.І. Осипенко, С.П. Поляков, Д.О. Ступак, Г.Є. Калейніков, О.А. Тригуб; Заявлено 30.12.03; Опубл. 15.11.2004; Бюл.№11.
126. Баби́ков О, И. Ультразвук и его применение в промышленности. Физико-математическая библиотека инженера. М.: Гос. изд. физико-математической литературы. 1958г. - 260 с.
127. Левит М.Л., Парадизова М.В. Зависимость скорости съема при электроэрозионном вырезании от расхода рабочей жидкости через межэлектродный промежуток // Электронная обработка материалов.– 1987.– №2. – С. 16–20.
128. Adjusting surface integrity of gears using wire EDM to increase the flank load carrying capacity D. Saria , D. Wellingb, C. Löpenhaus, F. Klockea, A. Klinka //Procedia CIRP 45 ( 2016 ) С. 295 – 298.
129. Осипенко В.І. Фізико-технологічні основи електроерозійного дротяного вирізання : дис... д-ра техн. наук: 05.03.07 / Осипенко Василь Іванович ; Черкаський держ. технологічний ун-т. - Черкаси, 2006. С. 369.
130. Полобич В. В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. / В. В. Полобич. – Львів: «Світ», 2006. – 611 с.
131. Осипенко В. І. Фізика і технологія електро ерозійного дротяного вирізання / В. І. Осипенко, О. П. Плахотний, Н. В. Філімонова. – Черкаси: ФОП Гордієнко Є.І., 2019. – 251 с. – (Черкаський державний технологічний університет). – (Монографія).
132. П.А. Усачов. Довідник фрезерувальника.- К.: Техніка, 1988. - 136 с.
133. Зубченко А. С. Марочник сталей и сплавов / А. С. Зубченко, М. М. Колосков, Ю. В. Каширский., 2003. – 784 с. – (2-е изд.). – (Машиностроение).

134. В.І. Осипенко. О.В., Тімченко О. В., **А.В. Кондаков**. Моделювання теплових процесів формування одиничної лунки розрядами сучасних генераторів електроерозійних вирізних верстатів, Вісник Черкаського державного технологічного університету. – Черкаси: ЧДТУ, 2019. – №3. – С. 154-162. DOI: 10.24025/2306-4412.3.2019.182555.
135. Liu, J., Li, L., Guo, Y., 2014. Surface integrity evolution from main cut mode to finish trim cut mode in W-EDM of shape memory alloy, Applied Surface Science 308, P. 253-260.
136. Klink, A., Guo, Y.B., Klocke, F., 2011. Surface integrity evolution of powder metallurgical tool steel by main cut and finishing trim cuts in wire-edm, Procedia Engineering 19, P. 178-183.
137. Antar, M., Soo, S., Aspinwall, D., Cuttell, M., Perez, R., Winn, A., 2010. WEDM of aerospace alloys using 'CleanCut' generator technology, ISEM XVI, Shanghai, P. 285-290.
138. Antar, M.T., Soo, S.L., Aspinwall, D.K., Sage, C., Cuttell, M., Perez, R., Winn, A.J., 2012. Fatigue response of Udimet 720 following minimum damage WEDM, Materials & Design 42, P. 295-300.
139. J.F. Liu, Y.B. Guo Residual Stress Modeling in Electric Discharge Machining (EDM) by Incorporating Massive Random Discharges. 3rd CIRP Conference on Surface Integrity (CIRP CSI). Procedia CIRP 45 ( 2016 ) P. 299 – 302.
140. Билан А.В., Осипенко В.И., Ступак Д.О., Король Я.Д. Особенности формирования микрогеометрии и физических свойств поверхностных слоев стали при электроэрозионной вырезной обработке и последовательной электроэрозионной и электрохимической обработке проволочным электродом // Уральский научный вестник. – 2012. – №12(48). – С. 27-34.
141. В. І. Осипенко, **А. В. Кондаков**, О. В. Тімченко. Визначення залишкових напруг в інструментальній сталі у7а після електроерозійного дротяного вирізання. Вісник ЧДТУ. – 2019. – №4. – С. 126–131.

142. Determination of microhardness and depth of thermally Hardening zone in quality carbon structural steel after wedm Using different discharge parameters / V.Osypenko, O. Plakhotny, O. Timchenko, A. Kondakov. // Nonconventional Technologies Review. – 2020. – C. 31–39.
143. Straka, L., Corny, I., Pitel, J., Properties Evaluation of Thin Microhardened Surface Layer of Tool Steel after Wire EDM, Metals, Vol. 6, No. 5, P. 95, (2016). <https://doi.org/10.3390/met6050095>