Вінницький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СЛОБОДЯНЮК ЮЛІЯ ОЛЕГІВНА

УДК 621.778.01

ДИСЕРТАЦІЯ

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВОЛОЧІННЯ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ДРОТУ З МАЛОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ДЕФОРМОВНОСТІ

Спеціальність 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском
Технічні науки

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 _____Ю.О. Слободянюк

Науковий керівник Грушко Олександр Володимирович, доктор технічних наук, професор

Вінниця – 2019

АНОТАЦІЯ

Слободянюк Ю.О. Підвищення ефективності волочіння зварювального дроту з маловуглецевих сталей на основі теорії деформовності. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2019.

На сьогодні не тільки в Україні, але й у світовому масштабі зростає необхідність удосконалення існуючих технологічних процесів з метою заощадження матеріальних, енергетичних, трудових та екологічних ресурсів. Волочіння є високоефективним процесом обробки тиском і набуло широкого поширення для виготовлення металевого дроту різного призначення. Зварювальний дріт з маловуглецевих сталей є одним із поширених видів метизної продукції і використовується для напівавтоматичного або автоматичного зварювання в середовищі захисних газів при виготовленні стальних конструкцій. Як показує досвід вітчизняного виробництва, існують певні ризики виготовлення неякісної продукції та виникнення технологічних відмов, що пов’язані з особливостями вихідної сировини та реалізації процесу волочіння на підприємстві. Ефективність техноло-гічного процесу виробництва зварювального дроту маловуглецевих сталей залежить від багатьох факторів. Основні чинники, які впливають та формують показники якості обмідненого дроту можна умовно поділити на три групи: показники якості сировини, показники якості, що нормуються при виробництві дроту та показники якості пов’язані із технологічною спадковістю. На сьогоднішній день практично відсутні системні дослідження впливу якості сировини на якість готової продукції. Якість сировини є першочерговим фактором, який впливає на якість кінцевого продукту. Катанка для виробництва обмідненого дроту повинна мати стабільний хімічний склад, відсутність поверхневих дефектів, відсутність у мікроструктурі різноманітних включень та надтвердих складових, що є причиною її обривності в процесі волочіння.

Основним процесом виробництва дроту маловуглецевих сталей є процес волочіння із катанки діаметром 6,5 або 5,5 мм до необхідного діаметру 1,6, 1,2, 1,0 або 0,8 мм. Сучасна технологія передбачає виробництво зварювального дроту без операції проміжного відпалу. Досить часто виготовити дріт без операції проміжного відпалу із необхідним характеристиками є неможливим. В зв’язку з цим пред’являються чіткі вимоги до катанки та виникає гостра необхідність у максимальному використанні пластичності матеріалів маловуглецевих сталей. Тому раціональне проектування технологічного процесу волочіння дроту без операції проміжного відпалу є актуальним питанням, вирішення якого дозволить значно скоротити процес виробництва та збільшити продуктивність. Так, постає необхідність у максимальному використанні пластичності матеріалів маловуглецевих сталей з метою розробки раціональної технології виробництва дроту даних марок. Для забезпечення безвідмовності процесу волочіння та виготовлення зварювального дроту належної якості необхідно здійснення відповідних розрахунків, які не можливо здійснити без відомостей про карту матеріалу.

З метою запобігання ризиків щодо виробництва неякісної продукції доцільно використовувати експрес-методи прогнозування механічних характеристик дроту після проходження через кожну волоку. До теперішнього часу не відомо вдалих спроб теоретичної систематизації процесів волочіння за механічними властивостями металів, тому доцільно будувати математичні моделі за феноменологічним принципом із врахуванням явищ зміцнення при багатоперехідному волочінні для окремих марок матеріалу. Тому проектування виробництва зварювального дроту із виключенням його розривів при багатоступінчастому волочінні з використанням феноменологічних зв’язків між коефіцієнтом витягування та параметрами кривої зміцнення маловуглецевої сталі дозволить зменшити ризики виготовлення неякісної продукції.

У зв'язку з вищевикладеним тема дисертаційної роботи, яка присвячена підвищенню ефективності процесу волочіння зварювального дроту з маловуглецевих сталей на основі теорії деформовності, є актуальною.

Наукова новизна отриманих результатів. Наукова новизна роботи поля-

гає в тому, що:

- отримав подальший розвиток метод оцінки деформовності в процесі волочіння, який на відміну від існуючих полягає в такому: за допомогою методу скінченних елементів отримано модель нерівномірності розподілу накопиченої інтенсивності деформацій, побудовано достовірні шляхи деформування в характерних точках по перерізу дроту, обґрунтовано застосування скалярного феноменологічного критерію деформовності із врахуванням третього інваріанта тензора напружень, що дозволило здійснити оцінку деформовності металу дроту в процесі його багатоступінчастого волочіння;

- вперше експериментально-розрахунковим шляхом отримано та проаналізовано закономірності, які дають достатню уяву про поведінку матеріалів в процесі їх холодного багатоступінчастого волочіння, на основі яких сформовано карту матеріалу на прикладі маловуглецевих сталей G3Si1 та Св-08Г2С (складається з кривої течії, діаграми пластичності, кривої Баушингера та градуювального графіка твердість-напруження-деформації), що дозволяє коректно виконати моделювання процесу волочіння, призначати режими та спрогнозувати якість продукції;

- отримала подальший розвиток модель зміцнення маловуглецевого зварювального дроту в процесі холодного волочіння, яка на відміну від існуючих встановлює залежність коефіцієнтів апроксимації кривої зміцнення металу від інтегрального ступеня деформації;

- вперше встановлено, що значення показника деформаційного зміцнення (за двопараметричною степеневою функцією Людвіга) вихідної сировини-катанки маловуглецевої сталі є важливим фактором прогнозування якості виготовленого дроту за його зварювально-технологічними характеристиками.

Практичне значення отриманих результатів полягає в:

- методиці оцінки деформовності дроту в процесі його холодного багатоступінчастого волочіння на основі феноменологічної теорії деформовності;

- підході визначення граничних технологічних параметрів (коефіцієнта витягування) для процесу волочіння, що дозволяють на етапі вхідного контролю катанки за допомогою випробування на розтяг прогнозувати виготовлення дроту рі-

зних діаметрів без операції проміжного відпалу;

- методиці формування карти матеріалу для процесу його холодного багатоступінчастого волочіння;

- методиці прогнозування показників якості готової продукції – за механічними властивостями дроту після волочіння та за зварювально-технологічними властивостями дроту (стабільністю горіння дуги) без проведення трудомісткого мікроструктурного та хімічного аналізу.

Результати дисертаційної роботи впроваджені на ПрАТ «ПлазмаТек» та у навчальному процесі Вінницького національного технічного університету.

Основні наукові положення та практичні результати, отримані в роботі, такі:

1. В результаті проведеного літературного огляду здійснено аналіз існуючих методів дослідження механіки процесу волочіння, методів оцінки деформовності дроту, принципів визначення технологічних параметрів волочіння, аналіз способів виробництва маловуглецевого зварювального дроту, а також визначені основні показники якості обмідненого зварювального дроту. Недоліками зазначених підходів є недостатня вивченість процесу волочіння з т.з. прогнозування показників якості готового продукту, в тому числі, з використанням феноменологічної теорії деформовності.

