

ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА АКАДЕМІЯ

ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА АКАДЕМІЯ

*Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису*

СУМЕЦЬ АНДРІЙ ВІКТОРОВИЧ

УДК 621.387.143

ДИСЕРТАЦІЯ

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЛАЗМОВОГО РІЗАННЯ ЗА
РАХУНОК УДОСКОНАЛЕННЯ ПЛАЗМОТРОНІВ**

Спеціальність 05.03.06 – «Зварювання та споріднені процеси і технології»

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ (А.В. Сумець)

Науковий керівник

д.т.н., професор

Кассов Валерій Дмитрович

Краматорськ - 2018

Анотація

Сумець А.В. Підвищення ефективності плазмового різання за рахунок удосконалення плазмотронів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – «Зварювання та споріднені процеси і технології» – Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, 2018.

Дисертація присвячена підвищенню ефективності та розширенню технологічних можливостей плазмового різання.

У першому розділі наведено огляд відомих результатів теоретичних і експериментальних досліджень по використанню плазмотронів в процесі різання. За допомогою плазмового різання відбувається перетворення електричної енергії джерела струму в теплову енергію плазмової дуги, інтенсивне стискання її стовпа у формуючій камері й наскрізне проплавлення плазмовою дугою металу, що розрізується, з видуванням розплаву з порожнини різку. Напряга стислої плазмової дуги залежить від її довжини, розмірів каналу, стискаючого стовп, складу й витрат газового потоку.

Виходячи з результатів аналізу проблеми були сформульовані цілі та завдання досліджень. Рішенню встановленої наукової проблеми присвячені наступні глави дисертаційної роботи.

У другому розділі міститься опис експериментальної та дослідно-промислової установки, що складається з блоків електро-, газо-, водопостачання і піджигу дуги. Був модернізований збудник дуги на базі ВІР–101УЗ, що забезпечує підпал дуги у всіх установках, призначених для плазмового різання. Інформаційно-обчислювальний комплекс експериментальної установки дозволяє незалежно від товщини металу, що розрізається і його асортименту, плазмотронів, що застосовуються, проводити

оптимальну настройку режимів роботи плазмотрона і раціональної технології різання. Наведено методики проведення досліджень, вимірювань і оцінки похибок, а також опис контрольно-вимірювальних приладів, які використовуються при проведенні експериментальних досліджень.

У третьому розділі наведено результати розробки конструкцій плазмотронів для різання металу великої товщини, які працюють на агресивних газах з термемісійними, порожнистими і комбінованими електродами, а також методику розрахунку їх основних параметрів (при зміні електричної потужності, витрат газу, діаметра сопла), яка базується на результатах узагальнення досліджень провідних вітчизняних та зарубіжних авторів. При цьому враховувалися наступні вимоги: надійність запалювання і стабільність горіння плазмової дуги за технологічними умовами і режимами роботи; ефективність охолодження деталей, схильних до високих температур; простота конструкції і технологічність у виготовленні; зручність в експлуатації. Розробка конструкції ріжучого плазмотрона виконувалася на основі вихідних даних, які визначаються не тільки розглянутими вимогами, але і технологічними та експлуатаційними особливостями застосування плазмотрона у виробничих умовах, до яких слід віднести: товщину і вид металу, який розрізується, що визначає потужність плазмової дуги і діапазон зміни цієї потужності; параметри і можливі витрати плазмоутворюючого (іноді основного та захисного) газу і охолоджувальної води; максимальний за технологічними умовами ресурс роботи електродної системи; використовуване джерело живлення і основні його характеристики; особливі вимоги до охорони праці при роботі ріжучого плазмотрона у виробничих умовах. При конструюванні плазмотронів для різання металів великої товщини пред'являвся також і ряд спеціальних вимог: стійкість електродної системи при великій кількості запусків за рахунок використання мідних порожнистих електродів, що працюють в «холодному» режимі або в розрядному каналі оптимальної аеродинаміки течії газу. Крім того, плазмовий потік, який закінчується через

сопловий отвір, повинен максимально виплавляти метал і видаляти його з порожнини різку, а в процесі плазмового різання необхідно проводити пробивання отворів в металі для інтенсивного викиду розплавлених частинок в бік плазмотрону. Також необхідно враховувати ресурс роботи плазмотрону, зокрема його електродних вузлів. У розроблюваних плазмотронах для різання металу великої товщини виділяли три ділянки дуги, які характеризуються різними параметрами стану. Перша ділянка – електрод (катод) сопло; другий – від місця прив'язки допоміжної дуги до сопла до виходу з сопла; третій – від сопла до поверхні металу, що розрізається. Основні параметри плазмової дуги: ентальпія, щільність, тиск, швидкість руху на кожній ділянці визначали при спільному рішенні рівнянь збереження енергії в адіабатному процесі та сталості витрати.

Проведені дослідження показали, що при збільшенні потужності плазмотрону зростають: i , P_1 , ω_2 , $G\omega_2$, $\rho_2\omega_2^2/2$. Підвищується також середньомасова температура, однак щільність плазми всередині розрядного каналу і на виході з сопла зменшується. Збільшення G призводить до зниження i , T_1 , ω_2 , однак P_1 , ρ_2 , $\rho_2\omega_2^2/2$, $G\omega_2$ зростають.

При збільшенні витрати плазмоутворюючого газу (повітря) відбувається зниження швидкості витікання плазмового потоку. Це стає можливим при постійній потужності і заданому діаметрі сопла d_c , оскільки відбувається одночасне зростання тиску і щільності нагрівання газу. Причому інтенсивність росту ρ_1 вище інтенсивності росту P_1 . В результаті відношення P_1/ρ_1 із збільшенням G зменшується, а, отже, зменшується ω_2 . Збільшення діаметра сопла d_c плазмотрона призводить до зменшення всіх газодинамічних параметрів потоку плазми.

Були отримані рекомендації та емпіричні залежності для вибору геометрії розрядного каналу, діаметру катодних вставок і прикатодної секції. Структура

прикатодної області для плазмотронів з термоемісійними електродами дозволила розрахувати геометрію розрізного каналу з урахуванням нагріву і охолодження катода плазмотрона при його роботі, це дозволило розробити плазмотрони з різним типом електроду.

У четвертому розділі наведено експериментальні та теоретичні дослідження створених плазмотронів. Вони представлені електричними, тепловими та ерозійними характеристиками. В основу досліджень був покладено електричний вузол плазмотрону з порожнистим електродом.

Залежність електричної потужності плазмотрона від факторів, що впливають (витрата плазмоутворюючого газу, діаметр й довжина циліндричної ділянки сопла, відстань від зрізу сопла до металу, що розрізається) досліджувались з використанням вольтамперних характеристик.

Під час дослідження ерозійних характеристик електродів плазмотрону, обрана фізична модель ерозії в плямах дуги, тобто в місці контакту дуги до електрода. Встановлено, що питома ерозія порожнього мідного електрода, що складається з двох ділянок, становить $10^{-9} - 10^{-10}$ кг/Кл. Електрод на ерозію випробовувався при силі струму від 200 до 800 А. Експерименти для кожного значення струму тривалістю не менше 30 хв повторювалися тричі. При цьому електрод зважувався на демпферних терезах (з точністю до 10^{-7} кг) до початку і після закінчення експерименту. Були отримані залежності питомої ерозії полого мідного електрода від струму дуги, як з поділом на дві ділянки, так і без поділу.

Для виявлення раціональної геометрії розрядної камери досліджувалась питома ерозія мідного електроду при різних конфігураціях його днища. Найменше значення питомої ерозії забезпечується при наявності в центрі днища гострокінцевого виступу з плавним криволінійним переходом до бокової внутрішньої поверхні електроду, що підтвердило дослідження. Зіставлення результатів проведених досліджень показують, що ерозія електроду залежить від наступних факторів: оптимальна товщина стінки електрода, полярності

горіння дуги, напрямок крутки опорної плями дуги, напрямок подачі охолоджуючої води. Для її зменшення були прийняті кращі значення: оптимальна товщина стінки електрода, при якій забезпечується її найменше зношення, зворотна полярність горіння дуги, узгоджений напрямок газодинамічного та електромагнітного переміщення опорної плями дуги, протікання охолоджуючої води від електрода до сопла.

У п'ятому розділі продемонстровано переваги створених плазмотронів і результати їх практичного застосування.

Впровадження результатів роботи в промислових умовах дозволило отримати економічний ефект у сумі 121 тис. грн.. у цінах 2017 року.

Наукова новизна отриманих результатів.

У даній роботі представлений комплекс фундаментальних і прикладних досліджень, пов'язаних з підвищенням ефективності технології плазмового різання металу й плазмового устаткування:

1. Дістав подальшого розвитку науково-прикладний напрямок: для підвищення ресурсу роботи й ефективності плазмотронів для різання необхідно застосовувати принцип розподілу прив'язки дуги по довжині розрядного каналу (для порожнистих «холодних» електродів) та по термохімічним вставкам (для термохімічних електродів).

2. Вперше встановлено, що для збільшення робочого струму дуги до 1000 А при різанні металу великої товщини (понад 150 мм) необхідно конструкція плазмотрону з порожнистим термоемісійним катодом із захистом аргоном низького тиску й створенням дифузійної прив'язки дуги.

3. Встановлено, що плазмотрон з порожнистим «холодним» електродом для підвищення ресурсу роботи, продуктивності і якості різання металу більшої товщини слід підключати на зворотну полярність. При цьому ресурс роботи електрода збільшується більш ніж у два рази, а продуктивність підвищується на 20-40% у порівнянні із промисловими плазмотронами при однаковій силі струму.

4. Набула подальшого розвитку методика розрахунків високоресурсних плазмотронів яка враховує вплив і взаємозв'язок основних факторів і параметрів процесу з товщиною металу, що розрізається. Це дозволило сформулювати конструкційні рекомендації з створення плазмотронів з термохімічним та порожнистим «холодним» електродами.

Практичне значення отриманих результатів.

Створені плазмотрони для різання металу з «холодними» і «гарячими» електродами потужністю від 40 до 300 кВт із поліпшеними енергетичними характеристиками й високою ефективністю. Тепловий ККД ріжучих плазмотронів з порожнистими «холодними» або «гарячими» електродами становить (80-95) %. Товщина металу, що розрізається – від 60 до 400 мм;

Розроблена інженерна методика розрахунків високоресурсних плазмотронів для різання з порожнистими циліндричними «холодними» і «гарячими» електродами, що працюють на кисневмісних газах;

Розроблена, досліджена і реалізована технологія плазмового різання металу плазмотроном з порожнистими «холодним» електродом на зворотній полярності. При цьому встановлене, що усередині металу, що розрізається, розміщується більш контрагована рухлива катодна пляма, яка поглиблюється в порожнину різу в п'ять разів більше, ніж в умовах прямої полярності.

Позитивною особливістю розроблених плазмотронів є можливість їх використання не тільки для реалізації різання металів, але й для плазмового напилення.

Ключові слова: анод, катод, ККД, питома ерозія, плазмова дуга, плазмотрон, полярність горіння, порожнистий «холодний» і «гарячий» катод, потужність, продуктивність, ресурс роботи.

Summary

Sumets A. Increasing the efficiency of plasma arc cutting due to the improvement of Plasmatrons. – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Thesis for a Candidate Degree in specialty 05.03.06 – "Welding and Related Processes and Technologies" – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, 2018.

The dissertation is dedicated to upgrading the efficiency and extending the technological capabilities of plasma arc cutting.

The first section gives an overview of the known results of theoretical and experimental studies on the use of Plasmatrons in the cutting process. Through the use of plasma arc cutting, the transformation of the electric energy of the current source into the thermal energy of the plasma arc, the intensive compression of its pillar in the forming chamber, and the continuous melting of the metal to be cut by the plasma arc with the melt blowing out of the cavity of the cut occur. The voltage of the compressed plasma arc depends on its length, channel size, compressing pillar, composition and flow rate of the gas stream.

Based on the results of the problem analysis, the goal and objectives of the research were formulated. The following chapters of the dissertation are devoted to the solution of the established scientific problem.

The second section contains the description of an experimental and research and production plant consisting of electric supply, gas supply, water supply blocks and an arc ignition block. The arc activator was upgraded on the basis of VIR-101UZ, providing arc burning in all plants intended for plasma arc cutting. The information and computing complex of the experimental plant allowsto carry out the optimal adjustment of the operating modes of the Plasmatron and the rational cutting

technology, regardless of the thickness of the metal to be cut and its assortment, and regardless of the Plasmatrons, which are used. The methods of conducting researches, measurements and estimation of errors, as well as the description of the control devices used in conducting of experimental researches, are presented

The third section presents the results of the design of Plasmatrons structures for cutting metal of the big thickness, which are operated on aggressive gases with thermionic, hollow and combined electrodes, as well as a method for calculating their main parameters (when changing electric power, gas consumption, nozzle diameter) based on the results of the generalization of researches conducted by the leading domestic and foreign authors. At the same time, the following requirements were taken into account: reliability of ignition and stability of combustion of the plasma arc in relation to the technological conditions and operating modes; the cooling efficiency of parts prone to high temperatures; simplicity of construction and technological effectiveness in manufacturing; usability. The development of the design of the cutting Plasmatron was carried out on the basis of the initial data, which are determined not only by the requirements considered, but also the technological and operational features of the Plasmatron in the production conditions, which should include: the thickness and type of metal that is to be cut, which determines the plasma arc strength and the range of change of this power; parameters and possible costs of the plasma-forming (sometimes the main and protective) gas and cooling water; the maximum operating conditions of the electrode system; used power source and its main characteristics; special requirements for labor protection while operating the cutting Plasmatron in production conditions. In the construction of Plasmatrons for cutting metals of the big thickness, there were also a number of special requirements: the stability of the electrode system with a large number of starts due to the use of copper hollow electrodes operating in "cold" mode or in the discharge channel of the optimum aerodynamics of the gas flow. In addition, the plasma stream, which ends through the nozzle hole, should maximally smelt the metal and remove it from the cavity of cutting, and in the process of plasma arc cutting, it is necessary to break

through the holes in the metal for the intense release of molten particles in the direction of the plasma torch. It is also necessary to take into account the life of the Plasmatron, in particular its electrode nodes. In the developed Plasmatrons for cutting metal of the big thickness, three arc regions were distinguished, which are characterized by different parameters of the state. The first section is an electrode (cathode) nozzle; the second one is situated from the binding point of the auxiliary arc to the nozzle before the exit from the nozzle; the third one is located from the nozzle to the surface of the metal, which is to be cut. The main parameters of the plasma arc: enthalpy, density, pressure, and velocity of motion on each site were determined with the joint decision of the energy conservation equations in the adiabatic process and the constancy of costs.

The conducted researches have shown, that the increase of capacity of Plasmatrons is resulted in increase of i , P_1 , ω_2 , $G \omega_2$, $\rho_2 \omega_2^2 / 2$. Also, the average temperature is increasing, but the plasma density inside the discharge channel and at the exit from the nozzle is decreasing. Increasing G results in decrease of i , T_1 , ω_2 , but P_1 , ρ_2 , $\rho_2 \omega_2^2 / 2$, $G \omega_2$ are increasing.

With an increase in the cost of plasma-forming gas (air) there is a decrease in the flow rate of plasma flow. This becomes possible under the conditions of a constant power and the specified diameter of the nozzle d_c , since there is a simultaneous increase in pressure and density of gas heating. And besides, intensity of increasing ρ_1 is higher that the intensity of increasing P_1 . As result, the ratio P_1 / ρ_1 is decreasing with increase of G , and so ω_2 is decreasing as well. Increasing of the nozzle diameter d_c of Plasmatron leads to a decrease in all gas-dynamic parameters of the plasma flow.

There were obtained recommendations and empirical dependencies for the choice of the geometry of the discharge channel, the diameter of the cathode inserts and the cathodic section. The structure of the cathodic area for Plasmatrons with

thermionic electrodes allowed to calculate the geometry of the cut channel, taking into account the heating and cooling of the plasma torch cathode during its operation, which allowed the development of Plasmatons with different types of electrode.

The fourth section presents experimental and theoretical studies of Plasmatrons created. They are characterized by the electric, thermal and erosion characteristics. The basis of the research was the electrical node of a Plasmatron with a hollow electrode.

The dependence of the electric power of the Plasmatron on the influencing factors (the flow of plasma gas, the diameter and length of the cylindrical nozzle area, the distance from the cutoff of the nozzle to the metal to be cut) were investigated using voltage-current characteristics.

During the study of erosion characteristics of the Plasmatron electrodes, the physical model of erosion in the spots of the arc is chosen, that is, at the point of contact of the arc to the electrode. It is established that the specific erosion of an empty copper electrode, consisting of two sections, is $10^{-9} - 10^{-10}$ kg / Kl. The electrode for erosion was tested at a current of 200 to 800 A. Experiments for each value of current of at least 30 minutes were repeated three times. In this case, the electrode was weighed on the damping scales (up to 10^{-7} kg) before and after the end of the experiment. There were obtained dependences of the specific erosion of the hollow copper electrode from the current of the arc, as with the division into two sections, and without separation.

To identify the rational geometry of the discharge chamber, a specific erosion of copper electrode was investigated at various configurations of its bottom. The least value of specific erosion is provided with the presence of a sharp-edged protuberance in the center of the bottom with a smooth curvilinear transition to the lateral surface of the electrode, which confirmed the study. Comparison of the results of the conducted research shows that the erosion of the electrode depends on the following factors: the optimal thickness of the electrode wall, the arc burning polarity, the direction of the twist of the arc reference spot, the direction of supply of cooling

water. The best values were adopted for its reduction: the optimum thickness of the electrode wall, in which its least wear is ensured, the reciprocal polarity of burning of the arc, the coordinated direction of the gas-dynamic and electromagnetic displacement of the arc base, the flow of cooling water from the electrode to the nozzle.

The fifth section demonstrates the advantages of the created Plasmatrons and the results of their practical application.

Implementation of the results of the work in industrial conditions allowed to obtain an economic effect in the amount of 121 thousand UAH in prices relevant in 2017.

Scientific novelty of the obtained results.

In this paper a complex of fundamental and applied researches connected with the increase of the efficiency of the technology of plasma arc cutting of metal and the plasma equipment is presented:

1. The scientific-applied direction has become further developed: to increase the resource of the paper and efficiency of Plasmatrons for cutting, it is necessary to apply the principle of distribution of arc binding along the length of the discharge channel (for hollow "cold" electrodes) and thermochemical inserts (for thermochemical electrodes).

2. It was first established that in order to increase the working current of an arc to 1000 A, when cutting metal of a large thickness (over 150 mm), a Plasmatron with a hollow thermionic cathode with a low pressure argon protection and the creation of a diffusion binding of the arc is needed.

3. It has been established that the Plasmatron with a hollow "cold" electrode should be connected to the reverse polarity to increase the life of the work, productivity and quality of cutting metal of greater thickness. In this case, the life of the electrode is increased more than twice, and the productivity increases by 20-40% compared with industrial Plasmatrons at the same strength of current.

4. The calculation methodology of high-resource Plasmatrons, which takes into account the influence and interconnection of the main factors and parameters of the process with the thickness of metal to be cut, has become further developed. This made it possible to formulate structural recommendations for the creation of Plasmatrons with thermochemical and hollow "cold" electrodes.

The practical value of the results.

Plasmatrons for cutting metal with "cold" and "hot" electrodes with capacity from 40 to 300 kW with improved energy characteristics and high efficiency have been created. The thermal efficiency of cutting Plasmatrons with hollow "cold" or "hot" electrodes is (80-95) %. Thickness of metal to be cut is from 60 to 400 mm;

The engineering calculation methodology of high-power Plasmatrons for cutting with hollow cylindrical "cold" and "hot" electrodes operating on oxygen-containing gases is developed;

The technology of plasma arc cutting of metal by means of Plasmatron with a hollow "cold" electrode on the reverse polarity is developed, investigated and implemented. In this case, it is established that inside a cutting metal there is situated a more contracted moving cathode spot, which deepens into the cavity of cutting five times more than in direct polarity conditions.

Positive feature of the developed Plasmatrons is the possibility of their use not only for the implementation of cutting metals, but for plasma spraying.

Key words: anode, cathode, efficiency, specific erosion, plasma arc, Plasmatron, polarity of combustion, hollow «cold» and «hot» cathode, capacity, operational life.

Список публікацій здобувача

1. Корсунов К. А. Плазмотрон для напыления с «холодным» катодом / К. А. Корсунов, В. А. Волков, Н. А. Подгорная, **А. В. Сумец** // 6 Международная практическая конференция – выставка, 13 – 16 апреля 2004г.: тезисы докладов. – Санкт–Петербург: СПб ГПУ, 2004. – С. 194 – 196.
2. Дзюба В. Л. Повышение ресурса работы плазмотрона для обработки материалов / В. Л. Дзюба, К. А. Корсунов, В. С. Гаврыш, **А. В. Сумец** // 9 Международная практическая конференция – выставка, 10 – 13 апреля 2007г.: тезисы докладов. – Санкт–Петербург: СПб ГПУ, 2007. – Ч. 1. – С. 75 – 78.
3. Дзюба В. Л. Высокоресурсный плазмотрон для напыления, резки и упрочнения поверхности / В. Л. Дзюба, К. А. Корсунов, Е. Ю. Мягченко, **А. В. Сумец** // 9 Международная практическая конференция, 10 – 13 апреля 2007г.: тезисы докладов – Санкт-Петербург: СПб ГПУ, 2007. – Ч. 1. – С. 79 – 85.
4. **Сумец А. В.** Высокоресурсный плазмотрон для резки металлов больших толщин / А. В. Сумец, Е. Ю. Мягченко // XI Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю, 16 – 17 квітня. 2008р.: тези доповідей. – Сєверодонецьк, 2008. – 185 с.
5. Дзюба В. Л. Результаты исследований по созданию плазмотрона для резки / В. Л. Дзюба, К. А. Корсунов, **А. В. Сумец** // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні. – Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2008. – С.13 – 19.
6. Дзюба В. Л. Результаты исследований плазмотрона для резки металла / В. Л. Дзюба, К. А. Корсунов, **А. В. Сумец** // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2009. – № 8 (138) – С. 54 – 62.
7. Дзюба В. Л. Повышение эффективности работы электродуговых плазмотронов / В. Л. Дзюба, К. А. Корсунов, **А. В. Сумец** // Вісник

Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2009. – № 11 (141). – Ч. 2. – С. 81 – 86.

8. Дзюба В. Л. Плазмотрон для резки металла обратной полярности / В. Л. Дзюба, К. А. Корсунов, **А. В. Сумец** // Современные материалы и технологии в металлургии и машиностроении: Международная научно-техническая конференция, 2007 г.: тезисы докладов. – К.: Ред. журн. Процессы литья, 2007. – С. 107 – 109.

9. Дзюба В. Л. Конструктивные особенности электродных узлов режущих плазмотронов / В. Л. Дзюба, К. А. Корсунов, **А. В. Сумец** // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2009. – № 9 (139). – С. 37 – 44.

10. **Сумец А. В.** Металлофизические аспекты структурообразования в процессе высокотемпературной резки стали / А. В. Сумец // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XV Міжнародної науко-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2017.– С.86 – 87.

11. **Сумец А. В.** Основные направления повышения эффективности плазменной резки / А. В. Сумец // Научный Вестник ДГМА: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2016.–№3(21Е).–С. 34 – 37.

12. **Сумец А. В.,** Кассов В. Д. Закономерности структурообразования зоны термического влияния при термической резке металлов / А. В. Сумец, В. Д. Кассов // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2017. – Вып. 77. – С.166 – 170.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1	
СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ	25
1.1 Сутність та металургійні особливості плазмового різання.....	25
1.2 Застосування плазмового різання і його економічні переваги.....	33
1.3 Схемні та конструктивні принципи побудови плазмотронів.....	38
1.4 Дослідження по розробці електродних вузлів плазмотронів	45
1.4.1 Електродні вузли з термоємисійними вставками.....	46
1.4.2 Порожнисті циліндричні електродні вузли.....	56
1.4.3 Об'єднані електродні вузли.....	59
Висновки до розділу 1.....	65
РОЗДІЛ 2	
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	66
2.1 Експериментальна установка	66
2.2 Інформаційно-керуючий обчислювальний комплекс	76
2.3 Методика вимірювань і оцінка похибок	78
Висновки до розділу 2.....	84
РОЗДІЛ 3	
РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЙ РІЗУЧИХ ПЛАЗМОТРОНІВ ТА ЇХ ОСНОВНИХ ВУЗЛІВ.....	85
3.1 Вибір основних параметрів і рекомендації з конструювання різальних плазмотронів.....	85
3.2 Розрахунок технологічних параметрів плазмотронів для різання.....	86
3.3 Розробка плазмотронів з термоємисійними електродами.....	93
3.4 Розробка плазмотрону з порожнистим електродом.....	104
Висновки до розділу 3.....	108
РОЗДІЛ 4	
ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА РЕЖИМІВ РОБОТИ РОЗРОБЛЕНИХ ПЛАЗМОТРОНІВ.....	109

4.1 Особливості роботи розроблених плазмотронів для різання.....	109
4.2 Дослідження електричних характеристик.....	115
4.2.1 Потужність ріжучого плазмотрону.....	115
4.2.2 Вплив змінення опору дуги на роботу системи джерела живлення дуги.....	119
4.2.3 Напруженість електричного поля ріжучої дуги.....	122
4.3 Дослідження теплових характеристик плазмотрона.....	128
4.3.1 Тепловий ККД.....	128
4.3.2 Питома ентальпія дуги.....	133
4.4 Дослідження ерозійних характеристик.....	138
Висновки до розділу 4.....	143
РОЗДІЛ 5	
ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ СТВОРЕНИХ ПЛАЗМОТРОНІВ.....	144
5.1 Переваги створеного класу плазмотронів.....	145
5.2 Практичне застосування створених плазмотронів.....	147
5.2.1 Використання плазмотронів потужністю більш ніж 100квт....	147
5.2.2 Застосування плазмотронів із термоемісійними електродами.....	151
5.3 Порівняльна оцінка ефективності термічного різання металу.....	156
Висновки до розділу 5.....	186
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	188
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	190
ДОДАТОК А.....	203
Акт впровадження на ПрАТ «СЄВЕРОДОНЕЦЬКЕ ОБ'ЄДНАННЯ АЗОТ» (м. Сєверодонецьк).....	204
ДОДАТОК Б.....	205
Акт впровадження на ТОВ «Буддеталь» (м. Краматорськ).....	206
ДОДАТОК В.....	207
Довідка про використання в навчальному процесі Донбаської державної машинобудівної академії (м. Краматорськ).....	208

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

- k, h – постійна Больцмана і Планка;
 $\sigma, \rho, C_p, \lambda_a$ – електропровідність, щільність, теплоємність,
 теплопровідність і температуропровідність;
 S_I – функція теплопровідності;
 E, U, I – напруженість електричного поля, напруга і струм дуги;
 L, R, C – індуктивність, опір і ємність;
 V, v, δ, γ – швидкість, ширина і глибина різку, щільність металу;
 T, p, i – температура, тиск, ентальпія;
 α_k – коефіцієнт теплопередачі;
 d_c, d_k – діаметри сопла і катода;
 G – витрата газу;
 Q – величина питомого теплового потоку;
 φ – робота виходу матеріалу (анода, катода);
 Q_a, Q_k, Q_m – втрати тепла, скрізь анод, катод та МЕВ;
 P_r, N_U, K_n, B_i, R_e – критерії Нуссельта, Кнудсена, Біо, Рельнольдса;
 e – заряд електрона;
 L_e – число Люїса-Семенова.

ВСТУП

Актуальність теми. Останнім часом все більше поширення одержала відносно нова технологія – плазмове різання, яка володіє певними перевагами перед традиційними методами газополум'яного і кисневого різання. Застосування технологія є досить перспективним, що пояснюється надзвичайно високими енергетичними параметрами плазмової ріжучої дуги (об'ємна концентрація потужності – $100 - 150 \text{ кВт/см}^3$, температури $(5 - 16) \cdot 10^3 \text{ К}$, висока швидкість потоку плазми – до 5000 м/с , питома щільність теплової потужності $(10 - 20) \text{ кВт/мм}^2$.

Володіючи універсальними властивостями й технологічними можливостями, цей метод впливає на метали. У процесі полум'яного різання підвищується концентрація потужності, а, отже, можливість керування процесом за рахунок зміни величини робочого струму або витрати полум'яутворюючого газу.

Однак, незважаючи на всі переваги, сучасний процес плазменно-дугового різання металів має й істотні обмеження. Вони пов'язані з зайвою складністю і матеріалоемністю техніки для різання плазми. Нерідко пов'язані обмеження сучасного процесу плазменно-дугового різання металів і з невиправданою її універсалізацією по способах (ручна, машинна), діапазонами товщин, які розрізаються, енергетичним параметрам і т.п..

Крім того, великий вплив на процес має серійне обладнання, яке використовується для повітряно-плазмового різання (ППР) металів плазмотронами із цирконієвими й гафнієвими катодними вставками, розробленими українськими, італійськими, німецькими й іншими європейськими фірмами, що приводить до ряду серйозних недоліків: зниження товщини металу, що ріжеться, до швидкості різання й продуктивності приводить обмежене число вмикань, низькі робочі діапазони струму й напруги і т.д..

Відзначені недоліки дають підставу вважати, що застосований спосіб плазмового різання й наявне устаткування останнім часом вичерпали свої експлуатаційні можливості, і надалі будуть потрібні нові технологічні рішення з розширення можливостей використання цього методу. Виконання цих задач може бути забезпечене лише за умови вивчення всього комплексу проблем технології процесу й устаткування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, результати яких представлені в дисертаційній роботі, виконані в Донбаської державної машинобудівної академії у рамках держбюджетної науково-дослідної роботи «Удосконалення конструкції та технології підготовки виробництва підйомно-транспортних, будівельних і гірничих машин» (номер державної реєстрації 0115U004732), а також у відповідності з держбюджетними науково-дослідними роботами: «Теоретичні дослідження процесів плазмової, віброабразивної і гідроабразивної обробки, комп'ютерного синтезу оптимальних технологічних середовищ» (номер держ. реєстр. № 0104U000100); «Математичне й комп'ютерне моделювання процесів у розрядному каналі плазматрона й процесів формування структури покриттів, отриманих при напиленні» (номер держ. реєстр. №0103U000425); «Теоретичне дослідження нагрівання газу в плазматроні для газифікації вугілля й опалення казанів теплових електростанцій (ТЕС)» (номер держ. реєстр. №0107U000284).

Внесок автора, як виконавця, полягає в удосконаленні конструкцій високо ресурсних плазматронів для різання металів великої товщини, в оптимізації технологічних параметрів різання, у розробленні технологічних рекомендацій.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності й розширення технологічних можливостей плазмового різання металу за рахунок удосконалювання технології процесу й устаткування.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

- проаналізувати відомі теоретичні й експериментальні дослідження із плазмового різання металу великої товщини і виявити проблеми, пов'язані з підвищенням ефективності і якості процесу;
- провести дослідження плазмотронів для різання металу великої товщини і їх основних вузлів;
- створити високоресурсні плазмотрони для різання металу товщиною до 400 мм, що працюють з кисневмісним газом;
- розробити інженерну методику розрахунків високоресурсних плазмотронів для різання металу великої товщини з порожнистими циліндричними «холодними» і «гарячими» катодами, що працюють на кисневмісних газах;
- провести дослідження змін фазових та структурних перетворень, змін хімічного складу та механічних властивостей сталей при трьох видах термічного різання (аргоно-плазменого, повітряно-плазменого, киснево-флюсового різання);
- здійснити практичне застосування результатів досліджень.

Об'єкт дослідження. Теплофізичні й фізико-механічні процеси при плазмовому різанні й роботі плазмотрона.

Предмет дослідження. Раціональні параметри підвищення ефективності плазмового різання металу й роботи плазмотрона в системі джерело живлення – електрична дуга – метал, що ріжеться.

Методи дослідження. В основу теоретичних досліджень покладено основні положення теорії зварювальних процесів, теорії плазми, фізики твердого тіла, електротехніки, електрофізики а також аеродинаміки. Експериментальні дослідження проводилися на спеціальному плазмовому устаткуванні з використанням сучасної вимірювальної та реєструючої апаратури. Містять методи вимірювання змінення хімічного складу, механічних властивостей та фазових складових, металографії. Достовірність одержаних результатів підтверджується їх використанням на промислових підприємствах України.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Дістав подальшого розвитку науково-прикладний напрямок: для підвищення ресурсу роботи й ефективності плазмотронів для різання необхідно застосовувати принцип розподілу прив'язки дуги по довжині розрядного каналу (для порожнистих «холодних» електродів) та по термохімічним вставкам (для термохімічних електродів).

2. Вперше встановлено, що для збільшення робочого струму дуги до 1000 А при різанні металу великої товщини (понад 150 мм) необхідно конструкція плазматрону з порожнистим термоемісійним катодом із захистом аргоном низького тиску й створенням дифузійної прив'язки дуги.

3. Встановлено, що плазмотрон з порожнистим «холодним» електродом для підвищення ресурсу роботи, продуктивності і якості різання металу більшої товщини слід підключати на зворотну полярність. При цьому ресурс роботи електрода збільшується більш ніж у два рази, а продуктивність підвищується на 20-40% у порівнянні із промисловими плазмотронами при однаковій силі струму.

4. Набула подальшого розвитку методика розрахунків високо ресурсних плазматронів яка враховує вплив і взаємозв'язок основних факторів і параметрів процесу з товщиною металу, що розрізається. Це дозволило сформулювати конструкційні рекомендації з створення плазмотронів з термохімічним та порожнистим «холодним» електродами.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

- в роботі вирішено комплекс завдань, пов'язаних з підвищенням ефективності плазмового різання металу за рахунок удосконалення конструкцій плазмотронів, матеріалів катодів і їх геометричних параметрів, умов роботи електродних вузлів плазмотронів;

- створені плазмотрони для різання металу з «холодними» і «гарячими» електродами потужністю від 40 до 300 кВт із поліпшеними енергетичними характеристиками й високою ефективністю. Тепловий ККД

ріжучих плазмотронів з порожнистими «холодними» або «гарячими» електродами становить (80-95) %. Товщина металу, що розрізається – від 60 до 400 мм;

– розроблена інженерна методика розрахунків високоресурсних плазмотронів для різання з порожнистими циліндричними «холодними» і «гарячими» електродами, що працюють на кисневмісних газах;

– розроблена, досліджена і реалізована технологія плазмового різання металу плазмотроном з порожнистими «холодним» електродом на зворотній полярності. При цьому встановлене, що усередині металу, що розрізається, розміщується більш контрагована рухлива катодна пляма, яка поглиблюється в порожнину різу в п'ять разів більше, ніж в умовах прямої полярності;

– розроблені конструкції плазмотронів впроваджені в промислове випробування у ремонтно-механічному цеху ПрАТ «Сєверодонецьке об'єднання АЗОТ» (м. Сєверодонецьк) та ТОВ «Буддеталь» (м. Краматорськ). Вони застосовувалися при різанні сталей (ст. 3, ст. 20, сталь 45, 09Г2С, 17ГС) товщиною до 400 мм; високолегованих сталей (12Х18Н10Т, 17Х23Н18, 20Х13, 10Х17Н13М3Т) товщиною до 150 мм; кольорових металів та сплавів (алюмінію, міді, латуні, бронзи) і титану до 100 мм для різання круглого прокату (40ХН2МА) до 300 мм, поковок (сталь 45), до 200 мм; труб високого тиску з товщиною стінки до 40-50 мм (12Х18Н10Т, 12Х1МФ);

– результати роботи використано у навчальному процесі Донбаської державної машинобудівної академії (м. Краматорськ) при викладанні розділів дисципліни «Технологія виробництва підйомно-транспортних машин» для освітньо-професійного рівня «бакалавр», а також у курсовому і дипломному проектуванні й у науково-дослідній роботі магістрів при визначення раціональних способі виготовлення деталей та їх вузлів.

Позитивною особливістю розроблених плазмотронів є можливість їх використання не тільки для реалізації різання металів, але й для плазмового напилення.

Особистий внесок автора. У представленій роботі внесок автора полягає в обґрунтуванні загальної концепції роботи, формулюванні мети й завдань дослідження, самостійному проведенні експериментальних і теоретичних досліджень створених конструкцій плазмотронів. Авторіві належать основні ідеї дисертації, положення, що виносяться на захист, а також загальні висновки й результати роботи.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідалися на всеукраїнських і міжнародних науково-технічних конференціях (МНТК): VI Міжнародна практична конференція – виставка, м. Санкт–Петербург, 13-16 квітня 2004р.; IX Міжнародна практична конференція – виставка, м. Санкт–Петербург, 10-13 квітня 2007р.; XI Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю, 16 – 17 квітня. 2008р.; Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні матеріали і технології в металургії та машинобудуванні», м. Київ, 2007р.; XV Міжнародна науково-технічна конференція «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку», м. Краматорськ, 2017р.

Публікації. Матеріали і основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 11 друкованих працях: 5 статей у фахових виданнях України, одна з яких входить до міжнародної науко-метричної бази даних; 1 стаття у іншому виданні України; 5 тез – у збірниках матеріалів міжнародних науково-технічних конференцій.

Структура й обсяг роботи. Дисертаційна робота викладена на 189 сторінках машинописного тексту, складається з анотації із переліком праць, вступу, 5 розділів з опціональним формуванням списку використаних джерел (загалом 127 джерел), загальних висновків та 3 додатків. Об’єм основного тексту дисертації складає 130 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 7 таблицями та 104 рисунками.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ

1.1 Сутність та металургійні особливості плазмового різання

Наука про плазмовий процес різання металів займається розглядом різноманіття процесів, що відбуваються в порожнині різку, досліджує явище плазмотрону й джерел його живлення [1-10].

За допомогою плазмового різання відбувається перетворення електричної енергії джерела струму в теплову енергію плазмової дуги, інтенсивне стискання її стовпа у формуючій камері й наскрізне проплавлення плазмовою дугою металу, що розрізується, з видуванням розплаву з порожнини різку [2-4]. Згідно [2], напруга стислої плазмової дуги залежить від її довжини, розмірів каналу, стискаючого стовп, складу й витрат газового потоку. Плазмова дуга формується в плазмотроні, який складається із двох основних елементів: електрода й формуючого сопла [6]. У соплі через канал пропускається стовп електричної дуги разом із плазмоутворюючим газом, що подається під певним тиском [5, 6].

У сучасному плазмовому різанні використовуються дві схеми плазмоутворення: дуги прямої дії й непрямої дуги [4, 5].

Схема дуги прямої дії (рис. 1.1) збуджується на оброблюваному металі, який є одним зі струмоведучих електродів розряду ККД (ефективність – 60-70 %) [11]. До недоліків схеми ставиться неможливість обробки матеріалів, що не проводять електричний струм [11].

Схема непрямої дуги (рис. 1.2) збуджується між електродами плазмотрона, незалежними від оброблюваного матеріалу [7]. Особливістю схеми є те, що об'єкт обробки не включений в електричне коло (ККД нагрівання виробу не перевищує 30-40 %) [12]. Плазмовий струмінь

використовують при обробці матеріалів, що не проводять електричний струм, а також для різання металів невеликої товщини [7].

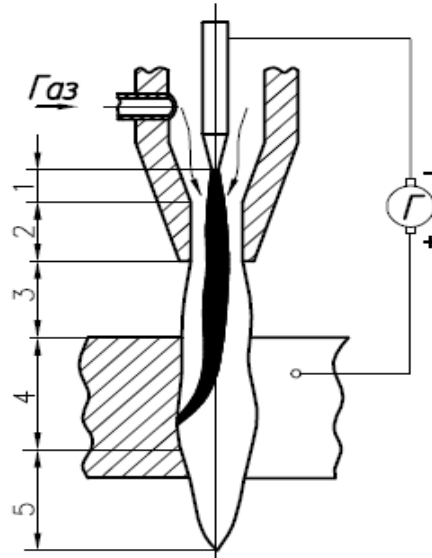


Рисунок 1.1 – Схема плазмової дуги прямої дії та її ділянки: 1 – закрита; 2 – стисла; 3 – відкрита; 4 – робоча; 5 – факел плазми; Г – генератор струму

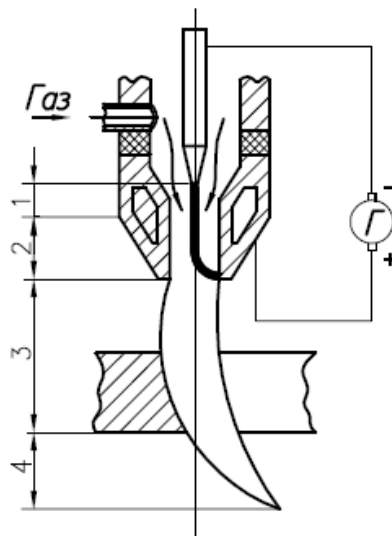


Рисунок 1.2 – Схема плазмової дуги непрямої дії та її ділянки: 1 – закрита; 2 – стисла; 3 – відкрита; 4 – факел плазми; Г – генератор струму

На одержання різку необхідної якості при найбільшій продуктивності процесу впливають вертикальні переміщення розплавленого металу в порожнині різку, рід плазмоутворюючого газу, застосовувана полярність струму й інші фактори [13-16]. У роботі [17] були встановлені закономірності зміни ефективної теплової потужності плазмового струменя. Плазмовий струмінь розглядався як нормальне кругове джерело теплоти [17]. Дослідження визначили характер зміни ефективної потужності залежно від режиму роботи плазмотрона. Крім того, вивчався розподіл теплової потужності по поверхні й обсягу металу, що нагрівається [17]. Було помічено, що тепловий потік у центрі плями плазмових струменів склав $2-5 \text{ кВт/см}^2$, що суттєво менше теплового потоку в центрі плями стиснутих плазмових дуг, що переходять на метал. У результаті проведених досліджень було встановлено, що плазмові струмені не зможуть одержати широке промислове застосування в області різання металів [17].

У ряді робіт [14, 18, 19 і ін.] досліджувалися теплові потоки в плямах плазмових ріжучих дуг при різних значеннях робочого струму, виду плазмоутворюючого газу і його витрат, конструктивних параметрів плазмотрона. За результатами досліджень були встановлені закономірності й особливості процесів у плямах, а також вплив характеру поведінки дуги і її опорної плями усередині порожнини різку на продуктивність і якість утвору порожнини різку. Дослідження [18] показали, що провести вивчення дуги в порожнині не можливо через її малу ширину. Спостереження дуги можливо лише з боку урізання, куди викидається потік розплавлених часток і продукти згоряння металу. Визначення місця розташування дугової плями по яскравості світіння вимагала значної ретельності, оскільки в порожнині різку розміщується частина стовпа дуги й не менш яскравий потік плазми після дугової плями, а дугова пляма розташовувалася в потоці розплавлених часток металу, що обмежувало можливість проведення вимірів і вивчення механізму переміщення

плями [18]. У зв'язку із цим науково-дослідні роботи велися на спрощених фізичних моделях порожнини різку [20-22].

У роботі [22] розглядалася поведінка дугових плям на відкритій торцевій поверхні пластини. Було відзначено, що швидкісна кінозйомка збоку сприяла можливому переміщенню дугової плями зверху вниз і утвору шунтувальних перемичок між стовпом дуги й пластинами. Але, проте, використання торцевих пластин не дозволило відтворити близькі до реальних умов газодинамічні впливи потоку плазмоутворюючого газу на електричну дугу і її анодну пляму. Більш близькими до реальних умов стали дослідження переміщення дугової плями усередині наскрізного отвору в пакеті розділених ізоляційними прокладками пластин [21]. У цьому випадку тепло надходить у пластини не тільки із фронтальної крайки, але й з бічних і тильної крайок [21].

У роботі [22] з'ясовано, що в кожен момент питомий тепловий потік по глибині різку був розподілений нерівномірно. Найбільший потік надходив до металу у зоні опорної плями дуги, а найменший – у фронтальну крайку різку, у зону стовпа дуги. І, нарешті, найменший потік відповідає зоні фронтальної крайки різку за опорною плямою дуги. У відповідність із цим, можливим став розподіл питомого теплового потоку по глибині різку, і сформувалася його конфігурація [22]. Переміщення дугової плями вниз по фронтальній поверхні порожнини різку відбувається під впливом газодинамічної й електродинамічної сил. Газодинамічна сила сприяє руху потоку плазми з порівняно холодною оболонкою з недостатньо нагрітого газу, що рухається уздовж стінок сопла з навколишнього плазмотрон середовища, а електродинамічна, викликає взаємодію струму із власним магнітним полем [22].

Обидві ці сили прагнуть поступово перемістити дугу від верхніх секцій до нижніх. У міру переміщення вниз дугової плями й подовження дуги зростає різниця потенціалів між дугою й верхньою частиною фронтальної крайки. Як тільки різниця потенціалів між верхньою частиною крайки й ділянкою дуги, що перебувають проти неї досягне значення більшого, ніж електрична потужність

цього проміжку, виникає нова дугова пляма, а стара зникає. Цей процес одержав назву «шунтування дуги» [11-13, 23-26].

Продуктивність плазмового різання металів може бути виражена через співвідношення ефективної потужності, що йде на розплавлювання металу, яку може забезпечити ріжучий плазмотрон, до величини питомої потужності, необхідної на розплавлювання одиниці маси металу [4]:

$$P = (U \cdot I \cdot \eta - q_m) / (C_{розпл} T_{розпл} - C_0 \cdot T_0 + C_m) \quad (1.1)$$

де U – напруга дуги, B ;

I – струм дуги, A ;

η – ефективний ККД нагріву металу;

q_m – тепловідвід в метал, Bm ;

$C_{розпл}$ – питома теплоємність металу при $T_{розпл}$, $Дж/(кг \cdot K)$;

C_0 – питома теплоємність металу при початковій температурі заготовки, $Дж/(кг \cdot K)$.

У знаменнику вираження (1.1) знаходяться параметри, що характеризують початковий стан і теплофізичні властивості металу, що розрізається. Однак (1.1) не розкриває вплив основних вхідних параметрів процесу плазмового різання на продуктивність. По суті, їх вплив інтегрально враховує ефективний ККД нагрівання металу, який згідно [17] зростає при збільшенні потужності плазмотрону.

Продуктивність процесу плазмового різання можна виразити через наступні параметри [1]:

$$P = v \cdot b \cdot \delta \cdot \gamma, \quad (1.2)$$

де v – швидкість переміщення плазмотрона, m/c ;

b – ширина різну, m ;

δ – глибина різання, m ;

γ – щільність металу, kg/m^3 .

Вираження (1.2) також не розкриває процес утворення порожнини різну й не демонструє вплив вхідних факторів.

Якість відокремлювального плазмового різання характеризується шириною різну, величиною не перпендикулярності бічних поверхонь порожнини різну, шорсткістю останніх, наявністю й розміром ґрата і т.д. [17]. З погляду теплофізики, розділове різання металів являє собою процес місцевого нагрівання, розплавлення й здування металу із фронтальної крайки різну при впливі на неї високотемпературного потоку плазми [25]. При цьому тепловий потік у метал обумовлений променистим і конвективним теплообміном від стовпа дуги, дугової плями й струменя плазми за плямою дуги. Згідно вимірів, [27] променистий тепловий потік становить лише п'ять-десять відсотків від загального потоку. Тому розмір й форма теплового потоку в метал обумовлені формою й характером поведінки дуги в порожнині різну, які залежать від вхідних параметрів процесу [17].

Одним з важливих показників якості плазмового різання металів є збереження вихідних властивостей металу поблизу поверхні різну [3]. Потужна плазмова дуга, виплавляючи метал з порожнини різну, викликає появу температурного поля й у більш вилучені в глибину шарах металу. Причому це поле переміщається в міру руху плазмотрона, і його параметри залежать від потужності плазмової дуги, товщини й виду, що розріжеться металу, швидкості переміщення плазмотрона, а також його конструктивних і режимних характеристик [17]. Під впливом виникаючого температурного поля в металі, поблизу поверхні різну утворюється зона термічного впливу, яка по глибині умовно розбивається на дві характерні ділянки [17, 105].

Перша ділянка, що примикає до поверхні різну, являє собою розплавлений і не вилучений потоком плазми шар металу – це ділянка оплавлення. Друга

ділянка, що нагрівається до температури менше температури плавлення, має ту або іншу, змінену під дією тепла, структуру металу або змінений хімічний склад [17].

Процеси термічного різання супроводжуються виплавленням металу з порожнини різу [17]. Відбувається переміщення крапкового джерела нагрівання щодо поверхні металу, що розрізується, а також великий перепад температур на порівняно вузькій ділянці, що прилягає до поверхні різу [17]. У результаті цього, у крайках металу відбуваються процеси зміни хімічного складу структурних складових і механічних властивостей металу [17]. Швидкість нагрівання й охолодження металу на глибині до 0,1 мм від крайки різу можуть досягати досить високих показників [17].

Згідно [1] поряд з якісним характером змін металу в зоні термічного впливу (ЗТВ) мають істотне значення загальна довжина ЗТВ, глибина окремих перехідних зон: литої ділянки, укрупненого зерна, повної й неповної перекристалізації. Характер і розміри ЗТВ залежать від состава й товщини металу, що розрізається, робочого струму й швидкості різання [7]. Перекристалізація в крайках металу зі зміною фазового складу структури викликає напруження, які можуть в окремих випадках привести до утвору тріщин у поверхневих шарах ЗТВ [28]. На зміну хімічного складу металу істотний вплив має і плазмоутворююче середовище [29]. Так, процентне співвідношення елементів металу може змінюватися – збільшуватися або зменшуватися. Крім того, поверхневий шар піддається насиченню газами, а, отже, зміні своїх властивостей, що виявляють негативний вплив на зварюваність металу [18]. Доведено [17], що найбільші зміни можуть відбуватися в литому шарі. При взаємодії високошвидкісного газового потоку із крайками різу відбувається переміщення металу литого шару на поверхні крайки, у результаті чого стає нерівномірною глибина його по товщині аркуша й на поверхні різу утворюється своєрідний макрорельєф у вигляді вертикальних або похилих до поверхні аркуша бороздок [30].

Загальною властивістю для плазмового різання металів є утворення у крайки різку ЗТВ із ділянками оплавлення й структурних змін у твердому металі [31]. У ЗТВ відбувається зміна фазового складу (поява α – фази), що приводить до підвищення твердості й збільшенню напруг другого роду [32]. Крім розглянутих структурних змін і твердості в литій ділянці ЗТВ відбувається також зміна хімічного складу металу [32]. Лити ділянка впливає на шорсткість поверхні різку. Чим менше глибина литої ділянки ЗТВ, тем менше шорсткість поверхні різів, тому що на виникнення шорсткості (бороздок) і на її величину впливають швидкість різання, товщина металу, розмір каналу сопла [6]. Але найбільш сильний вплив на утворення бороздок виявляє нерівномірність швидкості різки [32]. Взаємодія газової складової дуги з розплавленим металом приводить до інтенсивного його окиснення, у результаті чого відбувається зміна хімічного складу крайки різку [33]. Так, при різанні високовуглецевих сталей відбувається науглецування крайки різку через вибіркоче окиснення заліза. Одночасно спостерігається вигорання на крайках різку кремнію, марганцю й хрому [17]. Це пов'язане з більшою, ніж у заліза, спорідненістю цих елементів з киснем. Крім того, відзначене збагачення крайок плазмового різку при кисневмісній плазмі нікелем і міддю, що пояснюється меншою спорідненістю цих елементів з киснем, ніж з залізом, за даних умов різання [34].

Різання нержавіючих сталей також супроводжується процесом випару й реакціями окиснення металу й викликає його хімічну неоднорідність на поверхні різку [35]. Зміна на поверхні різку концентрації марганцю, титану й хрому в порівнянні зі змістом цих елементів в основному металі можна пояснити окисненням. Збільшення змісту в прилягаючій до різку зоні нікелю, що є слабо окиснюваним елементом, відбувається внаслідок вигорання інших компонентів сталі. Найбільше збіднення хімічного складу сталі відбувається у верхній її частині, тобто в зоні нагрівання плазмової дуги [35].

1.2 Застосування плазмового різання і його економічні переваги

При обробці високолегованих, хромонікелевих (корозійностійких) і хромистих сталей, чавуну, міді, алюмінію, латуні, бронзи й інших сплавів використовують термічні способи різання (табл. 1.1) демонструє, що плазмове різання застосовують при неможливості використання в даних умовах більш економічного способу, коли забезпечуються високі швидкості, необхідні для поділу металу при безперервному (сполученому) циклі обробки [36].

Таблиця 1.1 – Термічна різка різноманітних матеріалів [36]

Метал	Плазмово – дугова	Киснева (газова)	Киснево-флюсова	Дугова	Повітряно-дугова	Лазерно-киснева
Алюміній та сплави	+	-	-	0	0	-
Мідь та сплави	+	-	0	+	0	-
Сталь, що стійка до корозії	+	-	+	+	+	+
Низьковуглецева сталь	+	+	0	0	+	+
Чавун	+	-	+	+	+	0
Магній та його сплави	+	-	-	-	-	-
Титан	+	+	0	0	0	+
Нікель	+	-	0	0	0	-

Згідно [36], плазмового різання доцільно застосовувати для корозійностійких сталей товщиною до 60 – 80 мм; машинне плазмового різання – для низьковуглецевих і низьколегованих сталей товщиною до 30 –

50 мм або у випадку, коли багаторізакове кисневе різання недоцільне (наприклад, при одиничному виробництві) або коли необхідно зменшити теплові деформації заготовок, що вирізуються.

Плазмове різання металу здійснюють за допомогою плазмової дуги або плазмового струменя, основними джерелами нагрівання яких є потужність, ефективний ККД і характер розподілу теплового потоку плямою нагрівання [2, 5]. При цьому потужність і ККД змінюються аналогічно нагріванню газу в плазмотроні [19]. Зміна питомого теплового потоку q_r за радіусом плями нагрівання для струменя й плазмової дуги приблизно описується законом нормального розподілу (рис. 1.3) [13, 15, 37].

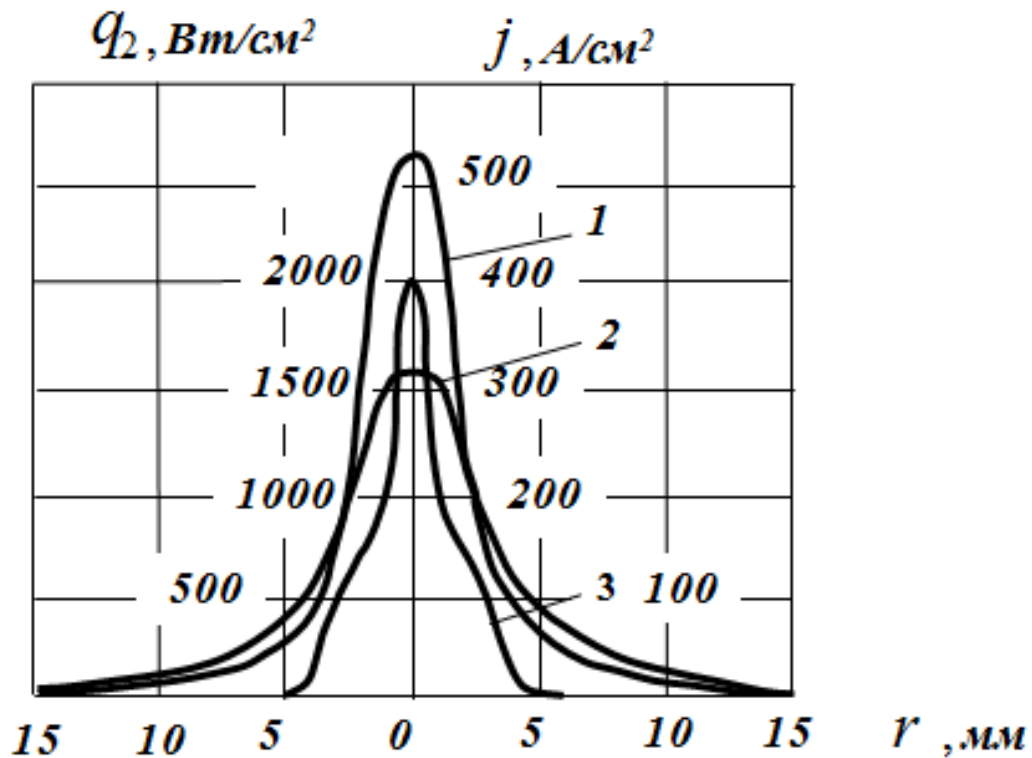


Рисунок 1.3 – Розподіл теплового потоку плазмової дуги (1), плазмового струменя (2) та щільності струму (3) вздовж плями нагріву аноду: 1, 3 – $I = 68$ А; $G = 1,2$ г/с; $d_c = 6$ мм; 2 – $I = 100$ А; $G = 1,6$ г/с; $d_c = 8$ мм

Рис. 1.3 демонструє, що збільшення струму приводить до зростання максимального теплового потоку, при цьому розмір плями практично не змінюється. Лише зі збільшенням струму розмір плями трохи підвищується.

Встановлено, що максимальний тепловий потік і розмір плями нагрівання зростають зі зменшенням діаметра каналу [19]. Максимальний тепловий потік можна розрахувати згідно [19]:

$$q_2 = q_{2m} \exp(-k r^2), \quad (1.3)$$

де k – коефіцієнт зосередженості, що характеризує форму кривої нормального розподілу.

Плазмовий струміль можна розглядати як нормально-кругове джерело теплоти з параметрами, пов'язаними з ефективною тепловою потужністю співвідношенням [19]:

$$q = q_{2m} \frac{\pi}{k}. \quad (1.4)$$

Умовний діаметр плями нормально-кругового джерела, тобто розмір плями d_n , на межі якого $q_{2m} \left(\frac{d_n}{2} \right) = 0,05 q_{2m}$, дорівнює [19]:

$$d_n = \frac{3,46}{\sqrt{k}}. \quad (1.5)$$

$$q_{2m} = 0,76 Pr^{0,6} (\rho \mu)_\omega^{0,1} (\rho \mu)_s^{0,4} [1 + Le^{0,52} I] \frac{h_D}{i_s} \sqrt{\frac{dv_e}{dr}} (i_s - i_\omega) \quad (1.6)$$

Теплова потужність, що виділяється в металі при підключенні його до джерела струму, обумовлена енергією струменя q_p , електрично активною плямою q_l і випромінюванням стовпа дуги q_r . Потужність, передана струменем, дорівнює [38]:

$$q_p = S \alpha_k (i_s - i_\omega), \quad (1.7)$$

де S – площа теплообміну;

α_k – коефіцієнт теплопередачі віднесений до різниці ентальпії;

i_s і i_ω – відповідно ентальпія плазми при температурі дуги і температурі поверхні пластини.

В таблиці 1.2 наведено технічні характеристики відомих установок ППР із плазмотронами, що дозволяють різати метал товщиною більше, ніж 50 мм [110].

Аналізуючи характеристики наведених установок, слід зазначити, що технологічні можливості ППР в основному обмежені товщиною металу до 70 мм [39]. Є одиничні установки, що дозволяють різати метали товщиною 100 і більш мм. Так наприклад установка PA-S150SNS (Фірма Kjellbetg, Австрія) дозволяє різати метал до 150 мм, однак її плазмоутворюючими газами є Ar, H₂ або їх суміші. Особливий інтерес викликають установки із плазмотронами ПВФ 401М и ПРОВ-2. Плазмотрон ПВФ 401М призначений для механізованої ППР чорних і кольорових металів у діапазоні товщин від 5.0...100 мм при роботі із джерелами живлення АПР-402, АПР-403, АПР-404, Київ-4М, АПРМ-411 або з іншими джерелами живлення плазмової дуги, що мають напругу холостого ходу до 300 В и струм до 400 А [6].

Установки із плазмотронами ПРОВ-2, що мають мідний порожнистий катод дозволяють різати метал до 150 мм. Однак як плазмотрон ПВФ-401М так і плазмотрон ПРОВ-2 мають один загальний недолік у вигляді низького ресурсу роботи електрода й сопла [19, 37, 39].

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики відомих установок для ППР

Показники	Київ – 5	Київ – 8У	Карат 200-802	ППР-200	РА– S150SSNS	ПРОВ–2	Мультиплаз 7500	Мультиплаз 15000
Виготовник	НПМГП «Плазмотрон» НТК «ІЕЗ ім.. Е.О.Патона, м. Київ, Україна		«ЕнергоТорец» м. Константи́нівка, Донецька обл., Україна	ОЗСО НТК «ІЕЗ ім. Є.О.Патона, м. Київ, Україна	«Kjellberg Elektroden» м. Фінстервальд, Німеччина	Кішеньовський політехнічний університет, м Кішеньов, Молдова	Київ, Україна	Київ, Україна
Потрібна потужність, кВт	23	30	45	45	50..100	250	7,5	15
15Номінальний струм, А	120	140	200	200	600	600	20-55	20-100
Затрати повітря, л/хв	300	200	100	50	-	140	250	480
Охолодження плазмотрона	повітряне	повітряне	водне	водне	водне	водне	повітряне	повітряне
Максимальна товщина різання сталі та алюмінію, мм	50	70	50	60	75-150	150	25	50

1.3 Схемні та конструктивні принципи побудови плазмотронів

Ріжучі властивості плазмотронів ППР із термохімічними катодами суттєво залежать від конфігурації їх формуючої системи – катодно-соплової камери й завіхрювача повітря [19]. Оптимальні конструктивні параметри катодно-соплової камери [7], представлені на рис. 1.4, забезпечують максимальну концентрацію ріжучої ділянки стовпа дуги при відносно високому ресурсі роботи катода й сопла.

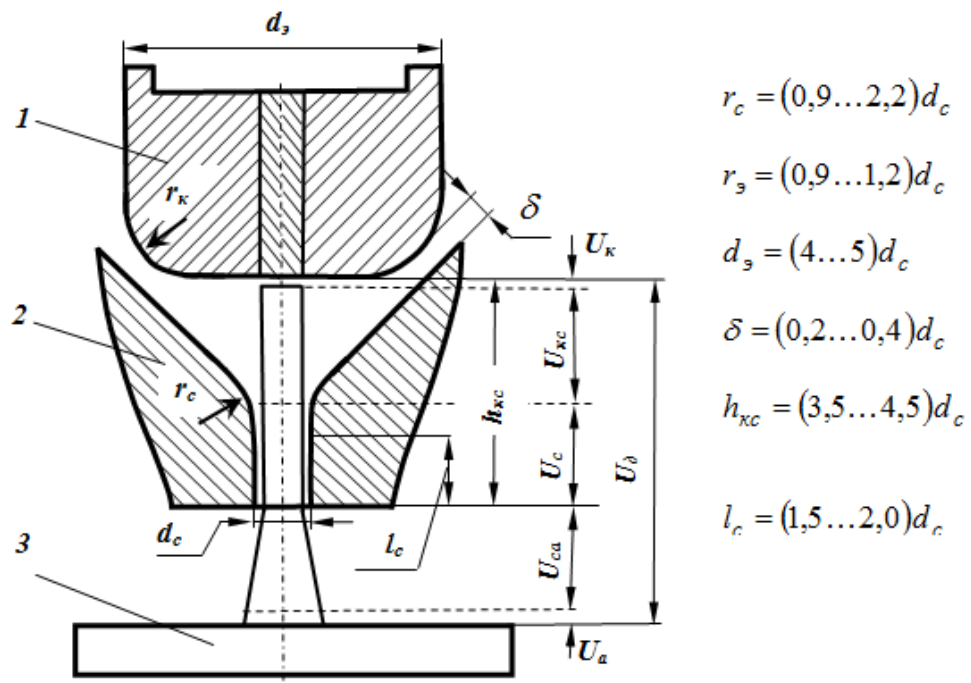


Рисунок 1.4 – Параметри ріжучої повітряно-плазмової дуги в формуючій камері: 1 – катод; 2 – сопло; 3 – анод

Вихідним розмірним параметром розрядної камери плазмотрона є діаметр сопла d_c який вибирається з оптимальної щільності струму в каналі сопла:

$$j_c = \frac{4 \cdot I_\delta}{\pi \cdot d_c^2} \quad (1.8)$$

З експериментальних даних $j_c = 40...70 \text{ А/мм}^2$ для $I_\delta \leq 150 \text{ А}$ в плазмотронах з повітряним охолодженням [12]. Аналіз енерготеплового балансу типових плазмотронів ППР показує, що потужність, що виділяється на оброблюваному виробі становить 83...88 % потужності повітряно-плазмової дуги (P_δ) [25]. Частина її корисно витрачається на виплавлення металу з порожнини різку (P_p), а частина, що залишилася (P_m) передається у крайку різку.

Згідно [2, 40-42] при швидкісній ППР термічний ККД процесу становить 0,80...0,85. Отже, P_p дорівнює $(66...75) \% \cdot P_\delta$, а P_δ, P_m – $(13...17) \% \cdot P_\delta$.

Електричні параметри системи джерела живлення, впливають на процеси, що відбуваються при ППР [24]. Одним з таких процесів є дуга [43, 44]. Тому основою створення різноманітних конструкцій плазмотронів і джерел живлення є електричні й теплофізичні характеристики ППР. Одним з основних вимог, пропонованих до плазмотронів для різання, є максимальний ресурс роботи катода й сопла з можливістю їх швидкої заміни й порівняно невисока вартість [41].

На рис. 1.5 представлені найпоширеніші в промисловості конструкції катодів і принципові схеми плазмотронів [45, 46]. Катод з конічним кріпленням до катодного вузла й гафнієвою вставкою (рис. 1.5 – г) відрізняється високою металоємністю й складністю його заміни. Катоди на рис. 1.5 – д і рис. 1.5 – е, мають меншу металоємність і досить високий ресурс роботи навіть за умови заміни гафнієвої вставки більш дешевою цирконієвою. Застосування в конструкції (рис. 1.5 – е) гафнієвої вставки забезпечує високий ресурс роботи (кілька годин) повітряохолоджуючого катода при струмі дуги 140...160 А [45].

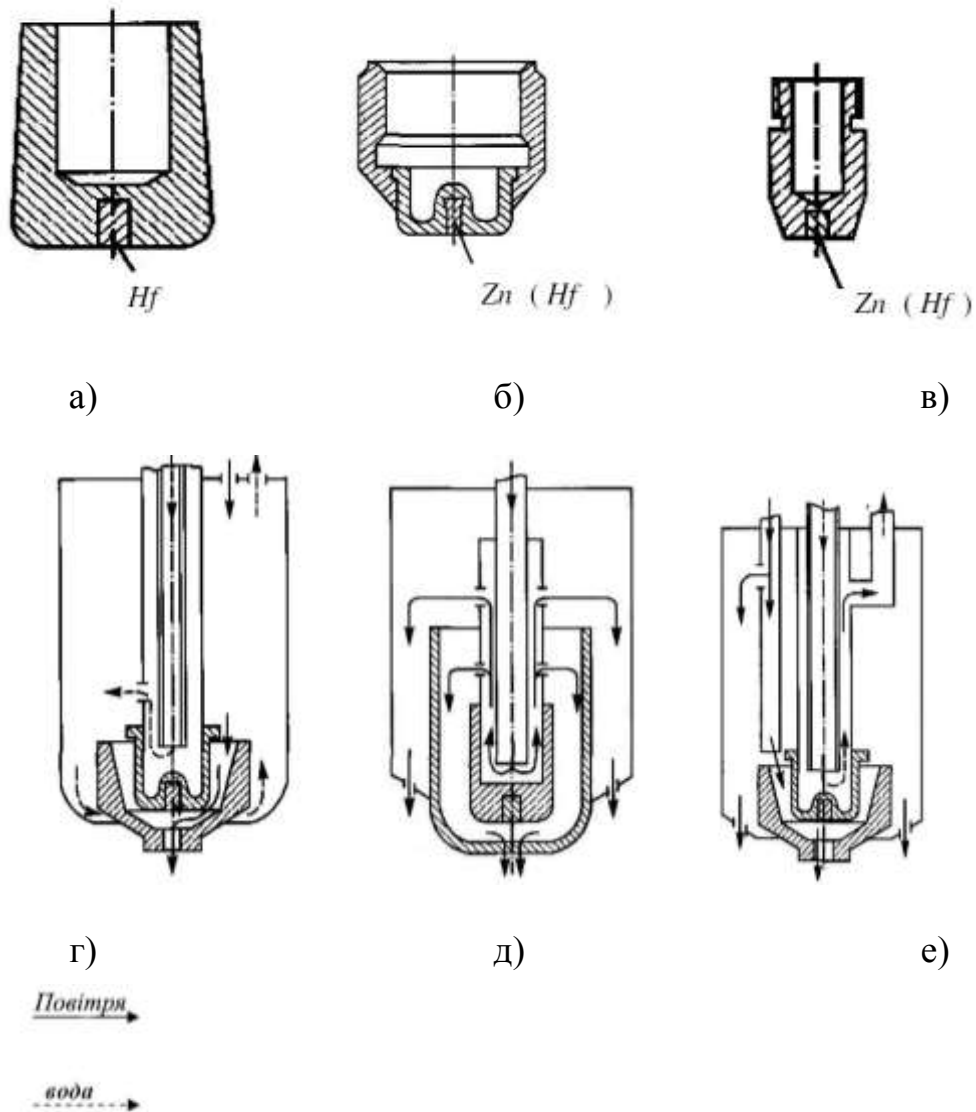


Рисунок 1.5 – Конструктивні схеми катодів та плазмотронів

Головним конструктивним фактором плазмотронів є високий рівень охолодження його теплонапружених елементів. Так, плазмотрони з водяним охолодженням катода й сопла (рис. 1.7 – а) призначені для машинного різання в діапазоні струму 50...300 А. Їхній запуск можливий тільки за допомогою чергової (допоміжної) дуги. Плазмотрони (рис. 1.7 – б, в) працюють із повітряним охолодженням при струмі дуги до 160 А, а на підвищених струмах (до 250 А) – з водоповітряним охолодженням.

Технологічні можливості ППР особливо виявлені при термічному різанні нержавіючих сталей і кольорових металів [47]. Однак можливості плазмотронів, що серійно випускаються, для ППР обмежені товщиною різку металу до 70 мм [48]. Альтернативою ППР є газокисневе різання, яке за швидкісними показниками при товщині сталей вище 60 мм практично однакова із ППР [35]. Основну частку споживачів установок і плазмотронів ППР становлять підприємства, що використовують їх на майданчику металобрухту [47]. Тому основними вимогами до подібних пристроїв є їхня простота й надійність [49].

Згідно [12] при оцінці процесу різання необхідно враховувати й інші показники, що впливають на ефективність: ресурс роботи і потужність плазмотрона, температура і масові витрати газу, що нагрівається, характер розподілу теплового потоку по плямі нагріву і ін. Крім того, як було зазначено вище ефективний ККД плазмової дуги в середньому на 10–30 % більше ККД плазмового струменя [50], а тепла потужність плазмотрона підвищується при використанні високоентальпійних молекулярних газів та їх сумішей (водню, аміаку, азоту). Ще більші потужності реалізуються при застосуванні хімічно активних плазмоутворюючих газів (повітря, кисень) здатних вступати в екзотермічні реакції з оброблюваним виробом [12].

Промисловістю випускається цілий ряд технологічних плазмотронів для різання, що відрізняються геометрією розрядного каналу, параметрами газу, що нагрівається, його подачею і стабілізацією, конструкцією і матеріалом електродів, схемою і джерелами електроживлення [50]. Поряд з перевагами серійні плазмотрони для різки володіють і недоліками, що знижує ефективність плазмового різання [51]. Так, наприклад, можливості різку плазмотронів для ППР в основному обмежені товщиною металу до 70 мм [39].

На сьогодні відсутні обладнання, яке забезпечує різання чорних і кольорових металів завтовшки 100–300 мм [39, 40]. Крім того, всі серійні

плазмотрони для різки мають один загальний недолік – це низький ресурс роботи електрода (катода) і сопла [1, 50, 51].

Застосування термокатодів із захистом їх інертним газом дозволяє при струмах 500–1000 А досягти ресурсу 100 год і більше. Однак все це вимагає додаткових витрат при створенні, виготовленні та експлуатації плазмотронів, що не завжди економічно виправдано [39].

Наведений огляд досліджень показав, що з точки зору зазначених проблем, найбільш перспективними є плазмотрони з порожнистими циліндричними «холодними» й «гарячими» катодами.

Ерозія матеріалу електродів є наслідком складних теплових, механічних і хімічних процесів в приелектродних областях, а також джоулевого виділення теплоти в металі [12]. Всі ці процеси в певних умовах можуть чинити вирішальний вплив на тепловий стан електродів, але якісна оцінка частки внеску кожного процесу не завжди можлива [21]. Наявні експериментальні дані різних авторів відрізняються один від одного за величиною іноді на кілька порядків [6, 12, 17]. Для «холодних» катодів досі немає єдиної точки зору на те, що є визначальним у перенесенні заряду в прикатодній області; ще більше протиріч по величині щільності струму на катоді [52].

Таким чином, вихідним матеріалом для визначення найважливіших характеристик – питомого теплового потоку, в зоні дуги контакту з поверхнею, служать експериментальні дані щодо теплових потоків і розмірів ерозійної поверхні [50].

На величину теплового потоку (рис. 1.6) у обраній робочій середі (азот, повітря) впливає матеріал катоду і тиск газу [3, 7, 55, 57]. На прикладі мідного електроду (криві 2 і 3) видно вплив тиску.

Так як ерозія катоду в значній мірі залежить від його теплового стану, то було встановлено, що як перегрів, так і переохолодження катоду призводять до зростання ерозії [52]. Це викликається підвищенням швидкості випаровування матеріалу або навіть краплинного виносу [45].

На рис. 1.7 наведена залежність питомої ерозії, інтенсивно охолоджуваного водою трубчастого електрода, від сили струму [3, 7].

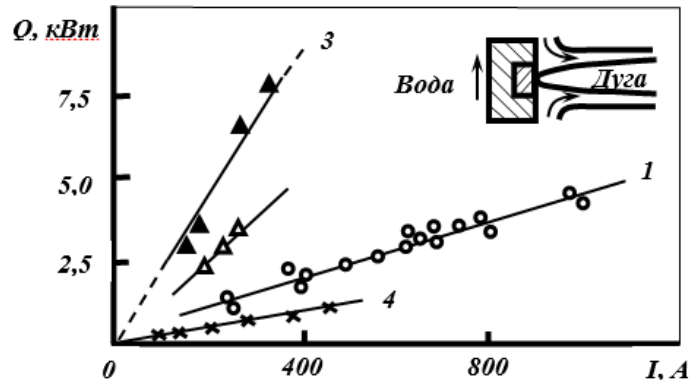


Рисунок 1.6 – Вплив роду матеріалу та тиску газу на тепловий потік в катоді (повітря, азот) [57]: 1, 2 – вольфрам, мідь (тиск 1 бар); 3 – мідь (тиск 5 бар); 4 – гафній, цирконій (тиск 1 бар)

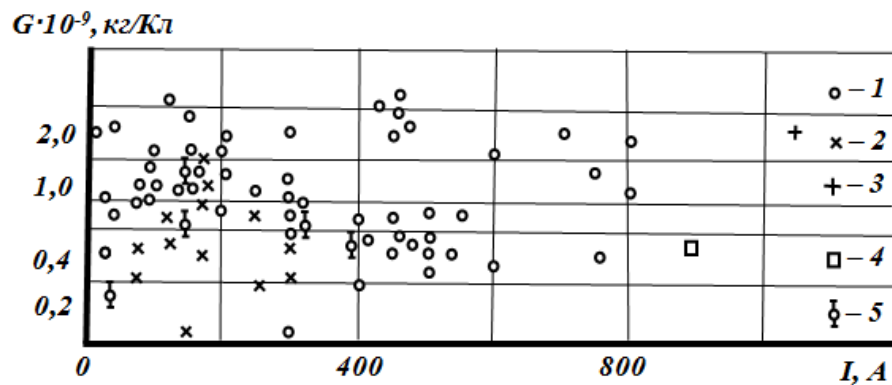


Рисунок 1.7 – Залежність питомої ерозії вихідного трубчастого електрода двокамерного плазмотрона від струму [58]: 1 – повітря; мідь, постійний струм; 2 – повітря; мідь, змінний струм; 3 – повітря; мідь, постійний струм; 4 – водень; мідь, постійний струм; 5 – повітря; титан, постійний струм

Опорна пляма дуги з досить великою швидкістю переміщується по внутрішній поверхні електрода, що призводить до зниження «ефективного» питомого теплового потоку в тіло електрода і зменшення ерозії [58]. Такий режим здійснюється в багатьох схемах плазмотронів. У діапазоні струмів 100–1000 А, незалежно від роду струму й газу, питома ерозія «холодного» електрода лежить в межах $10^{-9} - 10^{-10}$ кг/Кл [55, 58]. Ця величина досить велика, що, мабуть, пов'язано зі стрибкоподібним переміщенням плями дуги вздовж поверхні електрода [10, 12].

Експерименти в [5, 11, 12, 20 та ін.] показали, що пляма дуги на поверхні електрода залишається нерухомою протягом часу $t = 10^{-5}-10^{-4}$ с. З диференціального рівняння Фур'є випливає, що за такий малий час, до температури плавлення в локальній зоні прогрівається тільки тонкий поверхневий шар товщиною $\delta \approx \sqrt{at}$, де a – коефіцієнт температуропровідності.

Для міді і заліза товщина поверхневого шару δ дорівнює при $t = 10^{-4}$ с відповідно 0,3 і 0,1 мм, що на два порядки менше можливої товщини електрода, таким чином ерозійні процеси на «холодних» електродах розігруються в тонкому шарі [59]. Отже, одне з можливих рішень зниження ерозії лежить на шляху підвищення температури електрода, і тим самим зменшення часу. Застосування в якості плазмоутворюючого газу сумішей повітря з вуглецевмісними газами призводить до різкого зниження ерозії мідних електродів [13]. Причому в перші 15–20 год. ерозія відсутня повністю (струм дуги 300 А). У діапазоні струмів від 200 до 800 А ерозія сопла-анода плазмотрона становить $10^{-9} - 10^{-10}$ кг/Кл [60]. Аналіз численних досліджень в цьому напрямку говорить про те, що є ціла низка інших факторів, що впливають на ресурс, ККД плазмотрона й ефективного ККД нагріву речовини, урахування яких дозволяє поліпшити енергетичні характеристики і підвищити ефективність плазмових технологій у процесах різання, напилювання й нагрівання газу [32, 34, 37, 53 та ін.].

1.4 Дослідження по розробці електродних вузлів плазмотронів

На відміну від інших деталей плазмотрону, які можуть бути захищені від безпосереднього впливу електродугової плазми за допомогою газу або рідини, електроди завжди контактують з електричною дугою. При цьому тільки на «гарячих» термоемісійних електродах можна відвести все тепло, що виділяється в області нерухомої електродної плями тепло без помітного його руйнування [20, 61, 62]. При виготовленні термоелектродів, зазвичай застосовують тугоплавкі метали (найчастіше вольфрам) з присадками оксиду торію або лантану, які знижують роботу виходу електродів [1, 12]. Так як вольфрам інтенсивно окислюється, його можна використовувати тільки за умови захисту інертним газом [12]. В окислювальних середовищах застосовуються термокатоди з гафнію або цирконію, що утворюють міцні плівки оксидів, що володіють гарними емісійними властивостями [1, 6, 19, 49, 51 та ін].

Найбільш часто багаточастотні електроди сучасних плазмотронів (для струмів від одиниць кілоампер до десятків кілоампер) виробляються з міді і сталі [3, 9, 12, 19, 51 та ін.]. Такі електроди на відміну від термокатодів не можуть працювати з нерухомою дуговою плямою [8, 12, 63, 64 та ін.]. Температура плавлення міді і сталі (1083°C і 1401°C відповідно) не дозволяє нагрівати їх до температури, при якій стає помітною термоемісія [65]. Тому вони отримали назву «холодні» на відміну від «гарячих» термоемісійних [12, 58]. Щільність теплових потоків в дугових плямах на міді і сталі настільки висока, що неможливо повністю відвести все тепло від цих місць. З метою розосередження теплового потоку на робочій поверхні електрода і скорочення часу впливу дуги на фіксовану точку електрода застосовується швидке переміщення дугового розряду по його поверхні за допомогою аеродинамічних сил або магнітного поля [29, 42]. Однак позитивних результатів досягти вдається не завжди, оскільки зростає конвективний теплообмін між електродом

і плазмою, що веде до збільшення теплових навантажень на електроди, підвищення їх температури, ерозії і зниження ККД плазмотрону [3].

Слід зазначити, що порожнисті катоди можуть застосовуватися як при низьких тисках та при великих струмах (термокатод порожнистий), так і при високих тисках («холодний» катод) [12]. Окрему групу становлять порожнисті катоди на основі самовідділення дугового розряду [66]. Самовідділення відбувається при розміщенні декількох термоемісійних вставок по колу циліндричного електрода [10, 12, 45]. Актуальною проблемою досі залишається пошук нових удосконалених конструкцій, матеріалів, геометричних параметрів і умов роботи електродних вузлів, різальних плазмотронів.

У дисертації розглянуті найбільш вдалі розробки електродних вузлів, що використовуються при конструюванні високоресурсних плазмотронів для різання металу товщиною 60 і більше мм.

1.4.1 Електродні вузли з термоемісійними вставками

У плазмотронах для різання термоемісійні вставки є катодом, що забезпечують перехід електричного струму з твердого тіла у газоподібну середу – плазму [5]. Всередині катода існують вільні носії заряду – електрони, які долаючи енергетичний бар'єр здійснюють роботу щодо виходу з твердого тіла [20].

Це стає можливим за допомогою нагрівання катода до температури випаровування електронів з його поверхні [63]. Щільність випаровуються з поверхні термоемісійних електронів представлена формулою Річардсона–Дешмана [6]:

$$Je = A \cdot T^2 \cdot \exp\left(-\frac{e\varphi}{kT}\right), \quad (1.9)$$

де J_e – щільність струму термоемісії, A/m^2 ; A – $1,2 \cdot 10^6 A/m^2 \cdot K^2$;

T – температура твердого тіла (катода), K ;

$e\phi$ – робота виходу.

З (1.9) видно, що щільність струму термоемісії тим більша, чим вища температура катода і чим нижче потенційний бар'єр роботи виходу $e\phi$. Таким чином ефективний струм з катода щільністю $(1-2) \cdot 10^8 A/m^2$ може бути лише при температурах вище $3600 K$ [6]. Таку температуру можуть «витримати» тугоплавкі матеріали вольфрам і графіт, що і визначило їх застосування в якості катодів плазмотронів та електродів при зварюванні й в дугових печах [67]. Для зменшення активного зносу, випаровування і ерозії катодного матеріалу, а отже зниження роботи виходу, до вольфраму додають оксиди лантану, торію та ітрію [63]. В результаті з'явилися: торований вольфрам ($W+2\% ThO_2$); лантанований вольфрам ($W+2\% La_2O_3$); ітрієвий вольфрам ($W+2\% Y_2O_3$) [45]. Такі катоди іноді називають «термоемісійними» або T катодами [57]. Вони успішно застосовуються у всіх газових середовищах (Ar, N_2, H_2), за винятком газів, що містять кисень (повітря) [57, 68]. Найкращі результати застосування повітряної плазми отримали цирконій і гафній. Так як при зіткненні з киснем плазми повітря поверхня цих матеріалів окислюється, утворюючи окисли цирконію або гафнію, які мають мінімальну роботу виходу ($e\phi = 1,7-2 eV$) при емітування електронів. Катоди з цих матеріалів називаються термохімічними [57].

На рис. 1.8 відображена структура прикатодної області [12]. Завдяки термоемісії електрони надходять з катода в газове середовище [61]. У цьому середовищі вони створюють шар надлишкового негативного заряду [61]. В результаті порушується електрична нейтральність, для усунення якої використовуються іони, які розганяються і бомбардують поверхню катода [8]. Іони нагрівають його до температури, що забезпечує найбільш ефективну термоемісію електронів з катода [11]. Іонний потік на катод йде з дуже тонкого (менше довжини вільного пробігу заряду) беззіткненого шару [11]. До цього

шару прилягає тонкий шар іонізації атомів (молекул) плазмоутворюючого газу. Іонізація здійснюється завдяки електронам, які вилітають з катоду [1].



Рисунок 1.8 – Схема прикатодної області дуги

В результаті здійсненої іонізації плазмоутворюючого газу відбувається процес зародження плазми [3]. Розміри цієї області більше дебаївського радіусу і сумірні з розмірами довжини вільного пробігу [5]. Основною особливістю процесу, що відбувається є те, що в шарі порушується електрична нейтральність плазми $n_e \neq n_i$ [20].

Розміри цих двох прикатодних шарів можна назвати мікрослоями ($r_\delta = 0,02$ мкм, $\ell_e \sim 10\text{--}100$ мкм). Поняття плазми до цих шарів не застосовується [69]. Далі починає формуватися вже певна зона або область плазми (розмір ~ 1 см), порівнянна з діаметром катодної плями або стовпа дуги ($\Delta\ell \sim d_k \sim d_{cm} \sim 1$ см) [13]. Тут відбувається активне термічне розширення каналу дуги [27]. Це розширення каналу провідності дуги призводить до виникнення «магнітного підсосу» і прискорення плазми вздовж осі від катода до анода [27].

В результаті відбувається активне захоплення газу в дугу з навколишнього простору (ефект виникнення катодного струменя) [22]. У цій області $n_e = n_i$, однак можлива відсутність температурної та іонізаційної рівноваги: $T_e \gg T_{ai}$; число актів іонізації може бути більше числа актів рекомбінації ($i > r$) [20].

Нагрівання катоду відбувається за рахунок іонного бомбардування, джоульова нагріву, випромінювання і теплопровідності [19]. Іон, прискорений в прикатодному падінні потенціалу ΔU_k , віддає свою кінетичну енергію катоду тобто $j \cdot \Delta U_k$ [70, 71]. За рахунок рекомбінації термоемісійних електронів і вилітаючих з плазми іонів на поверхні катода виділяється енергія іонізації eV_i . З цієї енергії слід відняти енергію роботи виходу $e\phi$ тих електронів, які рекомбінують $eV_i - e\phi$ [71]. Таким чином цей енергетичний тепловий потік іонного бомбардування з урахуванням енергії рекомбінації може бути виражений [71]:

$$q_i = j(1 - S) \cdot [\Delta U_k + V_i - \phi]. \quad (1.10)$$

Тут $(1 - S)$ частка іонного струму; S – частка електронного струму, j – густина струму.

Висока щільність струму в катодній плямі призводить до джоулеву нагрівання катода, що володіє активним опором [72]. Його величина може бути виражена через питомий опір матеріалу катоду ρ_Ω [72]:

$$q_{дж} = j^2 \cdot \rho_\Omega. \quad (1.11)$$

Випромінювання $q_{рад\ p}$ і теплопровідність $q_{\lambda\ p}$ від плазми також нагрівають катодну пляму, але їхня частка не велика [71]. Охолодження катода відбувається за рахунок процесів термоемісії (випаровування електронів), теплопровідності $q_{\lambda\ k}$ і випромінювання катодної плями $q_{рад\ k}$ [73].

В результаті термоемісії електрони, вирвавшись з твердого тіла несуть із собою не тільки енергію роботи виходу, але і енергію вільного руху. Тому згідно [74] повна енергія, яку електрони уносять з катода дорівнює:

$$q_{em} = js + \frac{4}{2}kT . \quad (1.12)$$

При цьому згідно [5, 45] електрони, які рекомбінують з іонами, залишили свою енергію на катоді, а ті які віддалилися від катода забрали енергію виходу з катода.

Теплопровідність вздовж стрижня катода $q_{\lambda k}$ визначається звичайним механізмом охолодження катода [21, 50].

Випромінювання катодної плями $q_{rad k}$ є досить суттєвим при його температурі $T > 3500 \text{ K}$ [13].

Таким чином згідно [75, 76], температура катодної плями термоемісійних катодів визначається:

$$q_i + q_{дж} + q_{rad p} + q_{\lambda p} = q_{em} + q_{\lambda k} + q_{rad k}. \quad (1.13)$$

Для оцінки теплового потоку в катод використовують вольтовий еквівалент [77], тому що повні втрати енергії катода Q_k пов'язані з повним струмом дуги через вольтовий еквівалент [78].

Конструкції електродних вузлів з вольфрамівими вставками. Збільшення товщини металу, що розрізається призводить до необхідності підвищувати силу струму ріжучої дуги [12]. При цьому стійкість електрода (катода) плазмотрона різко знижується [66]. Використання в серійних плазмотронах термохімічних катодів обмежує струм дуги до 400 А, а потужність до 100 кВт [79] з ресурсом роботи від кількох хвилин до кількох десятків годин. У той час як для ППР металу товщиною 100 мм необхідний струм більш 600 А [15, 22]. Отже,

використання для цих цілей електродних вузлів з вольфрамовими вставками, захищеними інертним газом, зберігає актуальність.

У серійних плазмотронах найбільшу стійкість в інертних газах отримали електроди з вольфрамовими вставками, конструкція яких наведена на рис. 1.9 [12, 19, 80].

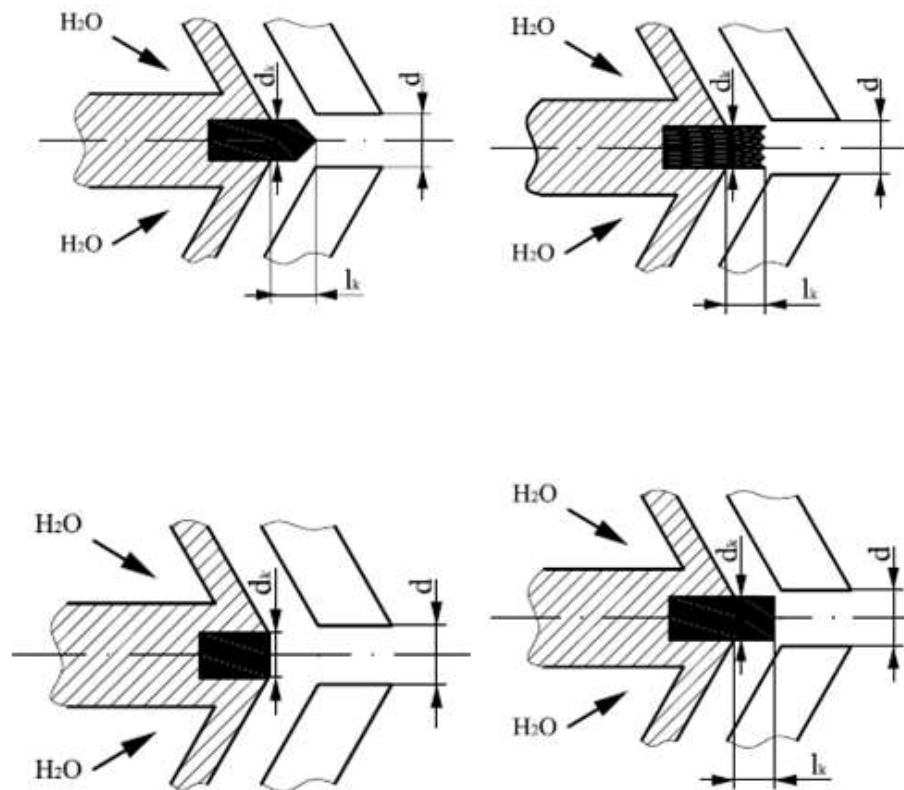


Рисунок 1.9 – Конструкції катодних вставок: d – діаметр прикатодної секції; d_k – діаметр катоду; L_k – довжина вильоту катоду

Згідно [81] істотний вплив на ресурс роботи катоду надають: спосіб його закладення в мідний водоохолоджуваний корпус, тепловий контакт у місці з'єднання із катодотримачем, а також стан поверхні. Закріплення катоду проводиться шляхом запресовування, вальцювання, пайки [6]. Вольфрамовий стрижень може розміщуватися в катодотримачі врівень або виступати на

$(3-5) \cdot 10^{-3}$ м з охолоджуваної обойми, а його робоча поверхня виробляється загостреною, плоскою або шорсткою [12, 49, 64, 82].

Наявність вістря центрує дугу і покращує емісію електронів, однак його постійний перегрів призводить до контракції дуги [83]. Катоди з плоскою поверхнею в залежності від температурного стану здатні працювати як з контрагованою, так і з дифузною прив'язкою дуги [42].

У [5, 84] отримано кращі експлуатаційні характеристики катодів з шорсткою поверхнею в порівнянні з гладкою. На параметри розряду великий вплив надає геометрія катода [82]. Проведені дослідження з вольфрамовим катодом $d_k = 2 \cdot 10^{-3}$ м в аргоні [5, 83] показали, що зміна довжини вильоту вольфрамового катода від $\ell_k = 15 \cdot 10^{-3}$ м до $\ell_k = 0$ ($I = 150$ А) призводить до збільшення щільності струму з $2 \cdot 10^7$ до $2 \cdot 10^9/\text{м}^2$, питомого теплового потоку в катод з $5 \cdot 10^7$ до $8 \cdot 10^9$ Вт/м², при цьому питома ерозія знижується від значення 10^{-10} до 10^{-12} кг/Кл.

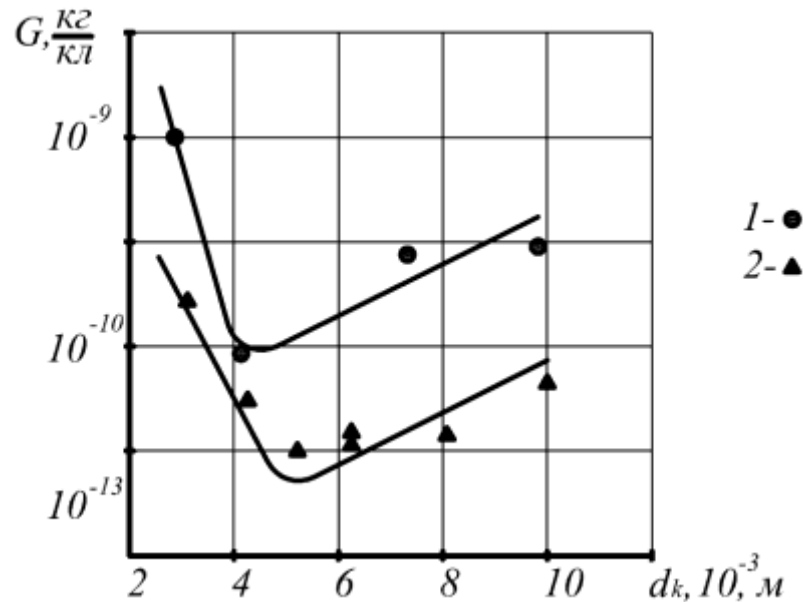
Отримані дані пояснюються, з одного боку, зусиллям охолодження катода по мірі зниження довжини вильоту і скорочення високотемпературної зони в силу контрагування розряду.

З іншого боку відомо [83], що поверненням на катод випаруваних й іонізованих атомів металу під впливом електричного поля. Встановлена залежність значення струму дуги від діаметра катода, коли спостерігається підвищений ресурс роботи електроду [83, 84]. У зв'язку з цим [82] рекомендується визначати розміри катодної вставки для аргонового середовища за рівнянням:

$$I_{\max} = 220 \cdot 10 \left(\frac{\pi d_k^2}{4 \ell_k} \right)^{3/4} \quad (1.14)$$

Отримане з (1.14) значення d_k пропонується збільшити в 1,2 – 1,3 рази, що призведе до незначного підвищення питомої ерозії, але знизить ймовірність локалізації дугової плями в місці контакту вставки з тримачем [82].

Експерименти, проведені авторами [83], показали, що катоди, закладені врівень з водоохолоджуваним корпусом ($l_k=0$), мають мінімальну ерозію. Тому такий інтерес представляє вплив на питому ерозію діаметру катоду (рис. 1.10).



d_k ($L_k = 0$) 1 – H_2 , $I = 370-400$ А; 2 – N_2 , $I = 1000$ А

Рисунок 1.10 – Залежність питомої ерозії вольфрамового катода від діаметру [83]

Робота вольфрамового катода залежить також і від якості інертних газів [85]. Однією з визначальних характеристик є концентрація кисню в робочому або захисному газі [68]. Збільшення концентрації кисню в аргоні, технічному і чистому азоті від 0,001 до 0,5 % призводить до збільшення питомої ерозії катодів з вольфраму в 2-3 рази [86]. При дослідженні вольфрамового катоду в азотно-кисневої плазмі при $I=500$ А і концентрації кисню 2 % отримана величина $G=(8-12) \cdot 10^{-6}$ кг/Кл [86].

Враховуючи, що вольфрамові катоди швидко вигорять в оксидних і відновних середовищах, а застосування нейтральних газів (аргону, азоту, гелію і ін.) в плазмотронах великої потужності не завжди виправдано й економічно

невигідно, тому був розроблений плазмотрон, що працює на повітрі з захистом вольфрамового катоду аргонем [87]. Ефективна робота такого плазмотрона на повітрі ($G = (2,5-7,5) \cdot 10^{-2}$ кг/с) при струмі дуги до 700 А вимагала витрати захисного газу (аргону) $(2-3) \cdot 10^{-3}$ кг/с, що становило близько 7 % витрати основного плазмоутворюючого газу [87]. При цьому питома ерозія катоду з вольфраму в залежності від його закладення в мідний катодотримач знаходилася в межах $10^{-12} - 10^{-10}$ кг/Кл [87]. У [5, 75, 88] проведені дослідження спрямовані на зниження витрати захисного газу (аргону) і збільшення ефективності плазмотрону. Це дозволило розробити катодний вузол з малою витратою захисного газу.

Згідно досліджень, катод з лантанованого вольфраму виконаний з шорсткою робочою поверхнею діаметром $3 \cdot 10^{-3}$ м, що становить набагато меншу цифру, порівняно з рекомендаціями [78], і вильотом з катодотримача $5 \cdot 10^{-3}$ м.

При струмі дуги до 1 кА, витраті робочого газу $(80-110) \cdot 10^{-3}$ кг/с витрата захисного газу (аргону) склала $(13-26) \cdot 10^{-6}$ кг/с, а питома ерозія $2 \cdot 10^{-13}$ кг/Кл, що на порядок нижче відомих даних [75]. Ресурс роботи створеного ними катодного вузла більше 500 год при потужності плазмотрона 1000-1500 кВт [88].

Конструкції електродних вузлів з термохімічними вставками з Z_r і H_f найбільш широке застосування знайшли при використанні в якості плазмоутворюючого газу повітря [7]. Стрижні з цирконію або гафнію вприсуються в мідні водоохолоджувані катодотримачі на одному рівні (див. рис. 1.7) [58].

Було помічено, що стійкість прикатодної ділянки дуги великою мірою залежить від величини діаметрів катодної вставки і прикатодної секції дугового каналу [12]. Так, при великих діаметрах катода опорна пляма дуги проходить крізь радіальне переміщення, кратер на її поверхні утворюється неправильної

форми, великих розмірів, а теплові потоки через катод і його ерозія різко зростають [75].

Для локалізації прикатодної ділянки дуги поблизу геометричної осі каналу, зменшення потоку тепла через катод і його ерозії стало необхідним застосовувати катод і вхідний перетин прикатодної секції визначених діаметрів [1-5, 78]. Рекомендації вибору емпіричних залежностей описані в [5]:

$$d_k = a + \nu I, \quad 50 \leq I \leq 300 \text{ A}$$

$$d_k = (0,8 - 0,5) d_l, \quad (1.15)$$

де d_k і d_l – діаметри катоду і вхідного перерізу прикатодної секції, $a = 2 \cdot 10^{-3}$ м, $\nu = 1,25 \cdot 10^{-5}$ м/А.

Питома ерозія одиночного катоду з Z_T або H_f , працюючого в кисневмісних середовищах і в середовищі азоту, $10^{-9} - 10^{-10}$ кг/Кл при струмах ~ 400 А [5]. Отже, перспективними є термохімічні катоди на основі самоділення дугового розряду в приелектродних зонах [89].

У [5] було встановлено, що теплові та ерозійні характеристики катоду сильно залежать від стану катоду й аеродинаміки в прикатодній області. Вони змінювали характер течії газу у катода. Так, наприклад, при струмі на дузі 200 А теплові потоки через катод за рахунок зміни характеру течії газу були зменшені з 1 кВт до 0,25 кВт [5]. Однак дослідження, проведені з Z_T і H_f – катодами, [1, 5, 57, 83 та ін.] дали суперечливі результати по ерозії та ресурсу роботи.

Але, тим не менш, всіма дослідниками було затверджено, що питома ерозія знижується в міру зменшення рівня струму, а також збільшення часу безперервної роботи з урахуванням поліпшення умов охолодження [1, 5, 57, 83 та ін.]. У [90] досліджувалися порошкові термохімічні катоди на цирконієвій основі з добавками барію, так звані самоспікаючися термохімічні катоди

(СТХК), запресовані в отвір з діаметром 3-5 мм мідної обоймі. Особливістю СТХК є те, що ця суміш спікається при першому порушенні електричної дуги на повітрі. Отриманий катод забезпечує стійке горіння дуги на струмах до 900 А, а ерозія коливається в межах $10^{-10} - 3 \cdot 10^{-11}$ кг/Кл в залежності від струму (350-900 А), вмісту Ва (до 7,5 %) і технології виготовлення [90].

Крім того, доступним матеріалом для катодів, є графіт. Він має низькі значення роботи виходу (4,2–4,7 еВ) [89] і швидкості випаровування, працює в інертних газах, водні, азоті, повітрі, водяному парі, вуглеводнях. Великі перспективи відкриваються при використанні подібних катодів у вуглецевих газах в режимі постійного відновлення.

Так, у [91] запропоновано використовувати катод з графітовою термоемісійною вставкою, що працює у режимі регенерації, а у [92] складовий катод, що формується тільки з вуглецевого середовища. Складовий катод створюється у вигляді активної вставки, запресованої або впаяної в мідний водоохолоджуваний корпус. Матеріалами катодних вставок служать карбідоутворюючі метали (W, Mo, Hf, Zr, Ti), метали, що практично не взаємодіють із вуглецем (Cu, Ag, Pb, Sn) і графіт [92]. Після запалювання дуги на робочій поверхні складового катода з активною вставкою, виростає міцно з ним пов'язане вуглецеве утворення у вигляді чашечки зі стінками товщиною ~ 1 мм. Питома ерозія складеного катода до формування справжнього вуглецевого катода залежить від матеріалу вставки і становить $10^{-4} - 10^{-11}$ кг/Кл [92].

1.4.2 Порожністі циліндричні електродні вузли

Єдиним типом плазмотронів, малочутливим до складу робочого середовища і здатні працювати при значних силах струму, є плазмотрони з «холодними» електродами і рухомою дуговою плямою. У плазмотронах двостороннього закінчення (рис. 1.11 а), що працюють на повітрі був досягнутий ресурс роботи мідних порожнистих електродів до 150 год [75]. Дослідження проводилися на електродах з діаметром внутрішнього каналу 0,04

і 0,03 м і довжиною 0,5 м. Витрата повітря змінювався в діапазоні 0,01-0,04 кг/с. Сила струму знаходилася в межах 750-1300 А [93]. Однак у плазмотроні з глухим порожнистим «холодним» електродом (рис. 1.11 б) реалізація подібного ресурсу виявилася складною [75].

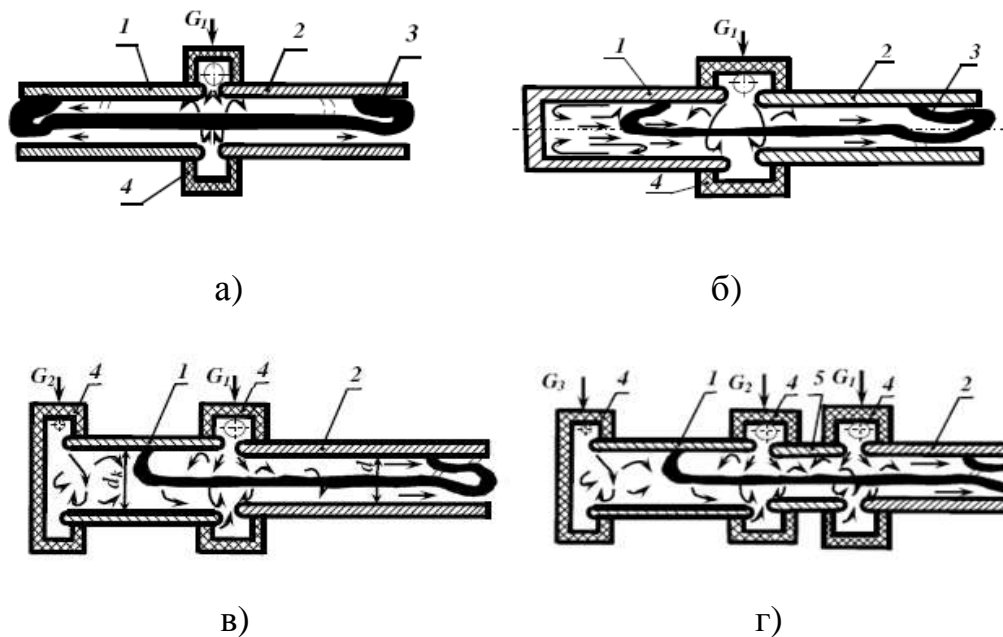


Рисунок 1.11 – Плазмотрони з порожнистими циліндричними електродами [98]:

1,2 – електроди; 3 – дуга; 4 – вихрова камера; 5 – міжелектродна вставка; а – двокамерного закінчення; б – з глухим порожнистим електродом; в – двокамерна; г – трикамерна

Так як в двосторонньому плазмотроні вихровий рух газу в обох електродах близько до квазітвердого («вимушений» вихор), в той час як у глухому електроді з-за впливу глухої стінки і значного радіального перетікання маси на осі в основному обсязі електрода спостерігається обертання, близьке до потенційного [5].

У квазіпотенційному вихорі радіальний градієнт тиску знижений, стабілізація дугового стовпа ослаблена [12].

Крім того, через існуючу змінність кутової швидкості обертання газу за радіусом катоду можуть виникати проблеми стійкості радіальної ділянки дугового стовпа [94]. Тому горіння дугового розряду в глухому катоді є нестабільним, а рух катодних прив'язок відбувається із затримками, що викликає збільшення ерозії [6]. Зміна геометрії глухого електроду призвела до зростання швидкості обертання дуги, зменшення розкиду її величини, рівномірності руху і зниження ерозії [20]. Так, на мідному глухому катоді діаметром 40 мм при силі струму 600 А питома ерозія склала $7 \cdot 10^{-6}$ г/Кл [94]. Чисельне моделювання у [95] показало, що за допомогою скануючого магнітного поля можна реально збільшити ресурс катоду в кілька разів. Наприклад, для плазмотрону з електродами діаметром 150 мм граничний ресурс мідного катоду можна збільшити до 400 год при початковій товщині стінки 15 мм і кінцевій – 3 мм [95].

Порожнисті холодні катоди можуть виготовлятися із сталі, міді, бронзи, титану та інших металів. Успішне використання яких в плазмотронах фірмами Huls і Westinghouse [96] призвело до подальшого вдосконалення їх геометрії і конструктивному виробленню. При цьому ресурс мідних глухих (склянокоподібних) катодів у плазмотронах, які працюють на повітрі досяг 400 год ($I = 650$ А, $U = 2300$ В), сталевих у вуглецевмісних газах – 1000 год ($I = 200$ А, $U = 2500$ В) [97].

При використанні склянокоподібних катодів є ймовірність прив'язки дуги до торцевої поверхні електроду і його прогорання. З метою запобігання цього явища був розроблений двокамерний плазмотрон (рис. 1.11 в), в якому катодна пляма обертається по поверхні порожнистого катода в перерізі зустрічі двох потоків, які подаються крізь тангенціальні отвори вихрових камер [64]. Іноді для збільшення швидкостей руху катодну і анодну плями, і підвищення ресурсу роботи плазмотрона, на радіальні ділянки дуги накладають магнітне поле [19].

Зміна співвідношення витрат робочого газу дозволяє регулювати положення катодної плями а, отже, і величину напруги [12]. Співвідношення діаметрів і впливає на аеродинаміку дугової камери [98].

Надалі відбувалося постійне вдосконалення двокамерного плазмотрону. Був створений перший трикамерний електродуговий плазмотрон з циліндричними мідними електродами, призначений для нагріву кисневмісних середовищ та їх сумішей з природним газом [6]. Цей плазмотрон (рис. 1.11 г) мав три вихрових камери подачі повітря в розрядний канал. У ньому була передбачена подача природного газу в анодну область, а електрична дуга мала ділянку зі зростаючими вольт-амперними характеристиками і тепловий ККД (80–90) % [6].

Були також визначені умови, при виконанні яких рівень ерозії катоду становить $2 \cdot 10^{-9}$ кг/Кл. В результаті проведених досліджень стала можливою розробка цілої серії плазмотронів потужністю від 1000 кВт до 2 МВт з ресурсом роботи при атмосферному тиску понад 150 ч [6].

1.4.3 Об'єднані електродні вузли

Проблема підвищення ресурсу електродів була вирішена створенням комбінованих катодних і анодних вузлів, в яких здійснювалися процеси «холодних» і «гарячих» електродів.

Авторами робіт [5, 20, 76 і ін.] був запропонований катод, виконаний у вигляді порожнього мідного циліндру 1 (рис. 1.12). Він був розташований всередині, на одній площині і радіально спрямовані термоємійними вставками 2. Подача в порожнину електрода 1 через вихрову камеру 3 додаткового газу, напрямок якого збігається з напрямком основного робочого газу сприяла розщепленню дуги на кілька стаціонарних катодних плям. Кількість катодних плям визначалась числом термоємійних вставок [57]. Застосування зазначеного катода підвищило його ресурс, але дещо ускладнило конструкцію його вузла.

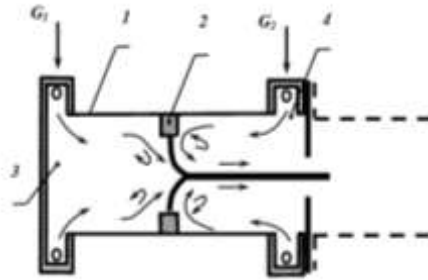


Рисунок 1.12 – Схема розщеплення електричної дуги: 1 – порожнистий циліндр; 2 – термоємисійні вставки; 3, 4 – вихрові камери

Іншими авторами [5, 88] було запропоновано розподіл катодних і анодних плям дуг по всій довжині циліндричного розрядного каналу (рис. 1.13), який був виготовлений секціонованим. Його склад був простий за рахунок чергування катодних і анодних порожнистих секцій, з'єднаних з джерелами живлення через певні резистори [88]. Було помічено, що для стійкої роботи плазмотрону необхідно застосовувати спеціальні багатодугові джерела живлення [5]. Їх і запропонували використовувати у [97] потужнострумівих плазмотронів прямої і непрямої дії.

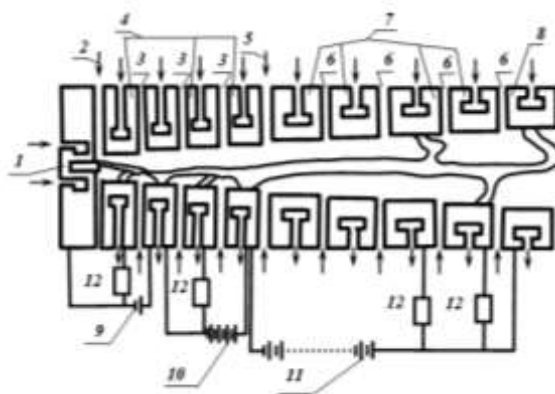


Рисунок 1.13 – Дуговий нагрівач газу з розподіленими катодним і анодним плямами дуг: 1 – термокатод; 2, 3, 5, 6 – вихрові камери подачі захисного і робочого газів; 4 – група катодних секцій; 7 – група анодних секцій; 8 – анод; 9, 10, 11 – джерела живлення; 12 – резистори

На рис. 1.14 представлений плазмовий катод [99].