2. Сформовано карту матеріалів G3Si1 та Св-08Г2С в стані постачання, що дає достатню для технолога уяву про поведінку матеріалу в пластичній області. Криві течії (втім як і стандартні механічні характеристики) зварювальної катанки марок G3Si1 та Св-08Г2С різних партій постачання суттєво відрізняються, що пов’язаний насамперед з умовами виготовлення напівфабрикату (з виробником). Хімічний склад в межах, визначених стандартами, чинить незначний вплив на механічні характеристики катанки. Діаграми пластичності є необхідною функцією для оцінювання можливості формозмінювання без руйнування за феноменологічними критеріями деформовності, при чому пластичність сталі G3Si1 значно вища, ніж Св-08Г2С, тому її можна рекомендувати до використання без проміжних відпалів. Коефіцієнт Баушингера в області розвинених деформацій досліджених матеріалів склав 0,14...0,16, що вказує на високу чутливість досліджених сталей до

деформаційної анізотропії. Цей факт треба враховувати, зокрема при моделюванні волочіння МСЕ. Градуювальний графік твердість (HV)–напруження (σ_i)–деформації (e_i) дає змогу оцінити твердість дроту після його волочіння, що є важливим при прогнозуванні якості продукції.

3. Встановлено, що зварювально-технологічні властивості дроту (стабільність горіння дуги) залежить від показників готової продукції, які нормуються згідно існуючих стандартів, а й від однорідності структури катанки, яку використовує виробник дроту в процесі його виготовлення. Мікроструктурний аналіз показав, що найкращому горінні дуги відповідає рівномірний розподіл карбідної фази у феритній матриці, а для ділянок із нестабільним горінням дуги характерна наявність зкоагульованих карбідів. Підвищена пористість зварювального дроту може бути викликана наявністю в ньому газів (зокрема, підвищеного вмісту азоту – більше ніж 0,10% – 0,0107%) та спричинює зниження твердості дроту та як наслідок нестабільне горіння зварювальної дуги. Якщо коефіцієнт зміцнюваності n матеріалу катанки в стані постачання менший за 0,18, то це вказує на суттєві зниження показників якості готового дроту через нестабільність горіння дуги, принаймні, для мінімальних діаметрів дроту 0,8–1,0 мм.

4. Встановлено, що дослідження деформацій по перерізу раціонально здійснювати через представлення їх у відносних одиницях, оскільки графіки практично співпадають для різних переходів та діаметрів заготовок. Коефіцієнт нерівномірності деформацій практично не залежить від числа переходів та ступеня витягування і становить 0,87. Шляхи деформування в небезпечній області (на вісі) характеризуються значною зміною першої похідної та кривини відповідних траєкторій. Шляхи деформування, побудовані через показники χ та μ_σ мають вигляд близький до константи, що значно спрощує їх врахування при оцінці деформовності в процесі волочіння.

5. Побудована обчислювальна схема, що дозволяє врахувати третій інваріант тензора напружень відповідно до критерію деформовності за Огороднiковим В.А. та оцінити вплив цього інваріанту на деформовність маловуглецевого зварюваль-

ного дроту в процесі його волочіння в існуючих на практиці маршрутах волочіння і здійснити в подальшому на цій основі оцінку технологічної спадковості у вигляді залишкової пластичності, твердості тощо.

6. Отримана феноменологічна модель зміцнення маловуглецевого зварювального дроту (марок G3Si1 та Св-08Г2С) в процесі волочіння встановлює залежність коефіцієнтів кривої зміцнення (за двопараметричною функцією П. Людвіга) від інтегральної деформації витягування. Коефіцієнт деформаційного змінення n прямує асимптотично до константи, що наближається до нуля, тобто матеріал дроту з великими степенями витягування набуває властивостей ідеально пластичного матеріалу. Модуль зміцнення має властивість до експоненціального зростання. Модель також можна використати для відповідних розрахунків для реологічно подібних (до досліджених) матеріалів, що значно розширює межі її практичного використання.

7. Розроблено методику проведення вхідного контролю катанки для виробництва дроту з маловуглецевих сталей, що дозволяє за результатами випробувань на розтяг розрахувати криву течії, показники міцності, пластичності дроту на будь-якому етапі волочіння, а отже спрогнозувати механічні властивості готового дроту різних діаметрів. Якщо шукані показники для певного діаметру дроту не будуть відповідати вимогам стандартів, то необхідно провести операції, які змінять вихідні властивості металу (наприклад, здійснити відпал) або провести повторний розрахунок для іншого діаметру.

8. Результати роботи впроваджені на підприємстві ПрАТ «ПлазмаТек» (м. Вінниця), що забезпечили раціональне планування виробництва дроту різних діаметрів для кожної партії катанки та сприяли уникненню виготовлення неякісної продукції, а також у навчальний процес ВНТУ. Прогнозування механічних властивостей зварювального дроту підвищило ефективність виробництва зварювального дроту за рахунок отримання продукції з прогнозованими характеристиками якості, уникнення технологічних відмов та раціонального планування виробництва, зменшення часу на технологічну підготовку (до 100%), економії матеріальних та енергетичних ресурсів (до 10%). Крім того на етапі вхідного контролю сировини

отримана модель дозволила скласти раціональний план виробництва дроту різних діаметрів.

Ключові слова: волочіння, зварювальний дріт, технологічний паспорт матеріалу, деформовність, феноменологічна модель, мікроструктура, пластич-ність, показники якості.

ABSTRACT

Slobodyanyuk Yu.O. Improving the efficiency of drawing welding wire from low-carbon steels based on the theory of deformability. – Qualification scientific work on the rights of the manuscript

Dissertation for the degree of candidate of Science in Technical Science in the Specialty 05.03.05 – Processes and Machines of Plastic Working. – Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, 2019.

Today, not only in Ukraine, but also globally, there is a growing need to improve existing technological processes in order to save material, energy, labor and environmental resources. Drawing is a highly efficient process of pressure treatment and has become widespread for the manufacture of metal wire for various purposes. Low-carbon steel welding wire is one of the common types of hardware and is used for semi-automatic or automatic welding in medium-high protective gases in the manufacture of steel structures. As the experience of domestic production shows, there are certain risks of producing substandard products and technological failures that are associated with the peculiarities of raw materials and the process of drawing in the enterprise. The efficiency of the technological process of producing low-carbon steel welding wire depends on many factors. The main factors that influence and shape the quality of copper coated wire can be roughly divided into three groups: raw material quality indicators, quality norms for wire manufacturing, and quality indicators related to technological heredity. To date, there are practically no systematic studies of the impact of raw material quality on the quality of finished products. Raw material quality is a primary factor affecting the quality of the final product. Copper wire rods must have a stable chemical composi-

tion, no surface defects, no microstructures of various inclusions and super-solid constituents, which cause its breakage in the drawing process.

The main process for the production of low carbon steel wire is the process of drawing from a rod with a diameter of 6.5 or 5.5 mm to the required diameter of 1.6, 1.2, 1.0 or 0.8 mm. Modern technology involves the production of welding wire without the annealing operation. Quite often, it is not possible to produce a wire without an intermediate annealing operation with the required characteristics. Due to this, clear requirements for the rod are imposed and there is an urgent need to maximize the plasticity of the low carbon steel materials. Therefore, the rational design of the wire drawing process without intermediate annealing operation is a pressing issue, the solution of which will significantly reduce the production process and increase productivity. Thus, there is a need to maximize the use of plasticity of low carbon steel materials in order to develop a rational wire manufacturing technology for these brands. In order to ensure the smoothness of the drawing process and the production of welding wire of the proper quality, it is necessary to carry out appropriate calculations, which cannot be done without information about the material map.

In order to prevent the risk of producing poor quality products, it is advisable to use rapid methods of predicting the mechanical characteristics of the wire after passing through each strand. To date, we have not been very successful in trying to theoretically systematize the processes of drawing by the mechanical properties of metals, so it is advisable to build mathematical models on the phenomenological principle, taking into account the phenomena of strengthening in multi-transverse drawing for individual brands of material. Therefore, designing the production of welding wire with the exclusion of its breaks in multi-stage drawing using phenomenological relationships between the drawing ratio and the parameters of the low-carbon steel hardening curve will reduce the risks of producing poor quality products.

In connection with the above, the topic of the dissertation, which is devoted to increasing the efficiency of the process of drawing welding wire from low-carbon steel steels on the basis of deformability theory, is relevant.

The scientific novelty of the obtained results is that:

- the method of estimation of deformability in the drawing process, which, unlike the existing ones, was further developed: using the method of finite elements the model of uneven distribution of the accumulated intensity of deformations was obtained, reliable ways of deformation at characteristic points along the wire cross section were constructed; the scalar phenomenological criterion of deformability, taking into account the third invariant stress tensor, which made it possible to evaluate the deformability of the wire metal in the process of its hatostupinchastoho drawing;

- for the first time, the laws that give a sufficient idea of the behavior of materials in the process of their cold multistage drawing, based on which a map of the material on the example of low-carbon steels G3Si1 and Sv-08G2C was obtained and analyzed, were analyzed and analyzed. the plasticity diagram, the Bauschinger curve, and the hardness-strain-strain graph), which allows for correct modeling of the drawing process, assigning modes, and predicting product quality;

- the model of strengthening of low-carbon welding wire in the process of cold drawing has been further developed, which, unlike existing ones, establishes the dependence of the coefficients of the curve of the hardening of the metal on the integral degree of deformation;

- it was established for the first time that the value of the strain hardening index (by the two-parameter Ludwig power function) of the raw material of the low-carbon steel wire rod is an important factor in predicting the quality of the manufactured wire by its welding and technological characteristics.

The practical value of the results obtained are:

- methods of estimation of deformability of a wire in the process of its cold bog-to-stage drawing on the basis of the phenomenological theory of deformability;

- approaches for determining the boundary technological parameters (pull coefficient) for the drawing process, which allow to predict the fabrication of wire of different diameters without intermediate annealing at the stage of the input control of the roller by means of a tensile test;

- methods of forming a map of the material for the process of its cold multistage drawing;

- methods of forecasting the quality of finished products - by the mechanical properties of the wire after drawing and by the welding and technological properties of the wire (arc stability) without carrying out time-consuming microstructural and chemical analysis.

The results of the dissertation were implemented at PlasmaTec PJSC and in the educational process of Vinnitsa National Technical University.

The main scientific provisions and practical results obtained in the work are as follows:

1. As a result of the literature review, an analysis of existing methods of investigation of the mechanics of the drawing process, methods of assessing the deformability of the wire, principles of determining the technological parameters of drawing, analysis of methods of production of low-carbon welding wire, as well as the main quality indicators of copper-coated welding wire. The disadvantages of these approaches are insufficient knowledge of the drawing process with the so-called. predicting the quality of the finished product, including the use of phenomenological theory of deformability.

2. A map of materials G3Si1 and Sv-08G2S in the state of supply is formed, which gives enough for the technologist an idea of the behavior of the material in the plastic region. The flow curves (as well as the standard mechanical characteristics) of the G3Si1 and Sv-08G2S welding rods of the different supply batches differ significantly, primarily due to the conditions of manufacture of the semi-finished product (with the manufacturer). The chemical composition, within the limits specified by the standards, has little effect on the mechanical characteristics of the rod. Plasticity diagrams are a non-bypass function for evaluating the possibility of non-destructive molding according to phenomenological deformability criteria, whereby the plasticity of G3Si1 steel is much higher than that of Sv-08G2S, so it can be recommended for use without intermediate annealing. The Bausinger coefficient in the field of advanced deformations of the investigated materials was 0.14 ... 0.16, which indicates the high sensitivity of the investigated steels to deformation anisotropy. This fact should be taken into account, in particular, in the modeling of ITU drawing. The calibration graph of the hardness (*HV*)–

tension(σ_i) –tension (e_i) makes it possible to estimate the hardness of the wire after its drawing, which is important in predicting product quality.

3. It is established that the welding and technological properties of the wire (arc burning stability) depends not only on the finished products, which are normalized according to the existing standards, but also on the uniformity of the wire structure used by the wire manufacturer in the process of its manufacture. Microstructural analysis showed that the uniform combustion of the carbide phase in the ferrite matrix corresponds to the best combustion arc, and the presence of coagulated carbides is characteristic of the sections with unstable combustion of dy. Increased porosity of the welding wire may be caused by the presence of gases in it (in particular, an excess nitrogen content of more than 0.10% - 0.0107%) and causes a decrease in the hardness of the wire and as a result of unstable welding of the welding arc. If the strength factor n of the rod material in the delivery state is less than 0.18, then this indicates a significant decrease in the quality of the finished wire due to the instability of the arc combustion, at least for the minimum wire diameters of 0.8-1.0 mm.

4. It is established that the study of section deformations is rational to carry out by presenting them in relative units, since the graphs practically coincide for different transitions and billet diameters. The coefficient of non-uniformity of deformation practically does not depend on the number of transitions and the degree of extension and is 0.87. The deformation paths in the hazardous area (on the axis) are characterized by a significant change in the first derivative and the curvature of the respective trajectories. The deformation paths, built through indicators χ and μ_σ and look close to a constant, which greatly simplifies their consideration when evaluating deformability in the drawing process.

5. A computational scheme has been constructed that allows to take into account the third invariant of the stress tensor according to the deformability criterion according to Ogorodnikov V.A. and evaluate the influence of this invariant on the deformability of the low-carbon welding wire in the process of its drawing in the existing drawing

routes, and subsequently evaluate the technological inheritance in the form of residual plasticity, hardness, and the like.

6. The phenomenological model of strengthening of low-carbon welding wire (grades G3Si1 and Sv-08G2S) in the process of drawing establishes the dependence of the coefficients of the strengthening curve (according to the two-parameter P. Ludwig function) on the integral deformation of the drawing. The coefficient of deformation change goes asymptotically to a constant approaching zero, that is, a material of wire with high degrees of elongation acquires the properties of an ideally plastic material. The strengthening module has the property of exponential growth. The model can also be used for appropriate calculations for rheologically similar (to investigated) materials, which greatly expands the limits of its practical use.

7. The technique of carrying out an input control of a rod for production of wire from low-carbon steels is developed. diameters. If the required diameters for a particular wire diameter do not meet the requirements of the standards, then operations that will change the original properties of the metal (such as annealing) or recalculate for another diameter.