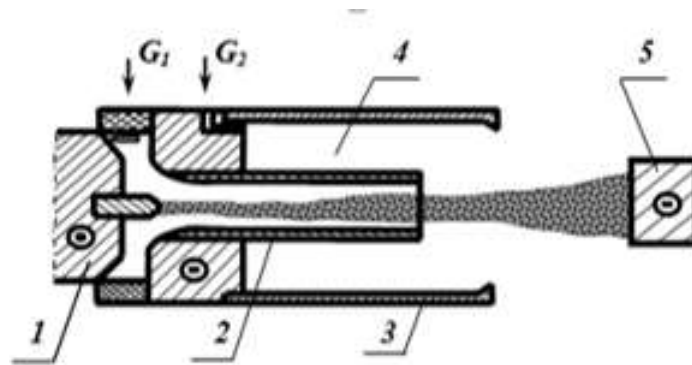


Рисунок 1.14 – Схема плазмового катоду: 1 – додатковий анод; 2 – циліндричний вольфрамовий катод; 3 – циліндричний екран; 4 – захисна порожнина; 5 – основний анод

Цей катод складається з додаткового торцевого аноду 1 і циліндричного полого вольфрамового катоду 2, між якими порушується допоміжна дуга. В якості катоду використовується вольфрамова трубка довжиною 7 см, діаметром 1 см, товщиною стінки $\delta = 0,15$ см [99]. Катод поміщений в циліндричний водоохолоджуваний екран 3. В порожнину 4 подається захисний газ (аргон). Аргон може надходити в область додаткового аноду 1 з витратою (~ 1 м/с). Основна дуга запалюється між катодом 2 і основним анодом 5. При силі струму понад 60 А зона прив'язки дуги до пологого електроду стає розподіленою і носить дифузний характер [99]. За оцінками [89] даний плазмовий катод може працювати при силі струму до 7000 А. Однак його недоліками є складність конструкції і велика витрата аргону $(0,5-1) \cdot 10^{-3}$ кг/с [89]. У [100] був застосований метод примусової генерації заряджених частинок в приелектродній зоні дуги, в результаті чого було створено спеціальний «плазмовий» електрод. Процес полягав у наступному: у приелектродній зоні генерувався плазмовий струмінь від додаткового джерела енергії, наприклад, електродугового нагрівача газу невеликої потужності [100]. Нагрівач

поміщували всередину основного полого електроду, а через створення додаткового іонізованого потоку газу відбувалося усунення контрагування основної дуги, в результаті чого горіння набувало дифузного характеру [100].

Експериментальні дослідження показали, що питома ерозія в межах 10^{-11} - 10^{-10} кг/Кл досягається при умовній густині струму $(0,6-1,5) \cdot 10^6$ А/м² на порожнистих графітових катодах і $(1,8-3,0) \cdot 10^6$ А/м² на «плазмових» вольфрамових електродах, що узгоджується з даними роботи [101].

Експериментальні дані робіт [5] показали, що багатокатодні плазмотрони з наявним допоміжним генератором плазми нейтрального газу, можуть забезпечувати розігрів катодів основного генератора, а, значить, і плавний підпал дуги. Було помічено, що електроживлення обох генераторів може здійснюватися автономно від двох джерел.

На рис. 1.15 представлений основний генератор, який має чотири катода, а на рис. 1.16 – генератор з вісьмома катодами. Подібні конструкції плазмотронів дозволили рівномірно розподіляти сумарний струм розряду по всім катодам з дифузною прив'язкою дуги [5]. Кількістю катодів регулюється сила струму на кожен з них, в результаті чого виникаюча ерозія стає прийнятною для забезпечення необхідного ресурсу роботи [5].

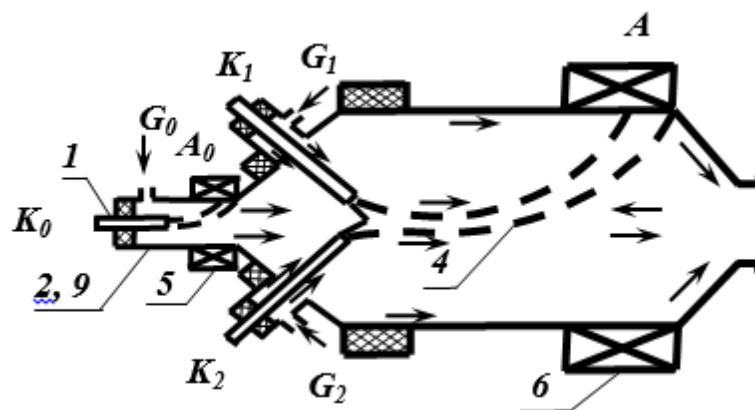


Рисунок 1.15 – Водневий плазмотрон потужністю 2 МВт

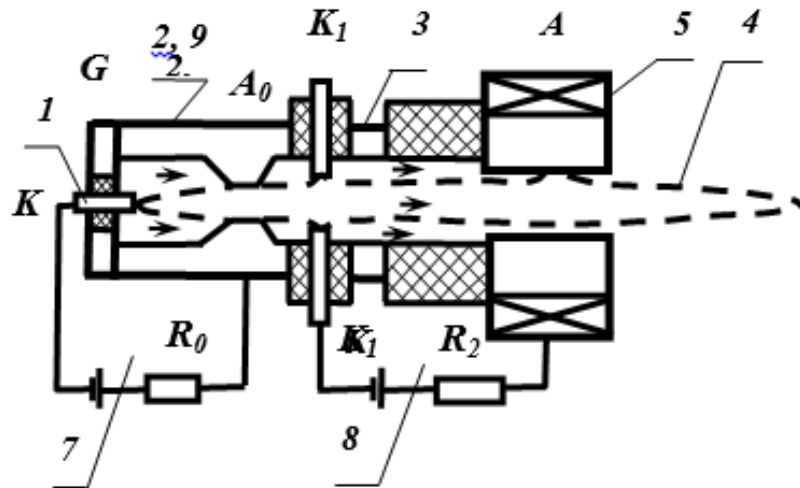


Рисунок 1.16 – Багатоелектродний плазмотрон: 1 – катод; 2 – анод; 3 – секція МЕВ; 4 – дуга; 5, 6 – соленоїди; 7, 8 – джерела живлення; 9 – додатковий генератор плазми

Експериментами було встановлено, що запалювання дуги основного плазмотрона здійснюється з нульового значення сили струму [5]. Це виключає пускову ерозію і забезпечує стійкість системи дуга – джерело живлення [5]. Недоліками розглянутих розробок є складність конструкцій і обмеженість нагрітих газів за хімічним складом, витратами і температурою.

Представляє інтерес двухструмовий плазмотрон з циліндричними електродами [97]. В основі його конструкції (рис. 1.17) лежать два взаємозамінних ідентичних вузли: кожен з них складається з циліндричного мідного електрода і вихрової камери для введення газу(повітря). Осі катодного і анодного вузлів розташовані одна до одної під кутом. При дослідженні циліндричних мідних електродів $d = 3 \cdot 10^{-2}$ м у повітряному середовищі ($G_1 + G_2 = 6 \cdot 10^{-3}$ кг/с) було встановлено наявність критичного значення струму, при перевищенні якого ерозія катоду і аноду різко зростає [97].

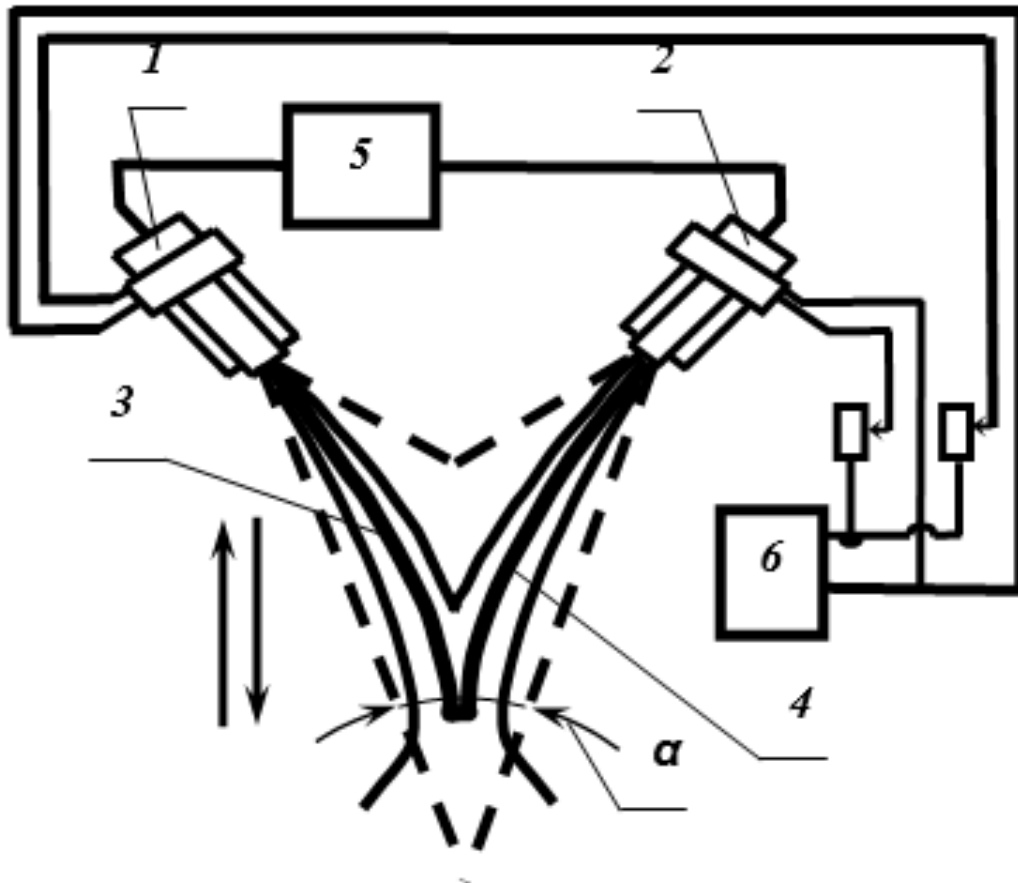


Рисунок 1.17 – Схема двухструмового плазмотрону: 1, 2 – електроди (катодний і анодний вузли); 3, 4 – дуги; 5, 6 – джерела живлення

З урахуванням наведеного вище, з метою підвищення ефективності плазмового різання необхідно:

1. Розробити високоресурсні і високоефективні плазмотрони, що працюють на агресивних газах з порожнистими «холодними» й «гарячими» катодами.

2. Застосувати в розроблених конструкціях плазмотронів принцип примусового розщеплення опорних плям дуги.

3. Домогтися наявності напруги на дузі 225–300 В, струму дуги 500–800 А, питомої ерозії мідного катода до $10^{-9} - 10^{-10}$ кг/Кл і теплового ККД 0,8 %.

Висновки до розділу 1

1. Підвищення ефективності плазмового різання залежить від енергетичних характеристик плазмотрону: потужності, температури плазмового струменя або дуги, теплового ККД, ефективного ККД нагріву речовини та ресурсу роботи.

2. Технологічні плазмотрони, що випускаються промисловістю серійні, для різання мають низький ресурс роботи електродів (не більш 50 годин), тепловий ККД (не більш 0,5-0,7), ефективний ККД нагрівання речовини (30-40 %).

3. Найбільш перспективними плазмотронами, що вирішують проблему ефективності плазмових технологій є плазмотрони з порожнистими циліндричними «холодними» й «гарячими» катодами, однак і вони потребують поліпшення їх енергетичних характеристик.

4. При розробці плазмотронів з порожнистими циліндричними катодами слід враховувати досвід зарубіжних і вітчизняних розробок.

РОЗДІЛ 2

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Експериментальна установка

Дослідження розроблювальних плазмотронів і їх модулів проводилися на експериментальній установці (рис. 2.1), яка включала систему електроживлення, газопостачання, водопостачання та КПП.



Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд експериментальної установки

Дана установка змонтована в дослідній лабораторії ЦЛО ПрАТ «АЗОТ» (м. Сєверодонецьк).

Система електроживлення призначена для електроживлення плазмотронів (рис. 2.2). Схема електроживлення експериментальних установок, які включають розділовий трансформатор ТР-1 (ТСЗВ-160/0,5) і тиристорний

перетворювач ТП-1, виконаний на базі збудника машин постійного струму ТІ-8, що й має наступні основні технічні дані:

- напруга живлячої мережі, 380 (В);
- номінальна випрямлена напруга, 300/540 (В);
- номінальний випрямлений струм, 350 (А);
- межі регулювання випрямленої напруги, 0-540 (В).

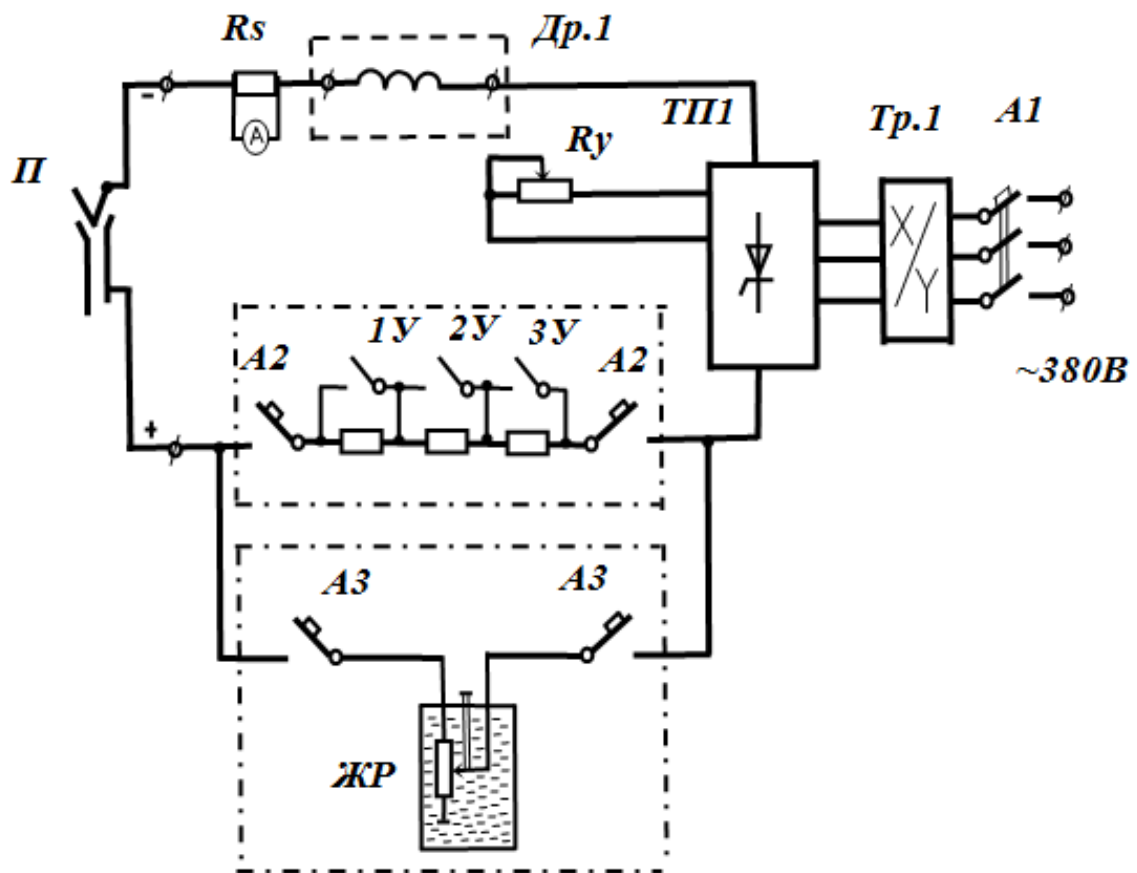


Рисунок 2.2 – Принципова схема електроживлення експериментальних плазмотронів

Крім того, блок електроживлення включає, демпфуючий дросель (Др.1), виготовлений у вигляді двох одношарових котушок, намотаних багатожильним ізольованим проводом на пластмасові каркаси й послідовно з'єднаних між собою.

Сумарна величина індуктивності дроселя розрахована за методикою, викладеною в роботі [102]:

$$L = N \frac{\mu}{4\pi} W d \Phi, \quad (2.1)$$

де N – число котушок;

μ – магнітна постійна;

W – число витків на котушці;

d – діаметр котушки;

Φ – величина, значення якої залежить від відносини $\alpha = \frac{a}{d}$,

a – довжина (висота) котушки.

Для коротких котушок Φ розраховується за формулою [102]:

$$\Phi = 2\pi \left[\left(1 + \frac{\alpha^2}{8} - \frac{\alpha^4}{64} \right) \ln \frac{4}{\alpha} - \frac{1}{2} + \frac{\alpha^2}{32} + \frac{\alpha^4}{96} \right]. \quad (2.2)$$

В установці індуктивність дроселя становила 0,197 мГн. Для зняття вольт-амперних характеристик досліджуваного плазмотрона у схемі передбачений рідинний реостат (РР) зі зміною активного опору в межах 0,2...0,6 Ом і резистори типу НФ–1АУЗ з сумарним опором 0,73 Ом, розділені на три секції: 0,365; 0,1825 і 0,1825 Ом, шунтування яких здійснюється за допомогою контактів 1У...3У однополюсних контакторів типу КП–604, керованих командо-апаратом (КА).

Для випробування плазмотронів промислових зразків використовувалися джерела електроживлення АПР-403.3 метою збільшення робочого струму два джерела АПР–403 включалися паралельно. Принципова схема джерела електроживлення АПР–403 наведена на рис. 2.3.

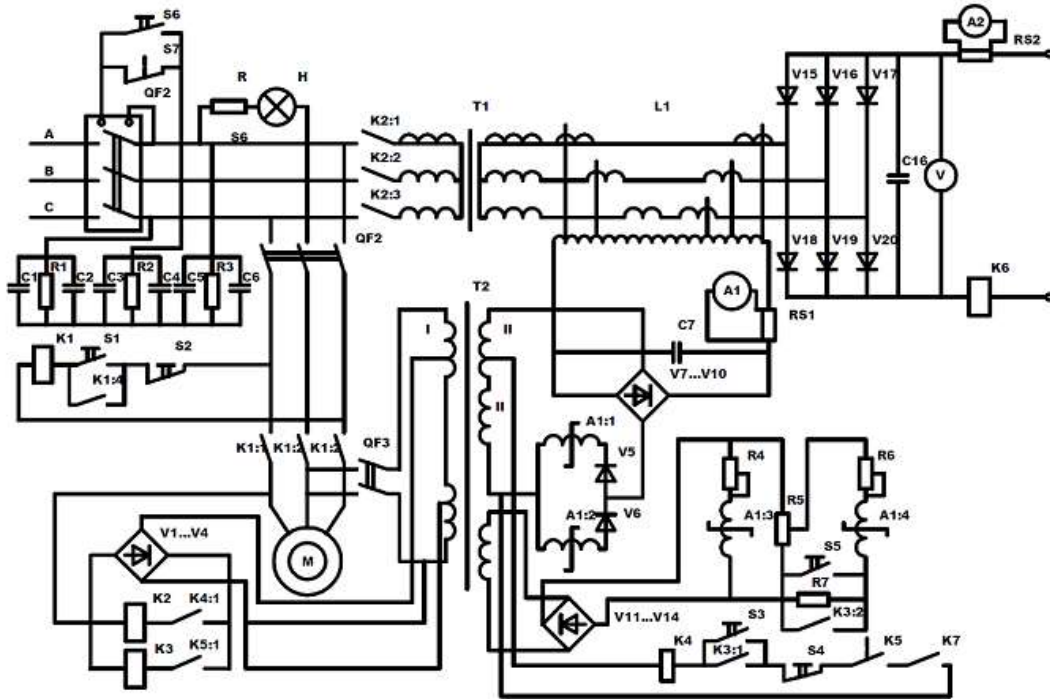


Рисунок 2.3 – Принципова схема джерела електроживлення АПР–403 [78]

Вона створена на базі дроселів насичення і призначена для плазмотронів плазмового різання. Дросель насичення ДН регулюється підмагнічуванням і складається з двох сердечників, на яких розміщуються робочі обмотки W_p (рис. 2.4).

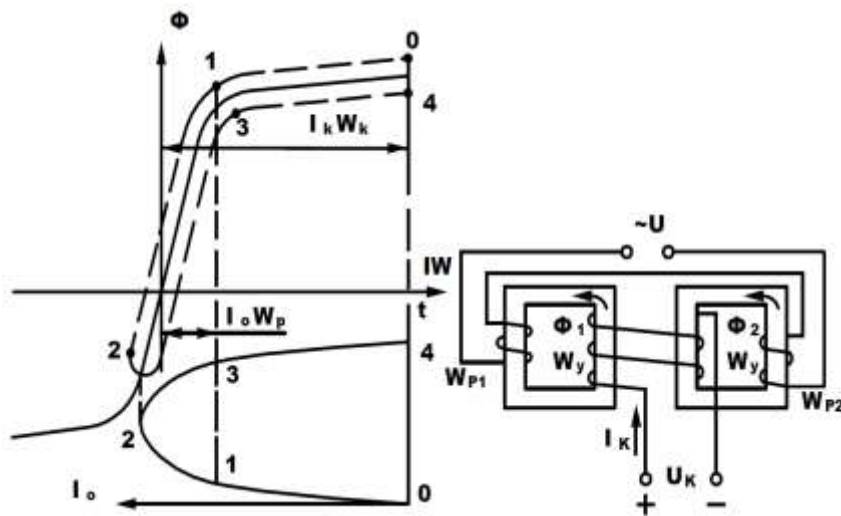


Рисунок 2.4 – Дросель насичення джерела електроживлення АПР–403

Робочі обмотки включені послідовно і з'єднуються з джерелом змінного струму. Обидва сердечники охоплюють обмотки управління або підмагнічування W_y , які живляться від джерела постійного струму. При відсутності керування, по працюючих обмотках протікає струм намагнічування I_0 . Він створює магніторушійну силу (МРС) намагнічування $I_0 W_p$, достатню для створення магнітного потоку Φ , періодична зміна якого наводить електрорушійну силу самоіндукції (ЕРС), яка врівноважує напругу живлення дроселя. Як правило, величина цього струму невелика (кілька ампер). Переріз магнітопровода і кількість робочих витків обмоток вибираються так, щоб магнітний потік не досягав значень насичення $\pm \Phi_s$.

Якщо задати струм управління I_y таким, щоб МРС управління $I_y W_y$ значно перевищувала МРС намагнічування сердечника $I_0 W_p$, обидва сердечники будуть знаходитися в стані глибокого насичення. Якщо подати живлення на робочі обмотки, то для одного з сердечників виникає МРС робочої обмотки, який діє в одну сторону з МРС управління. У цьому сердечнику зміни магнітного потоку Φ_2 майже не відбувається і на його робочій обмотці ЕРС самоіндукції не наводиться. При цьому до робочої обмотки другого сердечника буде докладена вся напруга живлення. МРС намагнічування буде спрямована проти МРС управління, прагнучи перемагнітити сердечник.

Магнітний потік спочатку (від точки 0 до точки 1) змінюється незначно для створення ЕРС, яка б врівноважувала амплітудне значення напруги, що прикладена до дроселя, струм в робочій обмотці повинен зростати з високою швидкістю, так як ЕРС самоіндукції пропорційна швидкості зміни струму та індуктивності котушки, а індуктивність котушки з насиченою серцевиною невисока. З точки 1 (див. рис. 2.4) починається перемагнічування сердечника. На вигині кривої намагнічування, індуктивність дроселя велика і високі швидкості зміни струму вже не потрібні. Після точки 2 перемагнічування закінчується і починається відновлення потоку під дією МРС управління. Робочий струм, що підтримується енергією, яка накопичена в дроселі, у точці 3

зменшується спочатку повільно, а потім по мірі насичення сердечника, швидше. Починається робочий напівперіод другого сердечника. Опускаючи МРС намагнічування, можна розрахувати: $I_y W_y = I_p W_p$ або $I_p = I_y \frac{W_y}{W_p}$, тобто величина робочого струму визначається струмом в обмотці керування дроселем насичення.

Основні технічні дані джерела електроживлення АПР–403:

- напруга живильної мережі – 220, 380 В;
- напруга холостого ходу – $300 \pm 10\%$ В;
- номінальний робочий струм різання – 400 А;
- межі регулювання робочого струму – 150–400 А;
- межі робочої напруги – 100–200 В;
- ККД випрямляча, не менше – 0,65;
- споживана потужність при номінальному струмі – не більше 120 кВт.

Джерело електроживлення АПР–403 дозволяє отримувати випрямлений струм з крутопадаючими зовнішніми статистичними характеристиками (рис. 2.5), а також виконувати автоматичне збудження дуги, управління струмом дуги і захист установки від перевантажень та аварійних режимів.

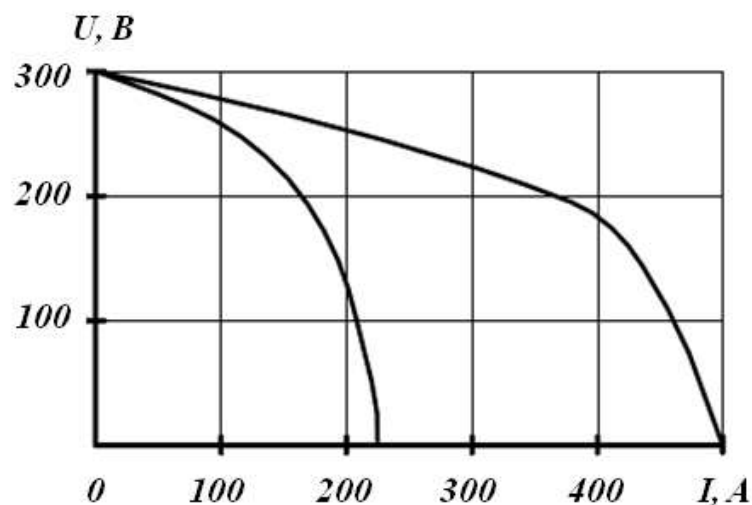


Рисунок 2.5 – Зовнішні характеристики джерела АПР–403

Підпал дуги в лабораторних умовах здійснюється від осцилятора безперервного електроживлення послідовного з'єднання ОСППЗ–300, (рис. 2.6) яким укомплектована установка для повітряно-плазмового різання АПР–403.

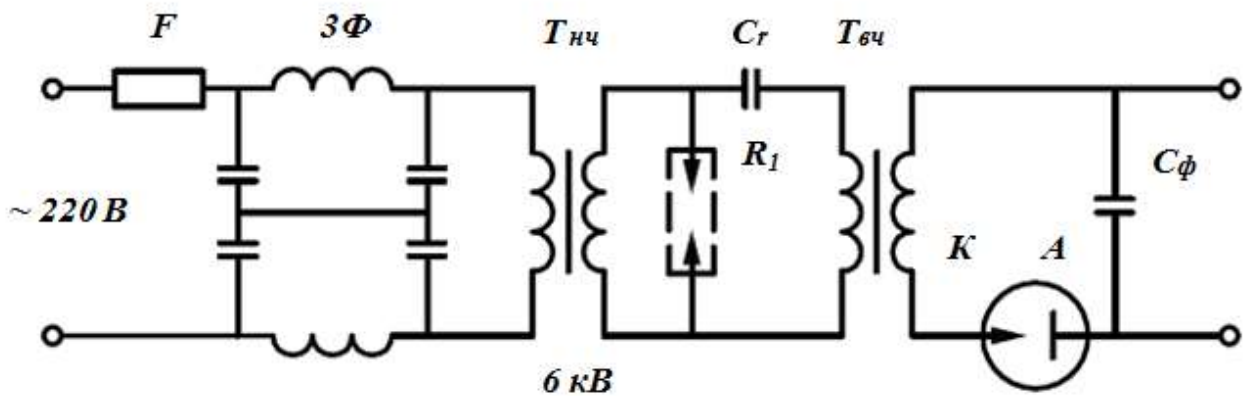


Рисунок 2.6 – Схема осцилятора ОСППЗ – 300 [78]

Осцилятори живиться від мережі змінного струму 220 В через запобіжник F і захисний фільтр 3Ф.

Трансформатор низької частоти $T_{нч}$ має підвищене розсіювання для обмеження струму після проби розрядника R_i . Розрядник R_i , конденсатор C_r і первинна обмотка трансформатора $T_{вч}$, утворюють коливальний контур іскрового генератора. Трансформаторний зв'язок контуру генератора з силовим ланцюгом зменшує небезпеку попадання високої напруги промислової частоти в силовий ланцюг. Максимальна енергія імпульсу становить 0,08 Дж. Власна частота коливань контуру – 500 кГц. Осцилятор генерує до 10–14 імпульсів в напівперіод. Інтервал між імпульсами близько 0,5 мс. Фаза початку генерації залежить від зазору в розряднику і становить 400 – 600. Вторинна обмотка трансформатора $T_{вч}$ розрахована на струм 300 А і під'єднується до ланцюга дуги послідовно.

Напруга з вторинної обмотки надходить в розрядний проміжок через захисний конденсатор C_ϕ , ємність якого на високій частоті може бути набагато

вище (в сотні і тисячі разів), ніж зведена до вторинної сторони ємності контуру C_r . Зведена ємність визначається як ємність, що подається з первинної сторони і помножена на квадрат коефіцієнта трансформації. При паралельному підключенні осцилятора параметри знижуються. Індуктивність фільтра при цьому становить 200 мкГн, що відповідає 50 витків дроту, намотаного на каркас діаметром 200 мм. Максимальна вихідна напруга знижується до 5 кВ, а максимальна енергія імпульсу до 0,05 Дж. Зі зменшенням індуктивності фільтра знижуються параметри збуджуючого імпульсу. Однак зі збільшенням витрати робочого газу більше 2 г/с, а також при випробуванні потужних плазмотронів для різання металу понад 60-70 мм, при підпалі дуги спостерігалися часті відмови осцилятора (ОСППЗ–300). У зв'язку з цим було прийнято рішення модернізувати збудник дуги ВІР–101УЗ, який випускається серійно. Після модернізації схема збуджувача (рис. 2.7) містить високовольтний трансформатор TV типу ТГ–1020 (220-10000 В), дросель L , розрядник FV, конденсатори C_1 – КВІ–3 (16 кВ, 470 пФ), C_2 – КСО–5 (500 В, 5600 пФ), C_3 – МБГО–2 (300 В, 2 мкФ).

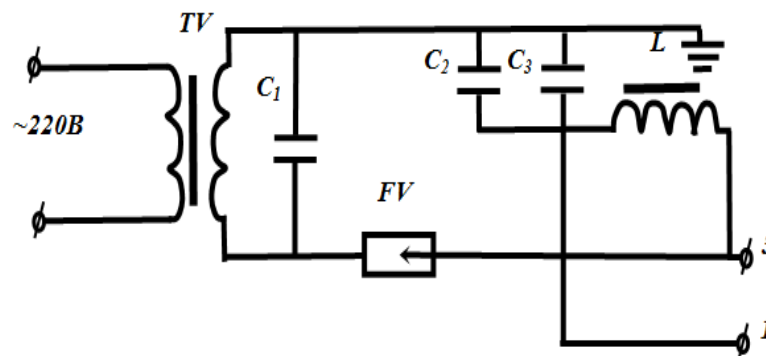


Рисунок 2.7 – Принципова схема модернізованого збуджувача дуги ВІР–101УЗ

На відміну від серійного збудника в нашій схемі замінено трансформатор TV, в серійному збуднику була встановлена високовольтна автомобільна котушка. Аналогічний ефект був досягнутий також, коли конденсатор C_1

замінювався на велику ємність ~ 1500 пФ. Включення підпалювача пристрою в схему електроживлення так само як раніше проводилося або послідовно, або паралельно. При роботі модернізованого збудника дуги напруга, що знімається з вторинної обмотки трансформатора TV, заряджає конденсатор C_1 , через дросель L і конденсатори C_2 і C_3 до напруги проббою розрядника FV. Після проби розрядника FV в контурі, утвореному L і C_1 , C_2 і C_3 , виникають високочастотні затухаючі коливання високої напруги. Конденсатор C_3 шунтує пік залишкової напруги. Напруга на клеммах 1-3 є вихідною напругою збудника дуги [5].

Блок газопостачання призначений для газопостачання плазмотронів і допоміжного обладнання експериментальної установки повітрям, інертними газами і газовими сумішами (рис.2.8).

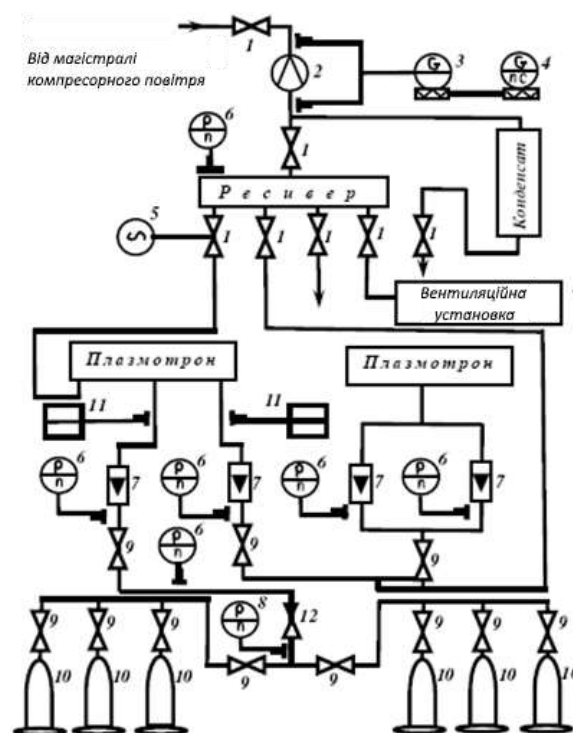


Рисунок 2.8 – Принципова схема газопостачання: 1, 9 – вентилялі; 2 – вимірювальні діафрагми; 3, 4 – витратоміри; 5 – виконуючий механізм; 6, 8 – манометри; 7 – ротаметри; 10 – балони; 11 – реле тиску; 12 – редуکتори тиску

Живлення системи повітрям здійснюється або від магістралі тиском (0,3–0,5) МПа або від пересувної компресорної установки СО–7Б тиском 0,5 МПа через вентилі 1, та інертними газами або їх сумішами від балонної рампи. Повітря на стенд надходить через ресивер і через вентилі розподіляється по споживачам. Повітря на стенд надходить через ресивер і через вентилі розподіляється по споживачам. Загальна витрата повітря контролюється витратоміром змінного перепаду (3, 4) ВФСМ. Подача повітря в розрядну камеру плазмотрону здійснюється дистанційно за допомогою виконавчого механізму 5, або в ручну, за допомогою вентилів.

Блок водопостачання призначений для відведення теплових потоків від вузлів плазмотрону і охолодження допоміжного обладнання експериментальної установки (рис. 2.9).

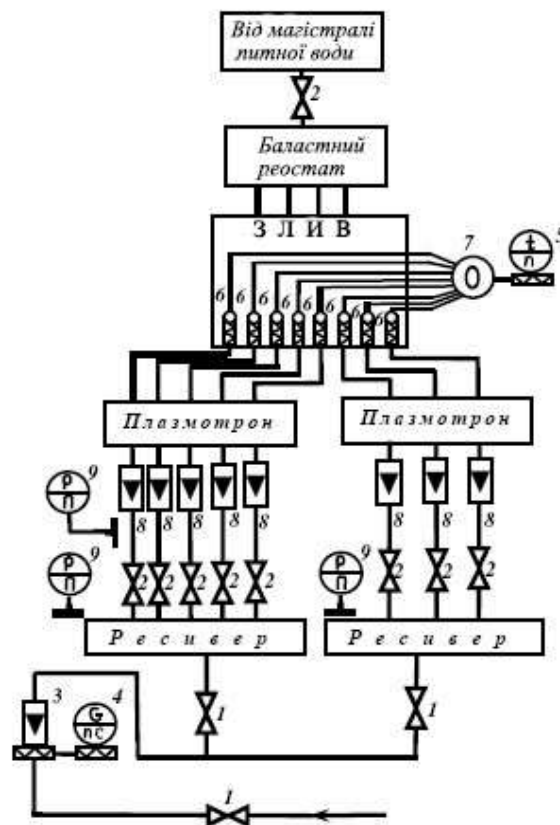


Рисунок 2.9 – Принципова схема водопостачання: 1, 2 – вентилі; 3, 4 – ротаметр дистанційний; 5 – логометри; 6 – термометри опору; 7 – перемикач; 8 – ротаметри (РС або РМ); 9 – зразкові манометри

Для охолодження може використовуватися вода оборотного циклу або магістральна питна вода тиском (0,2 – 0,5) МПа. Досліджуваний плазмотрон через гнучкі шланги підключається до окремих ресиверів підведення і зливу охолоджувальної води. Схема передбачає регулювання і контроль заданих значень тиску, витрати і температури охолоджуючої води. Регулювання подачі води окремим вузлам плазмотрона здійснюється вентилями. Тиск контролюється зразковими манометрами МЗ 160×10, а витрата – ротаметрами РМ і РЕД. Ротаметри РМ підключаються до системи охолодження по мірі необхідності. Температура охолоджуючої води контролюється термометрами опору з винесеними на щит логометрами. У водяний реостат вода надходить з магістралі питної води і зливається в каналізаційну мережу.

2.2 Інформаційно-керуючий обчислювальний комплекс

За основу була взята система числового програмного управління CNC–4000. Вона призначена для управління процесом розкрою металу за допомогою виконавчої машині термічної різки портального типу з прямокутною системою координат, з газокисневим, плазмовим або комбінованим оснащенням. CNC–4000 забезпечує:

- переміщення робочих органів машини, за необхідною траєкторією згідно з картою розкрою;
- реалізацію необхідних алгоритмів керування технологічною оснасткою машини у процесі виконання розкрою;
- графічний інтерфейс при перегляді деталей і виконання розкрою;
- створення та редагування програм, обмін програм з зовнішньою ЕОМ верхнього рівня;
- діагностику та налагодження електрообладнання машини.

Корпус CNC–4000 виконаний з ударостійкого алюмінію і укладає в собі 10.4" плоску панель кольорового дисплея на активній матриці TFT, мембранну

клавіатуру. Це промислове шасі було розроблене спеціально для роботи в жорстких промислових умовах і забезпечує захист від ударів, вібрації, пилу, вологи.

Система містить:

- процесор 5x86–133; (або PENTIUM) 256KB Cache; 4MB DRAM;
- операційну систему і системне програмне забезпечення зберігається в EPROM/Flash;
- енергозалежну пам'ять SRAM керуючих програм від 360KB до 1,44 MB;
- пристрій зовнішньої пам'яті керуючих програм – 3.5' Floppy 1.44 MB;
- 10.4", кольоровий TFT (активна матриця) плоский дисплей 192x144мм з матовим покриттям;
- захищену від пилу, частинок і масла мембранну клавіатуру.

Для забезпечення роботи ПЧПУ в широкому діапазоні температури зовнішнього середовища внутрішній простір було герметизовано. Він підтримується в заданому діапазоні автоматичною системою «нагрівання-охолодження».

Функціональні можливості:

- діалоговий режим роботи і видачі повідомлень оператору українською мовою;
- багатозадачність: відпрацювання поточної програми і виконання інших завдань одночасно;
- кольорове графічне відображення деталей і карти розкрою, положення листа металу на розкрійному столі, а також поточної позиції різача на карті розкрою і його траєкторії переміщення;
- визначення реального стану оброблюваного листа і поворотів координат;
- переривання різача з автоматичним відновленням попереднього стану (навіть у випадку відключення електроживлення);

- завантаження керуючих програм: з пам'яті, зовнішнього накопичувача 3.5' Floppy 1.44 MB, по кабелю DNC з зовнішньої ЕОМ з клавіатури, зі скануючого пристрою (залежно від виконання ПЧПУ);
- перегляд, редагування та автоматичний контроль помилок керуючих програм;
- абсолютні і відносні координати, до 10 координат виїзду в абсолютну точку;
- мінімально програмовані збільшення 0.1 для масштабу 1:1;
- доповнювана бібліотека макросів стандартних деталей;
- масштабування;
- швидке переміщення між деталями що вирізаються;
- компенсація ширини різку 0...30 мм;
- автоматична система пробивання;
- оперативна корекція часу прогріву металу: припинення або продовження процесу прогріву в будь-який момент;
- годинник і лічильник робочого часу.

Системне програмне забезпечення комплексу дозволяє проводити всебічне тестування устаткування машини та оптимальну настройку режимів роботи. При всіх налаштуваннях і тестуванні вузлів машини використовується кольоровий графічний інтерфейс. Використання даної системи дозволяє перейти в подальшому на новий рівень обслуговування та експлуатації машин з програмно-технічним комплексом для раціонального розкрою листа.

2.3 Методика вимірювань і оцінка похибок

Вимірювання на експериментальній установці поділялися на стандартні і спеціальні. До стандартних, як правило, відноситься вимірювання витрат, температури охолоджуючої води, газів, а також вимірювання сили струму і напруги дуги, а також джерела живлення плазмотрона. Згідно рекомендацій

[6, 12, 19, 76 та ін.] були перераховані вимірювання, що дозволило розрахувати втрати тепла через охолоджувані елементи експериментальної установки:

$$Q_i = 4,18q(t-t_0), \quad (2.3)$$

де q – тепловий потік через одиницю довжини каналу.

$$q = \frac{Q_i}{l_c + \delta}, \quad (2.4)$$

електричну потужність дуги:

$$N = IU, \quad (2.5)$$

тепловий ККД плазмотрона:

$$\eta = 1 - \frac{\sum Q_i}{IU}, \quad (2.6)$$

середньомасову ентальпію струменю на виході з сопла анода:

$$i = \frac{IU - \sum Q_i}{G}. \quad (2.7)$$

До спеціальних вимірів відносилися такі, які дозволяли отримувати інформацію про структуру дугового розряду, параметри в розрядному каналі плазмотрона, температурному полі і фізико-механічних даних металу, що розрізається. Вони включали вимірювання температури в дуговому розряді, в газі, який надходив з плазмотрона, вимірювання швидкості витікання

плазмового струменя, вимірювання потенціалів різних частин установки, температури нагріву і металографічні дослідження розрізаних заготовок.

Для контролю напруги і струму на пультах керування встановлені вольтметри і амперметри Е378, Н367 і М62 (клас точності 1,5), а для точних вимірювань застосовувалися переносні прилади С50 (клас точності 1,0) та Е59 (клас точності 0,5). Іноді напруга і струм фіксувалися за допомогою шлейфового осцилографа Н-105 з похибкою $\pm 2\%$, а електричні сигнали від хромель-алюмелевих термопар записувалися осцилографом НО43.2.

Осцилографічні дослідження дуги [75] показали, що частота шунтування і величини U_t і I_t в плазмотроні не є періодичними, а мають значні випадкові відхилення від їх середніх значень. Зазвичай для характеристики таких процесів вводять функції розподілу. Ймовірність знаходження напруги U_t до $U_t + dU_t$ виражається через f_u формулою [75]:

$$dP_u = f_u dU_t. \quad (2.8)$$

Для I_t :

$$dP_i = f_i dI_t.$$

У роботі [75] показано, що функція f_u та f_i підкорюються закону нормального розподілу, середні і найбільш ймовірні значення струму і напруги дорівнюють показанням приладів магнітоелектричної системи.

Середня потужність розраховувалась за осцилограмою струму і напруги з використанням формули [75]:

$$N = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} U_t I_t dt. \quad (2.9)$$

Напруженість електричного поля визначалася за нахилом розподілу потенціалу секцій МЕВ вздовж розрядного каналу. При цьому виміряні потенціали відносилися до середніх перерізів секції. Контроль гідравлічних і пневматичних параметрів установки здійснювався за тиском і витратою. Охолоджуюча вода контролювалася за температурою на вході і на виході з плазмотрону. Тиск вимірювався зразковими манометрами типу МЗ (клас точності 0,4), витрата газу – ротаметрами РМ і дросельними витратомірами з похибкою показів $\pm(1+\delta\zeta')$, де $\delta\zeta' = \pm(1-5) \%$ [60], витрата води – ротаметрами РМ і РЕД з похибкою показів $\pm 25 \%$, температура води – ртутними термометрами з ціною поділки $0,10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ і логометрами ЛПП–53. Всі спеціальні вимірювання температури на експериментальній установці загалом ґрунтуються на термоелектричному ефекті, тобто на вимірюванні нагріву спаю термопари і оптичному методі вимірювань. Для вимірювання температури контактним методом використовувалися наступні термоелектричні термометри: платина-платіноренієвий – $1600 \text{ }^{\circ}\text{C}$; родій-платіноренієвий – $1800 \text{ }^{\circ}\text{C}$; вольфрам-ренієвий – $2700-2900 \text{ }^{\circ}\text{C}$; платинородій-платина – $1600 \text{ }^{\circ}\text{C}$. В якості вторинних приладів застосовувалися мілівольтметри пірометричні МПП–054м (клас точності 1,0), потенціометри автоматичні ЕПВ (клас точності 0,5) і переносні потенціометри ПП–63 (клас точності 0,05). Оптичний метод використовувався для вимірювання температури плазмового потоку катодної і анодної плями в плазмотроні, матеріалі, металі, а також і для інших цілей при експериментальних дослідженнях. При цьому застосовувалися оптичні пірометри ЕОП–66, дистанційні пірометри-радіометри ДПР–2 і ДПР–3 з точністю вимірювання $\pm 0,14 \%$ і інтегровані термометри серії «Маратон» з точністю вимірювання $\pm 0,3 \%$. Показання знімалися під час горіння дуги в плазмотроні на заданому режимі не раніше, ніж через 30 секунд після виходу на режим. Отримані дані в ході експериментальних досліджень дозволили визначити електричну потужність дуги, тепловий потік через одиницю довжини каналу, втрати енергії через стінки дугової камери, тепловий ККД плазмотрона і т.д.

Згідно загальновідомих правил [103] були виконані оцінки похибок вимірювань. Програма експерименту, як правило, виконувалася тричі. Упевненість в правильності отриманих даних ґрунтувалася на їх близькості до раніше отриманих значень вимірюваних величин. Абсолютна похибка δ при зніманні зі шкали наближеного значення A_x вимірюваної величини A (тобто $A_x \approx A$) не перевищувала половини мінімальної поділки шкали приладу.

Виходячи із відомостей про клас приладу, за основу бралася найбільша допустима основна приведена похибка δ_{np} в робочій частині шкали, тобто $\delta_{kn} = \delta_{np}$, хоча δ_{np} і значення класу приладу δ_{kn} пов'язані нерівністю $\delta_{np} \leq \delta_{kn}$. Так, при класі точності приладу 1,0 основна приведена похибка вимірів може перебувати в межах $\pm(0,5 \div 1,0) \%$, при цьому δ_{np} приймалась рівною 1,0 %. Гранична (найбільша) абсолютна похибка приладу в будь-якій точці шкали:

$$\pm \varepsilon_a = \pm \Delta A_{max} = A_m \frac{\delta_{np}}{100} \leq A_m \frac{\delta_{kn}}{100}, \quad (2.10)$$

а відносна похибка:

$$\delta = \frac{A}{A} \delta_{np}, \quad (2.11)$$

де A – дійсне значення вимірюваної величини, прийняте наближено рівним до показань шкали приладу A_x .

Чим ближче за значенням вимірювана величина A_x до максимального значення робочої частини шкали A_m , тим менша відносна похибка.

Дані експериментів записувалися у вигляді табличних функцій, за ними будувалися графіки. Значна частина графіків описана розрахунковими формулами, які можуть бути використані при розробці аналогічних

плазмотронів. Критерієм прийнятності знайденої (певної) розрахункової формули була величина відхилення значень функцій від відповідних точок графіків, побудованих за отриманими експериментальними даними.

Як правило, при обробці вимірювань визначалося значення середнього арифметичного за формулою:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{k=1}^n X_k}{n}, \quad (2.12)$$

де X_k – значення « k »-тих вимірювань.

Оцінка величини відхилення середнього арифметичного від шуканого точного (але невідомого) значення виконувалася обчисленням середньої квадратичної помилки [104]:

$$\sigma = \pm \frac{\sum_{k=1}^n (X_k - \bar{X})^2}{n}. \quad (2.13)$$

Отримані значення X та σ порівнювалися з експериментально вимірними величинами шляхом звірки їх абсолютних похибок $\varepsilon_k = X_k - X$. При значеннях $\varepsilon_k > 3\sigma$ величини X_k відкидалися як промахи, а значення X та σ уточнювалися, тобто обчислювалися заново.

Оцінка похибки функції декількох аргументів проводилася за диференціальною формулою [103]:

$$\varepsilon_u = \left| \frac{\partial U}{\partial X} \right| \cdot \varepsilon_a + \left| \frac{\partial U}{\partial Y} \right| \cdot \varepsilon_b + \left| \frac{\partial U}{\partial Z} \right| \cdot \varepsilon_c, \quad (2.14)$$

$$\begin{array}{lll} x = a & x = a & x = a \\ y = b & y = b & y = b \\ z = c & z = c & z = c \end{array}$$

де ε_u є верхньою межею модуля помилки функції або інакше – граничною абсолютною похибкою функції.

Відносна похибка вимірювань електричних величин не перевищувала 3 %, температури – становила частки відсотка, інших величин – не перевищувала 5 %. Отримані критеріальні рівняння дозволяють розраховувати електричні і теплові характеристики плазмотронів з відносними похибками, які не перевищують 11 %.

Доповнення до методик досліджень наведені у відповідних розділах.

Висновки до розділу 2

1. Наведена в цьому розділі експериментальна установка, що включає блоки електроживлення, газопостачання, водопостачання та контрольно-вимірювальні прилади дозволяє проводити експерименти в широкому діапазоні вимірювання витратних і електричних параметрів при виконанні всіх досліджень, передбачених у завданнях, поставлених у дисертації.

2. Модернізований збудник дуги на базі ВІР–101УЗ можна рекомендувати для підпалу дуги у всіх серійних установках, призначених для плазмового різання, напилення, зварювання, термообробки та інших призначень.

3. Інформаційно-обчислювальний комплекс дозволяє незалежно від товщини металу, що розрізається і його асортименту, плазмотронів що застосовуються проводити оптимальну настройку режимів роботи плазмотрона і раціональної технології різання.

4. Зроблені оцінки за прийнятою методикою обробки результатів досліджень у діапазоні сили струму до 800 А, напруги до 1000 В і витрати газу до 100 г/с показали, що відносна похибка вимірювань електричних величин не перевищувала 3 %, температури – частки відсотка, інших величин – не перевищувала 5 %.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЙ РІЖУЧИХ ПЛАЗМОТРОНІВ ТА ЇХ ОСНОВНИХ ВУЗЛІВ

3.1 Вибір основних параметрів і рекомендації з конструювання різальних плазмотронів

В результаті досліджень вітчизняних і зарубіжних вчених з розробки електродних вузлів плазмотронів (див. розд. 1), встановлено, що найбільш ефективним є конструювання ріжучі плазмотрони з електродами, що містять термоемісійні вставки, порожнисті мідні і сталеві циліндри, включаючи комбіновані [105].

При розробці конструкцій ріжучих плазмотронів враховувалися вимоги, що пред'являються до типових плазмотронів [12, 19]:

- надійність запалювання і стабільність горіння плазмової дуги за технологічними умовами і режимами роботи;
- ефективність охолодження деталей, схильних до високих температур;
- простота конструкції і технологічність у виготовленні;
- зручність в експлуатації.

До ріжучих плазмотронів пред'являвся також і ряд спеціальних вимог, таких як стійкість електродної системи при великій кількості запусків за рахунок використання мідних порожнистих електродів, що працюють в «холодному» режимі або в розрядному каналі оптимальної аеродинаміки течії газу [12]. Крім того, плазмовий потік, який закінчується через сопловий отвір, повинен максимально виплавляти метал і видаляти його з порожнини різку, а в процесі плазмового різання необхідно проводити пробивання отворів в металі для інтенсивного викиду розплавлених частинок в бік плазмотрону. Також

необхідно враховувати ресурс роботи плазмотрону, зокрема його електродних вузлів [106].

Розробка конструкції ріжучого плазмотрону має технологічні та експлуатаційні особливості:

- товщину і вид металу, що розрізається (визначає потужність плазмової дуги і діапазон зміни потужності);
- параметри і можливі витрати плазмоутворюючого (основного та захисного) газу і охолоджувальної води;
- максимальний ресурс роботи електродної системи;
- використовуване джерело живлення і основні його характеристики;
- особливі вимоги до охорони праці при роботі ріжучого плазмотрону у виробничих умовах.

3.2 Розрахунок технологічних параметрів плазмотронів для різання

В даному розділі наведені методика і результати розрахунку основних параметрів при зміні електричної потужності, витрати газу (повітря), діаметру сопла плазмотрона для різання з порожнистим катодом.

Розглянемо асиметричний стовп в ламінарному дозвуковому потоці при відсутності зовнішнього магнітного поля. Для отримання та дослідження основних рівнянь, що виражають залежність параметрів потоку плазми від геометрії, витрат газу і потужності плазмотрона приймемо ряд спрощуючих припущень:

1. При тривалому режимі роботи витрата робочого газу та потужність плазмотрона не змінюються.
2. Процес витікання плазми з сопла адіабатний.
3. Статичний тиск в потоці плазми і на зрізі сопла є рівним статичному тиску навколишнього середовища.
4. Установки плазмової дуги в розрядному каналі плазмотрона змінюються уздовж осі руху.

У плазмотронах для різання виділяють три ділянки дуги, які характеризуються різними параметрами стану. Перша ділянка – електрод (катод) сопла; другий – від місця прив'язки допоміжної дуги до сопла до виходу з сопла; третій – від сопла до поверхні металу, що розрізається.

Основні параметри плазмової дуги: ентальпія, щільність, тиск, швидкість руху на кожній ділянці можуть бути визначені при спільному рішенні рівнянь збереження енергії, в адіабатному процесі та сталості витрати (згідно рівнянь (1.9) – (1.15) див. розд. 1).

Для першої ділянки дуги рівняння збереження енергії можна записати:

$$dq = d_i + A d \left(\frac{\omega^2}{2} \right), \quad (3.1)$$

де ω – тангенціальна складова швидкості;

A – механічний еквівалент теплоти.

Отже, підведене до плазموутворюючого газу тепло від електричної дуги витрачається на зміну ентальпії і кінетичної енергії рухомого потоку:

$$q = \int_{i_0}^{i_1} d_i + A \int_{\omega_0}^{\omega_1} d \left(\frac{\omega^2}{2} \right) = (i_1 - i_0) + A \frac{\omega_1^2 - \omega_0^2}{2}, \quad (3.2)$$

де i_0 , ω_0 – відповідно ентальпія і тангенціальна складова швидкості потоку на вході в розрядний канал;

i_1 , ω_1 – те ж саме на виході з розрядного каналу або на вході в сопло.

Враховуючи, що швидкість руху плазموутворюючого газу в розрядному каналі мала (~ 5 м/с), то другий доданок в (3.2) можна опустити і з достатньою для інженерних розрахунків точністю записати:

$$q=i_1-i_2. \quad (3.3)$$

На другій ділянці дуги при проходженні потоку через сопло частина енергії витрачається на збільшення швидкості потоку і переходить в кінетичну енергію руху. При цьому ентальпія і температура плазмоутворюючого газу зменшується.

При адіабатному закінченні потоку рівняння енергії має вигляд:

$$d i + A d \left(\frac{\omega^2}{2} \right) = 0. \quad (3.4)$$

Після інтегрування (3.4) можна записати:

$$(i_2 - i_1) + A \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2} = 0, \quad (3.5)$$

де i_2 , ω_2 – ентальпія і швидкість потоку на виході з сопла.