8. The results of the work were implemented at the enterprise of PJSC “PlasmaTek” (Vinnytsia), which ensured rational planning of wire production of different diameters for each batch of wire rod and contributed to avoiding the production of substandard products, as well as to the educational process of VNTU. Prediction of mechanical properties of welding wire has increased the efficiency of production of welding wire by obtaining products with predicted quality characteristics, avoiding technological failures and rational production planning, reducing the time for technological preparation (up to 100%), saving material and energy resources (up to 10 %). In addition, at the stage of input control of raw materials, the obtained model made it possible to draw up a rational plan for the production of wires of different diameters.

Keywords: drawing, welding wire, process data sheet, deformability, phenomenological model, microstructure, ductility, quality indicators.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

[1] О. В. Грушко і Ю.О. Слободянюк, «Особливості формування показників якості обмідненого зварювального маловуглецевого дроту», *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії,* №47(1166), с. 25 – 28, 2015.

[2] О. В. Грушко, Ю.О. Слободянюк і Р.С. Ткаченко, «Криві течії катанки марок G3Si1 та Св-08Г2С», *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр.*, №1(42), с. 207 – 213, 2016.

[3] O. Grushko and Y. Slobodyanyuk, «Microstructure of low-carbon steel wire and its welding and fabrication properties», *Metallurgical and Mining Industry*, №11, pp. 44-50, 2016.

[4] A.V. Grushko, V.V. Kukhar and Y.O. Slobodyanyuk, «Phenomenological model of low-carbon steels hardening during multistage drawing», *Solid State Phenomena,* Vol. 265, pp. 114-123, 2017.

[5] О.В. Грушко, О.В. Гуцалюк та Ю.О. Слободянюк «Спосіб відбору партій сталевої маловуглецевої катанки для волочіння дроту з прогнозованими механічними характеристиками», Пат.123757 Україна, МПК G01N 3/08, G01N 3/28 № u 2017 08508, Бюл. №5, заявл. 19.08.2017, опубл. 12.03.2018.

[6] О.В. Грушко і Ю.О. Слободянюк, «Механічні характеристики сталей G3SI1 та СВ-08Г2», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4, с. 103-109, 2018.

[7] О.В. Грушко, В.А. Огороднiков та Ю.О. Слободянюк, «Деформовність маловуглецевого дроту в процесі його багатоступінчастого холодного волочіння волочіння», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 103-110, 2019.

[8] О.В. Грушко та Ю.О. Слободянюк, «Підвищення ефективності технологічного процесу волочіння дроту з маловуглецевих сталей», на *1-ій Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2019»,* Вінниця, ВНТУ, 13 – 15 травня 2019, с. 80-81.

[9] О.В. Грушко та Ю.О. Слободянюк, «Особливості мікроструктури зварю-

вального дроту марки G3Si1» на *Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта»,* Одеса – Київ, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 21 – 24 червня 2016, с. 75.

[10] О.В. Грушко та Ю.О. Слободянюк, «Зміцнення маловуглецевого зварювального дроту в процесі його багатоступінчатого волочіння» на *VIII-ій Міжнародній науково-технічній конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти»,* Київ – Херсон, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 29 травня – 02 червня 2017, с. 159-160.

[11] О.В. Грушко та Ю.О. Слободянюк, *«*Карти матеріалів G3Si1 та Св-08Г2С*»* на *IX-ій Міжнародній науково-технічній конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», Київ – Херсон, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,* 28 травня – 01 червня 2018, с. 255-256.

[12] О.В. Грушко та Ю.О. Слободянюк, «Побудова кривих течій для маловуглецевої зварювальної катанки» на *Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи (МТН-2016)»,* Вінниця, ВНТУ, 4 – 10 травня 2016. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://conf.inmad.vntu.edu.ua/fm/index.php?page=materials&line=25&mat=285

[13] О.В. Грушко та Ю.О. Слободянюк, «Вплив мікроструктури маловуглецевого дроту на його зварювально-технічні властивості» на *Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи (МТН-2017)»,* Вінниця, ВНТУ, 12 – 17 червня 2017. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://conf.inmad.vntu.edu.ua/fm/index.php?page=materials&line=34&mat=429

[14] О.В. Грушко та Ю.О. Слободянюк, «Формування показників якості обмідненого зварювального мало вуглецевого дроту в процесі його холодного волочіння» на *XLVIII-ій Науково-технічній конференція факультету машинобудування та транспорту,* Вінниця, ВНТУ, 02 – 11 березня 2016. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-

2016/paper/view/1319

[15] О.В. Грушко, Ю.О. Слободянюк та Р.С. Ткаченко, «Феноменологічна модель зміцнення маловуглецевих сталей в процесі їх багатоступінчатого волочіння» на *XLVI -ій Науково-технічній конференція факультету машинобудування та транспорту,* Вінниця, ВНТУ, 27 – 28 березня 2017. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2017/paper/view/2730.

[16] О.В. Грушко та Ю.О. Слободянюк «Діаграми пластичності маловуглецевих сталей типу G3Si1 та Св-08Г2С» на *XLVII -ій Науково-технічній конференція факультету машинобудування та транспорту,* Вінниця, ВНТУ, 21 – 23 березня 2018. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2018/paper/view/4796.

[17] О.В. Грушко та Ю.О. Слободянюк, «Мікроструктурний аналіз дроту з маловуглецевих зварювальних сталей» на *XLVIII-ій Науково-технічній конференція факультету машинобудування та транспорту,* Вінниця, ВНТУ, 22 березня 2019. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2019/paper/view/7942

ЗМІСТ

ВСТУП…… 20
РОЗДІЛ І ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД. ВОЛОЧІННЯ: МЕХАНІКА, ПРОБЛЕМИ, ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ……. 27
1.1 Існуючі схеми виробництва зварювального маловуглецевого дроту…….. 27
1.2 Основні показники процесу волочіння…….. 28
1.3 Аналіз існуючих маршрутів волочіння……..…... 30
1.4. Вплив основних показників процесу волочіння на механічні властивості готового дроту……... 37
1.4.1 Вплив величини обтиснення та кількості переходів на механічні властивості готового дроту…… 37
1.4.2 Вплив швидкості волочіння на механічні властивості дроту…. 39
1.4.3 Вплив кута волоки на механічні властивості дроту……... 40
1.4.4 Вплив коефіцієнта тертя на механічні властивості дроту……... 42
1.5 Вплив мікроструктури на технологію виробництва зварювального дроту…… 42
1.6 Особливості побудови кривих течій зварювальної катанки……..... 43
1.7 Оцінка деформовності зварювального дроту…… 45
1.8 Особливості побудови діаграми пластичності зварювальної катанки…….. 47
1.9 Показники якості зварювального дроту…...…….. 49
1.10 Висновки до розділу та постановка задач дослідження……. 55
РОЗДІЛ ІІ МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ. МАТЕРІАЛИ ТА ОБЛАДНАННЯ. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПАСПОРТ МАТЕРІАЛІВ G3SI1 ТА СВ-08Г2С……... 57
2.1 Особливості технології виготовлення маловуглецевого зварювального дроту марок G3Si1 та Св-08Г2С…….. 57

2.1.1 Етап вхідного контролю та склад сировини…….. 57
2.1.2 Попереднє волочіння дроту……... 58
2.1.3 Фінішне волочіння дроту…….. 62
2.1.4 Обміднення дроту…….. 65
2.1.5 Пакування дроту…… 66
2.1.6 Кінцевий контроль та складування готового дроту…… 66
2.2 Обладнання для випробувань та досліджень. Вибір, характеристики, аналіз……..…… 67
2.2.1 Хімічний аналіз металу…….. 67
2.2.2 Випробування на розтяг, стиск та кручення…… 68
2.2.3 Мікроструктурний аналіз металу…….. 69
2.3 Карта матеріалів G3SI1 та Св-08Г2С……..….. 70
2.3.1 Криві течії катанки марок G3SI1 та Св-08Г2С…… 71
2.3.2 Діаграми пластичності катанки марок G3SI1 та Св-08Г2С…… 78
2.3.3 Крива Баушингера та градуювальний графік твердість-напруження-деформації катанки марок G3SI1 та Св-08Г2С…….. 81
2.4 Висновки до розділу……. 83
РОЗДІЛ ІІІ МІКРОСТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ДРОТУ ТА ЙОГО ВЗАЄМОЗВ’ЯЗОК ІЗ ЗВАРЮВАЛЬНО-ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ……. 85
3.1 Мікроструктурний аналіз зварювальної катанки G3Si1 та Св-08Г2С……. 85
3.2 Мікроструктурний аналіз зварювального дроту…… 87
3.3 Мікроструктурний аналіз за допомогою методів електронної мікроскопії та визначення кількісного елементного складу……. 96
3.4 Взаємозв’язок кривої течії і мікроструктури зварювальної катанки марки G3Si1 та Св-08Г2С……... 100
3.5 Висновки до розділу……. 103

РОЗДІЛ IV МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВОЛОЧІННЯ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА ФЕНОМЕНОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ ЗМІЦНЕННЯ МАЛОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ…. 105

4.1 Моделювання процесу волочіння МСЕ……... 105

4.2 Розподіл інтенсивності накопичених деформацій …… 110

4.3 Оцінка деформовності в процесі волочіння…… 113

4.4 Феноменологічна модель зміцнення маловуглецевих сталей в процесі багатоступінчатого волочіння……... 116

4.5 Підтвердження моделі на основі експериментів…… 121

4.6 Методика здійснення вхідного контролю для виробництва дроту з маловуглецевих сталей ……..... 124

4.7 Висновки до розділу……. 127

ВИСНОВКИ…… 129

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……...……... 132

ДОДАТКИ……...…… 143

ДОДАТОК А Акти впровадження…… 144

ДОДАТОК Б Результати моделювання……...……. 146

ДОДАТОК В Список публікацій за темою дисертації……..……. 160

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження.

На сьогодні не тільки в Україні, але й у світовому масштабі зростає необхідність удосконалення існуючих технологічних процесів з метою заощадження матеріальних, енергетичних, трудових та екологічних ресурсів. Волочіння є високоефективним процесом обробки тиском і набуло широкого поширення для виготовлення металевого дроту різного призначення. Зварювальний дріт з маловуглецевих сталей є одним із поширених видів метизної продукції і використовується для напівавтоматичного або автоматичного зварювання в середовищі захисних газів при виготовленні стальних конструкцій. Як показує досвід вітчизняного виробництва, існують певні ризики виготовлення неякісної продукції та виникнення технологічних відмов, що пов’язані з особливостями вихідної сировини та реалізації процесу волочіння на підприємстві. Ефективність техноло-гічного процесу виробництва зварювального дроту маловуглецевих сталей залежить від багатьох факторів. Основні чинники, які впливають та формують показники якості обмідненого дроту можна умовно поділити на три групи: показники якості сировини, показники якості, що нормуються при виробництві дроту та показники якості пов’язані із технологічною спадковістю. На сьогоднішній день практично відсутні системні дослідження впливу якості сировини на якість готової продукції. Якість сировини є першочерговим фактором, який впливає на якість кінцевого продукту. Катанка для виробництва обмідненого дроту повинна мати стабільний хімічний склад, відсутність поверхневих дефектів, відсутність у мікроструктурі різноманітних включень та надтвердих складових, що є причиною її обривності в процесі волочіння.

Основним процесом виробництва дроту маловуглецевих сталей є процес волочіння із катанки діаметром 6,5 або 5,5 мм до необхідного діаметру 1,6, 1,2, 1,0 або 0,8 мм. Сучасна технологія передбачає виробництво зварювального дроту без операції проміжного відпалу. Досить часто виготовити дріт без операції проміжного відпалу із необхідним характеристиками є неможливим. В зв’язку з цим

пред’являються чіткі вимоги до катанки та виникає гостра необхідність у максимальному використанні пластичності матеріалів маловуглецевих сталей. Тому раціональне проектування технологічного процесу волочіння дроту без операції проміжного відпалу є актуальним питанням, вирішення якого дозволить значно скоротити процес виробництва та збільшити продуктивність. Так, постає необхідність у максимальному використанні пластичності матеріалів маловуглецевих сталей з метою розробки раціональної технології виробництва дроту даних марок. Для забезпечення безвідмовності процесу волочіння та виготовлення зварювального дроту належної якості необхідно здійснення відповідних розрахунків, які не можливо здійснити без відомостей про карту матеріалу.

З метою запобігання ризиків щодо виробництва неякісної продукції доцільно використовувати експрес-методи прогнозування механічних характеристик дроту після проходження через кожну волоку. До теперішнього часу не відомо вдалих спроб теоретичної систематизації процесів волочіння за механічними властивостями металів, тому доцільно будувати математичні моделі за феноменологічним принципом із врахуванням явищ зміцнення при багатоперехідному волочінні для окремих марок матеріалу. Тому проектування виробництва зварювального дроту із виключенням його розривів при багатоступінчастому волочінні з використанням феноменологічних зв’язків між коефіцієнтом витягування та параметрами кривої зміцнення маловуглецевої сталі дозволить зменшити ризики виготовлення неякісної продукції.

У зв'язку з вищевикладеним тема дисертаційної роботи, яка присвячена підвищенню ефективності процесу волочіння зварювального дроту з маловуглецевих сталей на основі теорії деформовності, є актуальною.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційну роботу виконано відповідно до «Державної програми розвитку внутрішнього виробництва» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.09.2011, № 1130), Закону України "Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки" (Відомості Верховної Ради України, 2011 р., № 4, ст. 23; 2014 р., № 2-3, ст. 41) та постанови Кабінету Міністрів України від 7 вересня 2011 р. № 942 “Про

затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року” (зі змінами від 23 серпня 2016 р. № 556) за напрямком «Створення та застосування технологій отримання, зварювання, з’єднання, діагностики та оброблення конструкційних, функціональних і композиційних матеріалів». Тема дисертаційної роботи відповідає науковому напряму кафедри опору матеріалів та прикладної механіки ВНТУ і наукової школи "Розвиток феноменологічної теорії руйнування матеріалів при великих пластичних деформаціях та розробка на цій основі нових та удосконалення існуючих технологій обробки металів тиском". Робота виконана в рамках договірних науково-дослідних робіт (номер державної реєстрації тем 0116U004438, 0117U005540), в яких авторка брала участь як виконавець.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності процесу волочіння зварювального маловуглецевого дроту шляхом розробки науково-обґрунтованих підходів щодо раціональної реалізації технології виробництва з використанням максимального ресурсу пластичності матеріалу та прогнозування показників якості готового продукту.