Так як швидкість ω_2 значно більше (> 200 м/с) у порівнянні з (3.5) може бути записано:

$$i_2 = i_1 - A \left(\frac{\omega_2^2}{2} \right). \quad (3.6)$$

На третьому ділянці при адіабатному гальмуванні кінетична енергія потоку повністю переходить в ентальпію:

$$i_3 = i_2 + A \left(\frac{\omega_2^2}{2} \right) = i_1. \quad (3.7)$$

Величина питомої ентальпії плазмоутворюючого газу в розрядному каналі може бути визначена:

$$i_1 = i_0 + \frac{IU}{G} \cdot \eta. \quad (3.8)$$

Рівняння сталості витрати газу для плазмової дуги, що випливає із сопла:

$$G = F \omega_2 \rho_2, \quad (3.9)$$

де F – площа вихідного отвору сопла;

ρ_2 – щільність плазми на виході з сопла.

Швидкість витікання плазмової дуги з сопла плазмотрона:

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{2K}{K-1} \cdot \frac{P_1}{\rho_1} \left[1 - \frac{P_2}{P_1} \right]^{\frac{K-1}{K}}}, \quad (3.10)$$

де K – показник адіабати;

P_1, P_2 – тиск в розрядному каналі і на виході з сопла відповідно;

ρ_1 – щільність плазми в розрядному каналі.

Щільність плазми на виході з сопла пов'язана з густиною плазми в розрядному каналі співвідношенням:

$$\rho_2 = \rho_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{K}}. \quad (3.11)$$

Тоді:

$$\rho_1 = 0.8 \frac{G^2}{\frac{K}{K-1} d_c^4 P_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{K}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K+1}{K}} \right]}. \quad (3.12)$$

Рівняння стану потоку плазми в загальному випадку має вигляд:

$$P_1 = \frac{K-1}{K} \rho_1 \cdot i_1^\alpha. \quad (3.13)$$

Для інженерних розрахунків $\alpha \approx 1$, тоді (3.13) можна записати:

$$P_1 = \frac{K-1}{K} \rho_1 \cdot i_1. \quad (3.14)$$

Спільне рішення (3.8), (3.11) і (3.14) дозволяє визначити параметри стану плазми в розрядному каналі.

Середньомасова температура визначається за таблицями термодинамічних функцій [107] або обчислюється за формулою:

$$P_1' = \rho_1 R T_1. \quad (3.15)$$

У плазмотронах для різання важливим параметром є швидкісний напір потоку плазми і сила тиску потоку, оскільки від величини цих параметрів залежить видалення розплавленого металу із зони різання.

На рис. 3.1 – 3.3 наведено результати розрахунків за наданими формулами. Вибраний діапазон зміни параметрів охоплює найбільш можливі режими роботи розроблених плазмотронів для різання: потужність від

100-300 кВт, струм плазмової дуги 300-800 А, витрата робочого газу до 4 м/с, товщина металу, що розрізає від 60 до 400 мм.

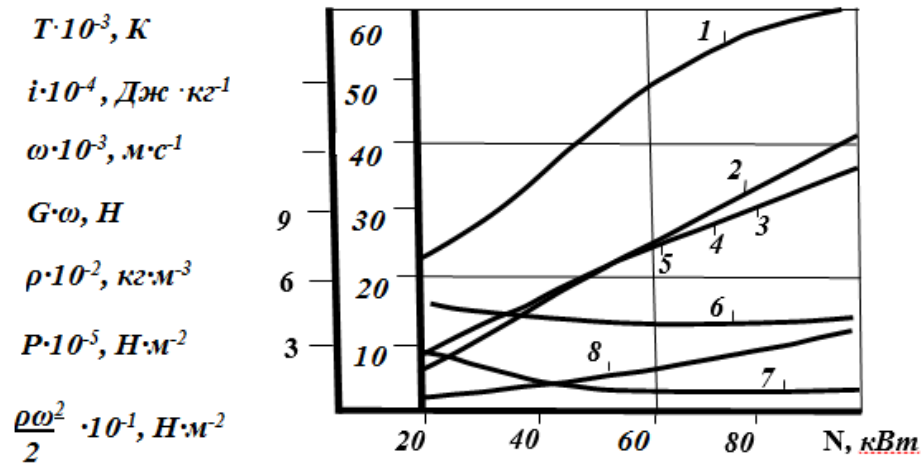


Рисунок 3.1 – Зміна параметрів потоку плазми від потужності:

- 1 – середньомасова температура; 2 – питома ентальпія; 3 – швидкість потоку;
 4 – сила тиску; 5 – швидкісний напір; 6 – щільність в розрядному каналі;
 7 – щільність потоку на виході з сопла; 8 – тиск в розрядному каналі

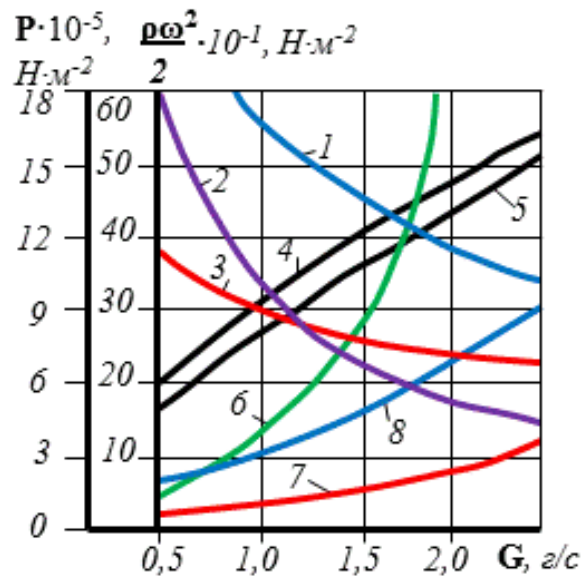


Рисунок 3.2 – Зміна параметрів потоку плазми від витрати робочого газу
 позначення див. на рис. 3.1

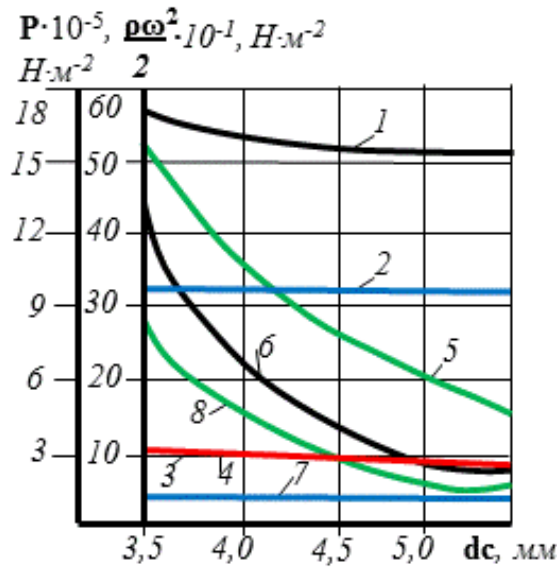


Рисунок 3.3 – Зміна параметрів потоку плазми від діаметра сопла: позначення див. на рис. 3.1

З рис. 3.1 – 3.3 видно, що при збільшенні потужності плазмотрону зростають: i , P_1 , ω_2 , $G\omega_2$, $\frac{\rho_2 \omega_2^2}{2}$. Підвищується також середньомасова температура, однак щільність плазми всередині розрядного каналу і на виході з сопла зменшується. Збільшення G (рис. 3.3) призводить до зниження i , T_1 , ω_2 , однак P_1 , ρ_2 , $\frac{\rho_2 \omega_2^2}{2}$, $G\omega_2$ зростають.

При збільшенні витрати плазмоутворюючого газу (повітря) відбувається зниження швидкості витікання плазмового потоку. Це стає можливим при постійній потужності і заданому діаметрі сопла d_c , оскільки відбувається одночасне зростання тиску і щільності нагрівання газу. Причому інтенсивність росту ρ_1 вище інтенсивності росту P_1 . В результаті відношення $\frac{P_1}{\rho_1}$ (3.9) із збільшенням G зменшується, а, отже, зменшується ω_2 . Збільшення діаметра

сопла d_c плазмотрона призводить до зменшення всіх газодинамічних параметрів потоку плазми [105].

3.3 Розробка плазмотронів з термоємійними електродами

Ріжучий плазмотрон ПР-1 з термоємійним електродом (рис. 3.4.) має основні елементи: катодний вузол 1, сопло 2, вихрова камера 3 [108].

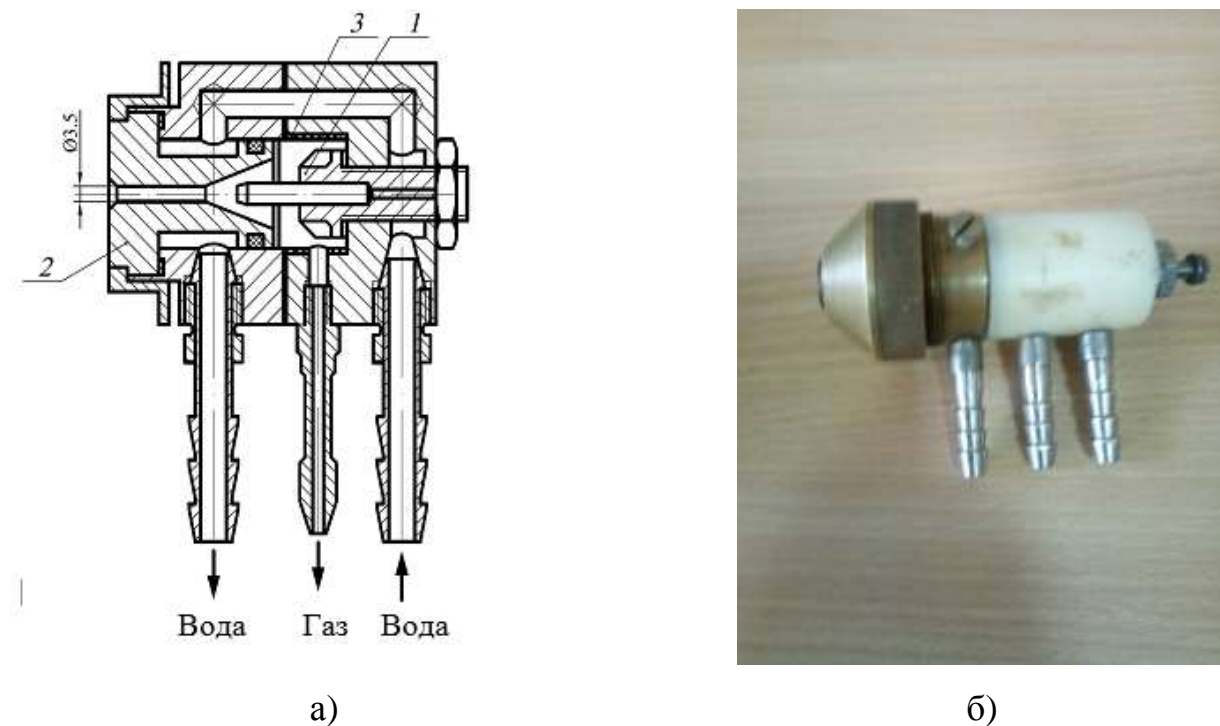


Рисунок 3.4 – Конструктивна схема (а) та зовнішній вид (б) плазмотрону ПР-1

Катодний вузол (рис. 3.5) складається з водоохолоджуємої мідної обойми 1 і запресованої в ній термоємійної вставки 2.

У даній конструкції плазмотрону електродна вставка може виготовлятися з вольфраму, цирконію або гафнію. Сопло (рис. 3.6) виконується з матеріалу з високою теплопровідністю, найчастіше з міді М-1. Стабілізація дуги в плазмотроні здійснюється потоком газу, що подається через тангенціальні отвори вихрової камери 3 (див. рис. 3.4).

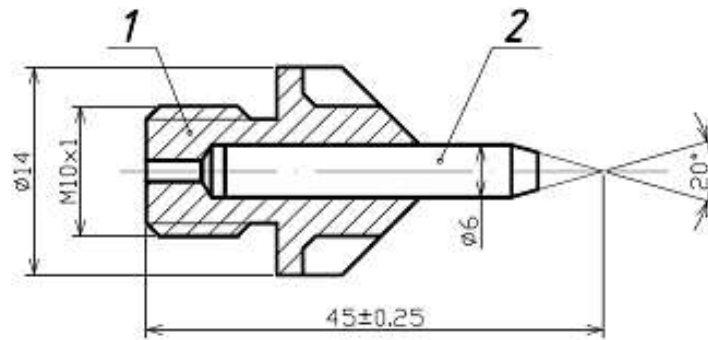


Рисунок 3.5 – Катодний вузол плазмотрону ПР–1

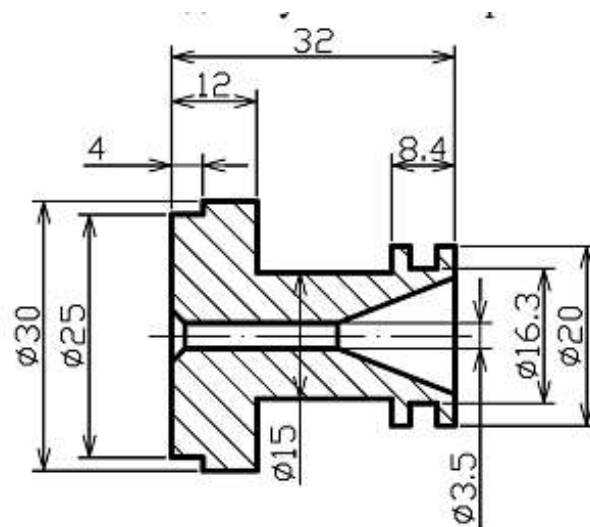


Рисунок 3.6 – Сопло плазмотрону ПР–1

Охолоджуюча вода по кабель-шлангу подається спочатку до струмопідводячого штуцера. Потім вона протікає в зазорі між катодним вузлом 1 (рис. 3.14) і соплом 2 інтенсивно охолоджуючи їх. Після цього охолоджуюча вода через зазори надходить до водовідводячого штуцера.

Плазмоутворюючий газ по шлангу подається до штуцера, а потім у вихрову камеру 3. По тангенціальних каналах у вигляді вихору він надходить в розрядну камеру плазмотрону. Технічні дані плазмотрону ПР–1 наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики розроблених плазмотронів для різки металів

Марка	Потужність, кВт	Номінальний струм, А	Розхід робочого газу, г/с	Розхід захисного газу, %	Товщина матеріалу, який ріжеться	Швидкість різання, м/хв	Діаметр сопла, мм
ПР-1	40	400	0,5-1 (аргон)	-	60	0,7	3,5
ПР-2	40	300	0,8-1 (повітря)	-	60	0,7	3,5
ПР-3	70	500	1-1,5 (кисень)	2-3	80	0,65	3,5
ПР-4	60	500	1-1,5 (кисень)	-	100	0,50	3,0
ПР-5	300	800	1-4,0 (повітря)	2-3 від затрат робочого газу	400	0,20	4,5
ПР-6	200	700	1-4,0 (повітря)	-	200	0,25	4,0

Плазмотрон ПР-2 (рис. 3.7) містить катодний вузол 1 і сопло 2. Катодний вузол плазмотрону ПР-2 (рис. 3.8) складається з водоохолоджуваного корпусу 1, в якому закріплена мідна обойма з термохімічною катодною вставкою 2 з цирконію або гафнію (рис. 3.9) [109, 110]. На зовнішній поверхні корпусу виконана гвинтова нарізка 3, якою служить завихрювач газу. Через неї плазмоутворюючий газ (повітря) заходить у дуговий канал і стабілізує катодну прив'язку дуги на термохімічному катоді, що значно підвищує ресурс роботи катоду.

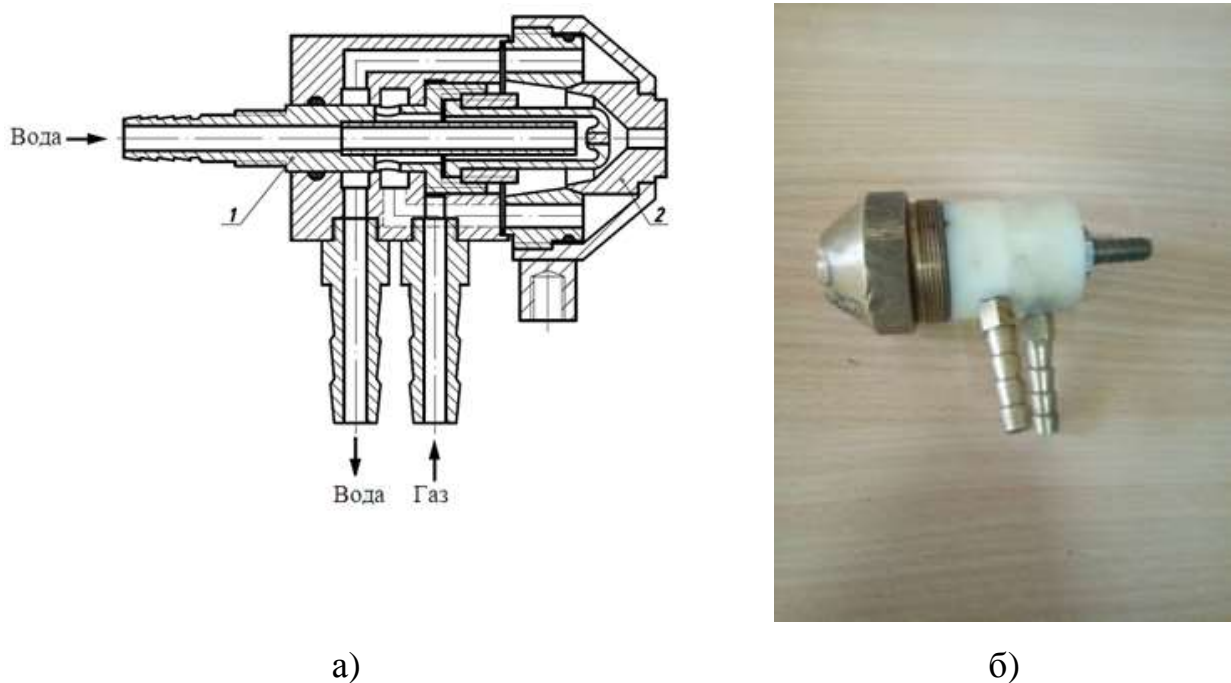


Рисунок 3.7 – Конструктивна схема (а) та зовнішній вид (б) плазмотрону ПР-2

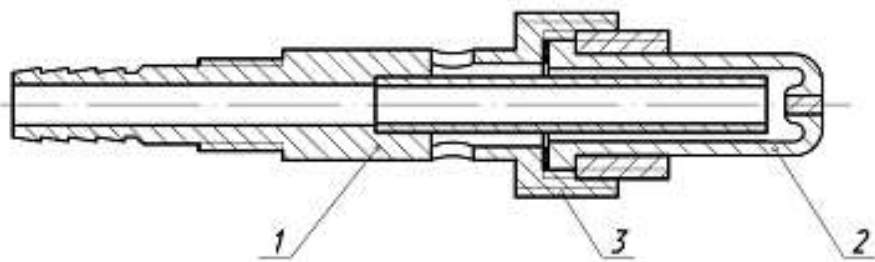


Рисунок 3.8 – Катодний вузол плазмотрону ПР-2

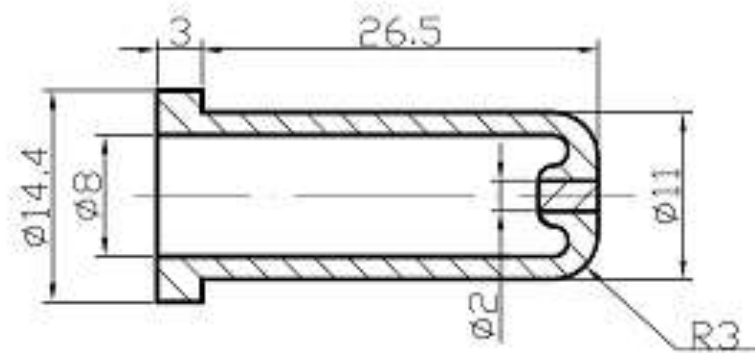


Рисунок 3.9 – Катод плазмотрону ПР–2

Сопловий електрод плазмотрону ПР–2 (рис. 3.10) виконується з матеріалу з високою теплопровідністю (міді). Як видно з рис. 3.7 між внутрішнім (катодом) і сопловим електродами створюється постійний зазор. Електричний пробій цього зазору (з допомогою осцилятора) викликає спочатку протікання струму чергової дуги, яка потім переходить в робочу ріжучу дугу. Технічні дані плазмотрону ПР–2 наведено в табл. 3.1.

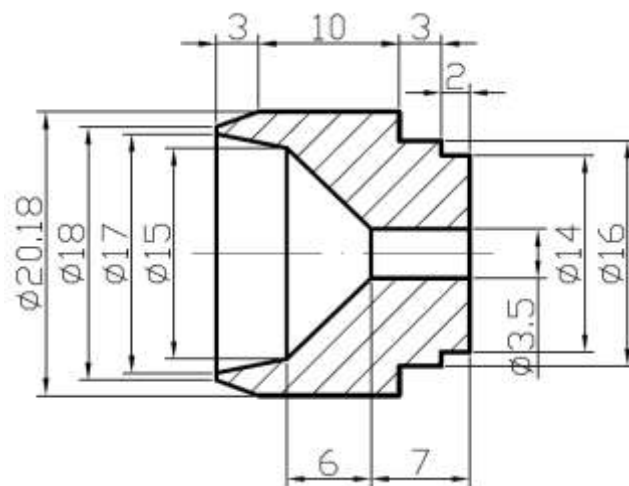


Рисунок 3.10 – Сопло плазмотрону ПР–2

Збільшення потужності призвело до розробки плазмотрону ПР–3 (рис. 3.11) який складається з корпусу 1, катодного вузла 2 і соплового електрода [108, 110].

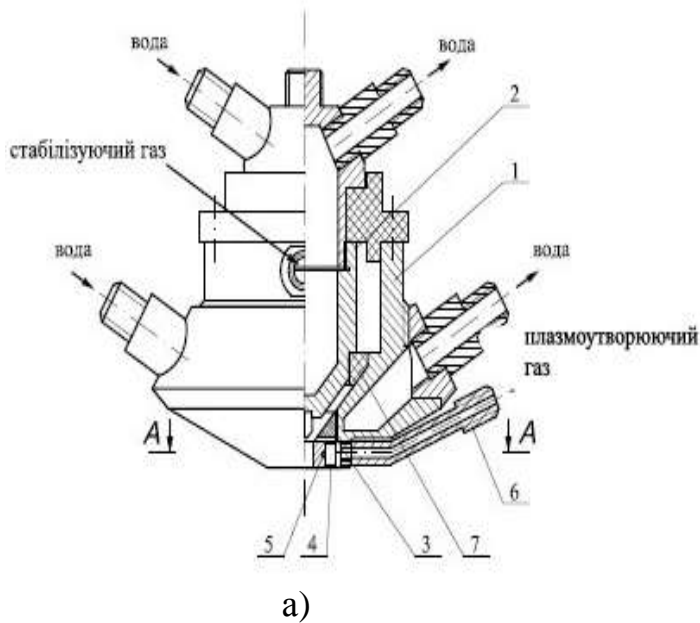


Рисунок 3.11 – Конструктивна схема(а) та зовнішній вид (б)плазмотрону ПР–3

Катодний вузол являє собою мідний водоохолоджуваний катодотримач з встановленою в ньому термостійкою вольфрамовою вставкою. Для захисту вольфрамової вставки від окислюючої дії робочого газу (повітря) застосовується аргон в кількості 2-3% від витрати робочого газу. Подача аргону здійснюється через вихрове кільце 7.

Сопловий електрод плазмотрону складається з двох частин розрядного каналу: усіченого конуса 3 і циліндра 4, забезпеченого чотирма тангенціальними отворами 5 для подачі робочого газу (повітря). Діаметр тангенціальних отворів становить (0,1 – 0,4) діаметру циліндричної частини соплового електроду, а їх вісь утворює з віссю сопла кут $60-85^{\circ}$. Робочий газ подається в розрядний канал соплового електроду через штуцер 6.

Виконання соплового електроду з двох частин забезпечує швидку його заміну. Технічні дані плазмотрону ПР–3 наведено в табл. 3.1.

Для підвищення ресурсу термохімічного катоду нами був розроблений плазмотрон ПР–4 (рис. 3.12) в якому крім центральної вставки 2 впресовані ще

чотири радіальних стрижні, в мідному пологому катодотримачі 1 (рис. 3.13 – рис. 3.14) [109, 110].

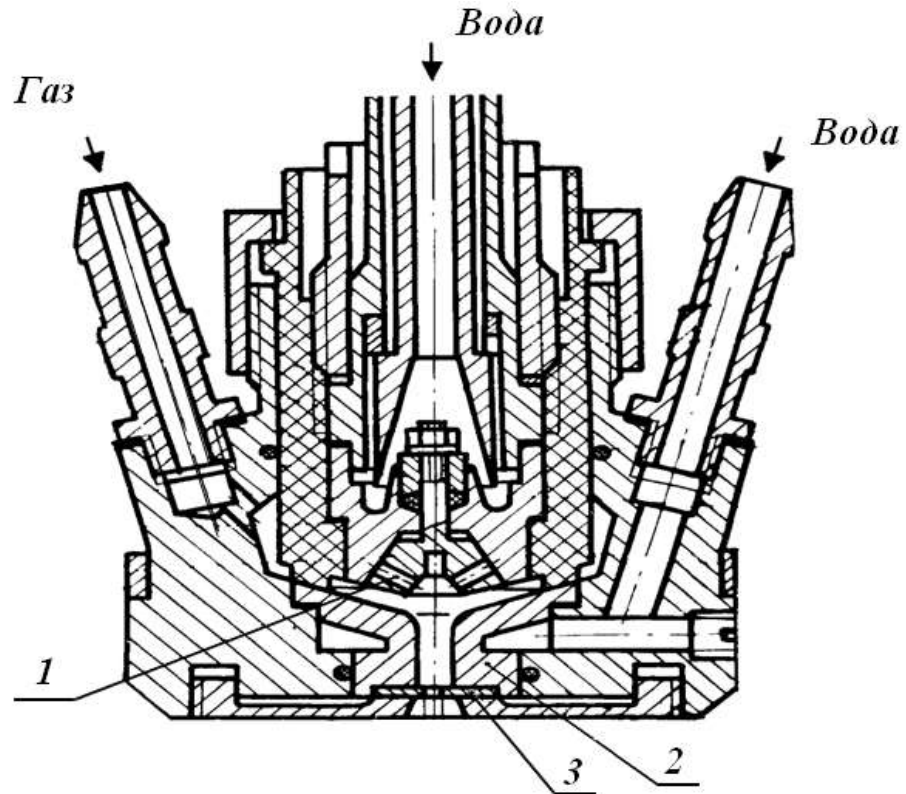


Рисунок 3.12 – Конструктивна схема плазмотрону ПР-4: 1 – катодний вузол;
2 – міжелектродна вставка; 3 – сопло

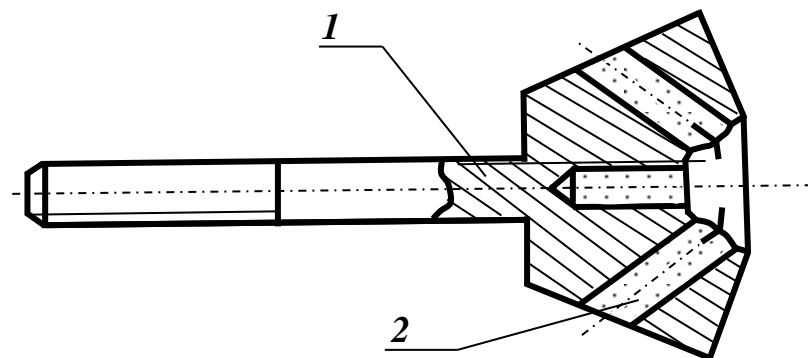


Рисунок 3.13 – Модифікований катод плазмотрону ПР-4

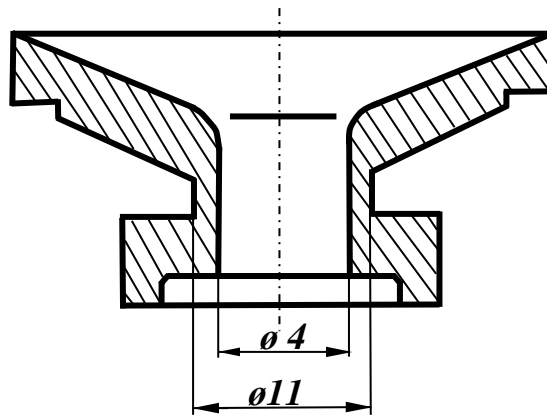


Рисунок 3.14 – Міжелектродна вставка (секція) плазмотрона ПР–4

Діаметр центральної вставки дорівнює 3 мм, бічних – 1,6 мм. В процесі випробування плазмотрона ПР–4 було встановлено, що на початку роботи відбувається вироблення тільки центральної вставки. Причому вона нижче, ніж у плазмотрона з одинарною вставкою. Це спричинене зниженням тиску газу в прикатодній області.

Відповідно зменшуються тепловий потік в катод і температура робочої вставки, що і призводить до зменшення ерозії. Після вироблення центральної вставки катодна пляма розподіляється на всі інші вставки. При цьому площа прив'язки опорної плями дуги збільшується в 1,5 рази в порівнянні з однією центральною вставкою. Щільність струму і теплового потоку знижується, що позитивно позначається на їх ерозії.

Технічні дані плазмотрона ПР–4 приведені в табл. 3.1.

Плазмотрон ПР–5 (рис. 3.15) складається з водоохолоджуваних катодного вузла 1, міжелектродної вставки 2 і соплового вузла 3. Катодний вузол (рис. 3.16) містить мідний катодотримач з циліндричною порожниною, в якій розміщений катод плазмотрона (рис. 3.17) з п'ятьма термоємисійними вольфрамовими вставками, які дозволяють розщепити катодну прив'язку дуги при роботі плазмотрона [109, 110]. Для захисту вольфрамових вставок від окислюючої дії повітря застосовується аргон, витрата якого не перевищує 2-3% від витрати робочого газу.

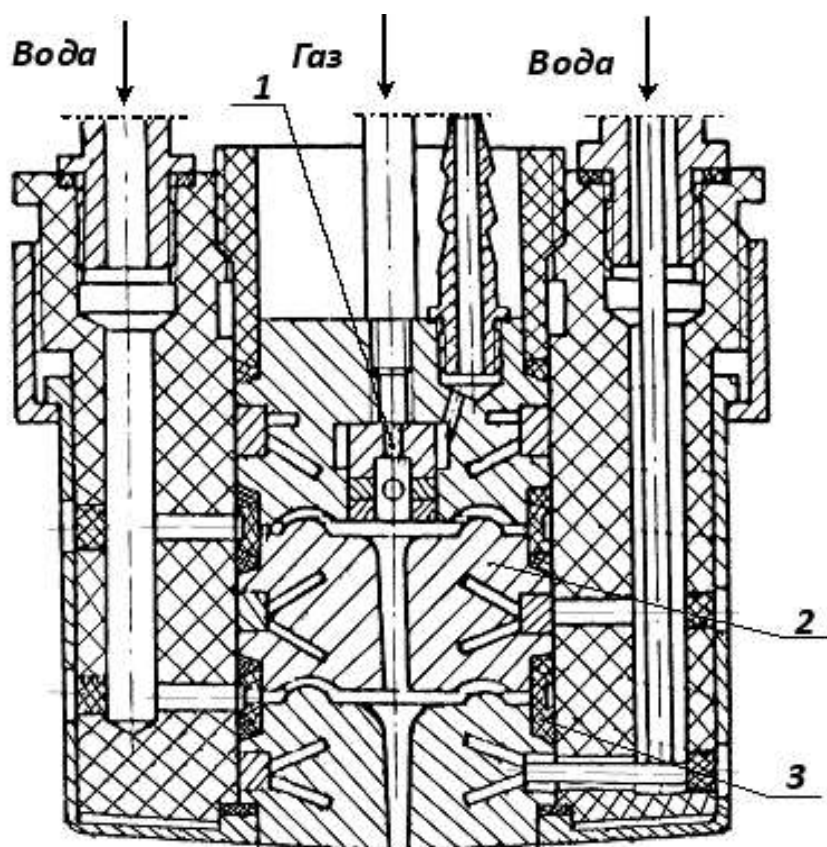


Рисунок 3.15 – Конструктивна схема плазмотрону ПР–5

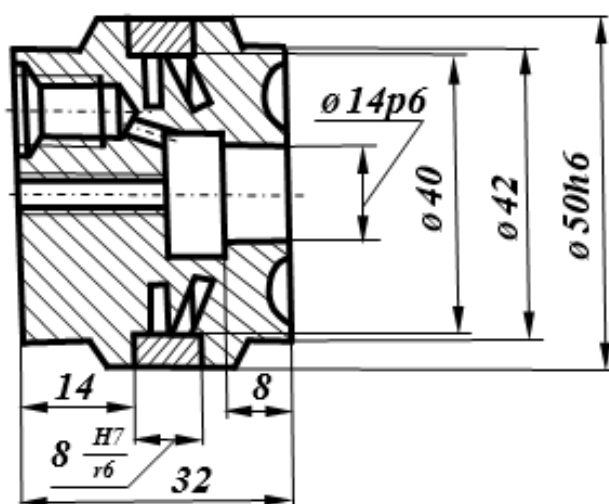


Рисунок 3.16 – Катодний вузол плазмотрону ПР–5

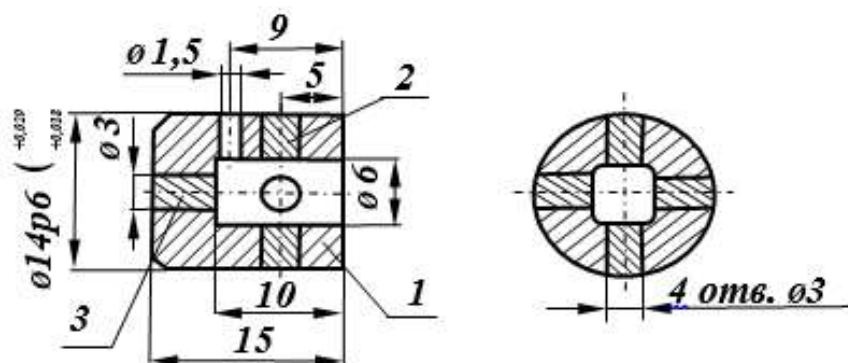


Рисунок 3.17 – Катод плазмотрону ПР-5

На рис. 3.18–3.20 представлено вузли та поетапне збирання плазмотрону.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.18 – Складові плазмотрону ПР-5:

а – катодний тримач; б – між електродна вставка з прокладками;

в – завихрителі; г – сопло плазмотрону



а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.19 – Складові плазмотрону ПР-5:
а – електродні вузли у зборі; б – корпус плазмотрону;
в – ізолятор; г – притискна кришка



Рисунок 3.20 – Плазмотрон у зборі

Подача аргону здійснюється локалізовано в порожнину катода і тангенціально між катодним вузлом і МЕВ.

Робочий газ (повітря) подається тангенціально через вихрову камеру в проміжок МЕВ – сопловий вузол. МЕВ і сопловий вузол плазмотрону являють собою мідні секції, електро ізольовані від катодного вузла та один від одного, і мають розрядний канал діаметром 2,5 мм.

У плазмотроні можна використовувати в якості робочого газу кисень, якому при різанні маловуглецевої сталі надається більша перевага. Замість вольфрамових вставок можна застосовувати термохімічні з цирконію або гафнію без використання захисного газу. Технічні дані плазмотрона ПР-5 наведено в табл. 3.1.

3.4 Розробка плазмотрону з порожнистим електродом

Плазмотрон ПР-6 (рис. 3.21 – 3.22) складається з електродного 1 і соплового 2 вузлів, розділених завихрювальною камерою 3 для введення повітря.

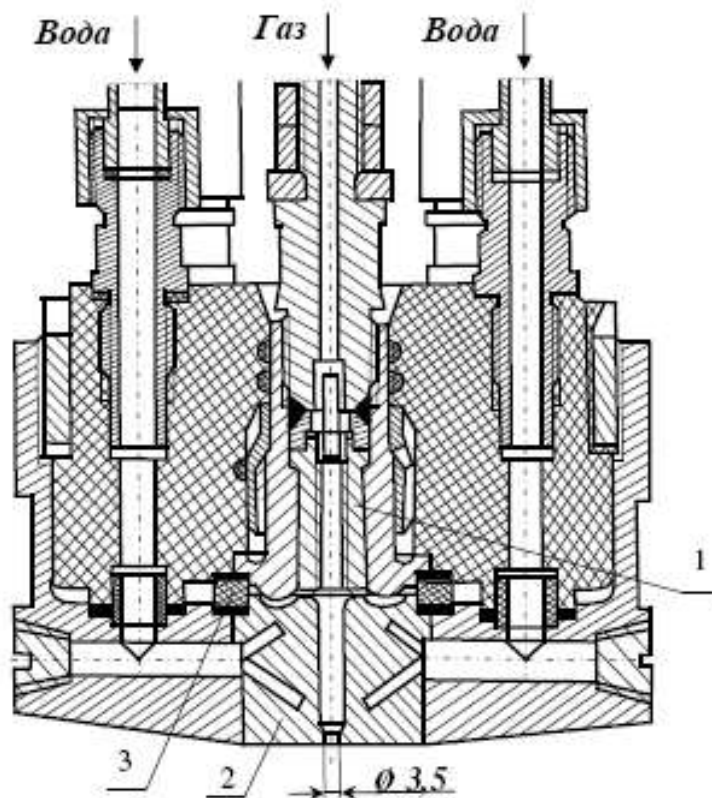


Рисунок 3.21 – Конструктивна схема плазмотрону ПР–6



Рисунок 3.22 – Зовнішній вигляд плазмотрону ПР–6

Відділ електроду (рис. 3.23) містить мідний порожнистий електрод 1 (рис.3.22) запресований в корпус 2 який охолоджується водою.

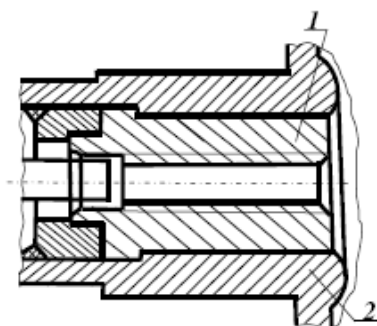


Рисунок 3.23 – Вузол катода плазмотрону ПР–6

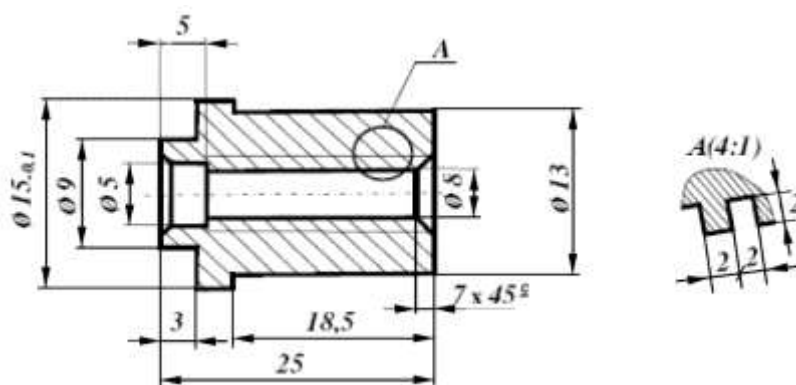


Рисунок 3.24 – Катод плазмотрону ПР–6

У внутрішній частині електроду розташоване різьблення М8х2 і додаткова камера для додаткової подачі газу (~10% від основного), що локалізує катодну прив'язку дуги. Різьба суворо розтеплює опорну пляму дуги. І вона розпадається на кілька мікроплям. Це зменшує порожнинне нагрівання і збільшує термін служби електроду (катода), при цьому струм дуги може досягати 700 А. Дуга подовжується в розрядному каналі електроду. Це призводить до зростання напруги дуги та збільшення потужності плазмотрону на 10-15 % [106, 108- 111]. Так само мідний наскрізний катод може працювати виключно плазмотрону, як на хімічно активних Аг, N, H, так і на агресивних

газах O_2 , CO_2 , повітря. При цьому кількість запусків у роботу плазмотрона, може бути велика [106, 111, 112].

Сопловий вузол складається з основи з розташованими в ній каналами для подачі і відведення охолоджуючої води і соплової мідної сильно охолоджуваної секції (рис. 3.25), в якій розташований наскрізний канал діаметром 5:153 м.

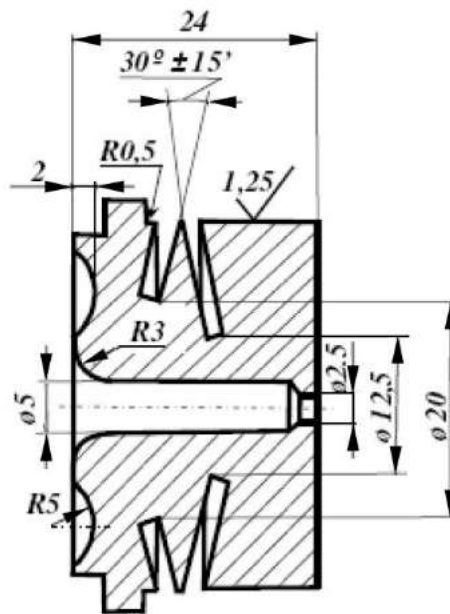


Рисунок 3.25 – Секція соплового вузла плазмотрону

При розрахунку катодного вузла розроблялася схема безперервного руху прив'язки дуги по порожнині «холодного» електроду. Різьба електроду відриває плазмовий потік за кожену різбову впадину. Ця екстремальна зона сприяє зміні частоти ритму плазмотронної дуги. І це зменшує її температурні та швидкісні параметри. Дуга шунтується в сприятливих умовах, її основна пляма розпадається на кілька частин. Різьбова нарізка сприяє цьому процесу.

Технічні дані плазмотрону наведено в табл. 3.1.

В якості прикладу на рис. 3.26 представлено розроблені плазмотрони ПР-3 та ПР-6, що встановлені на експериментальному стенді.



а)

б)

Рисунок 3.26 – Плазмотрони ПР-3 (а) та ПР-6 (б) на експериментальному стенді

Висновки до розділу 3

1. Створено плазмотрони для різання металу товщиною до 400 мм потужністю від 40 до 300 кВт.

2. Для підвищення резусу роботи, потужності та ефективності в розроблених плазмотронах для різання металу застосований спосіб розподілу прив'язки дуги за довжиною розрядного каналу або по розташованим в ньому термоємисійним електродам.

3. Вперше для різання металу великої товщини (понад 100 мм) розроблений секційний плазмотрон з порожнистим електродом в циліндричній порожнині якого розташовані термоємисійні вставки (з вольфраму) захищені від ерозії робочого газу (повітря) аргонем низького тиску, що сприяє утворенню дифузійної прив'язки дуги і підвищенню струму дуги понад 800 А.

4. Отримані рекомендації та емпіричні залежності для вибору геометрії розрядного каналу, діаметру катодних вставок і прикатодної секції.

5. Наведена структура прикатодної області для плазмотронів з термоємисійними електродами дозволила розрахувати геометрію розрізного каналу з урахуванням нагріву і охолодження катода плазмотрона при його роботі.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА РЕЖИМІВ РОБОТИ РОЗРОБЛЕНИХ ПЛАЗМОТРОНІВ

4.1 Особливості роботи розроблених плазмотронів для різання

Плазмотрони для різання металу найчастіше використовуються в заготівельному виробництві. Вони відрізняються один від одного груповими ознаками, що пов'язані з особливостями призначення та умовами їх роботи. Найбільших змін в розроблених нами плазмотронах зазнав електродний вузол (рис. 4.1.) [113].

Це було пов'язане із застосованими плазмоутворюючими (робочими) газами, потужністю та ресурсом роботи. У всіх наведених в табл. 3.1 (див. розд. 3) плазмотронах плазмоутворюючий газ подається в розрядну камеру крізь тангенціальні отвори завихрювача. Вихрова подача плазмоутворюючого газу обумовлює створення газового циклона, який інтенсивно переміщує опорну пляму дуги по поверхні електроду, не допускаючи його локального нагріву та розплавлення [106]. Крім того, газовий циклон, що утворюється, створює ефективну теплову ізоляцію дуги від стінок розрядної камери (електроду та сопла) та забезпечує стабільне положення стовпа дуги на осі розрядної камери в зоні найменшого статичного тиску. Стикаючись з електричною дугою, робочий газ нагрівається та крізь сопло збігає назовні у вигляді високотемпературного та високошвидкісного потоку, який розплавляє та видаляє метал із площини різку. Внутрішній та сопловий електроди охолоджуються проточною водою. Один полюс джерела живлення підключається до електроду, інший до розрізуваного металу та крізь баластний опір (рис. 4.2) до сопла [106, 108]. При запуску плазмотрона спочатку запалюється дуга в мінімальному зазорі між внутрішнім та сопловим електродами за допомогою осцилятора.

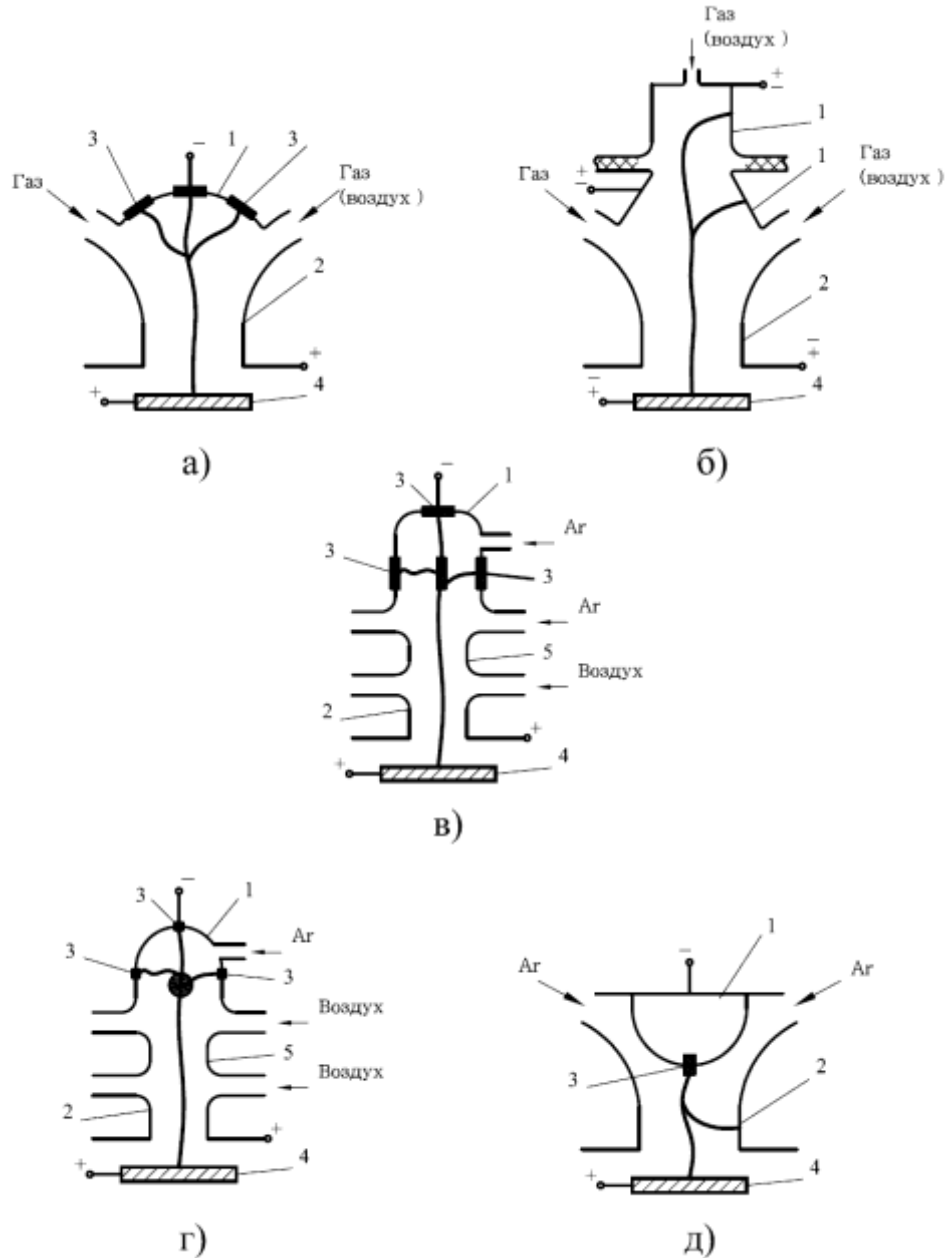


Рисунок 4.1 – Принципові схеми плазмотронів для різання металу великих товщин: а – з порожнистим катодом та термомеханічними вставками; б – з порожнистим розділеним катодом; в, г – з порожнистим катодом, термоємійними вставками МЕВ; д – з термоємійною вольфрамовою вставкою; 1 – електрод; 2 – сопло; 3 – термовставки; 4 – розрізуваний метал; 5 – МЕВ

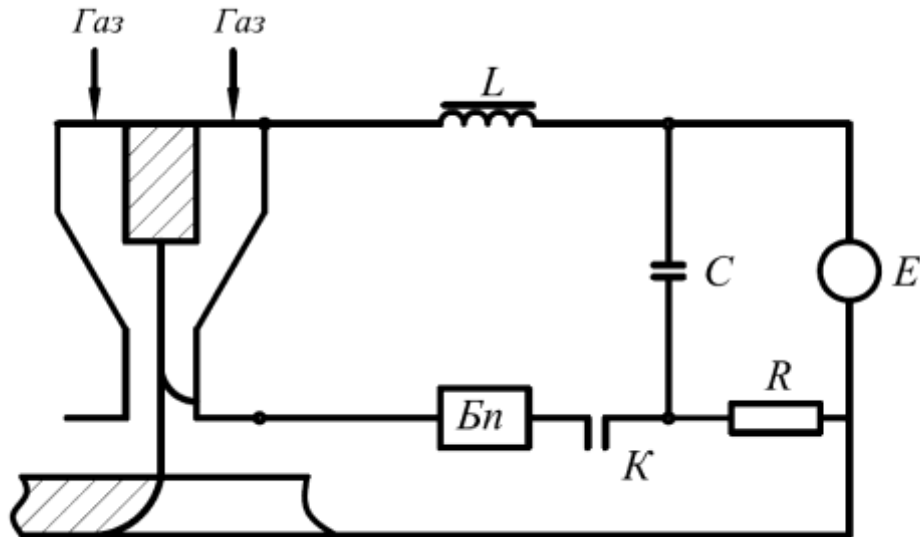


Рисунок 4.2 – Схема включення плазмотрону для різання: E – джерело живлення; $Бп$ – блок підпалу; C – ємність; L – індуктивність; R – опір; K – контакт контактору

Утворена дуга розтягується вздовж вісі розрядної камери (каналу), збігає у вигляді потоку плазми (струменя) крізь сопло, торкається розрізуваного металу, та утворюється робоча дуга. Ланцюг чергової дуги електрод-сопло розмикається.

Під дією газового вихорю та пондеромоторного зусилля радіальна ділянка та опорна пляма дуги прив'язуються до внутрішнього електроду. Прив'язка дуги визначається конструкцією електродного вузла, а також параметрами режиму роботи плазмотрону.

Найважливішою відмінною особливістю ріжучого плазмотрону з дугою, що переходить на метал, є інтенсивне обтиснення дугового стовпа на виході з розрядного каналу стінками сопла при одночасному проходженні крізь нього потоку плазмоутворюючого газу. В цьому випадку різко обмежується діаметр дуги, підвищується питома щільність струму, температура дуги та щільність теплової енергії. Плазмова дуга, яка стискається та формується сопловим

каналом, має значно більшу просторову стабільність, ніж вільно палаюча дуга, що забезпечує отримання в розрізаному металі мінімальної ширини різку з порівняно рівними та гладкими крайками.

Іншою відмінною особливістю ріжучих плазмотронів є те, що в робочому режимі в розрядному каналі плазмотрону розташовуються тільки одна опорна пляма дуги та тільки частина дугового стовпа. Друга опорна пляма дуги та значна частина стовпа знаходяться всередині порожнини розрізаного металу. Таким чином, розрядний канал плазмотрону та порожнина різку утворюють єдину систему, яка забезпечує умови та особливості горіння плазмової дуги. В цьому випадку характеристики дуги та стійкість її горіння залежать не тільки від параметрів плазмотрону, але також від властивостей та геометричних параметрів розрізаного металу і, що є особливо важливим, від швидкості пересування плазмотрону над розрізуваним металом. При швидкості пересування плазмотрону менше лінійної швидкості виплавлення металу на всю товщину виробу відбувається обрив дуги. Якщо ж швидкість пересування плазмотрону дуже велика, то прорізання виробу відбувається не на повну товщину. Крім того, від швидкості пересування плазмотрону залежать і якісні показники розділового різання. При швидкості пересування менше оптимальної утворюється скіс крайок з розширенням в нижній частині різку, а при швидкості більше оптимальної, навпаки, із звужуванням площини різку в нижній частині.

Горіння дуги в плазмотроні супроводжується різноманітним складним та взаємопов'язаним фізичним явищем: електромагнітним, тепловим, хімічним, дифузійним, гравітаційним та ін. В загальному вигляді вся сукупність процесів обумовлюється перетворенням потоків речовини та енергії. Оскільки в плазмотроні не акумулюється ані енергія, ані речовина, то схема введення та відводу їх потоків представлена на рис. 4.3. В плазмотрон вводяться потоки енергії та плазмоутворюючого газу. Причому останній проходить крізь плазмотрон, практично не змінюючи своєї маси.

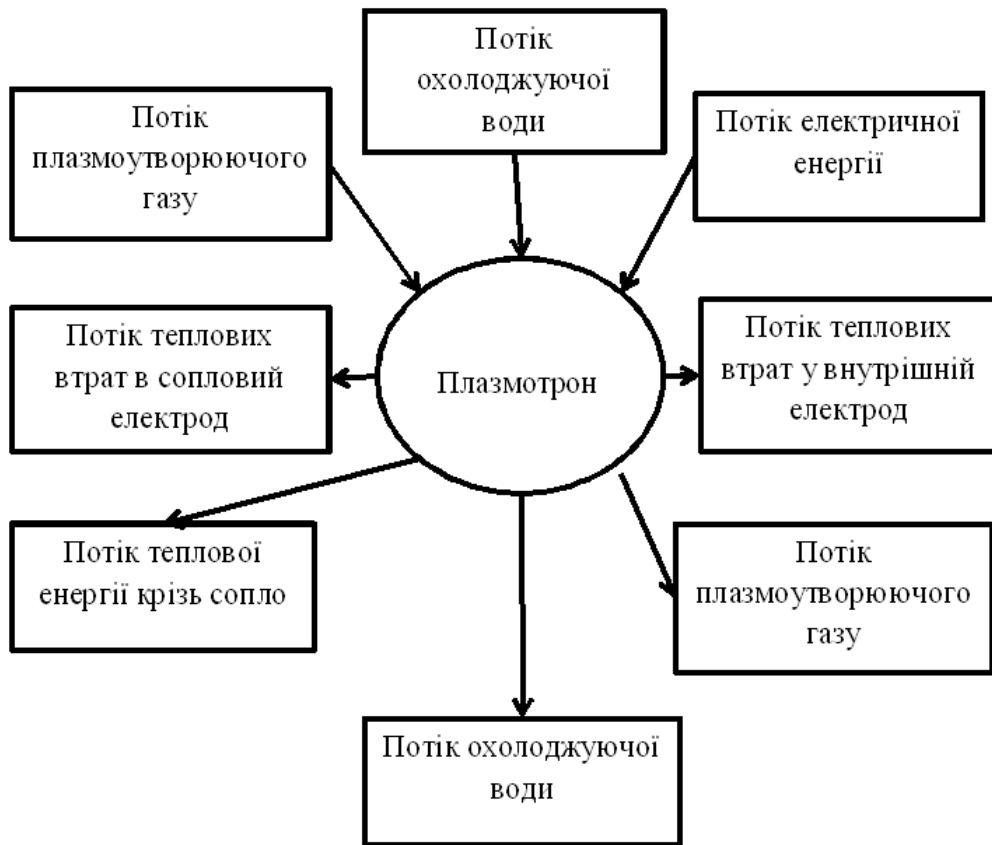


Рисунок 4.3 – Схема потоків енергії та речовин в ріжучому плазмотроні

Вхідний в плазмотрон потік енергії частково витрачається на корисну роботу нагріву газу, а частково губиться у внутрішньому та сопловому електродах та уходить з охолоджуючою водою.

Між плазмовою дугою та внутрішнім, і сопловим електродами, а також стінками порожнини різку існує різниця потенціалів. При електричному пробі дуги, на стінці порожнини різку відбуваються мілко та крупномасштабні шунтування, аналогічно процесу шунтування в плазмотронах лінійної схеми [6, 19]. Шунтування дуги на стінки каналу сопла до аварійного режиму роботи плазмотрону для різання – подвійне дугоутворення, коли плазмова дуга розділяється на дві паралельно палаючі дуги. Звичайно дугові плями на сопловому каналі малорухомі та інтенсивно руйнують його.

Відносно ріжучих плазмотронів з термоемісійними катодами ПР-1, ПР-2, ПР-3, ПР-4, ПР-5 (див. розд. 3), робота плазмотрону з мідним порожнистим електродом ПР-6 характеризується деякими особливостями. По перше, в ньому подовжується внутрішньокамерна частина дуги, що обумовлює, з одного боку, більш високе робоче напруження, а, відтак, і електричну потужність плазмотрону.

З іншого боку, подовження внутрішньої частини дуги приводить до збільшення втрат тепла і стінки електроду, тобто до певного зниження теплового ККД плазмотрону. По друге, через інтенсивне пересування опорної плями дуги та його поділу внутрішній мідний електрод працює при невисокій температурі нагріву (420 – 470 К), тобто практично в «холодному» режимі. Це дозволяє усунути залежність електроду від плазмоутворюючого газу. Плазмотрон з мідним електродом надійно працює як на нейтральному газі, так і на кисневмісних газах, в том числі і на чистому кисні [114].

По третє, інтенсивне пересування опорних плям по внутрішній порожнині електроду потребує створення строго сформованого газового вихорю всередині розрядного каналу. Вихрова стабілізація дуги забезпечує також хорошу теплоізоляцію стовпа дуги від стінок розрядного каналу та ефективно стискання дуги в каналі сопла. Однак наявність тангенціальної складової в потоку плазми на виході з сопла є причиною його розширення по мірі віддалення від зрізу сопла.

По четверте, мідний електрод, що працює в «холодному» режимі, не вибірковий відносно полярності дуги. Якщо термохімічний електрод може працювати тільки на прямій полярності, тобто може бути катодом, і повністю не допускає роботу в режимі аноду, то мідний електрод надійно працює і в якості катода, і в якості анода. Більш того, мідний електрод успішно забезпечує горіння дуги змінного струму [112].

Крім того, плазмотрон з мідним електродом не має обмежень за числом його запусків у роботу.

4.2 Дослідження електричних характеристик

4.2.1 Потужність ріжучого плазмотрону

Електрична потужність плазмотрону – один з основних факторів, що визначають продуктивність процесу різання металів [28]. Подальше підвищення продуктивності різання і збільшення товщини розрізуваного металу потребує створення більш потужних плазмотронів. Підвищити електричну потужність ріжучого плазмотрону можливо або шляхом підвищення величини робочого струму, або за рахунок підвищення робочої напруги плазмової дуги [19]. Кожен з цих способів має переваги та недоліки.

Основною перевагою підвищення потужності за рахунок збільшення робочого струму є легкість здійснення цього способу шляхом зміни параметрів джерела живлення. Тому на практиці отримало широке застосування регулювання потужності ріжучого плазмотрону за рахунок зміни величини робочого струму. Однак підвищення робочого струму викликає необхідність збільшення діаметра сопла, а, відтак, і ширини різку зі всіма негативними наслідками. Крім того, зростання величини робочого струму викликає підвищення ерозії електродів та соплового наконечника [115].

Підвищення електричної потужності ріжучого плазмотрону за рахунок збільшення робочої напруги дуги є більш прийнятним, оскільки в цьому випадку ерозія електродної системи практично не змінюється та не має потреби збільшувати перетин сопла. Останнє чинить сприятливу дію на інші енергетичні характеристики плазмотронів, і зокрема, на підвищення питомої потужності ріжучої дуги. Слід відмітити, що робоча напруга плазмової дуги не піддається безпосередньому регулюванню. Величина напруження дуги обумовлюється режимними та конструктивними параметрами плазмотрона: величиною робочого струму, витратою плазмоутворюючого газу, швидкістю пересування плазмотрона над розрізуваним металом, відстанню між

розрізуваним металом та зрізом сопла, заглибленням дуги всередину плазмотрону, діаметром та довжиною сопла, складом плазмоутворюючого газу та ін.

Загальна перевага представлених на рис. 4.1 варіантів електродних вузлів плазмотронів – це можливість розщеплення опорної плями дуги на декілька опорних плям, що призводить до зниження точкового струмового навантаження в плямі і до підвищення ресурсу роботи електроду. Іншими словами до рівномірного розподілу ерозії по поверхні електроду. Вказана перевага дозволяє підвищити потужність плазмотрона за рахунок збільшення робочого струму.

Залежність електричної потужності плазмотрона від факторів впливу зручно дослідити з використанням вольт-амперних характеристик, які інтегрально представляють основні властивості плазмової дуги [113].

Експериментальні дослідження електричних характеристик дуги виконувались на експериментальному устаткуванні з джерелом АПР–403, яке забезпечує плавне регулювання робочого струму в діапазоні 150–400 А. З метою підвищення напруги на дузі два джерела АПР–403 вмикалися послідовно. В основу досліджень було покладено плазмотрон ПР-6 зі змінним розрядним каналом електроду (рис. 4.4).

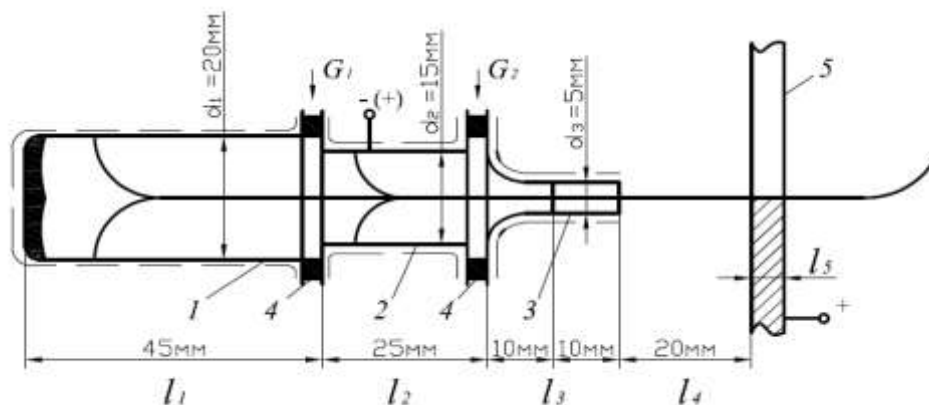


Рисунок 4.4 – Схема експериментального плазмотрону ПР–6: 1, 2 – електрод; 3 – сопло; 4 – ізолятор; 5 – розрізуваний метал

Електрод плазмотрона розділений ізолятором на дві частини. Одна з них представляє склянкоподібну деталь 1 внутрішнім діаметром d_1 , а друга – циліндр 2 з порожнистим отвором діаметром d_2 . Робочий газ (повітря) в розрядний канал плазмотрону подається крізь вихрові камери, розташовані в ізоляторах 4 між деталями 1 та 2, а також між соплом 3 та деталлю електроду 2.

Розділення електроду на дві самостійні ділянки дозволило збільшити робочий струм, знизити щільність струму в опорних плямах дуги та підвищити ресурс роботи електроду.

Досліджуваний плазмотрон (див. рис. 4.4) має п'ять характерних ділянок дуги: всередині порожнього електроду ℓ_1 (ділянка 1), вздовж другої частини електроду ℓ_2 (ділянка 2), вздовж сопла ℓ_3 (ділянка 3), відкрита частина дуги від зрізу сопла до поверхні розрізаного металу ℓ_4 (ділянка 4), всередині щілинного розрізу металу ℓ_5 (ділянка 5). Зміна довжини дуги в кожній з цих ділянок при незмінній довжині дуги на інших ділянках дозволяє визначити величину напруженості електричного поля за зміною величини загальної напруги на дузі в залежності від режимів роботи плазмотрона та геометрії розрядного каналу. Розрядний канал досліджуваного плазмотрона має наступні основні геометричні розміри: $d_1 = 15\text{--}30$ мм, $d_2 = 10\text{--}25$ мм, $d_3 = 3\text{--}6$ мм, $\ell_1 = 45$ мм, $\ell_2 = 25$ мм, $\ell_3 = 20\text{--}30$ мм, $\ell_4 = 10\text{--}30$ мм, які найбільш істотно впливають на глибину прорізання. Крім того враховуючи, що заглиблення дуги в метал залежить від статичних та динамічних характеристик джерела живлення дуги, то для забезпечення стійкості режиму горіння дуги напруження холостого ходу на плазмотроні підтримувалось 850 В, тобто з більшим запасом граничної потужності [112]. Витрати повітря G_1 та G_2 визначались ротаметрами РС-3 та РС-5, охолоджуючої води – ротаметрами РС-7. Температура води вимірювалась фізичними термометрами з ціною ділення 1°C. Напруження та струм дуги реєстрували відповідно приборами В-1500/5 та М105/1.

На рис.4.5. приведені вольт-амперні характеристики, отримані при різних витратах плазмоутворюючого газу (рис. 4.5, а), діаметрах сопла (рис. 4.5, б), довжинах циліндричної ділянки сопла (рис. 4.5, в) та відстанях від зрізу сопла до поверхні розрізуваного металу (рис. 4.5, г). З характеристик видно, що зростання струму в діапазоні 100–400 А приводить до незначного змінення напруження на дузі. Порівняння кривих (рис. 4.5, а) свідчить про те, що підвищення витрат робочого газу від 0,5 до 1,25 г/с викликає істотне збільшення напруження на дузі. В середньому ця величина складає 80 В на 1 г/с.

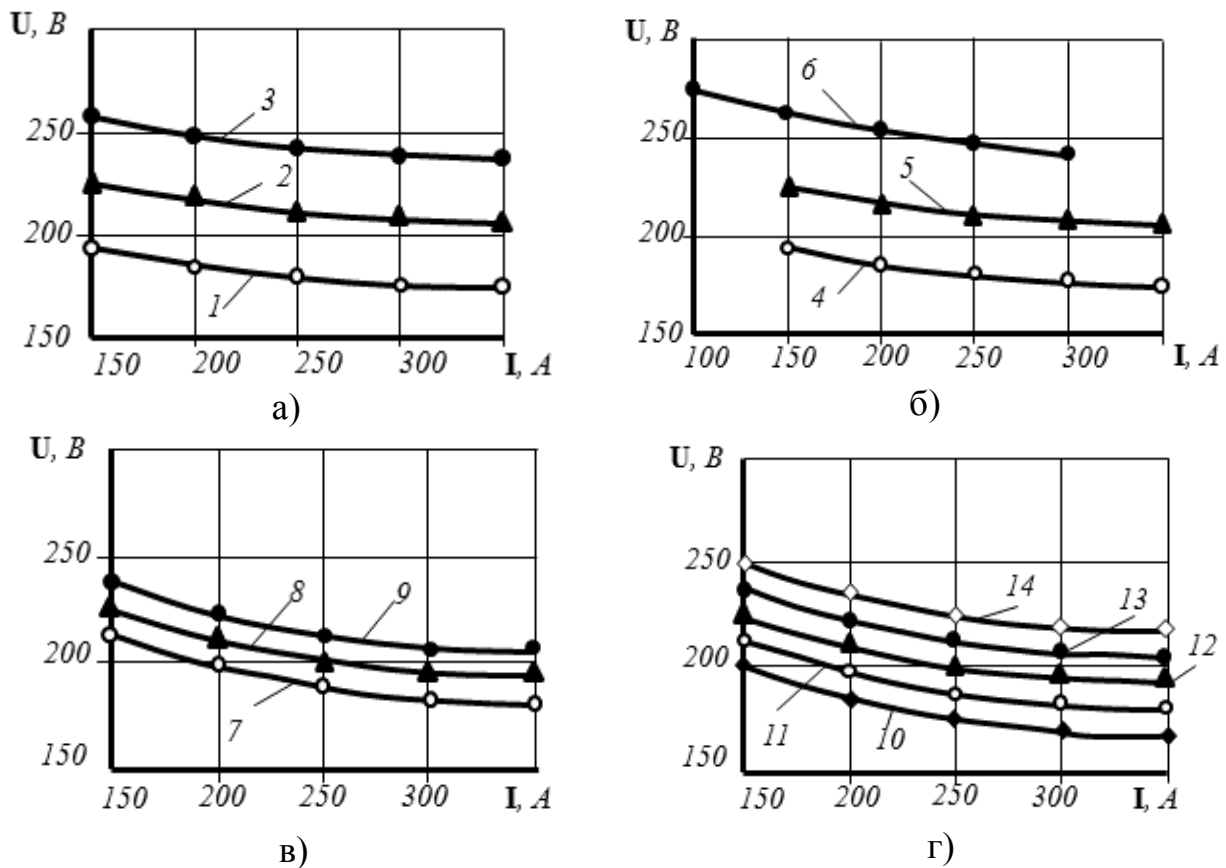


Рисунок 4.5 – Вольт-амперні характеристики плазмотрону, отримані при витраті плазмоутворюючого газу (повітря): 1 – 0,54; 2 – 0,9; 3 – 1,25 г/с; діаметрі циліндричної ділянки сопла: 4 – 5; 5 – 4; 6 – 3 мм; довжині циліндричної ділянки сопла: 7 – 5; 8 – 8; 9 – 10 мм; відстані від зрізу сопла до розрізуваного металу: 10 – 5; 11 – 10; 12 – 15; 13 – 20; 14 – 25 мм

Збільшення діаметру сопла в діапазоні від 3 до 5 мм, знижує напруження на дузі. Причому інтенсивність зниження напруження при малих діаметрах сопла більше, ніж при великих діаметрах. Було встановлено, що збільшення довжини сопла на 1 мм приводить до росту напруження на дузі на 5 В, а збільшення відстані від зрізу сопла до поверхні металу – (2–3) В/мм.

4.2.2 Вплив змінення опору дуги на роботу системи джерела живлення дуги

На рис. 4.5 приведені статичні вольт-амперні характеристики електричної дуги, стабілізованої повітряним вихором. Кожна крива (рис. 4.5, а) відповідає певному значенню витрат повітря на плазмотрон. В цих експериментах електрична дуга живилась від джерела з великим запасом граничної потужності, тобто $g_2 = \left(\frac{\partial U_u}{\partial I_o} \right) \cong 0$ диференційний опір джерела в досліджуваній робочій точці. Тому умовами стійкості є нерівності [5]:

$$R' + R^* > 0, \quad C R' + R^* > 0, \quad (4.1)$$

а верхньою межею області стійкості – рівність:

$$R^* + R' = 0. \quad (4.2)$$

Тут R' , L – омичний опір та індуктивність ланцюга джерела живлення;
 $R^* = \frac{dU_0}{dI_0}$ диференційний опір дуги.

Вольт-амперні характеристики вільних дуг є падаючими і замість $U = f(I)$ слід вводити більш загальну характеристику $U = f\left(I \frac{\partial U_0}{\partial I_0}\right)$ [115].

З урахуванням наведеного, дуга в плазмотроні як електричне навантаження, являє собою активний нелінійний опір, величина якого змінюється в широких межах в залежності від конструктивних параметрів плазмотрона та режиму процесу різання. Основними факторами, які впливають на опір дуги, є та ж робоча сила струму, витрата плазмоутворюючого газу (повітря), діаметр сопла, довжина циліндричної ділянки сопла та довжина зовнішньої ділянки дуги (тобто відстань між зрізом сопла та металом).

Для вивчення впливу різних факторів на величину опору дуги розглянемо її характеристики, які виражають залежність опору ріжучої дуги від величини струму (рис. 4.6). Величина опору дуги із зростанням робочого струму знижується по нелінійному закону. При чому на малих струмах інтенсивність зниження більше, ніж на великих. В середньому при збільшенні струму від 150 до 300 А, тобто в два рази, опір дуги зменшується також в два рази.

Збільшення витрат плазмоутворюючого повітря від 0,54 г/с (крива 1, рис. 4.6, а) до 1,26 г/с (крива 3) при незмінному значенні діаметра сопла 4 мм, довжині циліндричної ділянки сопла 8 мм та довжині зовнішньої частини дуги 15 мм викликає істотне зростання опору дуги. При робочому струмі 300 А він складає 0,28 Ом/г/с, а при струмі 150 А – 0,65 Ом/г/с. Збільшення діаметра сопла, навпаки, приводить до зниження величини опору дуги (рис. 4.6, б). Для струму 300 А збільшення діаметра сопла на 1 мм викликає зниження опору на 0,1 Ом, а при струмі 150 А – на 0,2 Ом. Збільшення довжини циліндричної ділянки сопла приводить до росту опору дуги (рис. 4.6, в), що обумовлюється подовженням ділянки дуги, яка є більш інтенсивно стиснутою в сопловому каналі. Причому зростання складає від 20 Ом/м до 40 Ом/м. Подовження зовнішньої частини ріжучої дуги (рис. 4.6, г), як і слід було очікувати, викликає

збільшення опору дуги. В досліджуваному діапазоні змінення робочого струму 150-350 А зростання опору знаходиться в межах від 10 Ом/м до 20 Ом/м.

З отриманих графіків видно ярко виражене нелінійне змінення опору ріжучої дуги в залежності від величини робочого струму.

На рис. 4.6 в показано характер і інтенсивність впливу досліджуваних факторів на опір дуги в Ом [115]. Найбільший вплив на зміну останнього чинить робочий струм, особливо в діапазоні його малих значень. Зменшення струму на 40 % від середнього значення 250 А викликає зростання опору на 80 %, а збільшення струму на 40 % від середнього значення приводить до зниження опору на 30 %.

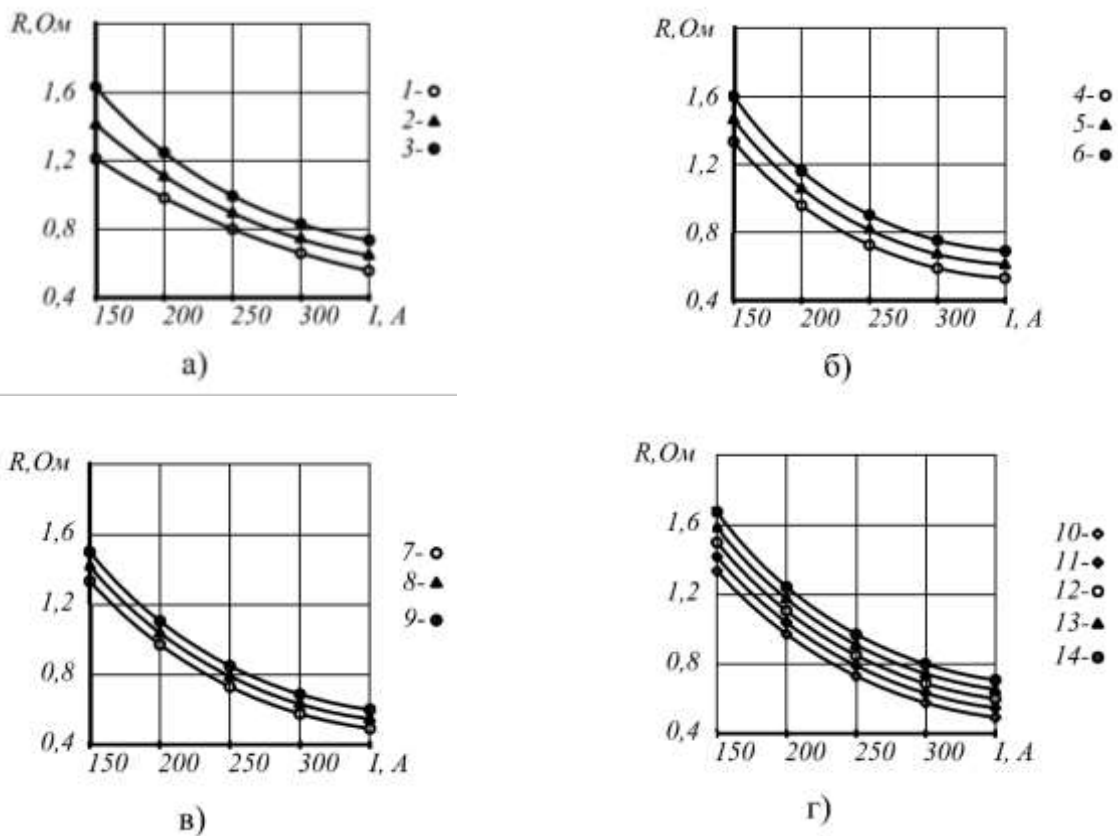


Рисунок 4.6 – Характеристики залежності опору дуги від величини робочого струму при плазмоутворюючого газу (повітря): 1 – 0,64; 2 – 0,9; 3 – 1,26 г/с; діаметрі сопла; 4 – 5; 5 – 4; 6 – 3 мм; довжині циліндричної ділянки сопла: 7 – 5; 8 – 8; 9 – 11 мм; відстані від зрізу сопла до металу: 10 – 5; 11 – 10; 12 – 15; 13 – 20; 14 – 25 мм

Другим за значимістю чинним фактором є діаметр сопла. Причому функціональна залежність опору дуги від останнього також нелінійна і зворотно пропорційна. Зменшення діаметру на 25 % від середнього значення приводить до зростання опору на 17 %, а аналогічне збільшення діаметру викликає зниження опору на 11 %.

Пояснення розглянутого характеру впливу діаметра сопла на опір дуги полягає в тому, що зі зменшенням діаметр сопла виникає стискання дугового стовпа, тим інтенсивніше, чим менше сопло. При стисканні дуги зменшується її провідність та збільшується опір.

В досліджуваному діапазоні змінення витрат повітря його вплив на опір дуги носить практично прямо пропорційний характер. Змінення витрат повітря на 40 % від середнього значення приводить до відповідного змінення опору на 15 %.

З досліджуваних факторів найменший вплив на опір дуги чинять довжина циліндричної ділянки сопла та довжина відкритої частини дуги. Залежності опору дуги від вказаних факторів прямо пропорційні та практично однакові. При змінненні досліджуваних факторів на 40% від їх середніх значень опір дуги змінюється лише на 8 % [114].

4.2.3 Напруженість електричного поля ріжучої дуги

Напруженість електричного поля і розподіл потенціалу вздовж дуги в основному досліджувались для відкритих та каналових дуг з фіксованим положенням опорних плям [15, 45]. Величини потенціалів в різних точках дуги визначалися різними способами. Для відкритих дуг використовувалися рухомі зонди [79], в каналових – рухомі зонди та електроди з ізолюваних одне від одного секційних кілець [116]. В останньому випадку кільцеві секції при високому опорі у вимірювальному ланцюгу є по сутності також зондами,

потенціал яких дорівнює потенціалу деякої точки дуги, що розташована на вісі цього кільця.

Слід відзначити, що використання наведених методів для дослідження розподілу потенціалів вздовж ріжучої дуги ускладнене через те, що значна частина дуги розташована в середині плазмотрона та в глибині розрізаного металу. Більш простим та достатньо точним методом при умові дотримання строгої стабілізації дуги вздовж вісі плазмотрона та опорної плями на внутрішньому електроді є метод змінення довжини дуги [116].

Як вже відмічалось, плазмотрон ПР-6 (рис. 4.4) має п'ять характерних ділянок дуги. Зміненням довжини дуги в кожній з цих ділянок на деяку величину при незмінній довжині дуги на інших ділянках по зміні загального напруження на дузі можна визначити величину напруженості електричного поля та її зміну в залежності від режимів роботи та геометричних параметрів електродної системи плазмотрона.

На першій ділянці дуга розташовується всередині порожнього стаканоподібного електроду, діаметр якого в 5–10 раз більше діаметра дуги. Довжина цієї ділянки знаходиться в межах 2–5 діаметрів електроду. Ця ділянка характеризується складною аеродинамікою витікання плазмоутворюючого газу вздовж стінок та вздовж вісі електроду, а також складним профілем зміни тиску в радіальному напрямку. При вихровій подачі газу найбільша щільність та тиск спостерігаються поблизу стінок, тоді як вздовж вісі плазмотрона встановлюється зона пониженого тиску. Завдяки цьому забезпечується стабілізація стовпа дуги вздовж вісі електроду.

Друга характерна ділянка дуги розташовується в циліндрі, діаметр якого в 3–5 раз більше діаметру дуги.

Третя ділянка дуги розміщується всередині сопла плазмотрону. Діаметр сопла звичайно можна порівняти з діаметром дуги та він може змінюватися у межах (3–6) мм. Довжина сопла складає 1–3 розміри його діаметру. На цій

ділянці дуговий стовп інтенсивно обтискається стінками сопла та потоком плазмоутворюючого газу.

На четвертій ділянці між зрізом сопла та розрізуваним металом, дуга горить у відкритому просторі, але в інтенсивному потоці газу.

І, нарешті, на п'ятій ділянці всередині щілинного розрізу вглиб металу дуга обмежена з трьох боків стінками щілини та знаходиться під впливом інтенсивного газового потоку.

Таким чином, умови горіння дуги на всіх ділянках істотно відрізняються. Це проявляється наявністю змінного тиску вздовж дуги, різних умовах взаємодії газового потоку з дугою та просторового обмеження дуги стінками розрядного каналу.

За умовами практичного використання плазмотронів для розділового різання металів найбільший інтерес представляють три останні ділянки. З них ділянка дуги вздовж сопла істотно впливає як на електричні параметри плазмової дуги, так і на газодинамічні характеристики потоку плазми. На цій ділянці внаслідок інтенсивного обтискання та обдування дуги напруженість електричного поля, вочевидь, є найбільшою порівняно з іншими ділянками. Електричні параметри плазмової дуги на виході з сопла та на деякому віддаленні від нього є визначними при розгляданні питання нагріву, розплавлення та видалення металу з порожнини різу. Величина напруженості електричного поля на розглянутих ділянках залежить від низки геометричних параметрів та режимних факторів. До них слід віднести, в першу чергу, діаметр сопла, витрату плазмоутворюючого повітря та величину робочого струму [112, 114].

Дослідження впливу вказаних факторів на напруженість електричного поля дуги ріжучого плазмотрону проводилось експериментально методом зміни довжини дуги на ділянках від зрізу сопла до розрізуваного металу та всередині циліндричної ділянки соплового каналу. Кожне значення напруженості поля визначалось як середнє за 5–10 вимірами.

На рис. 4.7 приведено експериментальні графіки зміни середнього значення напруженості електричного поля зовнішньої частини дуги в функції від величини робочого струму при різній витраті плазмоутворюючого повітря. Геометрія соплового каналу при цьому залишалась незмінною: діаметр циліндричної ділянки сопла 4 мм, а довжина – 8 мм. Довжина зовнішньої частини дуги змінювалась від 5 мм до 25 мм.

Як впливає з графіка, напруженість електричного поля дуги нелінійно та незначно знижується із зростанням струму. Такий вид залежності є характерним для відкритих дуг. Однак величина напруженості стовпа дуги (2,2–3,8) В/мм значно перевищує напруженість електричного поля вільно палаючих дуг, для яких величина напруженості, що виміряна за допомогою потенційних зондів при робочих струмах 150–250 А, складає 1 В/мм.

Отримані значення напруженості електричного поля зовнішньої частини дуги ріжучого плазмотрона істотно перевищують також напруженість поздовжньо обдуваних дуг в циліндричних каналах електродугових нагрівачів газу, величина якої при вимірюванні методом подовження дуги склала (1,2 – 2,8) В/мм [12].

Високі значення напруженостей електричного поля зовнішньої частини стовпа дуги ріжучого плазмотрона обумовлені інтенсивним обтисканням дуги в сопловому каналі, діаметр якого звичайно можна порівняти з діаметром стовпа дуги. При збільшенні витрат плазмоутворюючого повітря напруженість – амперні характеристики дуги переміщуються на графіку вгору. Збільшення діаметра циліндричної ділянки сопла, навпаки, викликає зниження напруженості електричного поля дуги (рис.4.7, б).

Причиною цього є збільшення обтискання стовпа дуги в сопловому каналі із зростанням витрат плазмоутворюючого повітря та зменшенням обтискання дуги при збільшенні діаметра сопла.

Таким чином, відкрита ділянка ріжучої дуги володіє якісною характеристикою відкрито палаючого дугового розряду, але кількісно його параметри залежать від умов обтискання дуги в сопловому каналі ріжучого плазмотрона.

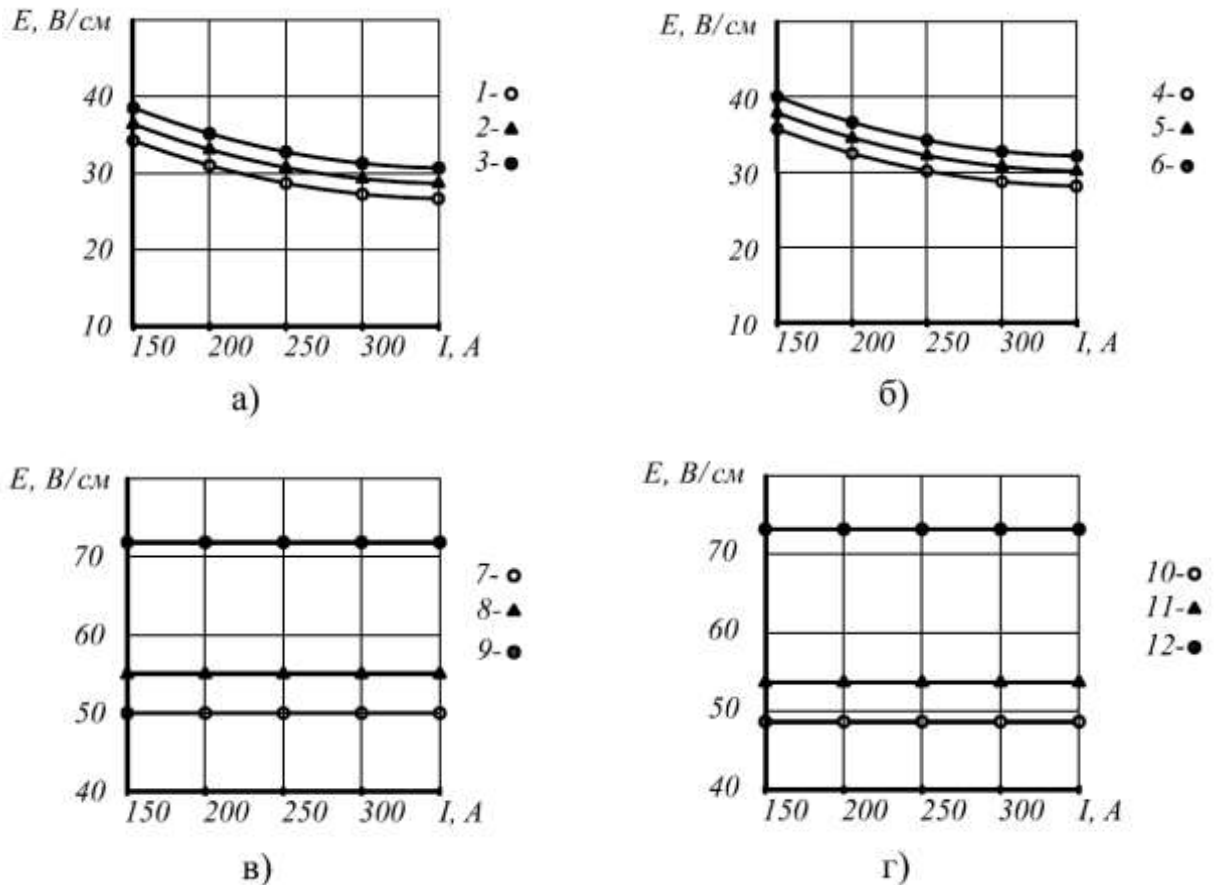


Рисунок 4.7 – Зміна напруженості електричного поля відкритої (а, б) та соплової (в, г) ділянок ріжучої дуги в залежності від робочого струму при витраті плазмоутворюючого газу (повітря); 7 – 0,54; 2 і 8 – 0,9; 3 і 9 – 1,26 г/с; та діаметрі сопла: 4 і 10 – 5; 5 і 11 – 4; 6 і 12 – 3 мм

На рис.4.8, а показано в зіставленні вплив кожного з досліджених факторів на напруженість поля відкритої частини дуги. Найбільший вплив чинить діаметр сопла. При змінненні його на 25 % зростання напруженості складає 15–16 %, тобто коефіцієнт впливу знаходиться в межах 0,6–0,64. Ця залежність близька до лінійної.

Вплив витрати плазмоутворюючого повітря в досліджуваному діапазоні його змінення від 0,54 г/с до 1,26 г/с є практично прямо пропорційним. При зміні витрат на 40 % напруженість змінюється на 15–16 %, тобто коефіцієнт впливу набуває значення 0,38 – 0,4. І, нарешті, найменший вплив на напруженість електричного поля чинить струм дуги. Причому залежність між цими параметрами нелінійна. Коефіцієнт впливу складає 0,04 при великих значеннях струму та 0,46 при малих значеннях струму.

При розробці конструкцій ріжучих плазмотронів та оптимізації режимів їх роботи важливо також знати взаємозв'язок між напруженістю електричного поля ділянки дуги, розташованій в сопловому каналі, та чинними факторами, перш за все, робочим струмом, витратою плазмоутворюючого повітря та діаметром сопла. Для встановлення цих залежностей проведено серію експериментів, в яких використовувався метод зміни довжини дуги всередині циліндричної ділянки соплового каналу шляхом зміни довжини останнього від 5 мм до 10 мм.

Як показали дослідження (рис 4.7, в, г) напруженість електричного поля дуги всередині сопла із зростанням робочого струму незначно зростає. В першому наближенні її можна прийняти не залежною від струму. Величина напруженості електричного поля дуги в діапазоні зміни витрати повітря (0,54 – 1,26) г/с (рис.4.7, в), діаметра сопла (3 – 5) мм (рис. 4.7, г) та робочого струму 150–300 А знаходиться в межах (50 – 77) В/см, що приблизно вдвічі більше напруженості поля відкритої частини дуги та в 5–8 разів – вільно палаючої дуги.

На рис. 4.8, б наведені в порівнянні графіки залежностей між напруженістю електричного поля дуги в сопловому каналі і чинними факторами. Найбільший вплив на напруженість чинить діаметр сопла.

Коефіцієнт впливу для нього складає 0,24 при діаметрі 5 мм, 0,86 при 4 мм та 1,47 при 3 мм. Причому досліджувана залежність є зворотною та істотно нелінійною [101].

Великий вплив на напруженість чинить витрата плазмоутворюючого газу (повітря), особливо при великих його значеннях. Ця залежність також є нелінійною, але на відміну від попередньої зі збільшенням витрати газу напруженість поля зростає. Коефіцієнт впливу для витрати газу дорівнює 0,17 при витраті повітря 0,54 г/с, 0,5 при 0,9 г/с та 1,0 при 1,26 г/с.

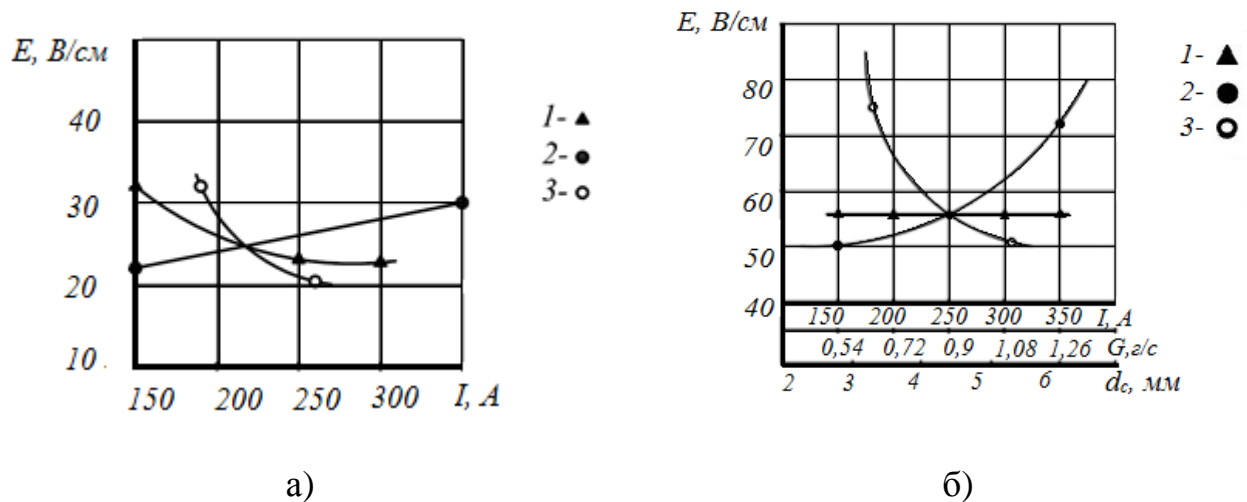


Рисунок 4.8 – Зміна напруженості електричного поля відкритої (а) та соплової (б) ділянок ріжучої дуги в залежності від робочого струму (1), витрати плазмоутворюючого газу (2) та діаметру сопла (3)

4.3 Дослідження теплових характеристик плазмотрона

4.3.1 Тепловий ККД

Величина теплового ККД (см. (2.7) та (3.17)) плазмотрону для різання визначається цілим рядом параметрів. Перш за все, це витрата робочого газу, величина струму дуги та напруження.

Істотний вплив на ККД чинять геометричні розміри електроду, камер сопла та конструктивне їх виконання. Певну роль відіграють й інші фактори, від яких залежить режим горіння дуги в плазмотроні: матеріал електродів, полярність, спосіб формування стабілізуючого потоку газу і т.п.

Слід відзначити, що втрати тепла в електроді та соплі плазмотрона відбуваються внаслідок конвективного теплообміну між потоком плазми та їх стінками, випромінювання дуги, що знаходиться в розрядному каналі, а також теплових процесів, що відбуваються в опорних плямах дуги.

Величина теплових втрат в стінку розрядного каналу крізь опорні плями визначається фізичними процесами, які залежать від геометричних параметрів, особливостей підключення електроду та сопла до джерела живлення, величини робочого струму, виду стабілізації дуги, витрати і складу плазмоутворюючого газу [70].

Оскільки в сталому режимі роботи плазмотрона сопло не включене в ланцюг протікання струму, можна вважати, що тепловий потік від розташованої вздовж вісі сопла дуги, на його стінки здійснюється в основному механізмом теплопровідності.

Експериментальні дослідження теплових втрат виконувались калориметричним методом. При цьому вимірювалась температура води на вході та виході, а також її витрата. Дуга плазмотрона прив'язувалась на мідний водоохолоджуваний обертовий диск. Похибка вимірювань теплового потоку, оцінена за відомими правилами (див. розділ 2) не перевищувала 11 %.

В процесі досліджень було встановлено, що характер теплових процесів різний для випадків, коли електрод працює в режимі аноду або катоду.

До теперішнього часу теорія анодної плями розроблена не достатньо повно. В більшості досліджень розглядаються умови та закономірності розвитку існування анодних плям на розплавлених поверхнях. Набагато менше праць присвячено дослідженню анодних плям на "холодних" електродах з різних матеріалів, в том числі і з міді [45].

Дослідження анодних плям [117] дозволило встановити, що їх динаміка розвитку та параметри визначаються теплофізичними характеристиками матеріалу анода, величиною струму дуги, температурою робочої поверхні анода, тиском навколишнього середовища та деякими іншими факторами. При порівняно малих струмах дуги, як правило, існує одна анодна пляма, що має форму правильного кола. Зі збільшенням струму дуги діаметр анодної плями зростає. Дробленню анодної плями на декілька окремих плям сприяє підвищення температури анода, величини струму та швидкості його наростання в імпульсних розрядах, зменшення тиску навколишнього середовища, а також високі значення потенціалу іонізації парів металу аноду та мала його теплопровідність.

Анодна пляма при відсутності діючих газодинамічних та електромагнітних зусиль відрізняється малою рухомістю. Довжина анодної області приблизно дорівнює довжині вільного пробігу електрону. Основними носіями електрики в анодній області є електрони, що надходять в неї із стовпа дуги, це обумовлює виникнення негативного просторового заряду в аноді, який в свою чергу визначає анодне падіння потенціалу. Через складність процесів, що відбуваються в аноді, та малій довжині анодної області визначення анодного падіння напруження пов'язане з великими технічними труднощами. Використані для цих цілей методи зондів Ленгмюра та зближення контактів дозволили визначити значення анодного падіння напруження на мідному електроді при струмі (1,5–5) А та довжині дуги 5 мм в повітряному середовищі, відповідно, (7,3–8,1) В та (2–6) В [82]. Помилки використаних методів можуть бути значними, тому отримані величини слід вважати орієнтовними та близькими до граничних. Ряд дослідників [79] стверджують, що зі збільшенням струму дуги анодне падіння напруження знижується.

Розглянуті фізичні процеси в анодній області та особливо величина анодного падіння напруження визначають значення теплових потоків до аноду.

Процеси в дуговій плямі на внутрішньому електроді плазмотрона істотно відрізняються, якщо електрод є катодом. Теорії катодної області присвячено значну кількість робіт.

Слід відмітити два істотно різних стани поверхні катода при горінні дуги. По перше, при виконанні катода з тугоплавких матеріалів (вольфраму, графіту, молібдену та ін.) його поверхня розігрівається до температури, близької до температури плавлення. До таких катодів, що працюють в розпеченому стані, також відносяться катоди зі вставок цирконію або гафнію, запресованих до масивного мідного охолоджуваного тіла [1]. Друга група – це масивні катоди, температура поверхні яких незначна та істотно менша температури плавлення. Такі катоди працюють в «холодному» режимі.

Форма та параметри катодних плям залежать від матеріалу катода, стану його поверхні, величини струму, умов навколишнього середовища *i* т.п. На «холодних» катодах завжди існують одна або одночасно декілька контрагованих катодних плям. Катодна пляма має менший розмір порівняно з анодним та більшу рухомість.

Експериментальними дослідженнями [45] встановлене існування двох типів катодних плям: ті, що швидко переміщуються, та ті, що повільно переміщуються. Пляма першого типу має швидкість переміщення по поверхні масивного металевого електроду (10–50) м/с, величину струму (5–20) А та час існування $(5–30) \cdot 10^{-6}$ с. Пляма другого типу відрізняється меншою швидкістю пересування (до 1 м/с), більшим струмом в плямі (10–30 А) та великим часом існування (до $50 \cdot 10^{-6}$ с). Якщо швидкі плями існують незалежно одне від одного, то повільні плями можуть об'єднуватися в групові асоціації з ще меншою швидкістю пересування (до 0,1 м/с), більшим струмом (150–300 А) та більшим часом існування $(1–2) \cdot 10^{-3}$ с. При ініціюванні розряду на початку виникають плями першого типу та крізь певний час, що залежить від матеріалу та стану поверхні катода, утворюються плями другого типу. Швидкість переміщення плям першого типу зростає при збільшенні числа

мікронерівностей на поверхні катода. Утворювана ними ерозія незначна. Утворення плям другого типу супроводжується вельми інтенсивним оплавленням катода та має, ймовірно, термічний характер.

Таким чином, форма та кількість катодних плям постійно змінюються. Наряду з виникненням нових плям, діленням існуючих, відбувається відмирання та асоціювання плям. Довжина катодної області вважається рівною довжині вільного пробігу електрону та оцінюється величиною $10^{-5} - 10^{-6}$ м.

Катодне падіння напруження на мідному електроді орієнтовно може бути прийнято рівним (8 – 14,5) В, а на залізному (8 – 17) В [8].

Незважаючи на велику кількість теоретичних та експериментальних праць в області дослідження прикатодних явищ, до теперішнього часу відсутня закінчена теорія електричних процесів в катодній області. Особливо це відноситься до катодів плазмотронів, що працюють в "холодному" режимі.

Утворювана на катоді теплова потужність обумовлена кінетичною та потенційною енергією іонів, які потрапляють на катод, а також процесами теплопередачі та випромінювання від катодної плями в електрод.

Величина теплових втрат до соплового електроду також визначається великим числом факторів: величиною робочого струму, видом стабілізації, витратою, складом та способом подавання стабілізуючого газу, геометричними розмірами сопла та, в першу чергу, його діаметром та товщиною [113].

Втрати теплової потужності до внутрішнього та соплового електродів обчислювали за формулою [5]:

$$P_{nom} = C_{y\delta} m(t_2 - t_1) \quad (4.3)$$

де $C_{y\delta}$ – питома теплоємність води, Дж/(кг⁰С);

m – масова витрата охолоджуючої води, кг/с;

t_1, t_2 , – температура води відповідно на вході та на виході з охолоджуючого тракту, ⁰С.

Енерговтрати на електроді та соплі, а також тепловий ККД плазмотрона в залежності від струму дуги при різних витратах робочого газу представлені на рис. 4.9. Як і очікувалось, зі збільшенням струму дуги теплові втрати в катоді та соплі збільшуються.

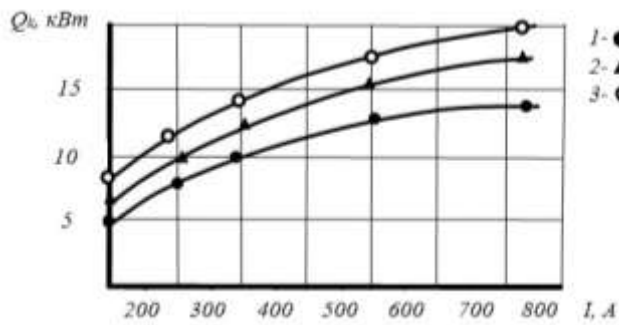
Втрати в порожнистому катоді складають 10–15 %, а в соплі – 2–5 % загальної потужності плазмотрона. ККД із зростанням сили струму на дузі змінюється незначно. На рис. 4.10 приведено графіки зміни тих самих складових втрат потужності та теплового ККД в залежності від витрати робочого газу при різних значеннях струму дуги. Рис. 4.10, а свідчить про те, що втрати тепла в катоді Q_k зростають зі збільшенням G , що пояснюється подовженням дуги в розрядному каналі катода з посиленням турбулізації газового потоку всередині каналу, що має порівняно малий діаметр. Втрати в соплі Q_c (рис. 4.10, б) мають екстремальний характер при $G=1,3$ г/с. Встановлено, що при малих G погіршується просторова стабільність дуги всередині сопла та посилюються її коливання, що приводить до зростання конвективної складової тепловтрат. При великих G зростає турбулізація та коефіцієнт конвективного теплообміну. Збільшення теплових втрат в катоді при підвищенні G приводить до зниження теплового ККД плазмотрона (рис. 4.10, в). На рис.4.11 приведено змінення Q_k , Q_c та η в залежності від зростання напруження на дузі. Звідки видно, що тепловтрати в катоді и соплі збільшуються незначно при одночасному зростанні теплового ККД [113].

4.3.2 Питома ентальпія дуги

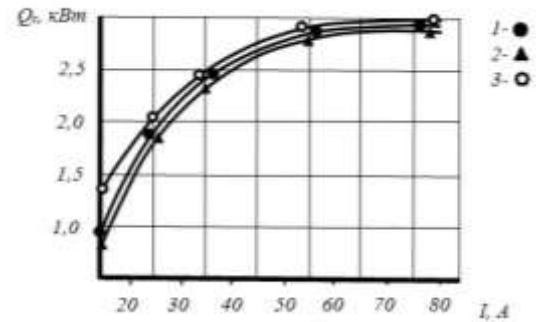
Враховуючи, що величина питомої ентальпії плазмового потоку визначає інтенсивність процесу теплообміну на поверхні розрізуваного металу, а отже, й ефективність процесу різання, великий інтерес представляє вивчення впливу на

величину питомої ентальпії плазмового потоку режимних та конструктивних параметрів плазмотрону [113].

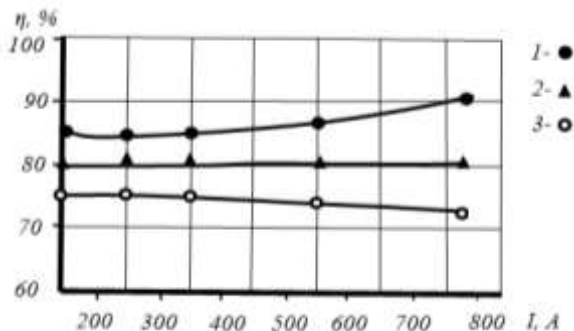
В газорізальних пристроях, коли використовуються паливо та окислювач, ентальпія ріжучого струменя має обмеження за величиною, оскільки отримання додаткової потужності неминуче призводить до відповідного збільшення маси спалюваних речовин. Зокрема питома ентальпія продуктів згоряння ацетилену в кисні не перевищує 15 кДж/г. В ріжучих плазмотронах ентальпія не має подібних обмежень та визначається енергією, що передана плазмоутворюючому газу. Вона може досягати 150 кДж/г та більше. Очевидною перевагою плазмотронів є можливість регулювання в широких межах питомої ентальпії зміною режимних та конструктивних параметрів плазмотрону.



а)



б)



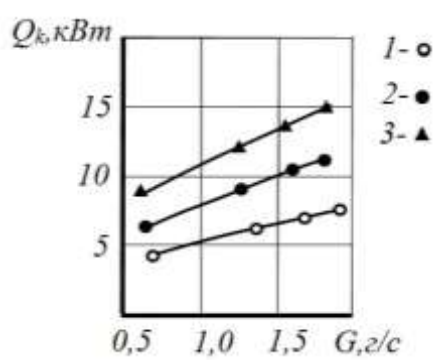
в)

Рисунок 4.9 – Залежність втрат тепла крізь катод (а) та сопло (б) та теплового ККД (в) від струму дуги; 1 – $G = 0,54$ г/с; 2 – $G = 1,08$ г/с; 3 – $G = 1,6$ г/с

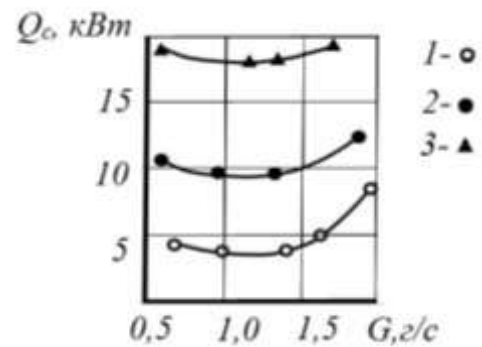
Так як безпосереднє вимірювання питомої ентальпії не представляється можливим, то її визначали за формулою (2.7):

$$i = i_0 + \eta \frac{N}{G},$$

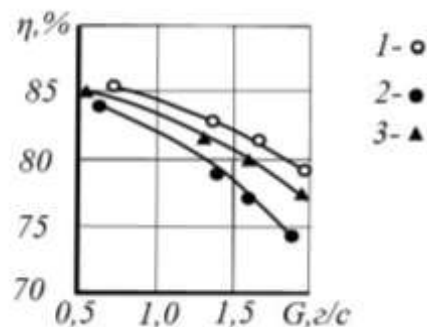
На рис. 4.12 показана серія графіків зміни питомої ентальпії в функції від робочого струму при різних витратах плазмоутворюючого повітря (рис. 4.12, а), діаметрах сопла (рис. 4.12, б), довжинах циліндричної ділянки сопла (рис. 4.12, в) та відстанях плазмотрону від поверхні металу (рис.4.12, г). Всі залежності мають лінійний та близький до нього характер [115].



а)

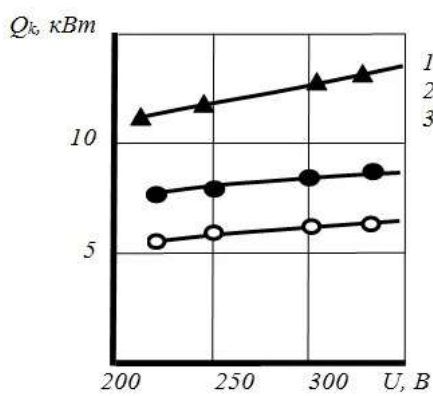


б)

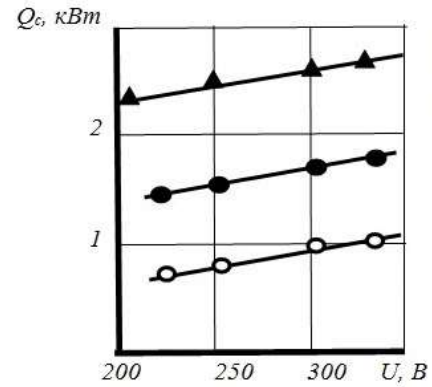


в)

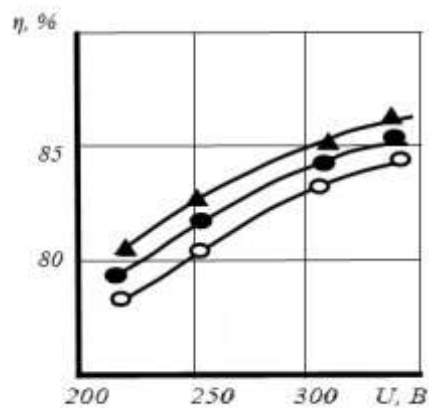
Рисунок 4.10 – Втрати тепла крізь катод (а) та сопло (б) та теплового ККД (в) в залежності від витрат робочого газу (повітря). Струм дуги: 1 – 150 А; 2 – 200 А; 3 – 300 А



а)



б)



в)

Рисунок 4.11 – Залежність втрат тепла крізь катод (а) та сопло (б) та зміна теплового ККД (в) від напруження на дузі. Струм дуги: 1 – 150 А; 2 – 200 А; 3 – 300 А

Зі збільшенням витрат плазмоутворюючого повітря питома ентальпія суттєво зменшується, особливо при малих значеннях витрат та великих величинах робочого струму. Так, наприклад, збільшення витрат повітря від 0,54 г/с до 0,9 г/с викликає зниження ентальпії на 15 кДж/г при струмі 150А та на 27,5кДж/г при струмі 300А.