Для досягнення мети сформульовані і вирішені такі задачі дослідження:

- провести огляд та аналіз існуючих методів дослідження механіки процесу волочіння, методів оцінки деформовності дроту, принципів визначення технологічних параметрів волочіння, здійснити аналіз способів виробництва маловуглецевого зварювального дроту, а також визначити основні показники якості обмідненого зварювального дроту;
- сформувати карту матеріалів для процесу волочіння (сталей G3Si1 та Св-08Г2С);
- виконати мікроструктурні дослідження зварювального дроту та визначити зв’язок параметрів мікроструктури зі зварювально-технологічними властивостями дроту;
- виконати аналіз розподілу деформацій по перерізу та особливостей шляхів деформування;
- здійснити оцінку деформовності дроту з маловуглецевих сталей в процесі

його багатоступінчастого волочіння для характерного технологічного процесу.

- встановити феноменологічні зв’язки між коефіцієнтом витягування та параметрами кривої зміцнення маловуглецевої сталі зварювального дроту в процесі його багатоступінчастого волочіння;

- розробити методику, що дозволяє на етапі вхідного контролю катанки, прогнозувати показники якості готової продукції для підвищення ефективності процесу волочіння маловуглецевого дроту.

Об'єкт дослідження – процес волочіння дроту.

Предмет дослідження – карта матеріалу, деформовність дроту в процесі його волочіння, феноменологічні зв’язки між коефіцієнтом витягування та параметрами кривої зміцнення.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження проводились на основі законів механіки суцільного середовища, математичної та прикладної теорії пластичності, прикладної теорії деформовності. Моделювання процесу волочіння було виконано за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ). Експериментальні дослідження проводились у лабораторних та виробничих умовах на обладнанні, яке має свідоцтво про метрологічну повірку. Для обробки експериментальних даних були використані методи математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів. Наукова новизна роботи полягає в тому, що:

- отримав подальший розвиток метод оцінки деформовності в процесі волочіння, який на відміну від існуючих полягає в такому: за допомогою методу скінченних елементів отримано модель нерівномірності розподілу накопиченої інтенсивності деформацій, побудовано достовірні шляхи деформування в характерних точках по перерізу дроту, обґрунтовано застосування скалярного феноменологічного критерію деформовності із врахуванням третього інваріанта тензора напружень, що дозволило здійснити оцінку деформовності металу дроту в процесі його багатоступінчастого волочіння;

- вперше експериментально-розрахунковим шляхом отримано та проаналізовано закономірності, які дають достатню уяву про поведінку матеріалів в про-

цесі їх холодного багатоступінчастого волочіння, на основі яких сформовано карту матеріалу на прикладі маловуглецевих сталей G3Si1 та Св-08Г2С (складається з кривої течії, діаграми пластичності, кривої Баушингера та градуювального графіка твердість-напруження-деформації), що дозволяє коректно виконати моделювання процесу волочіння, призначати режими та спрогнозувати якість продукції;

- отримала подальший розвиток модель зміцнення маловуглецевого зварювального дроту в процесі холодного волочіння, яка на відміну від існуючих встановлює залежність коефіцієнтів апроксимації кривої зміцнення металу від інтегрального ступеня деформації;

- вперше встановлено, що значення показника деформаційного зміцнення (за двопараметричною степеневою функцією Людвіга) вихідної сировини-катанки маловуглецевої сталі є важливим фактором прогнозування якості виготовленого дроту за його зварювально-технологічними характеристиками.

Практичне значення отриманих результатів полягає в:

- методиці оцінки деформовності дроту в процесі його холодного багатоступінчастого волочіння на основі феноменологічної теорії деформовності;

- підході визначення граничних технологічних параметрів (коефіцієнта витягування) для процесу волочіння, що дозволяють на етапі вхідного контролю катанки за допомогою випробування на розтяг прогнозувати виготовлення дроту різних діаметрів без операції проміжного відпалу;

- методиці формування карти матеріалу для процесу його холодного багатоступінчастого волочіння;

- методиці прогнозування показників якості готової продукції – за механічними властивостями дроту після волочіння та за зварювально-технологічними властивостями дроту (стабільністю горіння дуги) без проведення трудомісткого мікроструктурного та хімічного аналізу.

Результати дисертаційної роботи впроваджені на ПрАТ «ПлазмаТек» та у навчальному процесі Вінницького національного технічного університету.

Особистий внесок здобувача. Основні дослідження отримані автором самостійно. Особистий внесок здобувачки полягає в тому, що авторкою поставлено

наукові задачі, виконано розробку основних теоретичних положень, математичних моделей, сформульовані висновки та розроблена методика прогнозування показників якості. Авторка планувала та проводила експериментальні дослідження, обробку та аналіз отриманих результатів. Внесок здобувачки в роботах, опублікованих разом зі співавторами, представлений в анотаціях до списку опублікованих праць за темою дисертації.

В роботах, що опубліковані у співавторстві авторці належать: [1], [14] – огляд чинників, що формують якість обмідненого дроту [2], [12] – проведення експериментальних досліджень та побудова кривих течій; [3], [9], [13], [17] – проведення експериментальних досліджень та обробка отриманих результатів [4], [5], [10], [15] – проведення експериментальних досліджень та підтвердження моделі зміцнення маловуглецевих сталей в процесі багатоступінчатого волочіння; [6], [11], [16] – проведення експериментальних досліджень, побудова діаграм пластичності та градуювального графіка твердість-напруження-деформації; [7] – моделювання процесу волочіння; [8] – обґрунтування шляхів підвищення ефективності волочіння.

Апробація матеріалів дисертації. Основні результати роботи доповідались на науково-технічних конференціях: VII-ій Міжнародній науково-технічній конференції «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії» (м. Харків, 2015р.); XIX-ій міжнародній науково-технічній конференції «Досягнення та проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском» (м. Краматорськ, 2016 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (м. Одеса, 2016); Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи (м. Вінниця, 2016 – 2017 рр.);щорічних НТК ВНТУ (2016-2019 рр.); Міжнародній науково-технічній конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти» (м. Херсон, 2017-2018 рр.); 1-ій Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2019» (м. Вінниця, 2019р.). Дисертаційна робота в повному обсязі доповідалась на роз-

ширених наукових семінарах з ОМТ і отримала позитивну оцінку в: Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (м. Київ, 2019 р.) та Вінницькому національному технічному університеті (м. Вінниця, 2019 р.).

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи викладено в 17 публікаціях. Серед них: 5 статей в спеціалізованих фахових виданнях згідно переліку МОН України, 1 стаття у закордонному періодичному виданні, що входить до наукометричної бази даних SCOPUS, 1 патент України на корисну модель, 10 тез доповідей на конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел з 97 найменувань і 3 додатків. Робота викладена на 162 сторінках, з яких 112 сторінок основного тексту. У розділах дисертації міститься 63 рисунка і 25 таблиць, з яких 2 рисунка розміщені на 2 окремих сторінках; список використаних джерел та додатки займають 31 сторінку.

РОЗДІЛ І
ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД. ВОЛОЧІННЯ: МЕХАНІКА, ПРОБЛЕМИ, ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ

1.1 Існуючі схеми виробництва зварювального маловуглецевого дроту.

На сьогоднішній день споживання зварювального дроту суцільного перерізу для виготовлення стальних конструкцій залишається досить високим і має тенденцію до зростання – тому виробництво обмідненого (або полірованого) дроту марок Св-08ГС, Св-08Г2С ГОСТ 2246-70 або G3Si1 G4Si1 ISO 14341 є доволі перспективним. Традиційна схема технологічного процесу виробництва маловуглецевого дроту даних марок наведена на рис.1.1

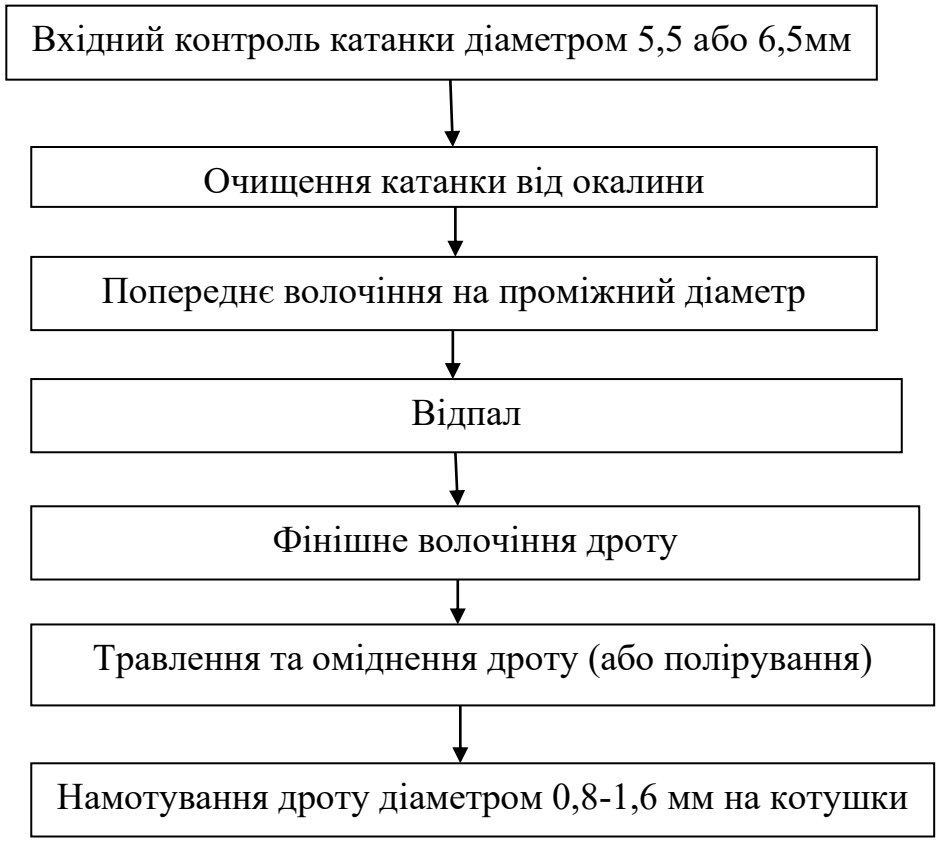


Рисунок 1.1 – Схема виробництва маловуглецевого дроту

Згідно рис. 1.1 після вхідного контролю катанки першим етапом технологічного процесу є очищення катанки від окалини, що може здійснюватися хіміч-

ним (у розчині сірчаної або соляної кислоти) або механічним (за допомогою окалиноломачів) способом. Хімічний спосіб очищення катанки від окалини відходить у минуле, оскільки має ряд недоліків у порівнянні з механічним, а саме: зайві витрати на травлення катанки, забруднення довкілля, значно більша кількість обслуговуючого персоналу, а також збільшення часу виробництва готової продукції. Сьогодні більшість підприємств переходять на механічний спосіб очищення катанки від окалини.

Також одним із етапів технологічного процесу є операція проміжного відпалу. Дана операція включена в технологічний процес по тій причині, що у ГОСТ 2246-70 встановлені вимоги до механічних властивостей готового дроту, проте жорстко не регламентуються вимоги до механічних характеристик катанки. На сьогоднішній день підприємства встановлюють жорсткі вимоги до якості сировини, щоб виключити операції проміжного відпалу з технологічного процесу [18, 19]. Це значно здешевлює собівартість готової продукції, але постає актуальною проблема прогнозування механічних властивостей виготовленого дроту виходячи із вхідних механічних характеристик катанки з метою уникнення небажаних ризиків на виробництві.

1.2 Основні показники процесу волочіння

Найпростіша схема волочіння дроту круглого перерізу наведена на рис. 1.2 і полягає у протягуванні заготовки 1 з вхідним діаметром d_0 через волоку 2 з напівкутом конусності α та з вихідним діаметром дроту d. Деформація дроту здійснюється в умовах контакту оброблюваного матеріалу з волокою. Стінки каналу волоки обтискають дріт по всій контактній поверхні в кожній її точці. Елементарні сили тиску волоки на протягуваний метал dN викликають зі сторони металу елементарні реактивні сили, що дорівнюють активним, але направлені в протилежні сторони. Частинки деформованого металу ковзають по поверхні волоки, в результаті чого виникають сили контактного тертя, що утрудняють дане ковзання. Елементарні сили тертя dT направлені по дотичних до поверхні каналу у різних її то-

чках і діють на метал в напрямку, який зворотній до його руху. Величина елементарних сил тертя визначається за законом Кулона- Амонтона $dT=f\cdot dN$, де f – коефіцієнт тертя [20].

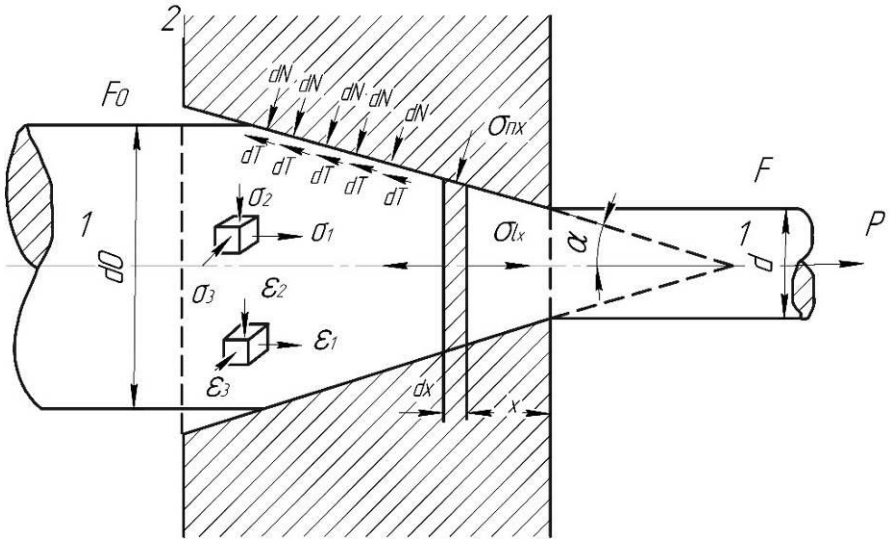


Рисунок 1.2 – Схема волочіння дроту суцільного перерізу

Основні показники процесу волочіння розраховують за наступними формулами [21]:

Відносне обтиснення дорівнює :

$$R=\frac{F_0-F}{F_0}\cdot 100\%=\frac{d_0^2-d^2}{d_0^2}\cdot 100\%, \qquad (1.1)$$

де R – відносне обтиснення; F_0 – початкова площа поперечного перерізу; F – площа поперечного перерізу металу після волочіння.