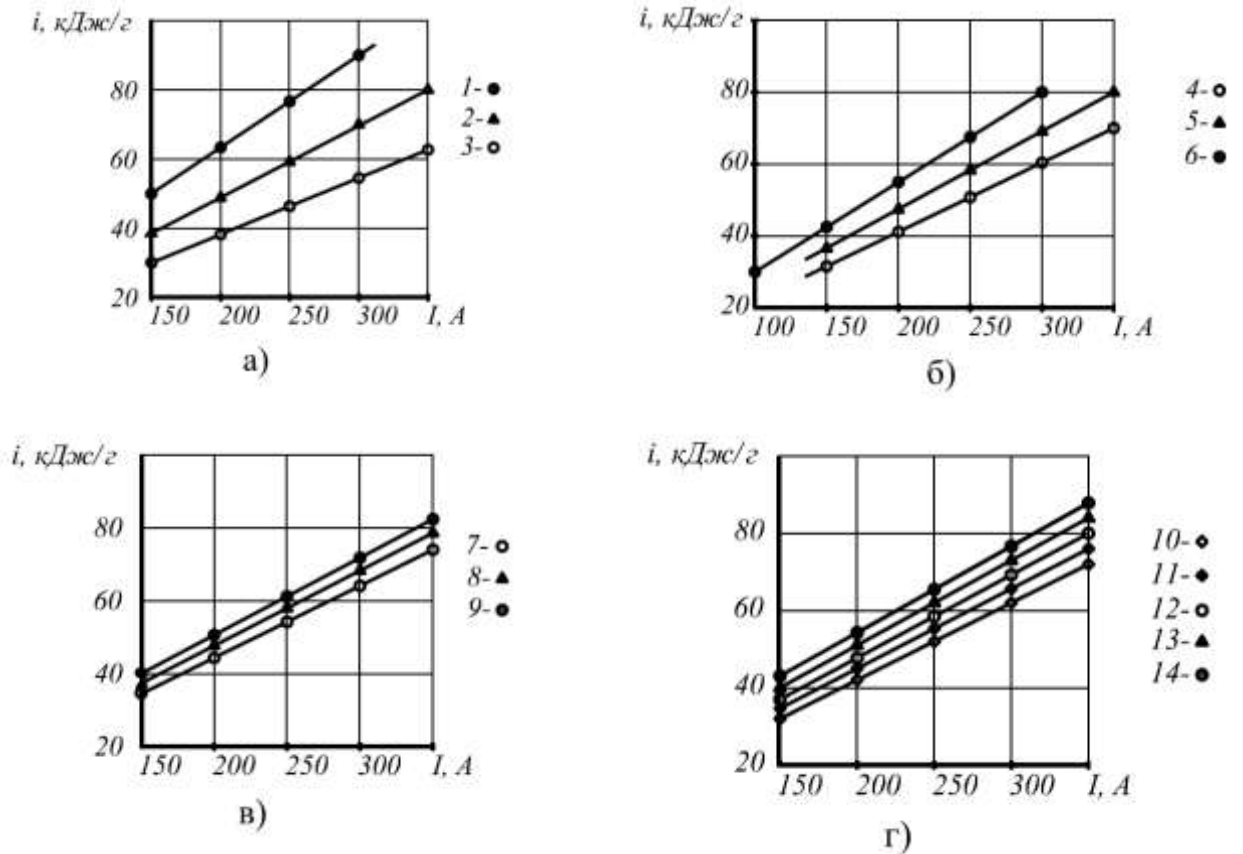


Рисунок 4.12 – Зміна питомої ентальпії в залежності від струму дуги. Витрата плазмоутворюючого повітря: 1 – 0,34; 2 – 0,9; 3 – 1,26 г/с. Діаметр сопла: 4 – 5; 5 – 4; 6 – 3 мм. Довжина циліндричної ділянки сопла: 7 – 5; 8 – 8; 9 – 10 мм. Відстань від зрізу сопла до металу: 10 – 5; 11 – 10; 11 – 15; 13 – 20; 14 – 25 мм

Збільшення діаметру сопла на 1 мм викликає зниження ентальпії на (4–10) кДж/г, що обумовлене зменшенням електричної потужності ріжучої дуги за рахунок більш слабого обтиснення дугового розряду. Подовження циліндричної ділянки сопла на 1 мм приводить до росту ентальпії на (1,2–2,5) кДж/г у зв'язку з великим обтисненням плазмової дуги. Зі збільшенням відстані плазмотрону до металу на 10 мм питома ентальпія зростає на (5–11) кДж/г внаслідок підвищення електричної потужності ріжучої дуги [102].

4.4 Дослідження ерозійних характеристик

Працездатність плазмотрона для різання визначається інтенсивністю зношування електроду, що знаходиться в найбільш важких теплових та ерозійних умовах. Опорні плями дуги, що переміщуються по внутрішній поверхні електроду (см. рис. 4.4), безперервно взаємодіють з матеріалом електроду, визиваючи його поступове руйнування. Враховуючи, що до теперішнього часу не має більш або менш обґрунтованої теорії віднесення матеріалу електроду при дії на нього дуги, нами при визначенні ерозії обрана фізична модель ерозії в плямах дуг, тобто в місці контакту дуги з електродом. При цьому розглядається електрод з нестационарними плямами дуги (безперервно переміщуються вздовж поверхні електроду), вважається, що електрод інтенсивно охолоджується водою (температура електроду протягом роботи не змінюється) та ерозія здійснюється за рахунок випаровування матеріалу при термічному впливі плазми дуги.

Фізичну картину взаємодії дуги з електродом можна представити наступним чином. Після появи плям дуги на поверхні електроду відбувається нагрів матеріалу до температури плавлення T_n (відрізок часу t_n), потім – розплавлення деякої маси матеріалу електроду аж до досягнення його поверхнею температури кипіння T_k (відрізок часу t_n). І лише після цього – сам процес випаровування, який триває протягом відрізка часу t_k . По закінченню часу $(t_n + t_n + t_k)$ від початку процесу пляма дуги перескакує на інше місце та весь процес повторюється знову. Так як маса випарованого матеріалу за час одиничного акту взаємодії плям з електродом $M = G \cdot t_k$, швидкість віднесення

маси G буде складати $\frac{M}{(t_n + t_n + t_k)}$, а питома ерозія:

$$\Psi = \bar{G} \cdot \frac{t_k}{t_n + t_n + t_k} \quad (4.4)$$

В нашому випадку питому ерозію полого мідного електроду, що складається з двох ділянок, складає $10^{-9} \dots 10^{-10}$ кг/Кл та в першому наближенні її можна вважати такою, що не залежить від струму ($I = 30 \dots 1000$ А) [11]. Враховуючи, що прив'язка частини дуги має декілька точок та струм дуги розподіляється майже по всій довжині розрядного каналу, то розрахунковий струм для визначення ресурсу роботи слід обирати не більше 200 А [114].

Електрод на ерозію випробувався при силі струму від 200 до 800 А. Експерименти для кожного значення струму тривалістю не менше 30 хв. повторювались тричі. При цьому електрод зважувався на демпферних вагах (з точністю до 10^{-7} кг) до запуску та після закінчення експерименту. На рис. 4.13 наведено залежності питомої ерозії порожнистого мідного електроду від струму дуги, як з поділенням на дві ділянки, так і без поділення [96].

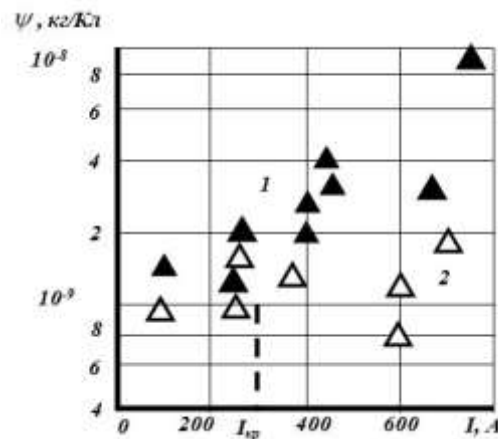


Рисунок 4.13 – Ерозія полого мідного катоду в повітрі: $G = 0,85 \cdot 10^{-3}$ кг/с, $d = 5 \cdot 10^{-3}$ м; 1 – полий катод без поділення на ділянки; 2 – полий катод з поділенням на дві ділянки

Приведені данні дозволили виявити характерну особливість для обох випадків – наявність $I_{кр}$. До критичного значення сили струму величина питомої

ерозії хоча і слабо, але падає; понад – різко зростає. Однак в електроді з поділенням спостерігається деяке відставання зростання ерозії.

Подальші експерименти показали, що ерозійні характеристики катоду можна поліпшити підвищенням швидкості безперервного переміщення опорних плям за рахунок подачі додаткової витрати газу (до 10% від основного) в торець електроду.

Зіставлення результатів візуальних досліджень з результатами зважування та фізичними параметрами проведення експериментів показують, що ерозія електроду залежить від цілої низки факторів.

Оптимальна товщина стінки електроду, при якій забезпечується найменший знос, визначається умовами на охолоджуючій поверхні електроду. Зі зменшенням товщини стінки мідного електроду від оптимальної зростає температура тепловіддаючої поверхні через концентрацію теплового потоку в ділянках прилягання опорної плями дуги. В результаті цього погіршується теплообмін між тепловіддаючою поверхнею електроду та охолоджуючою водою і змінюється режим кипіння в пристіночному пограничному шарі від бульбашкового до плівкового, що в кінцевому підсумку приводить до росту питомої ерозії електроду.

Три досліджених нами фактори: полярність горіння дуги, напрямок крутки та напрямок подавання охолоджуючої води – є якісними, тому при виконанні наступних етапів були прийняті їх найкращі значення: зворотна полярність дуги, узгоджений напрямок газодинамічного та електромагнітного переміщення опорної плями дуги, протікання охолоджуючої води від електроду до сопла [114].

Відомо, що для зменшення ерозії електроду необхідно зменшити величину робочого струму та відстань від зрізу сопла до металу. Однак за технологічними умовами відстань між плазмотроном і металом повинна бути не меншою (10–15) мм, а для забезпечення потужності 100 кВт робочий струм не повинен бути менше 300 А. Тому в подальших випробуваннях відстань від

зрізу сопла до металу прийнято 15 мм, а величина робочого струму плазмотрона 300 А. Як показали дослідження, окрім розглянутих факторів на ерозію мідного електроду істотно впливає геометрія днища електроду. Для виявлення раціональної геометрії розрядної камери досліджувалась питома ерозія мідного електроду при різних конфігураціях його днища, наведених на рис. 4.14. Найменше значення питомої ерозії забезпечується при наявності в центрі днища гострокінцевого виступу з плавним криволінійним переходом до бокової внутрішньої поверхні електроду, що підтвердило дослідження [7].

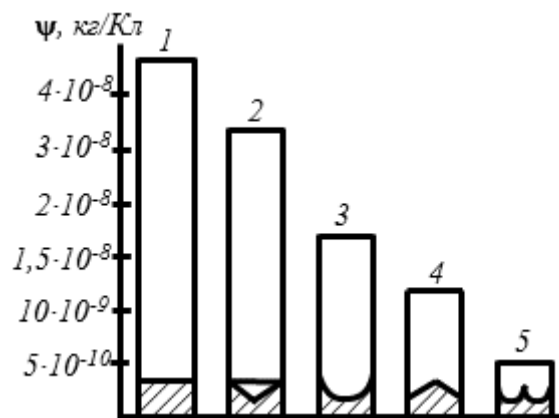


Рисунок 4.14 – Величина питомої ерозії при різній геометрії дна мідного електроду

Найважливіший експлуатаційний показник ріжучого плазмотрону – це ресурс роботи його найбільш зношуваних деталей електродної системи. Робота плазмотрону при розділовому різанні металу характеризується, як правило, циклічністю: встановлення плазмотрону, виконання безпосередньо процесу різання, відключення плазмотрону та перехід на наступний цикл. В умовах масового виробництва тривалість вирізання однієї заготовки знаходиться в межах від декількох секунд до декількох хвилин в залежності від розмірів та матеріалу заготовки, її форми, товщини металу та ін. Тривалість включення (ПВ в %) плазмотрона також коливається в широких межах, що визначаються

вже вказаними факторами. Як показала практика промислового використання ріжучих плазмотронів з цирконієвими та гафнієвими електродами, ресурс їх роботи обмежується кількістю пусків. Це пояснюється особливостями процесів, що відбуваються на поверхні термохімічних катодів. Як відомо, стійкість таких катодів в окислювальному середовищі обумовлена утворенням тугоплавкої захисної плівки оксидів та нітридів. Ця поверхнева плівка запобігає окисленню основного матеріалу електроду. Речовини, які входять до складу плівки, при звичайних температурах є керамічними з'єднаннями, а при температурах, що близькі до температури плавлення, стають провідниками з малим питомим опором. Катодна пляма утворюється на поверхні розплавленої захисної плівки, та у сталому режимі не викликає істотної ерозії електроду. Однак при запалюваннях дуги, коли на поверхні термохімічного катоду ще не сформувалась захисна плівка, відбувається інтенсивне випаровування матеріалу електроду. Зношення термохімічного катода полягає в поступовому руйнуванні цирконієвої або гафнієвої вставки, запресованої в мідну обичайку. По мірі зношування вставки зростає її поглиблення від торцевої поверхні обичайки та при досягненні останнього значення (2,5–3) мм електрод практично вичерпує ресурс своєї роботи. Це настає, як правило, при кількості запалювань дуги 200–300 [100]. У зв'язку з викладеним, в практиці плазмового різання металів одним з найбільш розповсюджених критеріїв оцінювання ресурсу роботи ріжучого плазмотрона прийнято вважати кількість його запусків до повного зношування електроду.

В ріжучому плазмотроні з порожнистим мідним електродом процес запалювання дуги не має такого істотного впливу на ресурс його роботи, оскільки при розвитку дуги її опорні плями інтенсивно переміщуються по поверхні внутрішнього та соплового електродів не тільки азимутальному, але і в осьовому напрямках. Стан поверхні мідного електроду в періоди виникнення дуги та її стабільного горіння не зазнає будь-яких істотних змін. Це дає

підставу вважати, що вирішальну роль в ресурсі роботи мідного електроду відіграє тривалість горіння дуги [109].

Висновки до розділу 4

1. Запропоновано конструкцію ріжучого плазмотрона, у якого розрядний канал електроду розділений ізолятором на дві частини. Одна з них являє собою склянокоподібну деталь з внутрішнім діаметром d_1 , а друга – циліндр з порожнистим отвором $d_2 < d_1$. Обидві деталі можуть бути виготовлені з міді, сталі або титану. Така конструкція електроду усуває його вибірковість до полярності горіння дуги, числу запусків в роботу та складу плазмоутворюючого середовища.

2. Потужність ріжучого плазмотрону є функцією його режимних та конструктивних параметрів.

3. Виявлено, що напруження ріжучої дуги залежить від витрати плазмоутворюючого газу, діаметру та довжини соплового каналу, а також від відстані сопла плазмотрону до розрізуваного металу. Напруження в плазмотроні з порожнистим мідним електродом на 20-40 % вище, ніж в плазмотронах с термокатодами.

4. Напруженість електричного поля ріжучої дуги на різних її ділянках істотно відрізняється. В каналі сопла вона найбільша та в залежності від факторів, що впливають, змінюється в межах (50-80) В/см.

5. Тепловий ККД ріжучого плазмотрону істотно залежить від відстані сопла до розрізуваного металу, полярності горіння дуги, довжини каналу сопла та витрати плазмоутворюючого газу.

6. При зворотній полярності горіння дуги питома ерозія мідного порожнистого електроду зменшується більше, ніж в два рази, ніж при прямій полярності.

РОЗДІЛ 5

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ СТВОРЕНИХ ПЛАЗМОТРОНІВ

Розглянуті вище результати, отримані при створенні плазмотронів для різання з порожнистими «холодними» та термоємисійними електродами показали можливість їх використання в різних галузях виробництва. Особливо це стосується заготівельного виробництва. Розроблені конструкції плазмотронів пройшли промислову апробацію на ремонтно-механічному заводі ПрАТ «Азот» м. Сєверодонецька та на виробничих майданчиках ТОВ «Буддеталь» м. Краматорськ (рис. 5.1).



Рисунок 5.1 – Плазмо-різальна машина ремонтно-механічного заводу
ПрАТ «АЗОТ»

5.1 Переваги створеного класу плазмотронів

Згідно даних табл. 1.2 (див. розд. 1) плазмотрони, що випускаються промисловістю для повітряно-плазмового різання, здебільшого обмежені товщиною розрізуваного металу та ресурсом роботи електроду та сопла. Збільшення товщини різку можливе за рахунок підвищення струму дуги, але при цьому стійкість електроду різко знижується (до 10–15 хв.). Використання «холодних» порожнистих мідних електродів дозволило підвищити струм дуги до 600 А, потужність плазмотрону – до 250 кВт та збільшити товщину розрізуваного металу до 150 мм, а ресурс роботи до 50–60 год., за рахунок збільшення товщини стінок порожнистого мідного катода, вага якого склала 0,3 кг [118].

Розроблені та надані в дисертації плазмотрони для різання за рахунок використання принципу розщеплення катодної прив'язки дуги дозволяють при «холодних» порожнистих електродах досягти струму дуги 700 А та різати метал до 200 мм, а при використанні термокатодів із захистом їх інертним газом відповідно – 800 А та 400 мм. При цьому ресурс електроду склав понад 100 год.

Плазмотрон ПР–6 (див. табл. 3.1 розд. 3) з порожнистим мідним електродом працює як на прямій, так і на зворотній полярності. Зворотня полярність розширила можливості використання плазмового різання металів, так як катодна пляма, маючи більшу рухливість, ніж анодна, легше поглиблюється по фронтальній поверхні різку, що забезпечує прорізання листової сталі більшої товщини. Крім того, більш рухома катодна пляма сильніше контрагована, ніж анодна, що забезпечує утворення порожнини різку меншої ширини, а отже, ефективність процесу плазмотронного різання зростає.

Передові вчені та практики в області плазмового різання створили стійку, але недостатньо коректну думку про те, що плазмове різання низьковуглецевої сталі є ефективним при товщині до 40–60 мм, а при більшій товщині листа

більш економічним є газокисневе різання. Виконаний нами аналіз показав, що при газокисневому різанні низьковуглецевої сталі товщиною 100 мм в порожнині різі виділяється тепла потужність ~ 150 кВт. В той час, як потужність ріжучої дуги плазмотронів, що випускаються серійно, не перевищує 100 кВт (ПВФ–401), отже, і ефективність плазмового різання менше.

Якщо підвищити теплову потужність плазмової дуги в порожнині різі до 150 кВт й більше, то зростає товщина розрізуваного металу й ефективність процесу різання. В плазмотроні ПР–6 потужність дуги складає 200 кВт, а розрізувана товщина металу з урахуванням роботи плазмотрону на зворотній полярності перевищує 200 мм.

На рис. 5.2 представлено залежності зміни швидкості плазмово-дугового різання нержавіючої сталі від товщини розрізуваного листа до 200 мм при зміні струму дуги до 600 А. Різання проводилося плазмотронами ПР–3, ПР–4, ПР–5, ПР–6, технічні характеристики яких представлені в таб. 3.1.

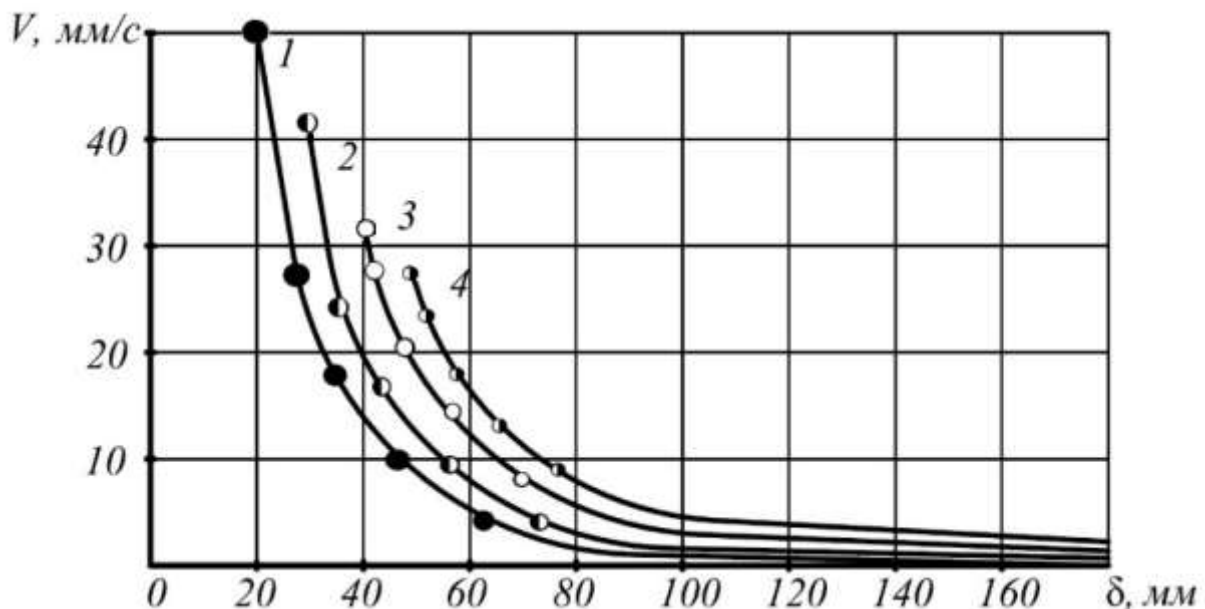


Рисунок 5.2 – Зміна швидкості різання високолегованої сталі в залежності від товщини листа при різних значеннях струму: 1 – 300 А; 2 – 400 А; 3 – 500 А;

4 – 600 А

Таким чином розроблені плазмотрони ПР-3, ПР-4, ПР-5, ПР-6 дозволяють різати метал товщиною понад 70 мм з прийнятною для виробництва швидкістю. Продуктивність різання при використанні в якості плазмоутворюючого газу повітря або кисню мало залежить від марки металу. Однак при різанні кольорових металів (алюмінію, міді та їх сплавів), які характеризуються високою теплоємністю та теплопровідністю необхідно використовувати плазмотрони з більш потужною дугою, ніж при різанні сталі. Якість різку при цьому буде приблизно однаковою.

5.2 Практичне застосування створених плазмотронів

5.2.1 Використання плазмотронів потужністю більш ніж 100 кВт

Плазмотрони ПР-3, ПР-4, ПР-5, ПР-6 встановлювались на машині ППлКЦ-2,5 (рис 5.3).



Рисунок 5.3 – Плазмотрон ПР-6, встановлений на машині ППлКЦ-2,5

Машина ППлКЦ–2,5 портального типу складається з порталу, рельсового шляху, супорта, пульта оператора з ЧПУ та установки для повітряно-плазмового різання. Вирізали плоскі елементи та деталі з криволінійними та прямолінійними контурами (фланці, кільці, сектори, смуги) з листів низьковуглецевих сталей (ст. 3, ст. 20, сталь 45, 09Г2С, 17ГС) товщиною до 400 мм (рис. 5.4); високолегованих сталей (12Х18Н10Т, 17Х23Н18, 20Х13, 10Х17Н13М3Т) товщиною до 150 мм (рис.5.5); кольорових металів та сплавів (алюмінію, міді, латуні, бронзи) та титану товщиною до 100 мм (рис.5.6); для різання круглого прокату (40ХН2МА) до 300 мм (12Х18Н10Т, 12Х1МФ) (рис. 5.7 а, б).



Рисунок 5.4 – Зразок різку листового прокату ст. 20 товщиною 140 мм: різання проводилось плазмотроном ПР–6 на зворотній полярності $I=600$ А; $d_c=3,5$ мм



Рисунок 5.5 – Зразок різку листового прокату 12X18H10Т товщиною 100 мм:
різання проводилось плазмотроном ПР–5 $I=650$ А; $d_c=3$ мм



Рисунок 5.6 – Зразок різку листового прокату титана ВТ 1–0 товщиною 100 мм:
різання проводилось плазмотроном ПР–4 $I=500$ А; $d_c=2$ мм



а)



б)

Рисунок 5.7 – (а) Зразок різку труби діаметром 273 товщина стінки 40 мм 12X18Н10Т; (б) Зразок різку труби діаметр 260 товщина стінки 50 мм 12X1МФ: різання проводилося плазмотроном ПР–3 $I=400$ А; $d_c=2,5$ мм

Використання повітряно-плазмового різання алюмінію (товщина 100 мм) (рис. 5.8) усунуло механічне висвердлювання заготовок (фланців, кілець), що привело до підвищення продуктивності (в 6 разів), точності вирізаних заготовок та економії металу (в 3 рази).



Рисунок 5.8 – Зразок різку листового прокату алюмінію АМг–6 товщиною 100 мм. Різання проводилося плазмотроном ПР–6 $I=600$ А; $d_c=3,5$ мм

5.2.2 Застосування плазмотронів із термоємійними електродами

Плазмотрони ПР-1, ПР-2 встановлювалися на апарат «ПАТОН ППР-201», що складається з однорізакової переносної машини, ручного різачу, пульта керування, джерела живлення та охолоджуючої системи закритого циклу. Виготовляли в заготівельному цеху пласкі елементи та деталі з криволінійними та прямолінійними контурами з листів низьковуглецевих сталей (ст. 3, ст. 20, сталь 45, 09Г2С, 17ГС, 20Х) та високолегованих сталей (12Х18Н10Т, 17Х23Н18, 20Х13, 10Х17Н13М3Т) товщиною до 60 мм (рис. 5.9).



а)



б)

Рисунок 5.9 – Зразок різку листового прокату (а) 10Х17Н13М3Т; (б) ст. 3; товщиною 60 мм. Різання проводилося плазмотроном ПР-1 $I=350$ А; $d_c=3,5$ мм

Результати різання кольорових металів (алюмінію, міді, латуні, бронзи) та титану товщиною до 70 мм представлені на рис. 5.10.

Проводили також утворення прорізів та отворів різних конфігурацій в елементах та деталях металевих конструкцій (котельно-зварювальний цех заводу). Розділення смуг, прутків, труб, профільного прокату на відрізки мірної довжини проводились в заготівельному та котельно-зварювальному цехах.

Проводили також обробка крайок штампованих елементів, вальцьованих або кованих заготовок, що включає різні види їх підготовки під зварювання.



а)

б)

Рисунок 5.10 – Зразок різу листового прокату (а) алюмінію АМГ–6; (б) титану ВТ1–0 товщиною 70 мм. Різання проводилося плазмотроном ПР–2 $I=400$ А;
 $d_c=3,5$ мм

Проводили також розділення металевих заготовок та елементів для наступного зварювання та обробки тиском, обробку прибутково-ливникових систем відливок (чавуну, сталі, кольорових металів та сплавів) в ливарному цеху (рис. 5.11 а, б.).

Це зменшило (вдвічі) використання пневморубки та наждакової обробки ручними пневмомашинками, на частку яких припадало біля 50–60% зачисних робіт (є найбільш трудомісткими та небезпечними на обробувальній ділянці цеху); підгонку розмірів збиральних елементів при монтажі металоконструкцій; демонтаж різних металоконструкцій (різання металолому на майданчику металу заводу) (рис. 5.12) плазмотронами ПР–1 та ПР–2.

Це дозволило знизити втрати часу на заміну зношених деталей, які спостерігалися при роботі стандартними плазмотронами.



а)



б)

Рисунок 5.11 – Обробка прибутково-ливникових систем відливки заготовки муфти, матеріал чавун СЧ20. Обробка проводилася плазмотроном ПР-1.

$$I = 350 \text{ А}; d_c = 3.5 \text{ мм}$$



Рисунок 5.12 – Різання металолу проводилась плазмотронами ПР-1, ПР-2.

$$I = 350\text{--}400 \text{ А}; d_c = 3,5 \text{ мм}$$

Показані на рис. 5.4 – 5.12 зразки пробних різів різних металів, які проводилися розробленими плазмотронами на режимах згідно таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Режими різання зразків

Тип плазмотрону	I, А	U,В	G г/с	V м/хв	в, мм	t, мм	ℓ, мм
ПР–6	600	400	3,0	0,35	8/5	140	20
ПР–5	650	400	3,0	0,25	9/5	160	25
ПР–4	500	200	1,5	0,3	6/4	100	15
ПР–3	400	180	2,0	0,35	5/4	80	10
ПР–2	400	180	10	0,5	6/3,5	60	10
ПР–1	350	180	1,0	0,5	6/3,5	50	10

В таблиці 5.1 прийняті наступні позначення: G – витрата плазмоутворюючого газу, г/с; V – швидкість різання, м/хв.; в – ширина різку, мм; t – товщина розрізуваного металу, мм; ℓ – відстань сопла плазмотрону до металу, мм.

В теперішній час плазмове різання товстолистових конструкційних сталей зазвичай використовують як розділове, до якого не пред'являють високих вимог якості різку, необхідних при виробництві деталей. Тим не менш, із споживчої точки зору задача використання плазмотронної дуги для різання товстолистого чорного та кольорового металів є достатньо актуальною.

Велику практичну зацікавленість для металообробних галузей промисловості становить процес плазмово-дугового розділового різання круглого сталю прокату діаметром до 300 мм. Успішне використання цього високоефективного способу різання виявилось можливим при збільшенні потужності ріжучих плазмотронів (від 200кВт та більше) і розробці джерел живлення аналогічної потужності з напругою холостого ходу 800–1000 В.

В процесі різання круглого прокату здійснюється обертання та одночасний зустрічний рух плазмотрону, при цьому відстань між зрізом сопла та поверхнею круглого прокату зберігається незмінною.

Практичні результати різання показали, що швидкість утворення розділової поверхні зростає зі збільшенням струму та зменшенням діаметру сопла. Максимальний струм дуги обмежується працездатністю плазмотрону, а мінімальний діаметр каналу сопла – гранично допустимим тепловим потоком у стінку сопла.

Дослідження впливу витрати плазмоутворюючого повітря на швидкість утворення поверхні різу виявили екстремальний характер цієї залежності.

На рис. 5.13 приведено залежності часу розрізання круглого сталю прокату плазмотроном ПР-6 від величини їх діаметрів при різних значеннях робочого струму дуги.

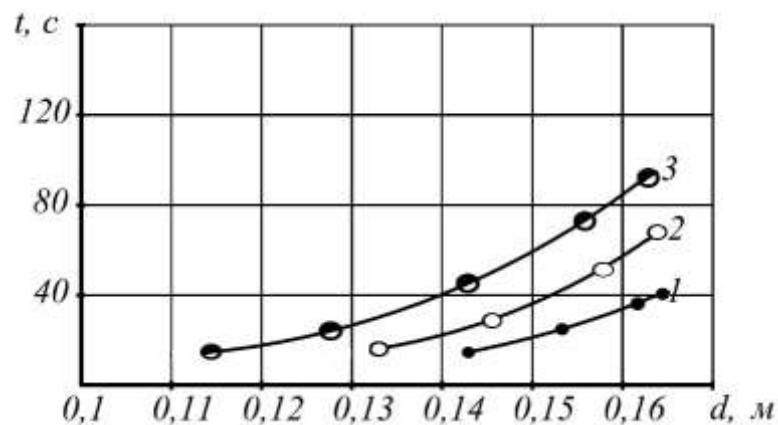


Рисунок 5.13 – Залежність часу відрізання круглого сталю прокату від його діаметру при різних значеннях робочого струму: 1–300 А, 2–400 А, 3–600 А

При визначенні часу відрізання для кожного робочого струму брали оптимальні значення витрати плазмоутворюючого повітря та діаметру каналу сопла, що забезпечують максимальний час відрізання.

Встановлено, що на час розрізання круглого прокату найбільший вплив чинить величина робочого струму, причому, чим більший діаметр заготовки, тим значніший вплив величини струму. Також істотний вплив на якість поверхні, ширину різку та паралельність поверхонь різку становлять обрані

параметри режиму роботи та взаємне переміщення плазмотрону та круглої заготовки (рис. 5.14).



Рисунок 5.14 – Зразок різку поковки діаметром 300 мм 40ХН2МА. Різання проводилося плазмотроном ПР–6 на зворотній полярності. $I = 600 \text{ А}$;

$$d_c = 3,5 \text{ мм}$$

5.3 Порівняльна оцінка ефективності термічного різання металу

При проведенні порівняльної оцінки проводилися дослідження з використанням наступних приладів: металографічні дослідження проводились за допомогою оптичного мікроскопу дзеркального типу НЕОФОТ-21; зміни мікротвердості перевірялися ПМТ-3; зміни хімічного складу досліджувалися за допомогою спектроскопом SPECTRO PORT.

Були досліджені особливості структуроутворення зони термічного впливу, що утворюється при терморізання трьома видами різання 11 марок стали. Структурні перетворення в умовах аргонно-плазмового, повітряно-плазмового й киснево-флюсового різання металу, значно відрізняються від перетворень при звичайній термічній обробці. Дані відмінності пояснюються, насамперед, специфікою термодформаційного циклу різання [119, 120].

В умовах терморізки розпад твердих розчинів у зоні різання протікає в більш складній і безупинно мінливій обстановці, а наявність хімічної неоднорідності в зоні термічного нагрівання в багатьох випадках докорінно змінює кінетику розпаду твердих розчинів [121]. Тому процеси кристалізації металу й структурні перетворення в зоні різання в більшості випадків визначають подальші технологічні й експлуатаційні властивості металу.

Із процесом затвердіння металу, після різання, зв'язано багато небажаних явищ, у тому числі й формування хімічної неоднорідності [122].

Мікроскопічна хімічна неоднорідність, що має місце в зоні терморізки, у першу чергу визначається характером первинної кристалізації сталі й залежить від кількості й природи легуючих елементів, домішок і умов охолодження [120, 123- 124]. При нерівновазі кристалізації дифузія не буде встигати вирівнювати состав внутрішніх і зовнішніх шарів твердого розчину.

Таким чином, після охолодження, піддана різанню сталь, швидше за все, буде мати неоднорідний або шаруватий склад. У таких умовах кристалізації, якщо легуючий елемент або домішка має в рідкій фазі більшу розчинність, ніж у твердій, буде мати місце збагачення міжвісного й междендрідного простору. Дендритна неоднорідність добре виявляється на мікроструктурі металу після терморізки, у вигляді поверхневого рельєфу (рис. 5.16, а, в; рис. 5.17, в; рис. 5.18, а; рис. 5.19, а–в; рис. 5.20, б–в; рис. 5.22, а–б; рис. 5.24, а–в; рис. 5.25, а–в)*. При дуже великому збагаченні в міжвісних і междендрідних просторах на останніх стадіях кристалізації спостерігаються нерівновагі структури (рис. 5.16, а, в; рис. 5.17, в; рис. 5.19, а–в; рис. 5.22, а).

У табл. 5.2 – 5.3 наведені вплив способу різання на глибину термічно оброблених шарів та мікротвердість [120].

Автор висловлює подяку колективу лабораторії металів ПрАТ «АЗОТ» за надану допомогу у металографічних дослідженнях

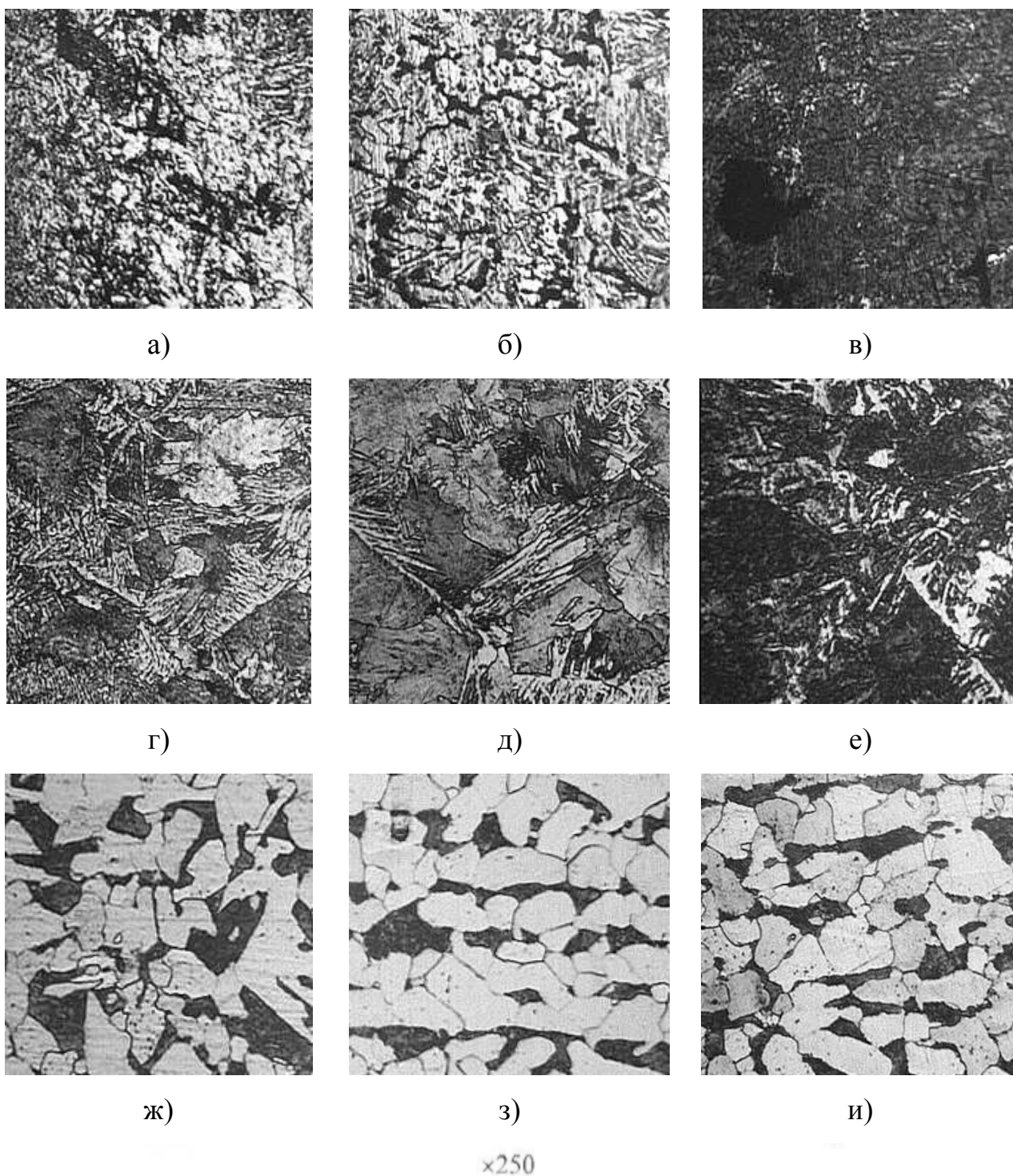


Рисунок 5.15 – Мікроструктура сталі 3сп після різних видів різання:
 а, г, ж – аргоно-плазмове різання; б, д, з – повітряно-плазмове різання;
 в, е, и – киснево-флюсове різання; а, б, в – мікроструктура оплавленої ділянки;
 г, д, е – мікроструктура перехідної ділянки; ж, з, и – мікроструктура основного металу

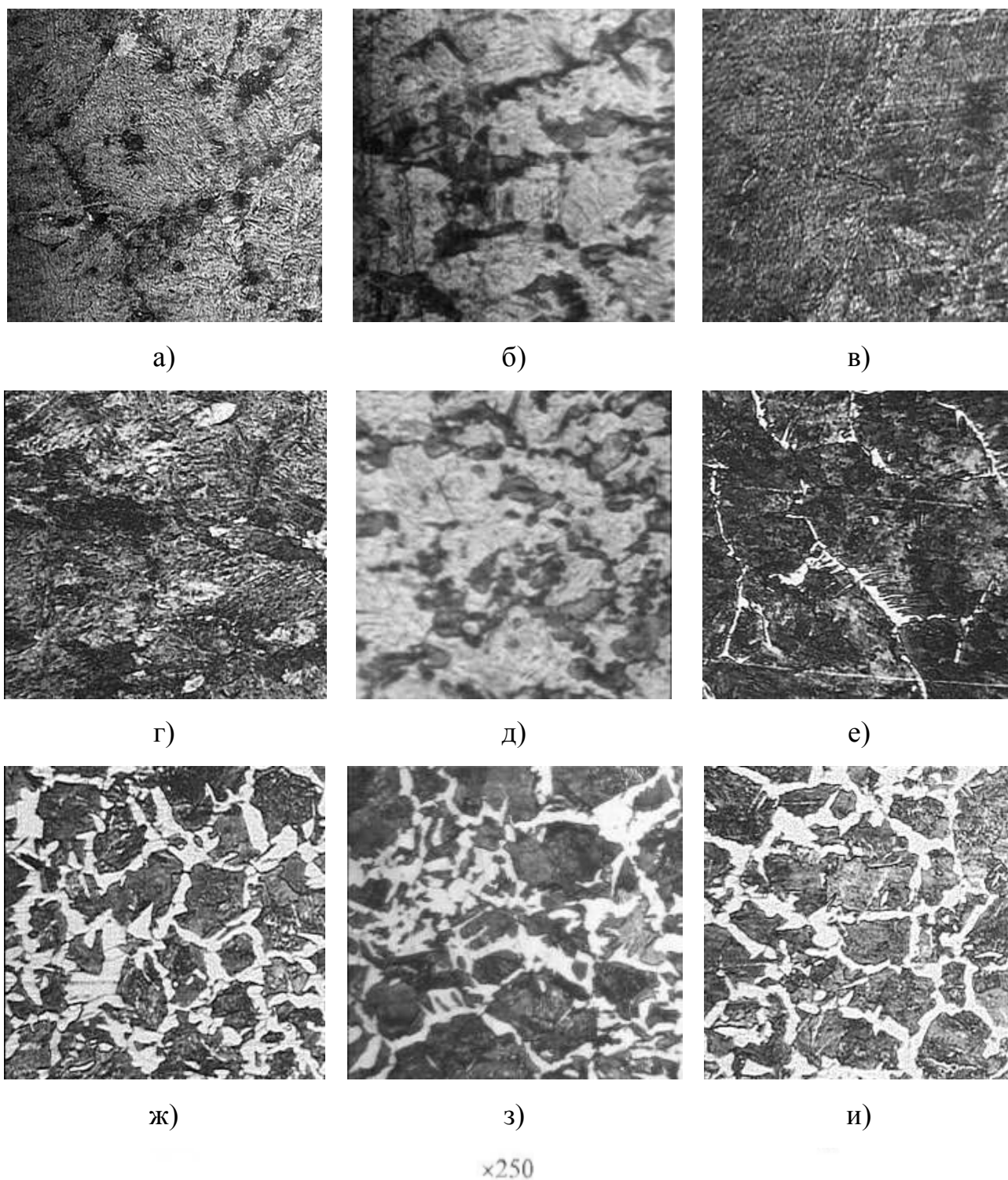


Рисунок 5.16 – Мікроструктура сталі 40 після різних видів різання:
 а, г, ж – аргоно-плазмове різання; б, д, з – повітряно-плазмове різання;
 в, е, и – киснево-флюсове різання; а, б, в – мікроструктура оплавленої ділянки;
 г, д, е – мікроструктура перехідної ділянки; ж, з, и – мікроструктура основного металу

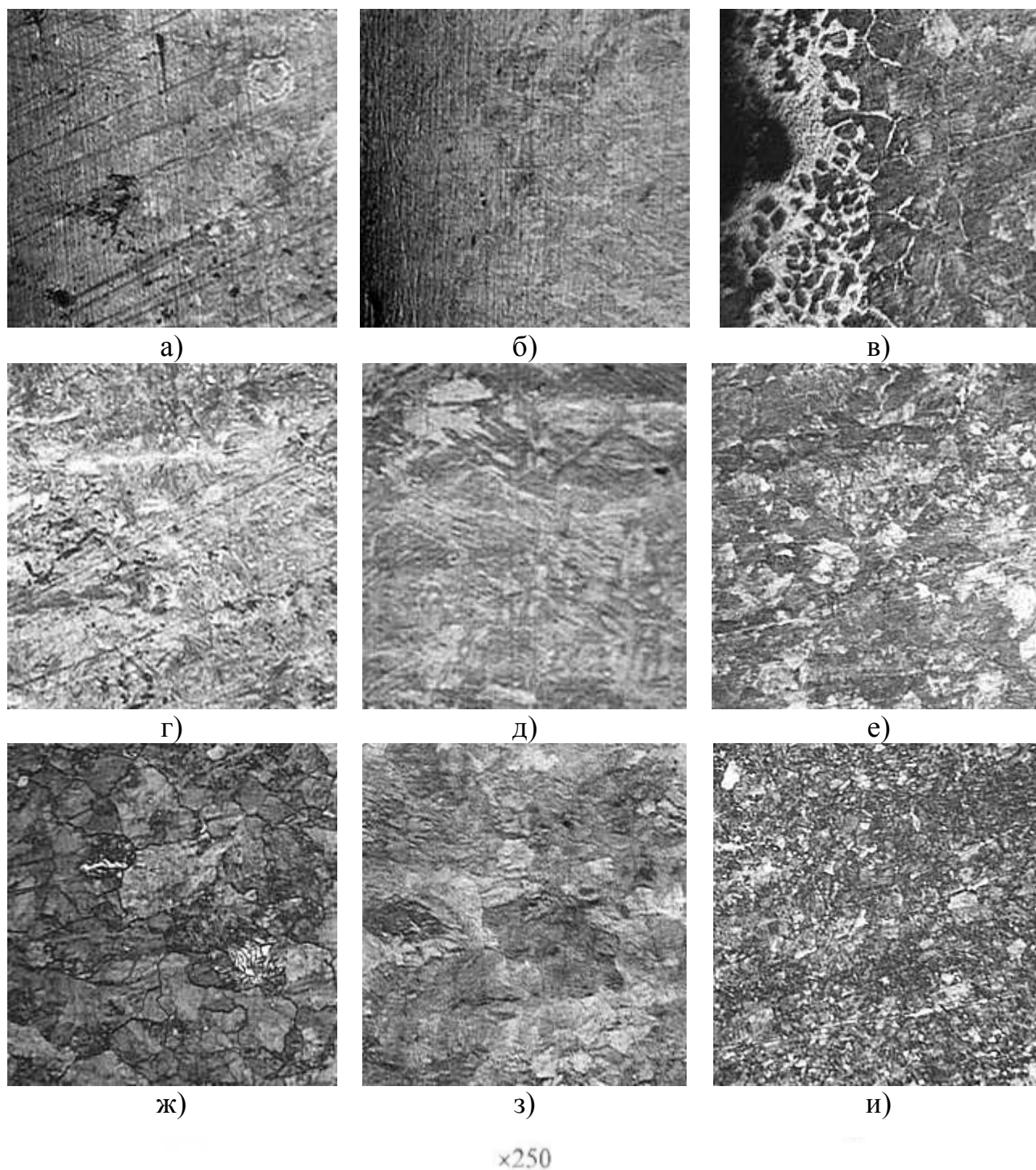


Рисунок 5.17 – Мікроструктура сталі У10 після різних видів різання:
 а,г, ж – аргоно-плазмове різання; б, д, з – повітряно-плазмове різання;
 в,е,и – киснево-флюсове різання; а,б,в – мікроструктура оплавленої ділянки;
 г,д,е – мікроструктура перехідної ділянки; ж, з, и – мікроструктура основного металу

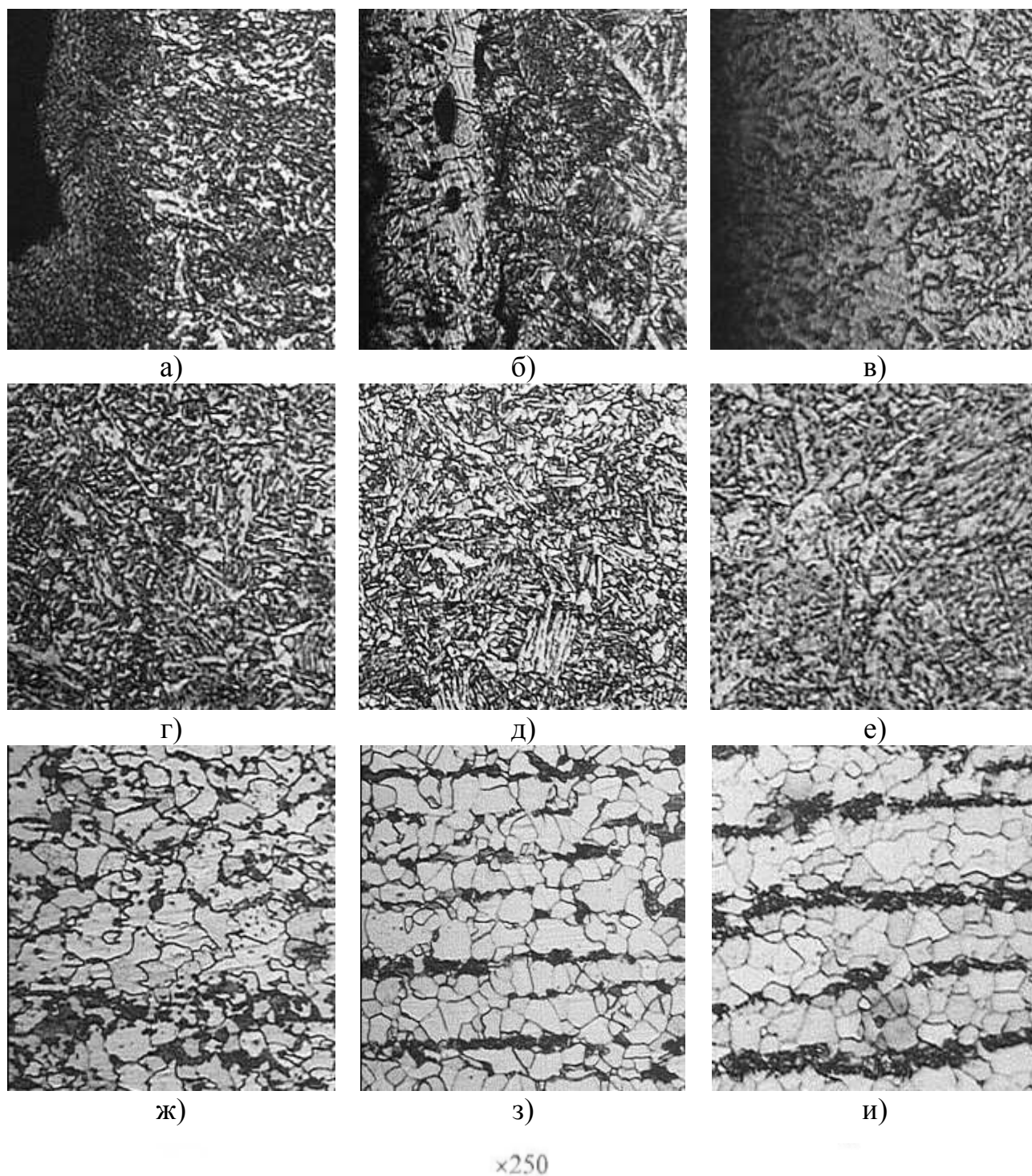


Рисунок 5.18 – Мікроструктура сталі 09Г2С після різних видів різання:
 а, г, ж – аргоно-плазмове різання; б, д, з – повітряно-плазмове різання;
 в, е, и – киснево-флюсове різання; а, б, в – мікроструктура оплавленої ділянки;
 г, д, е – мікроструктура перехідної ділянки; ж, з, и – мікроструктура основного металу

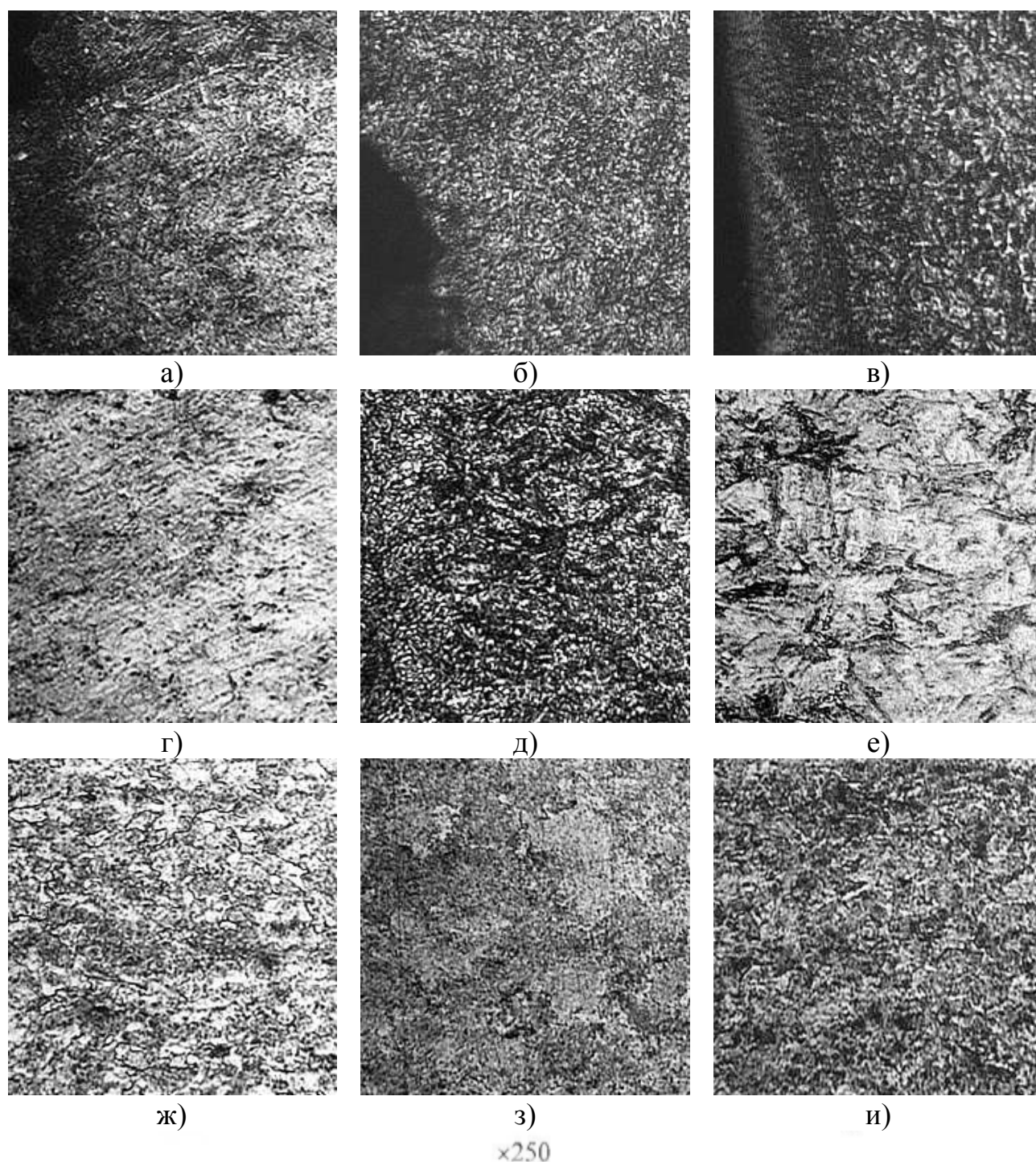


Рисунок 5.19 – Мікроструктура сталі 40X після різних видів різання:
 а, г, ж – аргано-плазмове різання; б, д, з – повітряно-плазмове різання;
 в, е, и – киснево-флюсове різання; а, б, в – мікроструктура оплавленої ділянки;
 г, д, е – мікроструктура перехідної ділянки; ж, з, и – мікроструктура основного металу

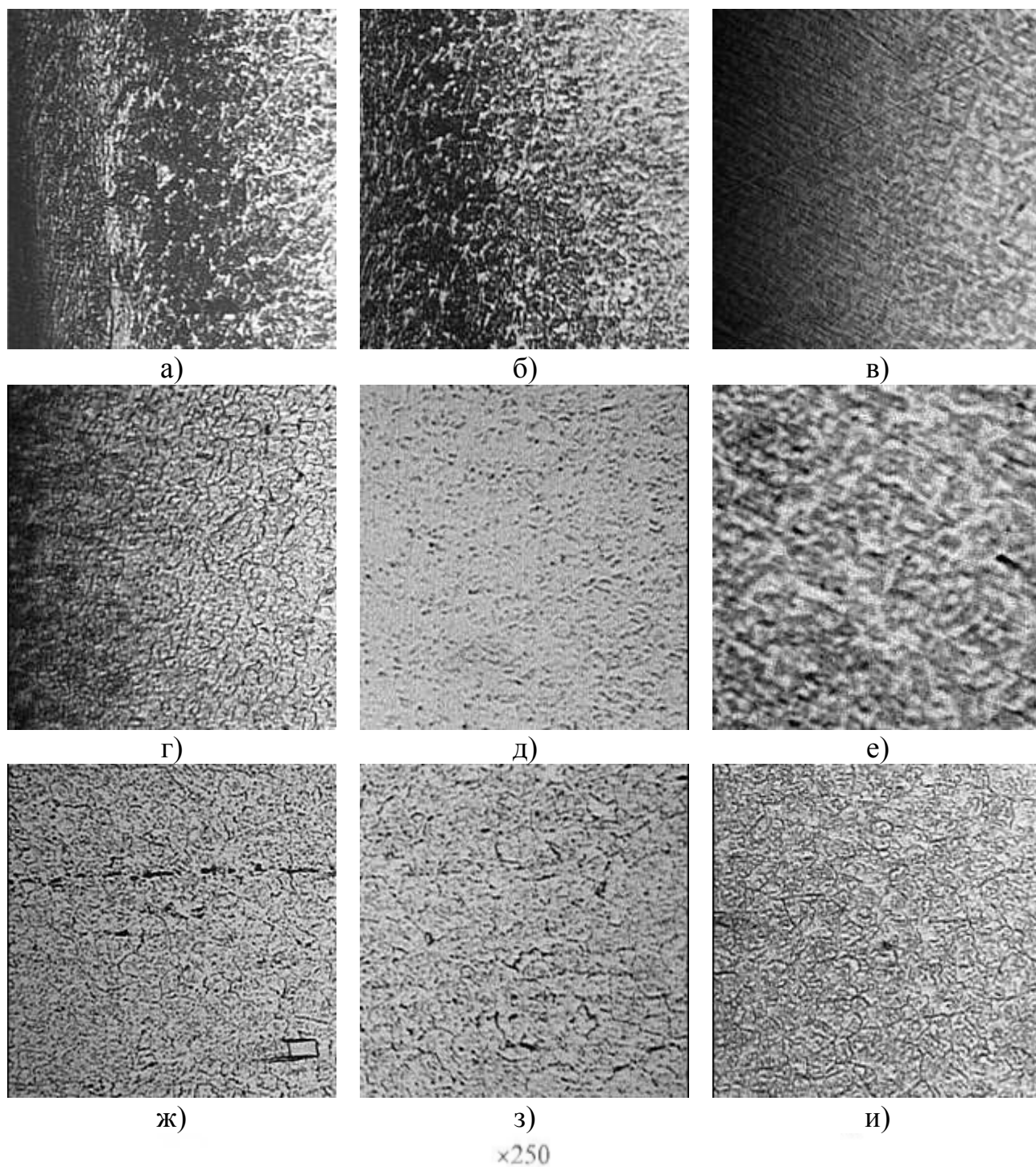


Рисунок 5.20 – Мікроструктура сталі 30X13 після різних видів різання:
 а, г, ж – аргано-плазмове різання; б, д, з – повітряно-плазмове різання;
 в, е, и – киснево-флюсове різання; а, б, в – мікроструктура оплавленої ділянки;
 г, д, е – мікроструктура перехідної ділянки; ж, з, и – мікроструктура основного металу

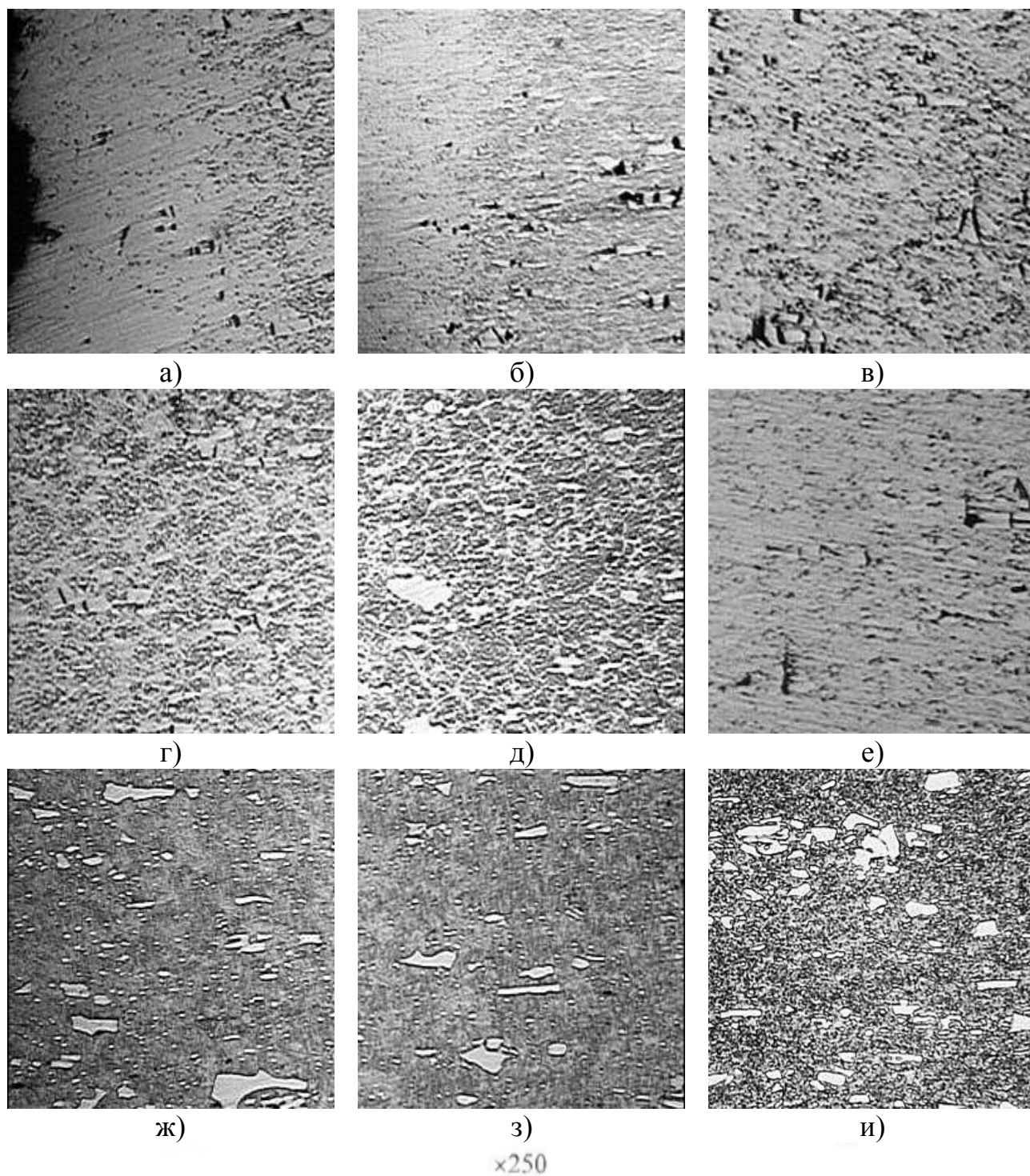


Рисунок 5.21 – Мікроструктура сталі X12МФ після різних видів різання:

а, г, ж – аргано-плазмове різання; б, д, з – повітряно-плазмове різання;
 в, е, и – киснево-флюсове різання; а, б, в – мікроструктура оплавленої ділянки;
 г, д, е – мікроструктура перехідної ділянки; ж, з, и – мікроструктура основного металу

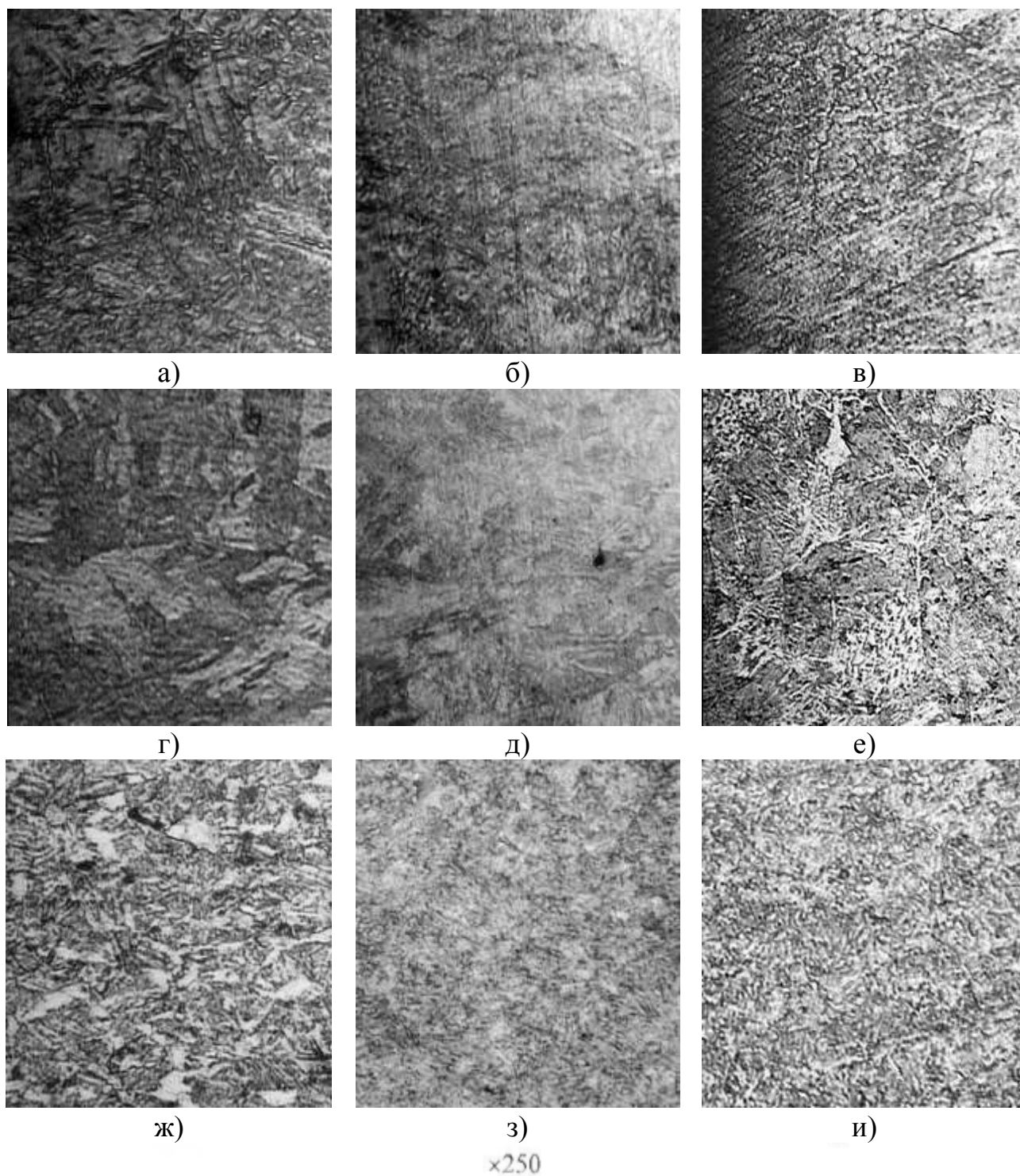


Рисунок 5.22 – Мікроструктура сталі 30ХМА після різних видів різання:
 а, г, ж – аргано-плазмове різання; б, д, з – повітряно-плазмове різання;
 в, е, и – киснево-флюсове різання; а, б, в – мікроструктура оплавленої ділянки;
 г, д, е – мікроструктура перехідної ділянки; ж, з, и – мікроструктура основного металу

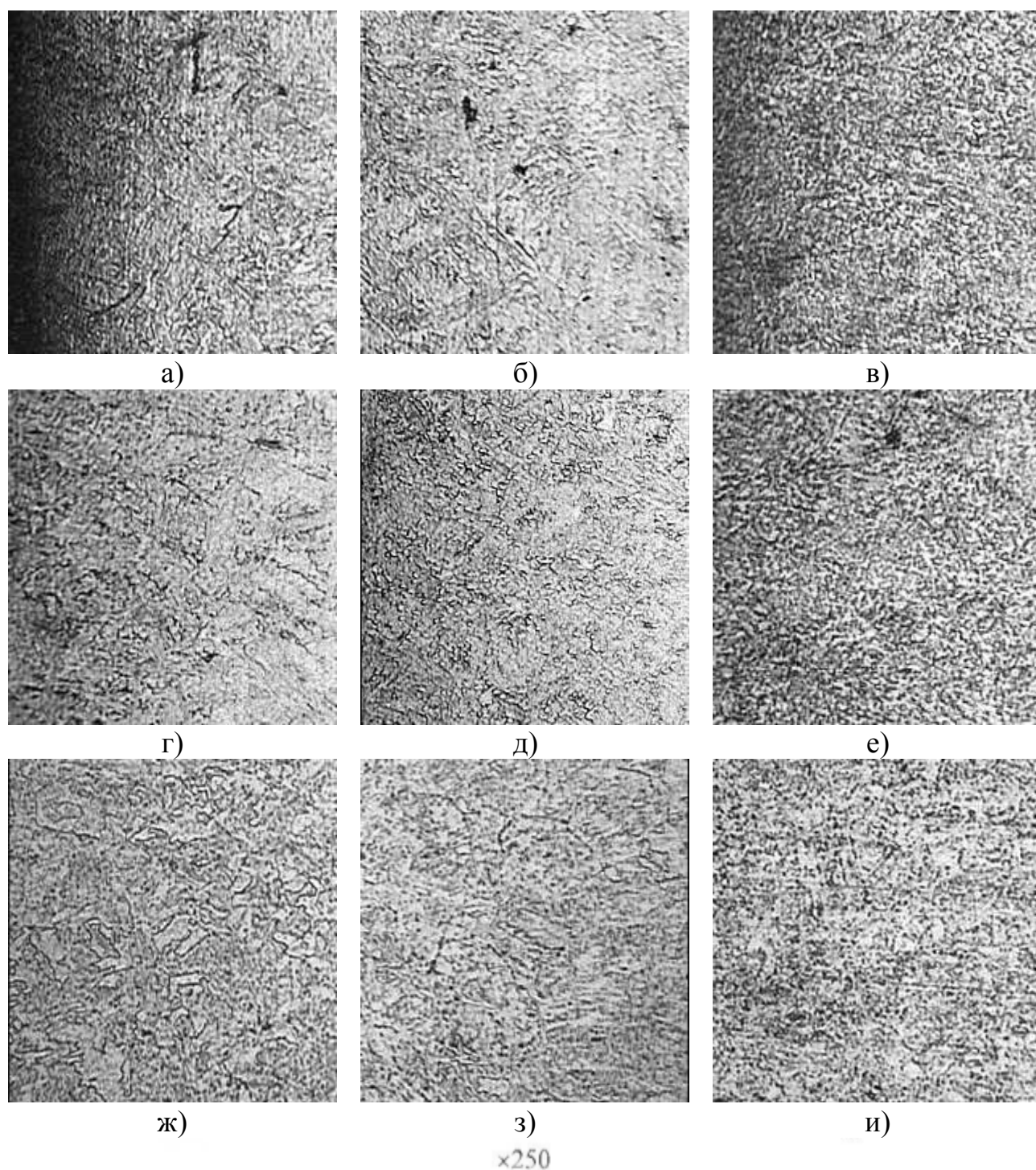


Рисунок 5.23 – Мікроструктура сталі 25Х1МФ після різних видів різання:

а, г, ж – аргоно-плазмове різання; б, д, з – повітряно-плазмове різання;
 в, е, и – киснево-флюсове різання; а, б, в – мікроструктура оплавленої ділянки;
 г, д, е – мікроструктура перехідної ділянки; ж, з, и – мікроструктура основного металу

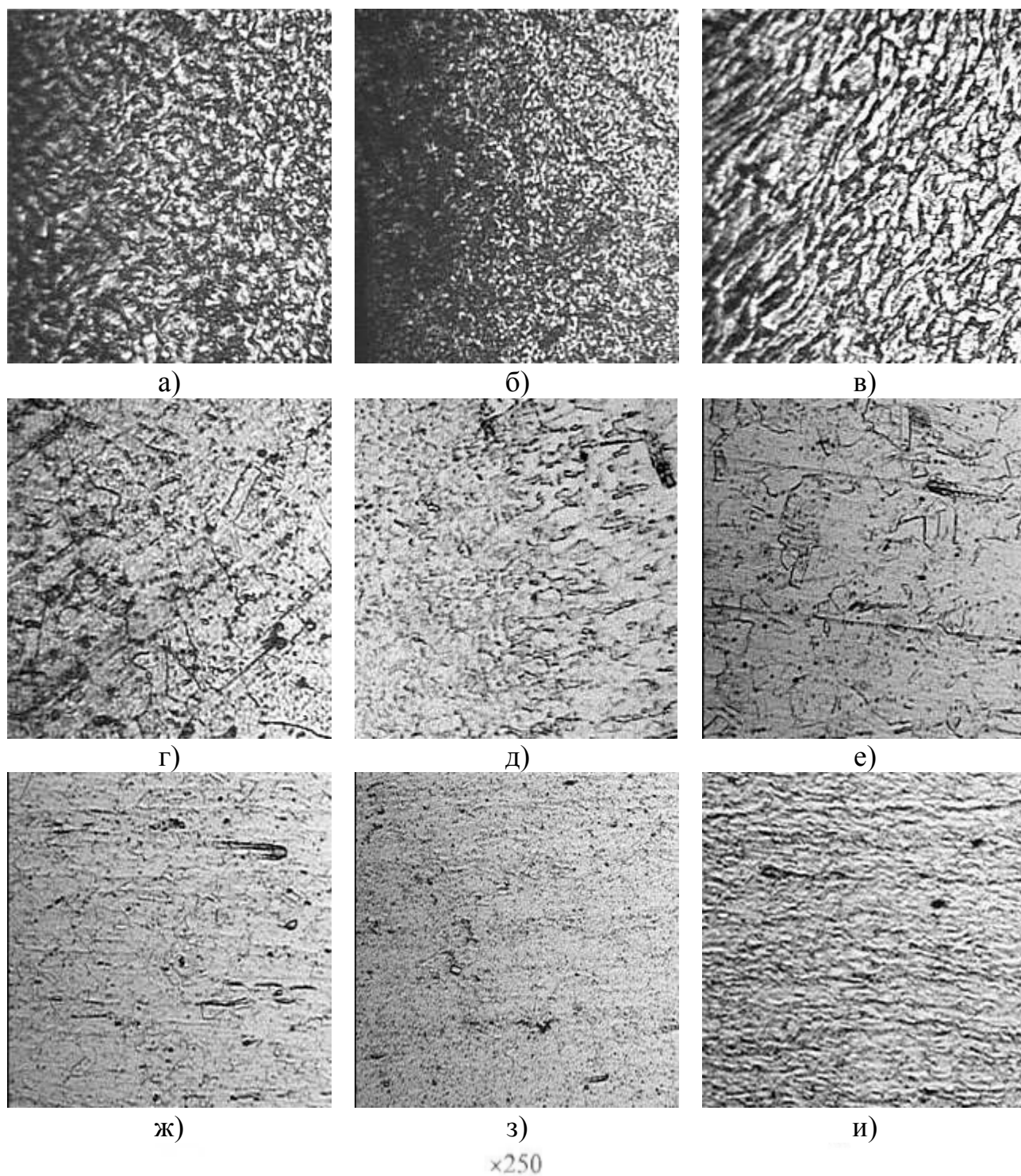


Рисунок 5.24 – Мікроструктура сталі 08X18N10T після різних видів різання:
 а, г, ж – аргано-плазмове різання; б, д, з – повітряно-плазмове різання;
 в, е, и – киснево-флюсове різання; а, б, в – мікроструктура оплавленої ділянки;
 г, д, е – мікроструктура перехідної ділянки; ж, з, и – мікроструктура основного металу

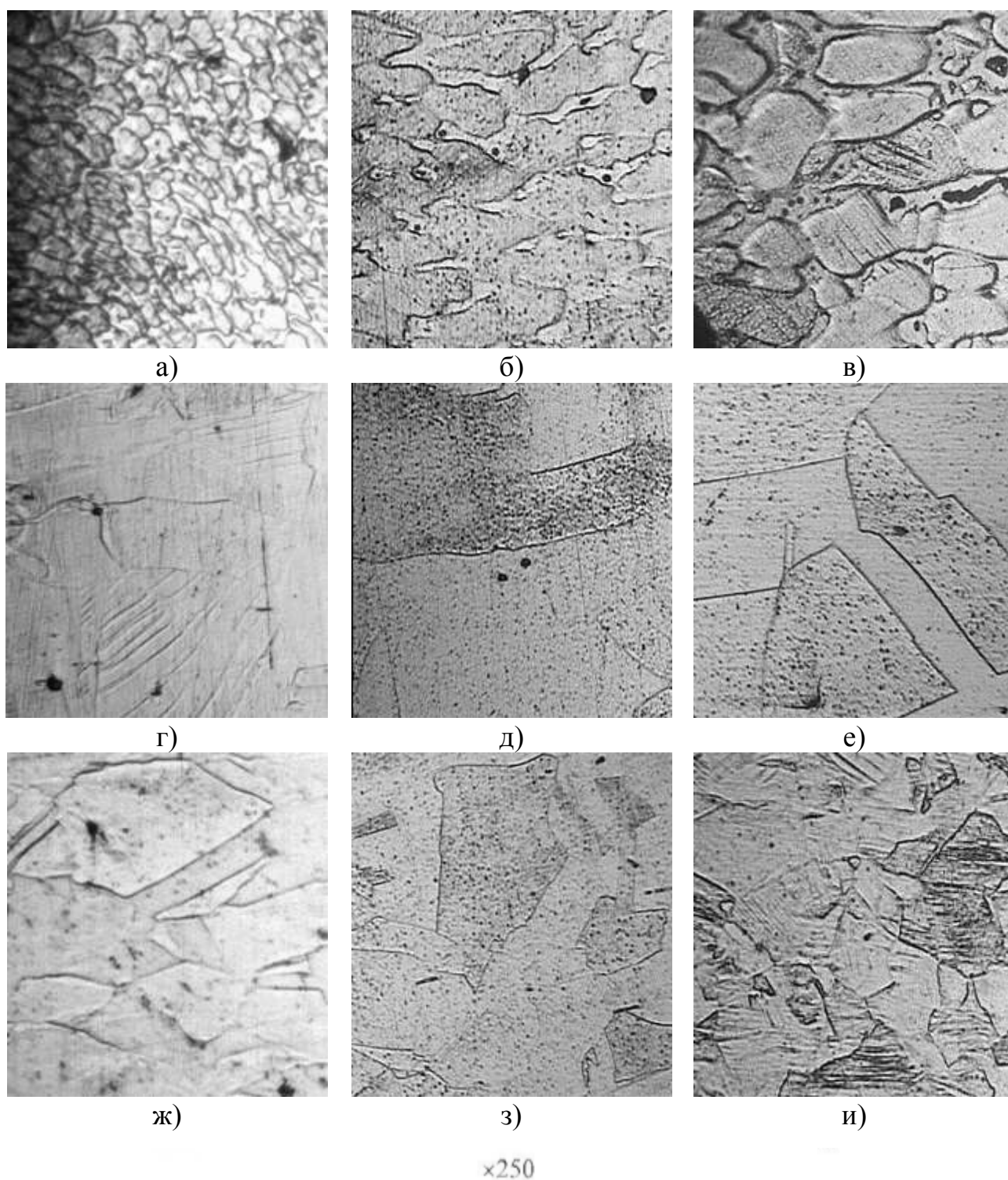


Рисунок 5.25 – Мікроструктура сталі 03X17H14M3 після різних видів різання:

а, г, ж – аргоно-плазмове різання; б, д, з – повітряно-плазмове різання;
 в, е, и – киснево-флюсове різання; а, б, в – мікроструктура оплавленої ділянки;
 г, д, е – мікроструктура перехідної ділянки; ж, з, и – мікроструктура основного металу

Таблиця 5.2 – Вплив способу різання на глибину термічно оброблених шарів

Глибина термічно оброблених шарів, мм		Марки сталі												
		3 сп.	40	У10	09Г2С	40Х	30Х13	Х12М	Ф	30Х1	А	25Х1	МФ	08Х10
Аргоно-плазмова	ОУ	0,08	0,45	0,10	0,08	0,04	0,15	0,40	0,20	0,13	0,35	0,90		
	ПУ	2,00	3,00	2,50	1,70	2,30	1,05	0,40	0,70	1,10	2,10	1,60		
	Σ	2,08	3,45	2,60	1,78	2,34	1,20	0,80	0,90	1,23	2,45	2,50		
Повітряно-плазмова	ОУ	0,18	0,80	0,10	0,15	0,15	0,08	0,35	0,15	0,13	0,14	0,40		
	ПУ	1,50	0,60	1,80	0,60	1,50	0,13	0,15	0,10	1,60	1,03	1,04		
	Σ	1,68	1,40	1,90	0,75	1,65	0,21	0,50	0,25	1,73	1,17	1,44		
Киснево – флюсова	ОУ	0,10	0,25	0,05	0,50	0,40	0,13	0,58	0,15	0,18	0,43	2,72		
	ПУ	1,50	7,00	1,40	2,00	1,70	2,15	1,70	3,20	1,70	4,30	3,30		
	Σ	1,60	7,25	1,45	2,50	2,10	2,28	2,28	3,35	1,88	4,73	6,02		

Примітка: ОУ – глибина оплавленого участку, мм; ПУ – глибина перехідної ділянки, мм; Σ – сума ОУ и ПУ

Таблиця 5.3 – Вплив способу різання на мікротвердість

Мікротвердість, кг/мм ²		Марки сталі											
		3 сп.	40	У10	09Г2С	40Х	30Х13	Х12М	МФ	30Х1	МА	25Х1	МФ
Аргоно-плазмова	ОУ	420	572	900	383	514	724	724	385	350	383	380	
	ПУ	290	350	510	270	260	640	642	350	240	236	297	
	ОМ	180	263	330	210	226	270	350	227	232	220	254	
Повітряно-плазмова	ОУ	170	572	420	193	420	824	950	383	350	272	254	
	ПУ	220	322	380	200	380	640	642	383	237	274	254	
	ОМ	180	263	330	210	226	270	350	227	232	220	254	
Киснево – флюсова	ОУ	193	322	824	181	464	642	724	383	420	383	274	
	ПУ	210	275	500	160	350	724	946	350	382	279	274	
	ОМ	180	263	330	210	226	270	350	227	232	220	254	

Примітка: ОУ – глибина оплавленої ділянки, мм; ПУ – глибина перехідної ділянки, мм; ОМ – основний метал.

Збільшення швидкості охолодження в інтервалі кристалізації сприяє здрібнюванню первинної структури металу в зоні різання, особливо для легованих сталей (див. рис. 5.16, а, в; рис. 5.19, б, д–е). Метал, що утворювався в результаті терморізки, на середньолегованих сталях, охолоджених з підвищеними швидкостями, по механічних властивостях значно перевершує основний метал. Зміна механічних властивостей відбувається не тільки в результаті здрібнювання первинної структури, але також ослаблення ступені хімічної неоднорідності, обумовленої співвідношенням концентрацій елементів у ліквацийному міжкристалічному прошарку й у тілі стовпчастого кристаліту (див. рис. 5.15, а-в; рис. 5.17, в) [125].

У результаті терморізки був встановлений утвір умовних ділянок, починаючи від зони плавлення до основного металу.

Друга ділянка містить крупні зерна. У неї входить метал, який нагрівався від температури близько 1200°C до температури плавлення основного металу. Ширина його змінюється в межах 0,6 – 4,3 мм. При нагріванні метал перетерплює $\alpha \rightarrow \lambda$ -перетворення [125].

У міру перегріву вище температури $A_{с3}$ аустенітне зерно росте й навіть при незначній тривалості перебування при високих температурах встигає вирости до значних розмірів (див. рис. 5.24, г–е; рис. 5.25, г–е). Тип структури, що утворюється в ділянці перегріву, залежить від характеру термічного процесу різання й состава металу. Так, у деяких випадках у цій ділянці формується відманштеттова структура (див. рис. 5.16, а; рис. 5.18, г–е).

У легованих сталях ділянки металу, що нагріваються при різанні вище температури $A_{с3}$, у результаті швидкого охолодження надобувають структури загартування (див. рис. 5.19, а–е; рис. 5.20, а, г; рис. 5.22, а–д; рис. 5.23, а–в).

В табл. 5.4 наведені мікроструктури, що утворюються при різанні різних сталей.

Таблиця 5.4 – Мікроструктури, що утворюються при різанні

Марка сталі	Ділянки зони термічного впливу												
	Ділянка оплавлення			Ділянка перегріву			Ділянка дрібного зерна			Ділянка неповної перекристалізації			Основний метал
	Вид різання												
	А	В	К	А	В	К	А	В	К	А	В	К	АВК
Зсп	М Д			М В			М В			М В			Ф П
40	^д МЛ М	М С	^д МЛ Ф	ФП В	С	С Ф М	Ф ПС	С	СП СФ	ПЗ СФ	С	ПЗ С П	П СФ
У10	М	ТМ	^д М Д	ТМ	Т	М	ТМ	Т	М	ТМ	Т	М П	П
09Г2С	ФП Д	ФП ПР		ФП В			ФП ПС			ФП ПС			ФП ПС
40Х	Ф М д	М Д МЛ	Ф М д	Ф М	М	Ф Т	Ф С	Ф С МЛ	Ф С МЛ	Ф С СП			Ф СП
30Х13	М А	АР Д		М А	А		М А	А		М А	А		Ф К
Х12МФ	НР			М К			М К			М К			СП К
30ХМА	М Д	М ДЯ	М	М	ТМ		М	Ф С		М	Ф С		Ф СП
25Х1МФ	М			Ф ПЗ В	Ф С		Ф СП			Ф СП			Ф СП
08Х18Н10Т	АФ Д	А ДЯ	АФ ДЯ	А			А			А			А К
03Х17Н14М3	АР Д	АР Д	АР К	А			А			А			А
Умовні позначення: А – аргонно-плазмова різка, В – повітряно-плазмова різка, К – киснево-флюсове різання, ФП – ферито-перлітна структура, Д – дендритна структура, Ф – ферит, СП – сорбітообразний перліт ПЗ – перліт зернистий, СФ –				В – відманштеттенова структура, ПС – полосчата структура, ПР – перепал, АФ – аустенитно-феритна структура, А – аустенитна структура, АР – неоднорідний аустенітний розчин, Ц – цементит, ФВ – ферит				ДВ – дендритна структура пористої будови, К – карбідні і карбонітридні вclusions, М – структура мартенситу, МЛ – мелкодисперсна структура, ТМ – троостомартенсіт, НР – нерівномірний твердий					

Однак структура зони по ширині від ділянки сплавки до ділянки, що мала при різанні максимальну температуру тільки трохи вище A_{c3} , буде однаковою. У результаті розпаду великих аустенітних зерен у ділянках, що прилягають до границі сплавки, що й нагріваються при різанні вище 1200°C , утворюється більш крупнопластинчатий мартенсит (див. рис. 5.23, а–в), чому в ділянках металу, що нагріваються при різанні вище A_{c3} . Структура зони сплавки є майже такою ж, як і структура ділянки перегріву. Наступна ділянка – ділянка перекристалізації. Він включає метал, нагрітий від температури, трохи вище температури $\alpha \rightarrow \beta$ -перетворення, до $1100\text{--}1150^{\circ}\text{C}$. Ширина даного ділянки $0,7\text{--}1,0$ мм.

У низьковуглецевих і низьколегованих сталях у ділянці перекристалізації звичайно утворюється дрібнодисперсна (зерниста) структура (див. рис. 5.16, а, в), що характеризує в цілому досить високим комплексом механічних властивостей. У середньо і високолегованих сталях у металі даного ділянки часто утворюється дрібнопластинчатий мартенсит або суміш мартенситу й продуктів проміжного перетворення (див. рис. 5.20, г; рис. 5.21, г–е; рис. 5.22, г–е), тобто ті ж структури, що й у ділянці перегріву, але більш дисперсні.

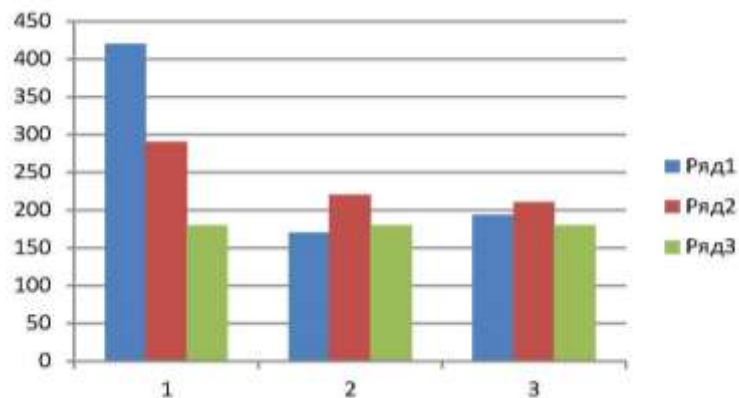
Наступна, четверта ділянка містить у собі метал, нагрітий від температур A_{c1} до температури A_{c3} . Метал ділянки зазнає тільки часткової перекристалізації, і, тому його можна назвати ділянкою неповної перекристалізації. Метал цієї ділянки в низьковуглецевих і низьколегованих сталях що характеризує майже незмінним феритним зерном (рис. 5.19, г–е) і деяким дробленням і сфероїдизацією перлітних ділянок (рис. 5.17, е; рис. 5.19, г–е). У середньо- і високолегованих сталях після охолодження формується структура часткового загартування (див. рис. 5.20, г; рис. 5.21, г–е; рис. 5.22, г–д).

Наступна ділянка – п'ята – можна назвати ділянкою рекристалізації. Він включає метал, який нагрівався від 500°C до температур трохи нижче A_{c1} . Окремі ділянки даної зони, що нагрівалися нижче A_{c1} , по своїй структурі й

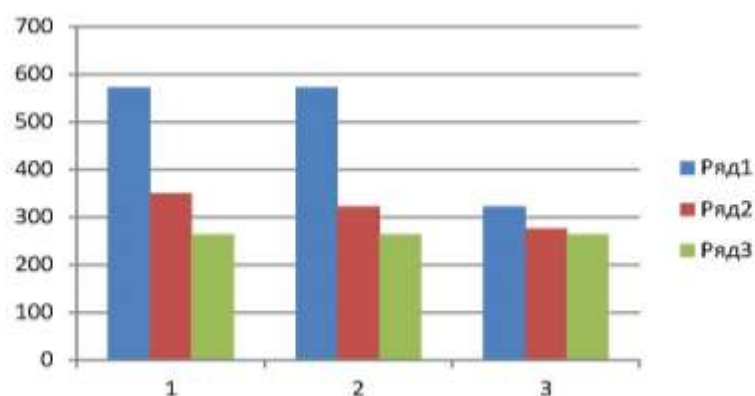
властивостям можуть бути різними залежно від вихідного стану металу перед терморізанням. Якщо метал перед різанням зазнав холодної пластичної деформації, то при нагріванні до температур нижче A_{c1} відбувається рекристалізація, що приводить до значного росту зерна (див. рис. 5.24, г–е; рис. 5.25, г–е). Шоста ділянка включає метал, який нагрівався в інтервалі температур 100-500°C. Ця ділянка в процесі різання не перетерплює видимих структурних змін (див. рис. 5.18, г–е; рис. 5.23, г–е). Високолеговані аустенітні сталі не перетерплюють видимих фазових перетворень при впливі на них термічного впливу при різанні. Внаслідок цього зона термічного нагрівання цих сталей має менш складну будову (див. рис. 5.24, 5.25), ніж зона при різанні звичайних конструкційних сталей (див. рис. 5.16, 5.18, 5.20). Розмір зони сплавки високолегованих сталей порівняно невеликий і визначається температурним градієнтом і інтервалом кристалізації. Якщо температурний градієнт малий, а інтервал кристалізації порівняно великий, то ширина зони сплавки зростає. Властивості зони термічного впливу при різанні нерозривно пов'язані зі станом границь зерен у ній. У зоні термічного впливу під впливом термічного циклу різання відбувається енергійний ріст зерен (див. рис. 5.23, г–е; рис. 5.24, г–е), а також підплавлення границь у зоні сплавки (див. рис. 5.15, в; рис. 5.17 в) і наступний розвиток у ній хімічної мікронеоднорідності (див. рис. 5.17, в). У зв'язку із цим по границях зерен локалізуються різного роду руйнування, що обумовлює істотний вплив їх на механічні властивості. У зоні сплавки утворюються границі двох типів – первинні й вторинні. Первинні границі формують більш дрібні зерна (див. рис. 5.19, д, е), вторинні (тонкі) крупні зерна (див. рис. 5.23, д, е). Первинні й вторинні границі, як правило, розташовані по відношенню одна до одної довільно. Первинні границі містять підвищену кількість легуючих елементів [126], причому рівень хімічної неоднорідності можна зіставити з дендритною неоднорідністю, що розбудовується при кристалізації зони сплавки. Це дає підставу вважати, що первинні границі виникають внаслідок утвору й наступного затвердіння рідкої

фази. Останнє переконливо підтверджується даними металографічних досліджень (див. рис. 5.15–5.25; табл. 5.3) і вимірів мікротвердості (табл. 5.2). Математична обробка результатів досліджень (рис. 5.26–5.38) довела, що глибина зони термічного впливу, отриманої від повітряно-плазмової різки набагато менше, у порівнянні з іншими видами різання (рис. 5.37–5.38) [120, 125].

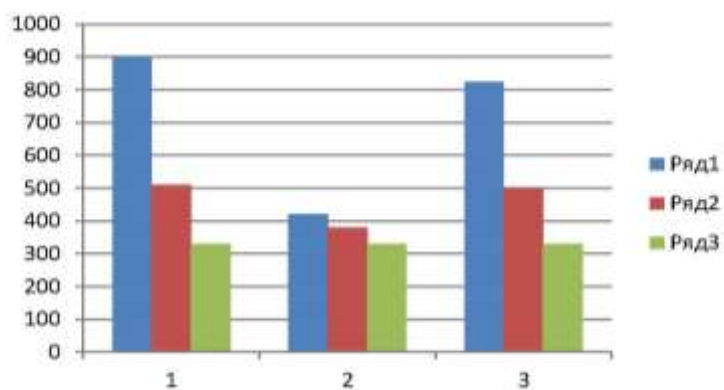
Таким чином, методом мікроструктурного аналізу встановлене, що найбільш ефективним і доцільним видом різання стали є повітряно-плазмове різання розробленими плазмотронами (див. рис. 5.15 – 5.25, б, д, з). Утворюються структури в зоні термічного впливу, а також характер і глибина даної зони промовляють на користь вибору повітряно-плазмового різання (табл. 5.1 – 5.3). Результати проведених теоретичних та експериментальних досліджень у вигляді конструкторсько-технічних рішень і технологічних рекомендацій були використані у промислових умовах. Так на ПрАТ «АЗОТ» м. Северодонецьк пройшли виробничі випробування плазмотрони ПР-1, ПР-2, ПР-3, ПР-4, ПР-6 для різання нержавіючих (12Х18Н10Т, Х23Н18, 20Х13), конструкційних (09Г2С, ст. 3, ст. 20, 10ХСНД, 20Г, 15Г2) товщиною понад 120 мм, кольорових металів (алюмінію, латуні, бронзи) і титану товщиною понад 70 мм. Економічний ефект склав 170 тис. грн.. за рахунок більш високих швидкісних режимів ніж при киснево і киснево-флюсовому різанні і більш якісною поверхнею різку. (Додаток А). На виробничих майданчиках ТОВ «Буддеталь» пройшла апробацію технологія різання конструкційних сталей товщиною до 60 мм плазмотронами ПР-1 та ПР-2. Плазменно-дугове різання плазмотроном ПР-1 здійснювали за режимами: $I = 350 \text{ А}$, $U = 180 \text{ А}$, розхід робочого газу (аргон) 1,0 г/с, швидкість різання 0,5 м/хв., відстань сопла плазмотрону до металу 10 мм, діаметр сопла 3,5 мм; а плазмотроном ПР-2: $I = 400 \text{ А}$, $U = 180 \text{ А}$, розхід робочого газу (повітря) 1,0 г/с, швидкість різання 0,5 м/хв., відстань сопла плазмотрону до металу 10 мм, діаметр сопла 3,5 мм.



а)

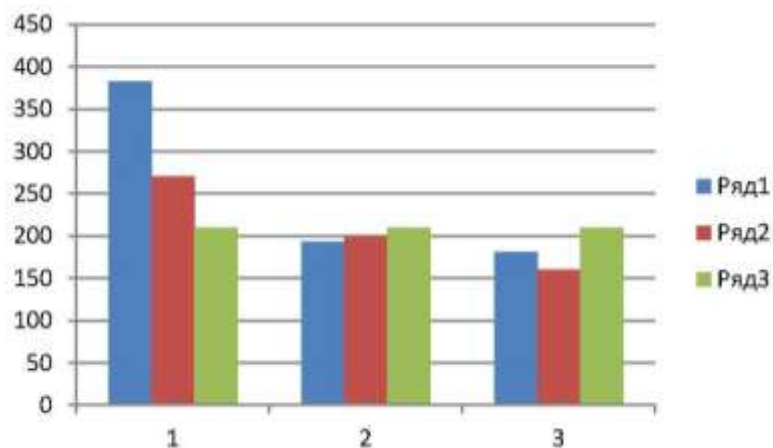


б)

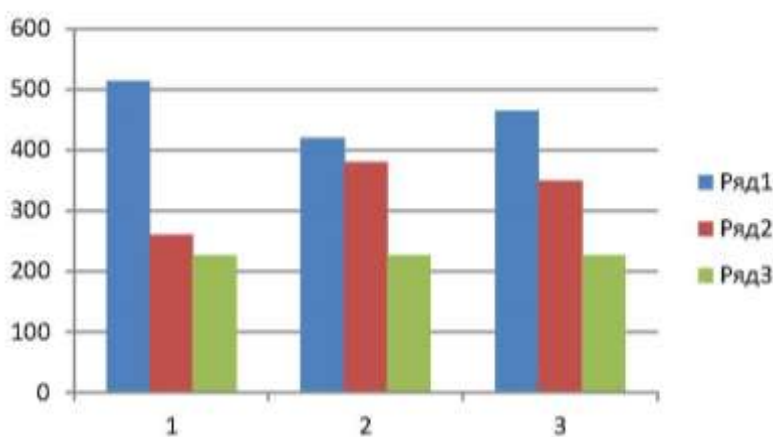


в)

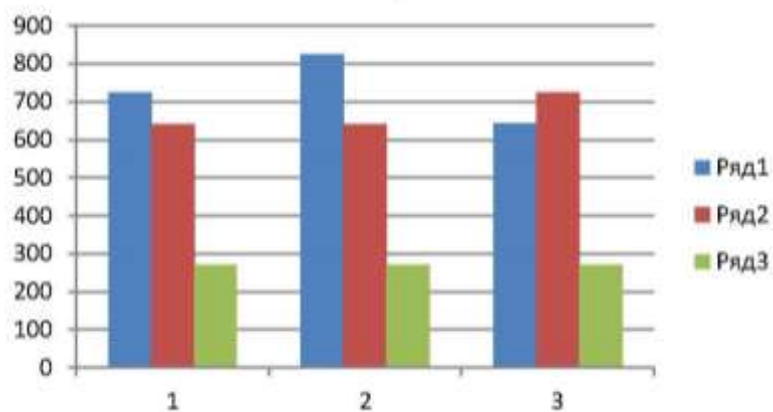
Рисунок 5.26 – Мікротвердість (кг/мм²) сталі 3сп (а), сталі 40 (б), сталі У10 (в).
 «Ряд 1» – оплавлена ділянка, «Ряд 2» – перехідна ділянка, «Ряд 3» – основний метал;
 1 – аргано-плазмове різання; 2 – повітряно-плазмове різання;
 3 – киснево-флюсове різання



а)

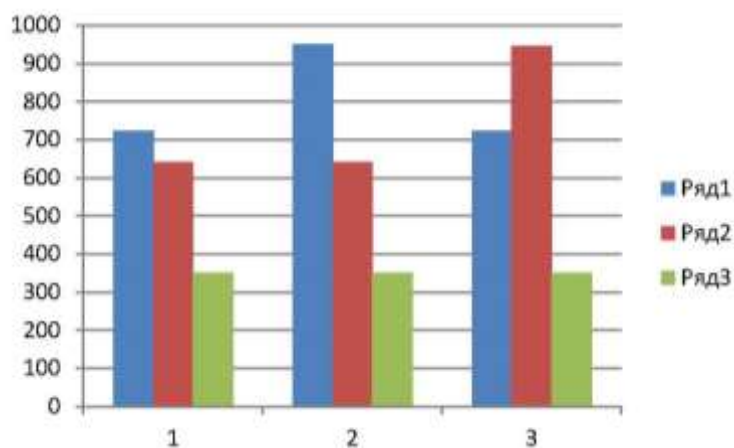


б)

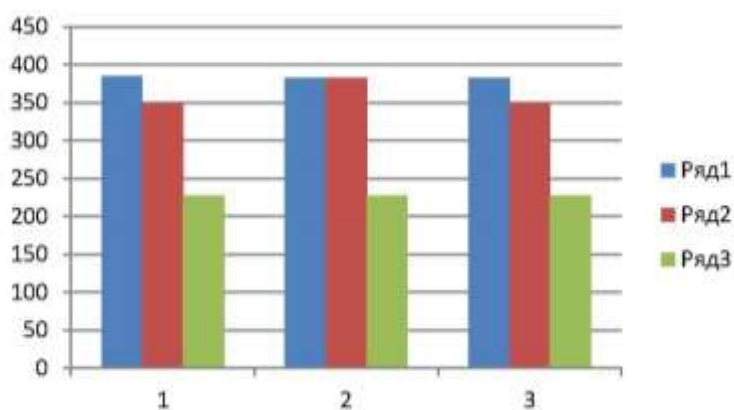


в)

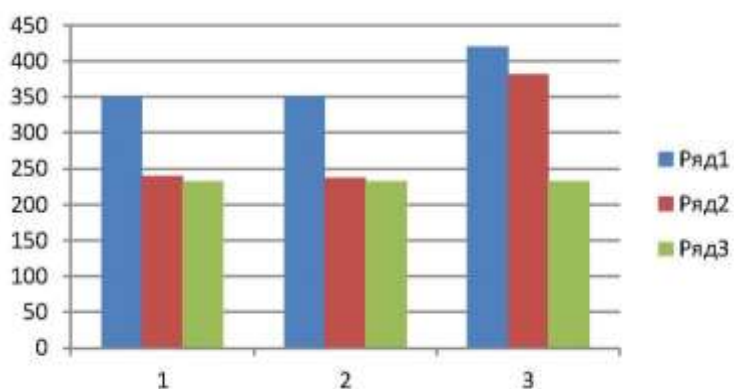
Рисунок 5.27 – Мікротвердість (кг/мм²) сталі 09Г2С (а), сталі 40Х (б), сталі 30Х13 (в). «Ряд 1» – оплавлена ділянка, «Ряд 2» – перехідна ділянка, «Ряд 3» – основний метал; 1 – аргано-плазмове різання; 2 – повітряно-плазмове різання; 3 – киснево-флюсове різання



а)

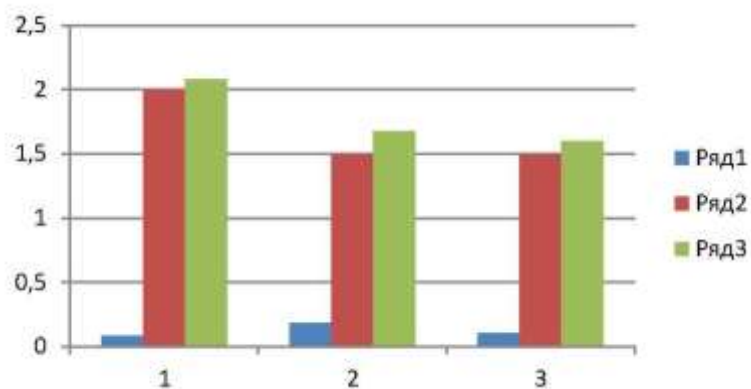


б)

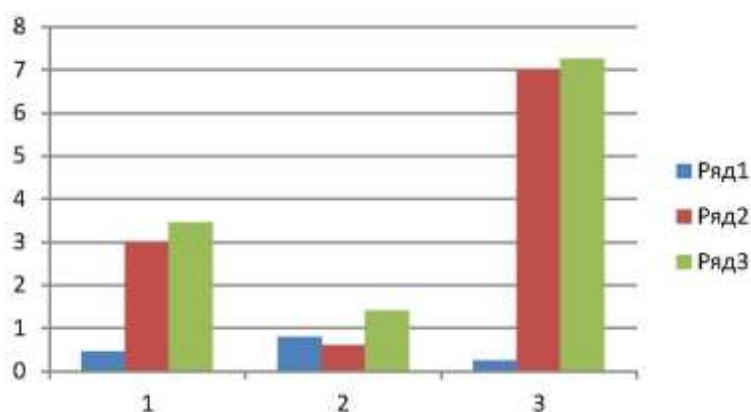


в)

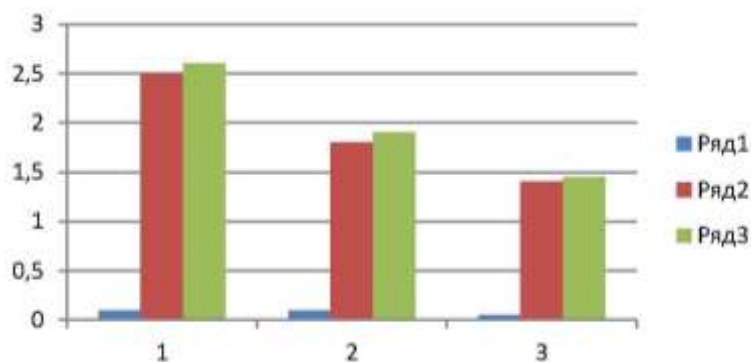
Рисунок 5.28 – Мікротвердість (кг/мм²) сталі Х12МФ (а), сталі 30ХМА (б), сталі 25Х1МФ (в). «Ряд 1» – оплавлена ділянка, «Ряд 2» – перехідна ділянка, «Ряд 3» – основний метал; 1 – аргано-плазмове різання; 2 – повітряно-плазмове різання; 3 – киснево-флюсове різання



а)

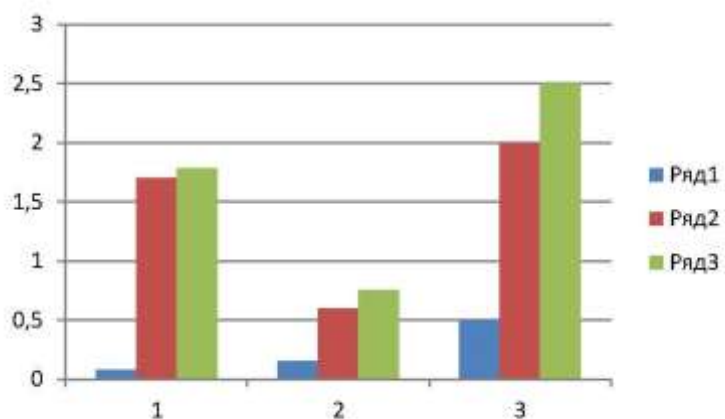


б)

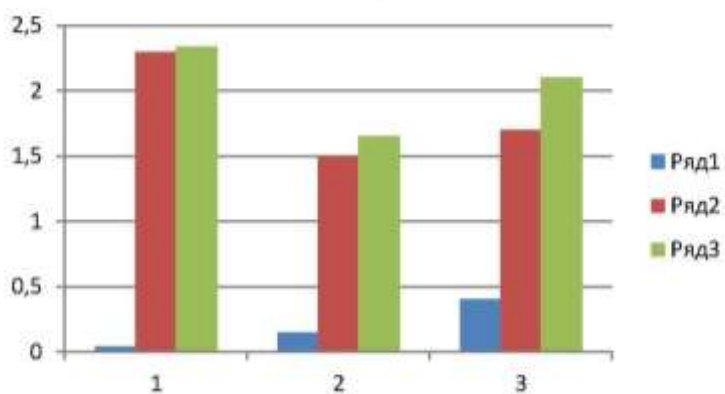


в)

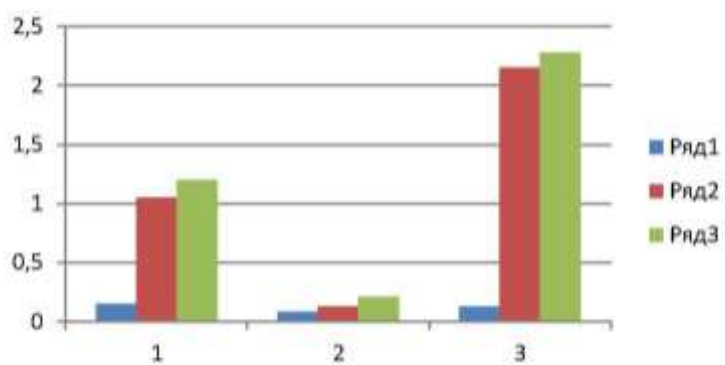
Рисунок 5.29 – Глибина (мм) термічно оброблених шарів сталі 3сп (а), сталі 40 (б), сталі У10 (в), після різання. «Ряд 1» – глибина оплавленої ділянки (ОУ), «Ряд 2» – глибина перехідної ділянки (ПУ), «Ряд 3» – сума ОУ та ПУ (мм);
 1 – аргано-плазмове різання ; 2 – повітряно-плазмове різання;
 3 – киснево-флюсове різання



а)

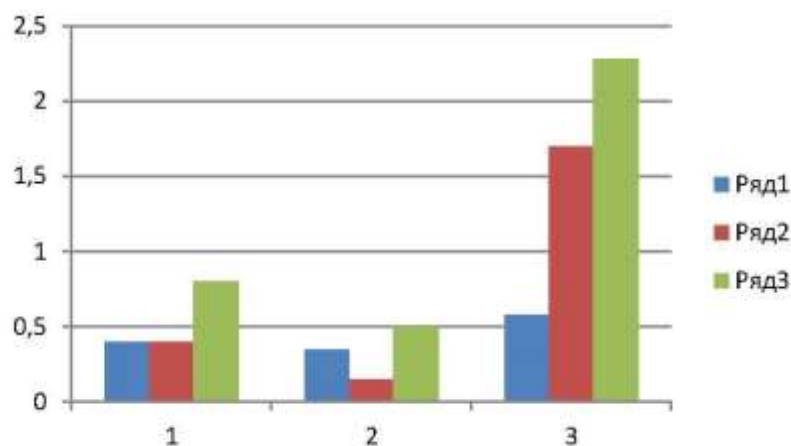


б)

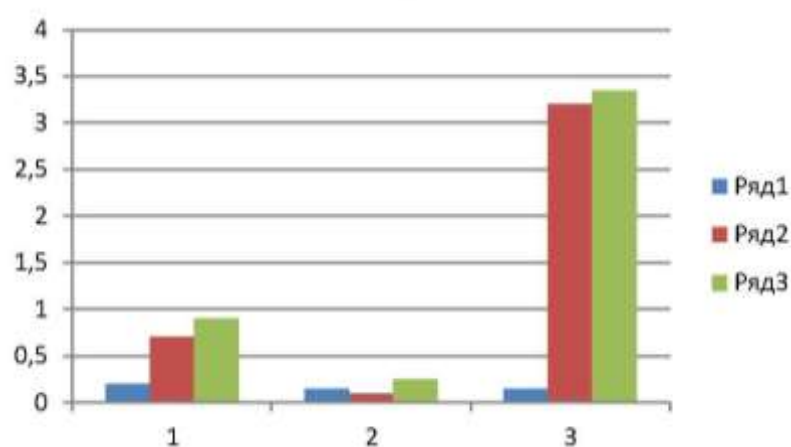


в)

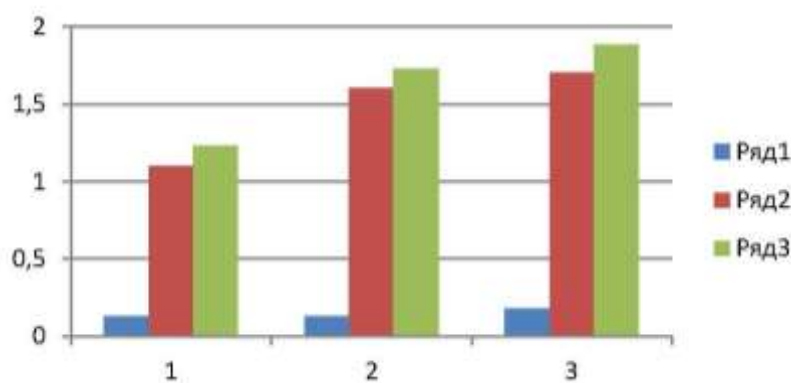
Рисунок 5.30 – Глибина (мм) термічно оброблених шарів сталі 09Г2С (а), сталі 40Х (б), сталі 30Х13 (в). «Ряд 1» – глибина оплавленої ділянки (ОУ), «Ряд 2» – глибина перехідної ділянки (ПУ), «Ряд 3» – сума ОУ та ПУ (мм); 1 – аргано-плазмове різання; 2 – повітряно-плазмове різання; 3 – киснево-флюсове різання



а)



б)



в)

Рисунок 5.31 – Глибина (мм) термічно оброблених шарів сталі Х12МФ (а), сталі 30ХМА (б), сталі 25Х1МФ (в). «Ряд 1» – глибина оплавленої ділянки (ОУ), «Ряд 2» – глибина перехідної ділянки (ПУ), «Ряд 3» – сума ОУ та ПУ (мм); 1 – аргонно-плазмове різання; 2 – повітряно-плазмове різання; 3 – киснево-флюсове різання

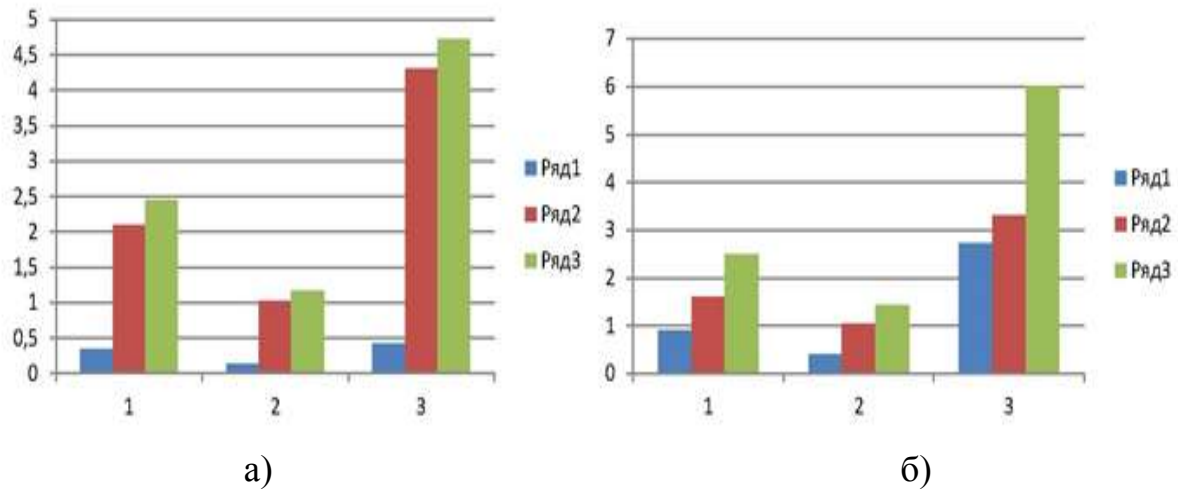


Рисунок 5.32 – Глибина (мм) термічно оброблених шарів сталі 08X18H10T (а), сталі 03X17H14M3 (б). «Ряд 1» – глибина оплавленої ділянки (ОУ), «Ряд 2» – глибина перехідної ділянки (ПУ), «Ряд 3» – сума ОУ та ПУ (мм); 1 – аргонно-плазмове різання; 2 – повітряно-плазмове різання; 3 – киснево-флюсове різання

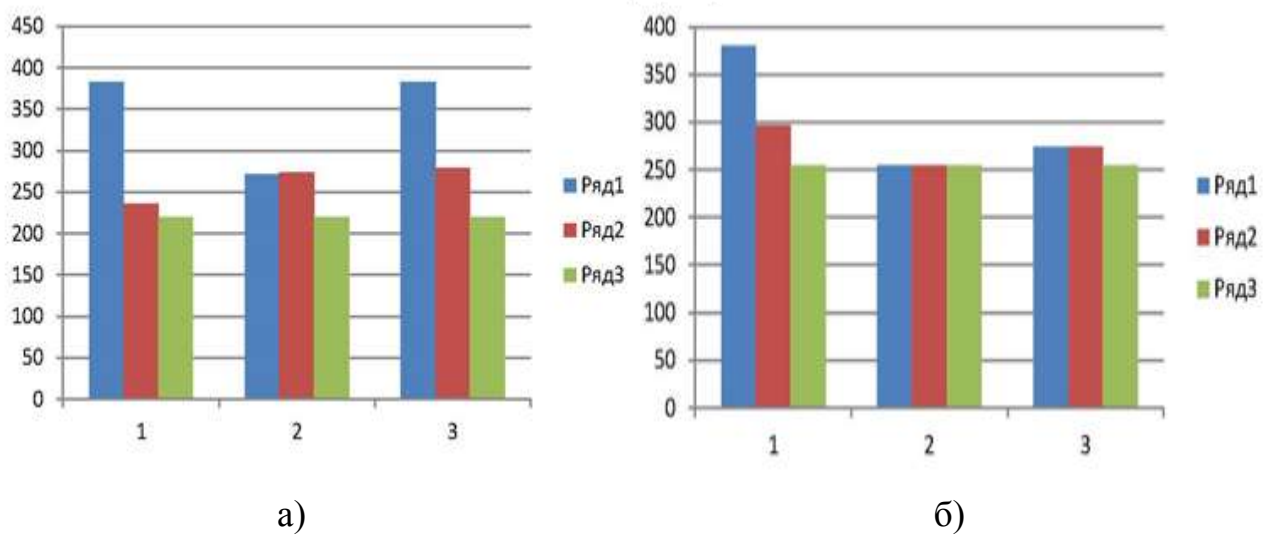
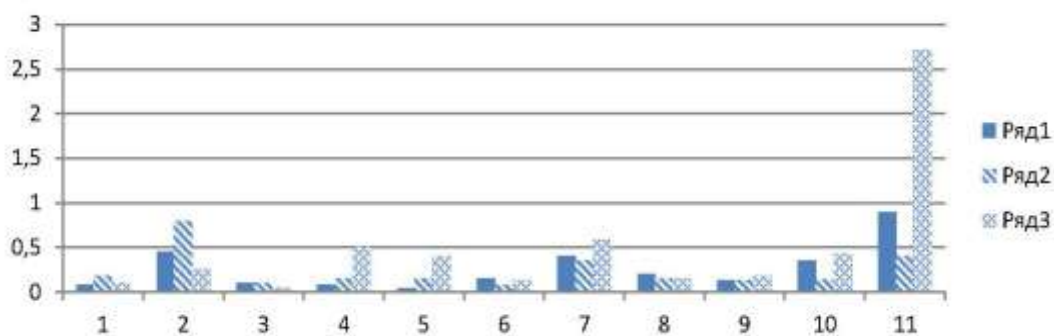
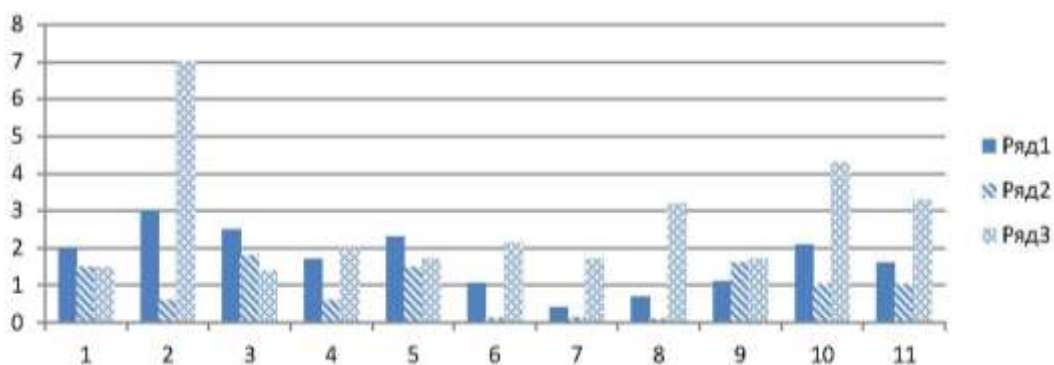


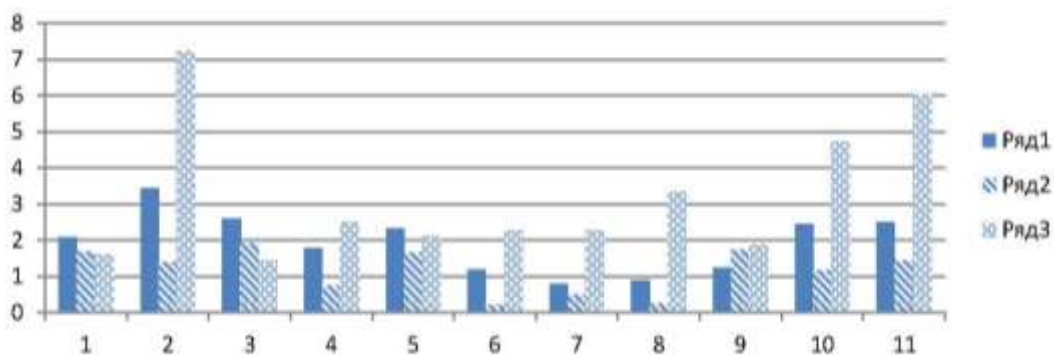
Рисунок 5.33 – Мікротвердість (кг/мм²) сталі 08X18H10T (а), сталі 03X17H14M3 (б). «Ряд 1» – оплавлена ділянка, «Ряд 2» – перехідна ділянка, «Ряд 3» – основний метал; 1 – аргонно-плазмове різання; 2 – повітряно-плазмове різання; 3 – киснево-флюсове різання



а)

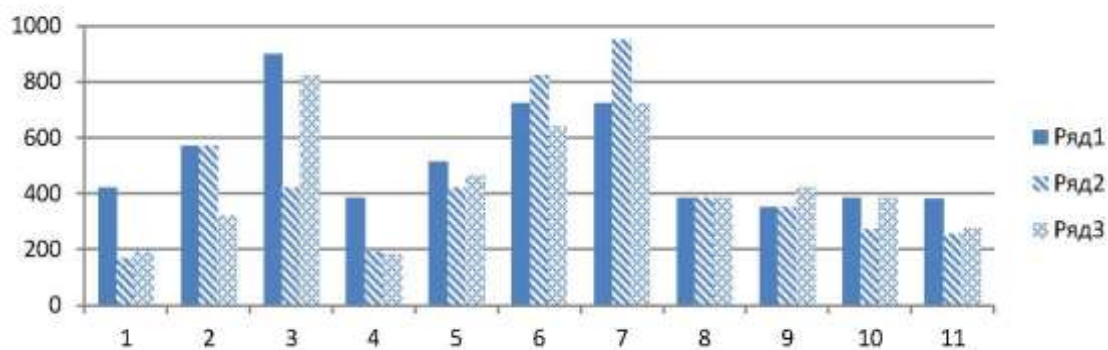


б)

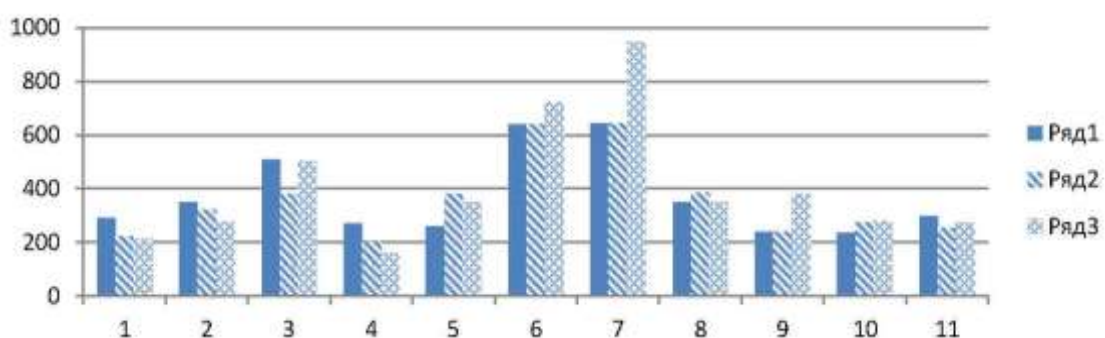


в)

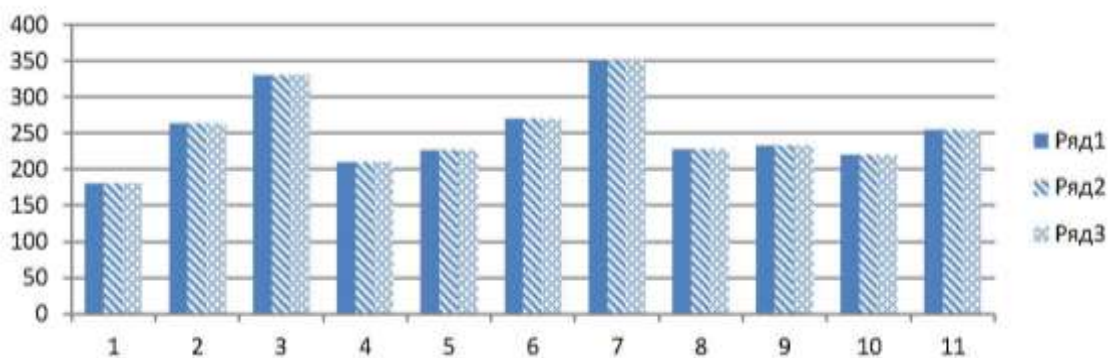
Рисунок 5.34 – Глибина (мм) термічно оброблених шарів різних марок сталі після різноманітних видів різання. «Ряд 1» – глибина оплавленої ділянки (ОУ), «Ряд 2» – глибина перехідної ділянки (ПУ), «Ряд 3» – сума ОУ та ПУ (мм); 1 – аргано-плазмове різання; 2 – повітряно-плазмове різання; 3 – киснево-флюсове різання Марки сталі: «1» – 3сп, «2» – Сталь 40, «3» – У10, «4» – 09Г2С, «5» – 40Х, «6» – 30Х13, «7» – Х12МФ, «8» – 30ХМА, «9» – 25Х1МФ, «10» – 08Х18Н10Т, «11» – 03Х17Н14М3



а)



б)

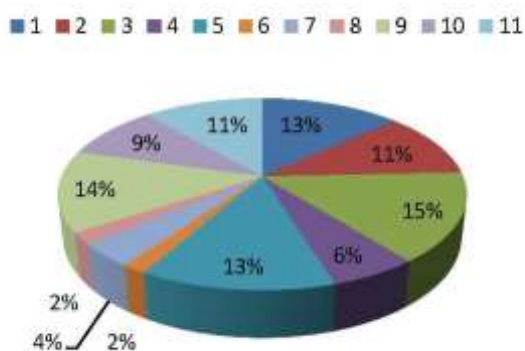


в)

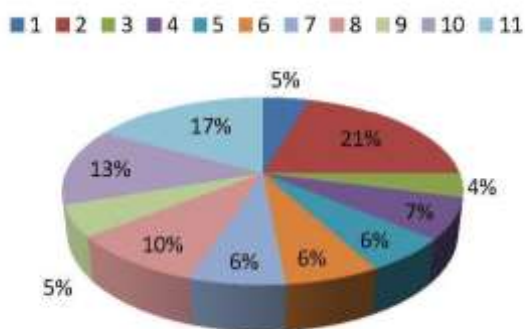
Рисунок 5.35 – Мікротвердість (кг/мм^2) термічно оброблених шарів різних марок сталі після різноманітних видів різання. а – мікротвердість оплавленої ділянки, б – мікротвердість перехідної ділянки, в – мікротвердість основного металу; «Ряд 1» – аргано-плазмове різання; «Ряд 2» – повітряно-плазмове різання; «Ряд 3» – киснево-флюсове різання Марки сталі: «1» – 3сп, «2» – Сталь 40, «3» – У10, «4» – 09Г2С, «5» – 40Х, «6» – 30Х13, «7» – Х12МФ, «8» – 30ХМА, «9» – 25Х1МФ, «10» – 08Х18Н10Т, «11» – 03Х17Н14М3



а)



б)



в)

Рисунок 5.36 – Доля значення(%) глибини оплавленої та перехідної ділянки(сумарно) різних марок сталі після різних видів різання; а – аргоно-плазмове різання; б – повітряно-плазмове різання; в – киснево-флюсове різання. Марки сталі: «1» – 3сп, «2» – сталь 40, «3» – У10, «4» – 09Г2С, «5» – 40Х, «6» – 30Х13, «7» – Х12МФ, «8» – 30ХМА, «9» – 25Х1МФ, «10» – 08Х18Н10Т, «11» – 03Х17Н14М3

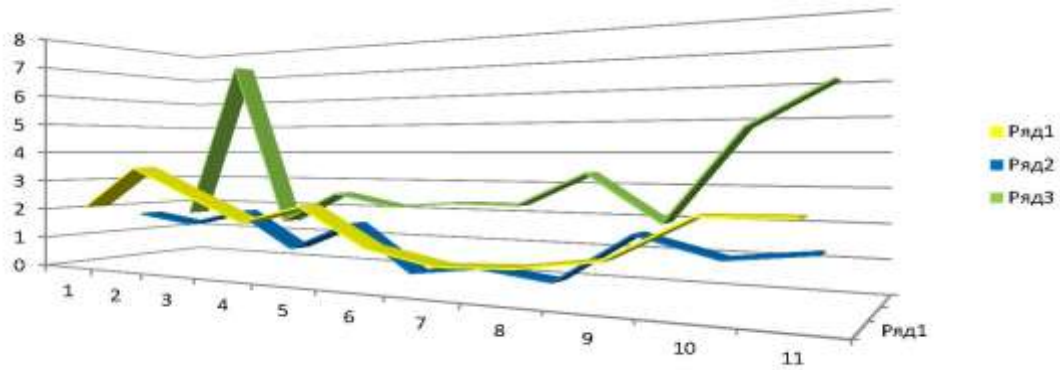


Рисунок 5.37 – Глибина (мм) оплавленої та перехідної ділянки(сумарно) різних марок сталі після різних видів різання. «Ряд 1» – аргано-плазмове різання; «Ряд 2» – повітряно-плазмове різання; «Ряд 3» – киснево-флюсове різання. Марки сталі: «1» – 3сп, «2» – сталь 40, «3» – У10, «4» – 09Г2С, «5» – 40Х, «6» – 30Х13, «7» – Х12МФ, «8» – 30ХМА, «9» – 25Х1МФ, «10» – 08Х18Н10Т, «11» – 03Х17Н14М3

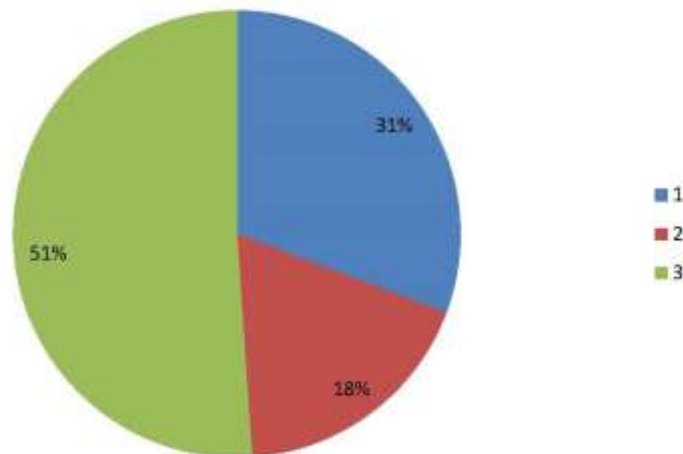


Рисунок 5.38 – Частка значення (%) глибини оплавленої та перехідної ділянки (сумарно) 11 марок сталі після різноманітних видів різання: «1» – аргано-плазмове різання (31%); «2» – повітряно-плазмове різання (18%); «3» – киснево-флюсове різання (51%)

Встановлений характер формоутворення розділової поверхні різку та час різання, а також основні залежності зміни параметрів різання від режимів роботи плазмотронів і товщини металу. Отриманий економічний ефект від впровадження технології різання конструкційних сталей плазмотронами ПР-1 та ПР-2 склав 51 тис. грн. за рахунок підвищення техніко-економічних показників. (Додаток Б).

Результати роботи, які пов'язані з технологією та обладнанням термічного різання металопрокату різної товщини та складності контуру для виготовлення деталей і вузлів підйомно-транспортних, дорожніх, будівельних та меліоративних машин, використано в навчальному процесі Донбаської державної машинобудівної академії при викладанні розділів дисципліни «Технологія виробництва підйомно-транспортних машин» для освітньо-професійного рівня бакалавр, а також у курсовому і дипломному проектуванні й у науково-дослідній роботі магістрів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» при визначенні способів виготовлення деталей та їх вузлів. (Додаток В).

Висновки до розділу 5

1. Дослідження технологічного процесу плазмового різання зразків різних металів дозволило встановити основні закономірності зміни параметрів різку в залежності від режиму роботи плазмотрону та товщини розрізуваного металу.

2. Встановлено, що швидкість різання металів плазмотронами з порожнистими електродами, що працюють на зворотній полярності струму на 20–40% вища, ніж із плазмотронами на прямій полярності, при однаковому робочому струму дуги.

3. Енерговитрати на один погонний метр різку для плазмотронів із порожнистим та термохімічним електродами однакові, але зростають зі збільшенням товщини розрізуваного металу.

4. Розроблене обладнання дозволило здійснити плазмово-дугове різання листового прокату товщиною до 400 мм. Така можливість обумовлена, перш за все, більшою рухомістю катодної плями при роботі плазмотрону на зворотній полярності. Крім того, потужність плазмотрону з мідним електродом в два-три рази перевищує потужність плазмотрону з термохімічним катодом.

5. Досліджено технологію плазмово-дугового різання круглого сталюого прокату діаметром 100–300 мм. Встановлено характер формоутворення розділової поверхні та час відрізання круглого прокату при робочих струмах 300–800 А.

6. Економічний ефект від впровадження однієї установки плазмово-дугового різання металів плазмотронами ПР–6, що працюють на зворотній полярності струму складатиме в залежності від обсягу виробництва.

7. Результати роботи впроваджено у ремонтно-механічному цеху ПрАТ «Сєверодонецьке об'єднання АЗОТ» (м. Сєверодонецьк), ТОВ «Буддеталь» (м. Краматорськ) з економічним ефектом 121 тис. грн. у цінах 2017 року. Окремі положення роботи впроваджено в учбовий процес.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертації виконано нові науково-обґрунтовані розробки в галузі плазмового різання металу, що забезпечують вирішення важливої науково-технічної проблеми – підвищення ефективності та розширення технологічної можливості плазмового різання на підставі розробки конструкторсько-технологічних рекомендацій при створенні плазмотронів для різання металу великої товщини.

1 Створено плазмотрони для різання металу товщиною до 400 мм потужністю від 40 до 300 кВт.

2 Для різання металу великої товщини (понад 100 мм) розроблено секційний плазмотрон з порожнистим електродом, у циліндричній порожнині якого розташовані термоємні вставки (з вольфраму), захищені від ерозії робочого газу (повітря) аргонем низького тиску, що сприяє утворенню дифузійної прив'язки дуги та підвищенню струму дуги понад 800 А.

3 Для підвищення ресурсу роботи та ефективності порожнистого «холодного» електроду в плазмотроні для різання використано спосіб розподілу прив'язки дуги вздовж розрядного каналу електроду. При струмі дуги 700 А питома ерозія порожнистого мідного електроду склала ($10^{-9} - 10^{-10}$) кг/Кл, що на порядок нижче відомих даних.

4 Застосування принципу примусового розщеплення прив'язки дуги між термохімічними вставками привело до якісно нових залежностей потоку тепла та потенціалу, та дозволило збільшити потужність плазмотрону і ресурс роботи катоду (в залежності від струму дуги в два рази та більше).

5 Встановлено, що розроблений плазмотрон із порожнистим «холодним» електродом при різанні металу на зворотні полярності підвищує ресурс роботи електроду більше ніж вдвічі, а продуктивність на 20–40%.

6 Розроблена інженерна методика розрахунку високоресурсних плазмотронів для різання з порожнистими циліндричними «холодними» та «гарячими» електродами, що працюють на кисневмісних газах.

7 Встановлено, що тепловий ККД ріжучого плазмотрону залежить від відстані сопла до розрізуваного металу, полярності горіння, довжини каналу сопла та витрати плазмоутворюючого газу.

8 Встановлено, що енерговитрати на один погонний метр різку для плазмотронів із порожнистими та термохімічними електродами практично однакові та зростають зі збільшенням товщини різку.

9 Проведені металографічні дослідження вимірювання мікротвердості, дослідження структури та змін хімічного складу в зоні хімічного впливу в 11 марках сталі при використанні аргоно-плазмового, повітряно-плазмового, киснево-флюсового різання. Встановлено, що глибина зони термічного впливу, отриманого від повітряно-плазменого різання, менше у порівнянні з іншими видами при різанні металів великої товщини.

10 Розроблені конструкції плазмотронів пройшли промислове випробування у ремонтно-механічному цеху ПрАТ «Сєверодонецьке об'єднання АЗОТ» (м. Сєверодонецьк) та ТОВ «Буддеталь» (м. Краматорськ). Вони застосовувалися при різанні низьковуглецевих сталей (ст. 3, ст. 20, сталь 45, 09Г2С, 17ГС) товщиною до 400 мм; високолегованих сталей (12Х18Н10Т, 17Х23Н18, 20Х13, 10Х17Н13М3Т) товщиною до 150 мм; кольорових металів та сплавів (алюмінію, міді, латуні, бронзи) і титану до 100 мм для різання круглого прокату (ст. 40ХН2МА) до 300 мм, поковок (сталь 45), до 200 мм; труб високого тиску з товщиною стінки до 40-50 мм (12Х18Н10Т, 12Х1МФ). Отримано економічний ефект у сумі 121 тис. грн. у цінах 2017 року.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ширшов И. Г. Плазменная резка / И. Г. Ширшов, В. Н. Котиков. – М.: Машиностроение, 1987. – 192 с.
2. Васильев К. В. Плазменно-дуговая резка – перспективный метод термической резки / К. В. Васильев. // Сварочное производство. – 2002. – № 4. – С. 28–32.
3. Акулов А. И. Технология и оборудование сварки плавлением и термической резки / А. И. Акулов, В. П. Алехин, С. И. Ермаков и др.; под. ред. А. И. Акулова. М.: Машиностроение, 2003. – 560 с.
4. Васильев К. В. Плазменно-дуговая резка / К. В. Васильев. – Москва: Машиностроение, 1974. – 112 с.
5. Дзюба В. Л. Физика, техника и применение низкотемпературной плазмы / В. Л. Дзюба, К. А. Корсунов. – Луганск: СНУ ім. В. Даля, 2007. – 448 с.
6. Жуков М. Ф. Исследование и разработка электродуговых плазмотронов линейной схемы / М. Ф. Жуков, В. П. Лукашов. – Минск: ИТМО им. А. В. Лыкова, 1988. – С. 3 – 8.
7. Эсибян Э. М. Воздушно-плазменная резка: состояние и перспективы / Э. М. Эсибян. // Автоматическая сварка. – 2000. – №12. – С. 6–20.
8. Koptseva N. V. Use of the Thixomet pro software for quantitative analysis of the ultrafine-grain structure of low-and medium-carbon steels subjected to equal channel angular pressing / N. V. Koptseva, M. V. Chukin., O. A. Nikitenko // Metal Science and Heat Treatment. – 2012. – Vol. 54, no. 7 – 8. – P. 387 – 392.
9. Салганик В. М. Научно производственный комплекс «Термодеформ» для создания новых технологий / В. М. Салганик, П. П. Полецков, М. О. Артамонова и др. // Сталь. – 2014. – № 4. – С. 104 – 107.
10. Anakhov S. V., Pykin Yu. A., Matushkin A. V. Narrow jet plasma as the energy efficient and safe technology for metal cutting // Solid State Phenomena (Material Science Forum). – 2016. – Vol. 870. – P. 523 – 527.

11. Analysis of the conditions of efficient and stable operation of plasma in welding processes / Y. G. Novoselcev et al. // *Welding International*. 2012 – P. 13 – 21.

12. Анахов С. В. Принципы и методы проектирования в электроплазменных и сварочных технологиях / А. С. Борухович. – Екатеринбург: Изд-во РГПУ, 2014 – 144 с.

13. Анахов С. В. Плазмотроны: проблема акустической безопасности. Теплофизические и газодинамические принципы проектирования маломощных плазмотронов / С. В. Анахов, Ю. А. Пыкин. – Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2012. – 224 с.

14. Peter Mueller-Hummel, Stefan Ferstl, Marcus Sengotta, Roland Lang. Laser beam welding of high stressed, complex aircraft structural parts, Proc. SPIE 4831, First international Symposium on High-Power Laser Macroprocessing, (3 March 2003) – 115 p.

15. Steen W. M. Laser material processing, 3rd ed. – Springer-Verlag London Ltd, London, 2003. – 450 p.

16. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И. Технологические процессы лазерной обработки. 2-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 664 с.

17. Ширшов И. Г., Котиков В. Н. Плазменная резка. Л.: Машиностроение, 1987. – 192 с.

18. Duley W. Laser Processing and Analysis of Materials. – Springer US, New York, 1983. – 504 p.

19. Коротеев А. С. Электродуговые плазматроны / А. С. Коротеев. – Москва: Машиностроение, 1980. – 175 с.

20. Жуков М. Ф. Динамика, структура дуги в цилиндрическом электроде и его эрозия / М. Ф. Жуков, А. С. Аньшаков, А. Н. Тимошевский, Э. К. Урбах. – Минск: 1988. – С. 915.

21. Handbuch zum Thema Plasmaschneiden [eine elektronische Ressource] / Werkstatt Ausrüstung Leitner joeset. – Salzweg, 2002. – 66 s. – Zugriffsmodus: <https://>

// www.walaustria.at/cu/wal/pdf/Handbuch_Plasmaschneiden_web.pdf - Der Titel Bildschirm.

22. Bererzluk M., Lezoh J. Air plasma cutting with ABIPLAS CUT nolders manufactured by ABICOR BINZEL // *Welding International*. – 2008. – vol. 22, № 6. – pp. 385 – 387.

23. Vasil'ev K. V., Chernyak R. V. Examination of plasma-forming additions in oxygen-plasma cutting // *Welding International*. – 1994. – vol. 8, № 11. – pp. 904 – 908.

24. Salonitis K., Vatousianos S. Experimental Investigation of the Plasma Arc Cutting Process // *Procedia CIRP*. – 2012. – vol. 3. – pp. 287 – 292.

25. Yahya Hisman Celik. Investigating the Effects of Cutting Parameters on Materials Cut in CNC Plasma // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2013. – vol. 28, № 10. – pp. 1053 – 1060.

26. Milan Kumar Das, Kaushik Kumar, Tapan Kr. Barman, Prasanta Sahoo. Optimization of Process Parameters in Plasma arc Cutting of EN 31 Steel Based on MRR and Multiple Roughness Characteristics Using Grey Relational Analysis // *Procedia Materials Science*. – 2014. – vol. 5. – pp. 1550 – 1559.

27. Schitsin Y. D., Kuchaev P. S., Schitsin V. Y. Plasma cutting of metals with reversed polarity and mixed supply of gases // *Welding International*. – 2013. – vol. 27, № 11. – pp. 890 – 892.

28. Dashkovskiy S., Narimanyan A. Thermal plasma cutting. Part I: Modified mathematical model // *Mathematical Modelling and Analysis*. – 2007. – vol. 12, № 4. – pp. 441 – 458.

29. Ramakrishnan H., Balasundaram R., Ganesh N., Karthikeyan N. Experimental investigation of cut quality characteristics on SS321 using plasma arc cutting // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. – 2018. – vol. 40, p. 60.

30. Kirkpatrick, Ian. High definition plasma-an alternative to laser technology // *Aircraft engineering and Aerospace technology*. – 1998. – vol. 70, № 3. – pp. 215 – 217.

31. Loktionov A. A., Gaar N. P. Influence of Technological Parameters of High-Precision Plasma Cutting on the Position of the Anode Spot on the Cut Edge // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 788. – P. 46 – 51.

32. Рахимьянов А. Х., Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А. Технологические особенности раскроя биметаллического соединения «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» при тонкоструйной плазменной резке // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014 - № 3 (64). – С. 51 – 67.

33. Локтионов А. А. Оценка качества реза листовых материалов при тонкоструйной плазменной резке // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013 - № 4 (61). – С. 86 – 91.

34. Рахимьянов Х. М., Локтионов А. А. Особенности формирования кромок при тонкоструйной плазменной резке листового материала // Инновации в машиностроении: сборник трудов 2 Международной научно-практической конференции. – Кемерово, 2011. С. 416 – 419.

35. Полевой Г. В., Сухинин Г. К. Газопламенная обработка металлов. – М.: Издательский центр «Академия», 2005, – 336 с.

36. Полевой Г. В., Сухинин Г. К. Пламенная и газотермическая обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1993, – 335 с.

37. Anakhov S. V., Rykin Yu. A., Matushkin A. V. Narrow jet plasma as the energy efficient and safe technology for metal cutting // Solid State Phenomena (Material Science Forum). – 2016. – Vol. 870. – P. 523 – 527.

38. Жуков М. Ф., Аньшаков А. С. Основы расчета плазмотронов линейной схемы / Ин-т теплофизики Сибир. отд-ния Акад. Наук СССР. – Новосибирск, 1979. – 146 с.

39. Жуков М. Ф. Электродуговые генераторы термической плазмы. Т. 17. Низкотемпературная плазма / М. Ф. Жуков, И. М. Засыпкин, А. Н. Тимошевский [и др.]. – Новосибирск: Наука, 1999. – 712 с.

40. Васильев К. В. Особенности плазменно-дуговой резки в азотно-кислородных смесях / К. В. Васильев. // Автоматическая сварка. – 2000. – № 12. – С. 21–25.

41. Васильев К. В. К системной оценке параметрической структуры плазморезательного оборудования / К. В. Васильев. // Сварочное производство. – 1993. – № 3. – С. 14 – 16.
42. Aithal S. M., Subramaniam V. V. Numerical model of a transferred plasma arc // Journal of Applied Physics. – 1998. – V. 84. – № 7. – P. 3506 – 3517.
43. Yuan X., Li h., Zhao T., Wang F. Comparative study of flow characteristics inside plasma torch with different nozzle configurations // Plasma chemistry and plasma processing. – 2004. – V. 24. – № 4. – P. 585 – 601.
44. Risasher A., Larigaldie S., Bobillot G. Modelling of a steady low-current arc discharge in air at atmospheric pressure // IEEE Trans. Plasma Science. – 2000. – V. 28. – P. 189 – 192.
45. Щицын Ю.Д. Плазменные технологии в сварочном производстве. Ч. 1 / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2004. – 73 с.
46. Пузряков А. Ф. Новые разработки и перспективы использования плазменных технологий // Сварочное производство. – 1997. – № 2. – С. 21 – 25.
47. Computer-aided simulation and experimental study of dusted plasma jets emitting into limited space / Yu. S. Borisov, A. V. Chernyshov, I. V. Krivtsun, et al. // Proc. of the National Thermal Spray Conference. – Boston, USA, 1994. – P. 361 – 366.
48. Васильев К. В. Плазменно-дуговая резка перспективный способ термической резки / К. В. Васильев // Сварочное производство. – 2002. – № 9. С. 26 – 28.
49. Эсибян Э. М. Плазменно-дуговая аппаратура. – К.:Техника, 1971. – 164 с.
50. Клименко А. А. Конструкции электродуговых плазматронов / А. А. Клименко, Г. К. Ляпин. – М.: Изд-во МГТУ им.Баумана, 2010. – 156 с.
51. Анахов С. В. Новый плазматрон для резки металла под сварку: сравнительный анализ / С. В. Анахов, А. В. Матушкин., Ю. А. Пыкин // Вестник ЮУрГУ. Metallurgy. – 2015. – Т.15, № 1. – С. 65 – 69.

52. Severance W. How plasma Arc Cutting cases / W. Severance, D. Adeerson // *Schweisstechnik*. 1992. – № 12. P. 555 – 558.

53. Куликов В. П. Технология и оборудования сварки плавлением и термической резки / В. П. Куликов. – Минск: Эноперспектива., 2003. – 311 с.

54. Медведев А. Я. Установки плазменной резки / nvertec PC 40,60,100 / А. Я. Медведев // *Сварочное Производство*. 1994. – № 4. – С. 39 – 41.

55. Favali R. C., Szente R. N. Physical and mathematical modeling of non transferred plasma torches // *Brazilian Journal of Physics*. – 1998. – № 1, March. – P. 25 – 34.

56. Харламов М. Ю. Математическая модель дуговой плазмы, генерируемой плазмотроном с проволокой-анодом / М. Ю. Харламов, И. В. Кривцун, В. Н. Коржик и др. // *Автоматическая сварка*. – 2007. – № 12. – С. 14 – 20.

57. Жуков М. Ф. Термохимические катоды / М. Ф. Жуков, А. В. Пустогаров, Г. Дандарон, Н. Б. Тимошевский. – Новосибирск: Ин-т теплофизики, 1985. – 129 с.

58. Жуков М. Ф. Прикладная динамика термической плазмы / М. Ф. Жуков, А. С. Коротеев, Б. А. Урюков. – Новосибирск: Наука, 1975. – 300 с.

59. Романовский Г. Ф. Плазмохимические системы судовой энергетики / Романовский Г. Ф., Сербин С. И. – Николаев: Изд-во УГМТУ, 1998. – 246 с.

60. Петров С. В. Плазма продуктов сгорания в инженерии поверхности / С. В. Петров, А. Г. Сааков. – К.: Топас, 2000. – 220 с.

61. Boulos M. I., Fauchais P., Pfender E. Thermal plasmas: Fundamentals and applications. – Vol. 1. – New York and London: Plenum Press, 1994. – 467 p.

62. Launder B. E., Spalding D. B. The numerical computation of turbulent flows // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 1990. – № 8. – P. 269 – 289.

63. Пашенко В. М. Обладнання для газо термічного нанесення покриттів / В. М. Пашенко: Політехніка, 2001. – 416 с.

64. Дзюба В. Л. Плазмотрон для резки с медным полым электродом / В. Л. Дзюба, А. Н. Ткаченко, С. А. Ткаченко // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2002. – № 7. – С. 280 – 282.

65. Сидоров В. П. Расчет теплоотода в сопло плазматрона от столба плазменной аргоновой дуги // Сварочное производство. – 1987. – № 2. – С. 36 – 37.

66. Акулов А. И. Технология и оборудования сварки плавлением и термической резки // А. И. Акулов, В. П. Лепин, С. И. Ермаков др.; Машиностроение. – 2003. – 437 с.

67. Чередниченко В. С. Плазменные электротехнологические установки / В. С. Чередниченко, А. С. Аньшаков, М. Г. Кузьмин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 602 с.

68. Васильев К. В. Особенности плазменно-дуговой резки в азотно-кислородных смесях // Автоматическая сварка. – 2000. – № 12. – С. 21 – 25.

69. Редчиц А. В. Повышение энергетической эффективности плазменной сварки / А. В. Редчиц, В. В. Овчинников // Сварочное производство. – 2004. – № 8. – С. 21 – 23.

70. Щицын В. Ю. Влияние полярности на тепловложение в сопло плазматрона / В. Ю. Щицын, В. М. Язовских // Сварочное производство. – 2002. – № 1. – С. 17 – 19.

71. Гарин Е. Н. Проблемы неустойчивости плазмы / Е. Н. Гарин // Вестник Красноярского государственного технического университета «Машиностроение». Красноярск. – 2004. – № 36. – С. 37 – 41.

72. Гарин Е. Н. Влияние режима горения плазменной дуги на величину теплового потока в катод / Е. Н. Гарин, Ю. Г. Новосельцев // Вестник университетского комплекса. Красноярск. 2005. – № 4 (18). – С. 86 – 91.

73. Гарин Е. Н. Методика исследования плазменной дуги / Е. Н. Гарин // Вестник Красноярского государственного технического университета «Машиностроение». Красноярск. – 2005. – № 38. – С. 74 – 77.

74. Арцимович Л. А. Элементарная физика плазмы / Л. А. Аруимович. – М.: «Просвещение», 1986. – 121 с.
75. Даутов Г. Ю. Плазмотроны со стабилизированными электрическими дугами / Г. Ю. Даутов, В. Л. Дзюба, И. Н. Карп. – К.: Наукова думка, 1987. – 168 с.
76. Невский А. П. Взаимодействие дуги с электродами плазмотрона / А. П. Невский, Л. И. Шароховский, О. И. Ясько. – Минск: Наука и техника, 1982. – 152 с.
77. Дресвин С. В. Основы математического моделирования плазмотронов / С. В. Дресвин, Д. В. Иванов. // (Том 1). – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. – 227 с.
78. Жуков М. Ф. Основы расчета плазмотронов линейной схемы / М. Ф. Жуков. – Новосибирск: Наука, 1975. – 148 с.
79. Петров С. В. Плазма продуктов сгорания в инженерии поверхности / С. В. Петров, А. Г. Сааков. – К.: Топас, 2000. – 220 с.
80. Моргунов Ю. А. Наукоемкие технологии Машиностроительного производства. Физико-химические методы и технологии / Ю. А. Моргунов, Д. В. Панов, Б. П. Саушкин, С. Б. Саушкин. Под. ред. Б. П. Саушкин // М., изд. Форум, 2013. – 928 с.
81. Щицын Ю. Д. Возможности плазменной обработки металлов током обратной полярности / Ю. Д. Щицын, О. А. Косолапов, В. Ю. Щицын // Сварка и диагностика. – 2009. – № 2. – С. 42 – 45.
82. Гордеев В. Ф. Термоэмиссионные дуговые катоды / В. Ф. Гордеев, А. В. Пустогаров. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 192 с.
83. Жуков М. Ф. Приэлектродные процессы в дуговых разрядах / М. Ф. Жуков, Н. Т. Козлов, А. В. Пустогаров и др. – Новосибирск: Наука, 1982. – 157 с.
84. Эккер Г. Теория катодных явлений / Г. Эккер. // Экспериментальные исследования плазмотронов. – Новосибирск: Наука, 1977. – № 9. – С. 155 – 207.

85. Q'Brien R. L., Wickham R., Keane W. Advances in plasma arc cutting // Welding Journal. – 1984. – № 12. – P. 60 – 63.

86. Browning J. A. The dual-flow plasma torch // Welding Journal. – 1984. – № 4. – P. 5 – 10.

87. Жуков М. Ф. Электродуговые генераторы плазмы и их применение в технологических процессах / М. Ф. Жуков. // Институт теплофизики. – 1987. – № 4. – С. 11–20.

88. Дзюба В. Л. Электродуговые и высокочастотные плазмотроны в химико-металлургических процессах / В. Л. Дзюба, Г. Ю. Даутов, И. Ш. Абдуллин. – К.: Вища школа, 1991. – 170 с.

89. Дандарон Г. Проблемы создания сильноточных катодов для электроплазменных процессов / Г. Дандарон, А. Н. Тимошевский. // Институт теплофизики, 1987. – № 6. – С. 250 – 270.

90. Лакомский В. И. Генераторы низкотемпературной плазмы: XI Всесоюз. конф.: тезисы докл. – Новосибирск, 1989. – Ч.2. – С. 127–128.

91. Чумаков А. Н. О режимах регенерации градиентов катода / А. Н. Чумаков, Н. И. Бортничук, А. В. Хотина. // Генераторы низкотемпературной плазмы: XI Всесоюз. конф., 1989г.: тезисы докл. – Новосибирск, 1989. – Ч.2. – С. 88–89.

92. Фридленд М. Г. Технологические возможности электродуговых нагревателей газа с постоянно возобновляющимся катодом / М. Г. Фридленд, Н. В. Алексеев. // Физика и химия обработка материалов. – 1983. – № 4. – С. 56 – 60.

93. Лукашов В. П. Многоуровневые плазмотроны с цилиндрическими электродами: Физика низкотемпературной плазмы / В. П. Лукашов, Б. А. Поздняков, А. И. Янковский. – Минск, 1991. – Т.4. – С.150–151.

94. Невский А. П. Взаимодействие дуги с электродами плазматрона / А. П. Невский, Л. И. Шароховский, О. И. Ясько. – Минск: Наука и техника, 1982. – 152 с.

95. Шараховский Л. И. Численное моделирование процесса эрозии медного катода с использованием модели эквивалентного теплового источника / Л. И. Шараховский, В. Н. Борисюк. // Генераторы низкотемпературной плазмы: X Всесоюз. конф.: тезисы докл. – Минск, 1986. – Ч.1. – С. 79 – 80.
96. Пархоменко В. Д. Технология плазмохимических производств / В. Д. Пархоменко, П. Н. Цыбулев, Ю.И. Краснокутский. – К.: Вища школа, 1991. – 225 с.
97. Лукашов В. П. Электродуговые плазмотроны промышленного назначения / В. П. Лукашов, А. Н. Тимошевский. // Плазмохимия – 90. – Ч.2. – М.: ИНХСАН, 1990. – С. 303–336.
98. Даутов Г. Ю. Плазмотроны со стабилизированными электрическими дугами / Г. Ю. Даутов, В. Л. Дзюба, И. Н. Карп. – К.: Наукова думка, 1987. – 168 с.
99. Дандарон Г. Проблемы создания сильноточных катодов для электроплазменных процессов / Г. Дандарон, А. Н. Тимошевский. // Институт теплофизики, 1987. – № 6. – С. 250 – 270.
100. Замуло Н. И. Эрозионная стойкость электродов металлургических плазмотронов / Н. И. Замуло, Ю. В. Латаш, О. С. Забарило, Г. А. Мельник и др. – Проблемы специальной металлургии. – 1989. – Вып. 2. – С. 76 – 83.
101. Костин Н. А. Вихревые электродуговые плазмотроны с «холодными» электродами: Физика низкотемпературной плазмы / Н. А. Костин, В. Н. Станкевич. – Минск, 1991. – Т.3. – С. 192 – 193.
102. Калантаров Т. Л. Расчет индуктивностей: Справочная книга / Т. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. – Энергия, 1970. – 415 с.
103. Грановский В. А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / В. А. Грановский, Т. Н. Сирая. – Л.: Энергоатомиздат, 1998. – 288 с.

104. Задгинидзе Ч. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / Ч. Г. Задгинидзе . – М.: Наука , 1976. – 215 с.
105. Дзюба В. Л. Высокоресурсный плазмотрон для напыления, резки и упрочнения поверхности / В. Л. Дзюба, К. А. Корсунов, Е. Ю. Мягченко, А. В. Сумец // 9 Международная практическая конференция, 10 – 13 апреля 2007г.: тезисы докладов – Санкт-Петербург: СПб ГПУ, 2007. – Ч. 1. – С. 79 – 85.
106. Сумец А. В. Основные направления повышения эффективности плазменной резки / А.В. Сумец// Научный Вестник ДГМА: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2016.–№3(21Е).–С. 34–37.
[http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%963\(21%D0%95\)_2016/nomer_3\(21E\)_2016.html](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%963(21%D0%95)_2016/nomer_3(21E)_2016.html)
107. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. Б. Варгафтик. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
108. Корсунов К. А. Плазмотрон для напыления с «холодным» катодом / К. А. Корсунов, В. А. Волков, Н. А. Подгорная, **А. В. Сумец** // 6 Международная практическая конференция – выставка, 13 – 16 апреля 2004г.: тезисы докладов. – Санкт–петербург: СПб ГПУ, 2004. – С. 194 – 196.
109. Дзюба В. Л. Конструктивные особенности электродных узлов режущих плазмотронов / В. Л. Дзюба, К. А. Корсунов, **А. В. Сумец** // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2009. – № 9 (139). – С. 37– 44. [Фахове видання]
110. Дзюба В. Л. Повышение ресурса работы плазмотрона для обработки материалов / В. Л. Дзюба, К. А. Корсунов, В. С. Гавриш, А. В. Сумец // 9 Международная практическая конференция – выставка, 10 – 13 апреля, 2007г. : тезисы докладов. – Санкт-Петербург: СПб ГПУ, 2007. – Ч.1. – С. 75 – 78.
111. **Сумец А. В.** Высокоресурсный плазмотрон для резки металлов больших толщин / А. В. Сумец, Е. Ю. Мягченко. // XI Всеукраїнська науково-

практична конференція з міжнародною участю, 16 – 17 квітня. 2008р.: тези доповідей. – Северодонецьк, 2008. – 185 с.

112. Дзюба В. Л. Плазмотрон для резки метала обратной полярности / В. Л. Дзюба, К. А. Корсунов, **А. В. Сумец** // Современные материалы и технологии в металлургии и машиностроении: Международная научно-техническая конференция., 2007 г.: тезисы докладов. – К.: Ред. журн. Процессы литья, 2007. – С. 107–109.

113. Дзюба В. Л. Результаты исследований плазмотрона для резки металла / В. Л. Дзюба, К. А. Корсунов, **А. В. Сумец** // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2009. – № 8 (138) – С. 54 – 62. [Фахове видання]

114. Дзюба В. Л. Повышение эффективности работы электродуговых плазмотронов / В. Л. Дзюба, К. А. Корсунов, **А. В. Сумец** // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2009. – № 11 (141). – Ч. 2. – С. 81 – 86. [Фахове видання]

115. Дзюба В. Л. Результаты исследований по созданию плазмотрона для резки / В. Л. Дзюба, К. А. Корсунов, **А. В. Сумец** // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні. – Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2008. – С.13 – 19. [Фахове видання]

116. Эдельс Х. Метод измерения нестационарной электропроводности плазменного столба / Х. Эдельс, С. В. Кимблин. – М.: Мир, 1967. – С. 337–349.

117. Раховский В. И. Эрозия электродов в контрагированном разряде / В. И. Раховский. // Изв. СОАН СССР, Серия техн. наук.–1975. – вып. 1, № 3. – С. 11–27.

118. Чернышов Г. Г. Сварочное дело: Сварка и резка металлов / Г. Г. Чернышов. – М.: Изд. центр «Академия», 2004. – 496 с.

119. Ширшов И. Г. Плазменная резка / И. Г. Ширшов, В. Н. Котиков. – Ленинград: Машиностроение. 1987. – 192 с.

120. **Сумец А. В.**, Кассов В. Д. Закономерности структурообразования зоны термического влияния при термической резке металлов / А. В. Сумец, В. Д. Кассов. // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2017. – Вып. 77. – С.166–170. [e-LIBRARY, index COPERNICUS] [Фахове видання]

121. Алёшин Н. П. Сварка. Резка. Контроль: Справочник. В 2-х томах / Под общ. ред. Н. П. Алёшина, Г. Г. Чернышова. – М.: Машиностроение, 2004. – 480 с.

122. Мурга В. В. Изменения микроструктуры стали при обработке в плазмотроне с жидким катодом / В. В. Мурга, И. И. Антропов, Д. К. Гамазин, А. Алкиб. // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Вып. 42 (1). – 2014. – С. 152-156.

123. Овчаренко В. Е. Наноструктурирование поверхностного слоя и его влияние на стойкость металлокерамического сплава при резании металла / В. Е. Овчаренко, А. А. Моховиков, А. С. Игнатъев // Известия вузов. Черная металлургия. – 2013. № 6. – с. 47 – 50.

124. Коротков В. А. Исследование плазменной закалки конструкционной стали / В. А. Коротков // Известия вузов. Черная металлургия. – 2013. – № 2. – С. 18 – 21.

125. **Сумец А.В.** Металлофизические аспекты структурообразования в процессе высокотемпературной резки стали / А.В. Сумец. // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XV Міжнародної науко-технічної конференції.– Краматорськ: ДДМА, 2017.– С.86–87.

126. Багмутов В. П. Структура и микротвердость упрочненных наноразмерными частицами плазменных покрытий после электромеханической обработки / В. П. Багмутов, В. И. Калита, И. Н. Захаров и др. // Известия вузов. Черная металлургия. – 2009. – № 10. – С. 62-68.


127. Чередниченко В. С. Плазменные электротехнические установки / В. С. Чередниченко, А. С. Аньшаков. – Новосибирск: НГТУ, 2011. – 602 с.

ДОДАТОК А

Акт впровадження на ПрАТ «СЄВЕРОДОНЕЦЬКЕ ОБ'ЄДНАННЯ АЗОТ» (м.
Сєверодонецьк)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Начальник
ремонтно-механічного цеху
ПрАТ «СЄВЕРОДОНЕЦЬКЕ
ОБ'ЄДНАННЯ АЗОТ»

 П.В. Колочко
«14» 07 2017р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Акт складено в тому, що в період з жовтня 2016 р. по лютий 2017 р. на ПрАТ «СЄВЕРОДОНЕЦЬКЕ ОБ'ЄДНАННЯ АЗОТ» пройшли виробничі випробування плазмотрони ПР-1, ПР-2, ПР-3, ПР-4, ПР-6 для різання нержавіючих (12x18H10T; X23H18; 20X13), конструкційних (09Г2С; СТ3; СТ20; 10ХСНД; 20Г; 15Г2) товщиною понад 120 мм, кольорових металів (алюмінію, латуні, бронзи) і титану товщиною понад 70 мм.

Економічний ефект склав 170 тис. грн., за рахунок більш високих швидкісних режимах, ніж при киснево і кісенево - флюсового різання і більш якісною поверхню різі. Результати роботи можливо рекомендувати для широкого застосування на промислових підприємствах України, що займаються ремонтом та виробництвом деталей.

Заступник начальника
ремонтно-механічного цеху



 О.В. Беліцький

Підписи начальника РМЦ Колочко П.В. та заступника начальника РМЦ Беліцького О.В. засвідчую:

В.О. директора департаменту
з управління персоналом
і соціальним питанням
ПрАТ «СЄВЕРОДОНЕЦЬКЕ
ОБ'ЄДНАННЯ АЗОТ»



 В.Н. Соломаха

ДОДАТОК Б

Акт впровадження на ТОВ «Буддеталь» (м. Краматорськ)



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Даний акт складений в тому, що на виробничих майданчиках ТОВ «Буддеталь» у третьому кварталі 2017 року пройшла апробацію технологія різання конструкційних сталей товщиною до 60 мм плазмотронами ПР-1 та ПР-2 (розробник – Сумець Андрій Вікторович).

Плазменно-дугове різання плазмотроном ПР-1 здійснювали за режимами: $I = 350 \text{ A}$, $U = 180 \text{ A}$, розхід робочого газу (аргон) 1,0 г/с, швидкість різання 0,5 м/хв., відстань сопла плазмотрону до металу 10 мм, діаметр сопла 3,5 мм; а плазмотроном ПР-2: $I = 400 \text{ A}$, $U = 180 \text{ A}$, розхід робочого газу (повітря) 1,0 г/с, швидкість різання 0,5 м/хв., відстань сопла плазмотрону до металу 10 мм, діаметр сопла 3,5 мм.

Встановлений характер формування розділової поверхні різі та час різання, а також основні залежності зміни параметрів різання від режимів роботи плазмотронів і товщини металу.

Отриманий економічний ефект від впровадження технології різання конструкційних сталей плазмотронами ПР-1 та ПР-2 склав 51 тис. грн. у цінах 2017 року за рахунок підвищення техніко-економічних показників.

Розроблені плазмотрони можливо використовувати в різних галузях виробництва.

Головний інженер

Шокун І.М.

ДОДАТОК В

Довідка про використання в навчальному процесі Донбаської державної
машинобудівної академії (м. Краматорськ)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Перший проректор, проректор
з науково-педагогічної, навчальної
та методичної роботи
Донбаської державної
машинобудівної академії



Фесенко А.М.

ДОВІДКА

Результати кандидатської дисертаційної роботи Сумця А.В. на тему «Підвищення ефективності плазмового різання за рахунок удосконалення плазмотрону», які пов'язані з технологією та обладнанням термічного різання металопрокату різної товщини та складності контуру для виготовлення деталей і вузлів підйомно-транспортних, дорожніх, будівельних та меліоративних машин, використано в навчальному процесі при викладанні розділів дисципліни «Технологія виробництва підйомно-транспортних машин» для освітнього рівня бакалавр, а також у курсовому і дипломному проектуванні й у науково-дослідній роботі магістрів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» при визначенні способів виготовлення деталей та їх вузлів.

Завідувач кафедри
«Підйомно-транспортні машини»
доктор техн. наук, професор

15.03.18

В.Д. Кассов