Величина витягування μ становить:

$$\mu=\frac{F_0}{F}=\frac{l}{l_0}, \qquad (1.2)$$

де l_0 – початкова довжина; l – довжина після металу після волочіння.

Величина коефіцієнта витягування

$$\ln \mu = e_i = \ln \frac{F_0}{F} = \ln \frac{l}{l_0}, \tag{1.3}$$

Геометричний параметр клиновидної зони деформації Δ дорівнює [22] :

$$\Delta = \frac{\alpha}{R}\left(1+\sqrt{1-R}\right)^2, \tag{1.4}$$

де α – напівкут робочої зони волоки.

1.3. Аналіз існуючих маршрутів волочіння

Для побудови маршруту волочіння дроту на практиці використовують такі основні принципи [23]:

- найбільшого запасу міцності по маршруту волочіння;
- обтиснень, які рівномірно зменшуються;
- збільшених на 25-30 % обтиснень у перших проходах до сумарного обтиснення 55-65 % і рівномірно зменшених у наступних проходах;
- однакового абсолютного видовження за кожну протяжку;
- мінімуму температури дроту по маршруту;
- однакового приросту міцності за кожний прохід;
- однакового використання потужності за кожне обтиснення маршруту волочіння.

Великого поширення набули принципи побудови маршруту волочіння, де використовують середню витяжку за кожен прохід. Для зручності розрахунку таких маршрутів побудовані номограми, які описані у роботах [21, 24-25]. Недоліками таких принципів побудови маршруту є нераціональне використання потужності виробничого обладнання, відсутність врахування механічних характеристик

матеріалу, що є дуже важливим питанням, коли встановлені вимоги до механічних властивостей готового дроту.

У роботі [26] пропонують розрахунок маршрутів волочіння на основі критерію руйнування Кокрафта-Латама:

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_p} \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon}_p = C \ , \qquad (1.5),$$

де $\bar{\sigma}$ – інтенсивність напружень, σ_1 – максимальне розтягуюче напруження; $\bar{\varepsilon}_p$ – накопичена пластична деформація. Методика розрахунку маршруту волочіння полягає в наступному:

1) вибирають катанку для волочіння;

2) здійснюють підготовку зразків з проточкою певної форми d_0/R = 0-4, де d_0 - діаметр в мінімальному перерізі шийки, R- радіус кривизни профілю шийки;

3) проводять випробування з проточкою на розтяг до моменту руйнування та визначають значення відносного видовження;

4) в програмному середовищі "DEFORM" моделюють випробування даних зразків (матеріал – зразок з проточкою, інструмент – захвати розривної машини). Визначають експериментально властивості матеріалу – крива «деформація – напруження» і вводять дані для моделювання. Потім визначають значення критерію Кокрафта-Латама на осі шийки зразка, що відповідає моменту руйнування і розраховують критичне значення критерію Кокрафта-Латама як $C = 0,7 \cdot C_{пр}$;

5) розраховують маршрут волочіння катанки до необхідного діаметру (діаметр вибирається, виходячи з вимог до тонкого лантунованого дроту). Величини одиничних деформацій приймають для відповідних умов волочіння, а також з врахуванням набутого досвіду. Приймають кут волоки, що забезпечує значення форми середовища деформації $1,2 < \Delta < 2,0$;

6) в програмному середовищі "DEFORM" моделюють процес багатократного волочіння катанки (матеріал - катанка, інструменти - волока,

тягнучі захвати) і проводять розрахунок фактичного значення критерія руйнування Кокрафта-Латама $C_Ф$ на осі дроту для кожного проходу;

7) якщо фактичне значення критерію руйнування $C_Ф$ не перевищує граничного значення $C_{пр}$, то розрахунок вважається закінченим і маршрут волочіння приймається для роботи;

8) якщо фактичне значення критерію руйнування $C_Ф$ перевищує граничне значення $C_{пр}$ то:

- визначають проходи, де приріст $C_Ф$ максимальний;

- на даних проходах зменшують кут волоки інструменту і розрахунок проводиться за вище описаною схемою п.6 - п.8. Зниження кута волоки бажано до значення Δ=1,20.

Якщо після прийнятих дій фактичне значення критерію руйнування $C_Ф$ не перевищує граничного значення $C_{пр}$, то розрахований маршрут вважається закінченим і приймається в роботу.

9) якщо $C_Ф$ перевищує граничне значення $C_{пр}$, то вибирають катанку з іншими властивостями та розрахунок повторюють;

10) якщо після вжитих дій по вибору катанки та коректуванню режимів деформації фактичне значення критерію руйнування $C_Ф$ перевищує граничне значення $C_{пр}$ то для даного діаметру призначають операцію проміжного патентування.

Очевидним недоліком даної методики є наявність всього однієї константи матеріалу, яка визначає пластичність, що, очевидно, не достатньо для коректної оцінки деформовності при значних пластичних деформаціях. Більш деталізований огляд недоліків цього та інших подібних до нього критеріїв розглянуто в [27, 28].

У роботі [29] обґрунтовано значення показника Δ для процесу волочіння з метою уникнення обривів дроту. В області значень показника Δ <1,2 величина критерію руйнування C незначно залежить від зміни Δ по причині високих значень розтягуючих напружень на осі дроту, що призводить до ймовірності утворення центральних обривів. В області значень Δ> 2,0 критерій руйнування C має менше абсолютне значення в порівнянні з областю значень Δ <2,0. Однак при

цьому значення гідростатичного напруження в досліджуваній області вище. Якщо область значень становить 1,2 <Δ <2,0 критерій руйнування *C* наочно відображає ймовірність утворення тріщин і розривів на осі дроту, що підтверджується наявними в літературі даними. При цьому спостерігається хороша кореляційна залежність між значенням гідростатичного напруження на осі протягуваного дроту і критерієм руйнування *C*.

Розглянута вище методика побудови маршруту волочіння розроблена для виробництва високовуглецевого дроту. Для волочіння маловуглецевого зварювального дроту така методика дуже трудомістка, оскільки потребує додаткової підготовки зразків з проточкою для випробувань на розтяг та кваліфікованого персоналу, який працює у програмному середовищі "DEFORM". Крім автори вирішують в першу чергу проблему обривів дроту в процесі волочіння за допомогою коректування маршруту. Але тут не вказані рекомендації для побудови маршруту волочіння з метою забезпечення необхідних механічних властивостей готового дроту, які жорстко регламентуються нормативною документацією, виходячи із вхідних механічних характеристик катанки.

Автори роботи [30] розглядають питання впливу швидкості волочіння на температурні умови і формування шару мастила в середовищі деформації та на поверхні дроту. Також досліджено вплив контактної взаємодії дроту і шківів на температуру і якість поверхні та запропонована методика побудови маршруту волочіння за наступною схемою:

1. Визначення вимог до готового дроту.

2. Вибір марки сталі і діаметра катанки.

3. Вибір типу або визначення паспортних даних наявних волочильних станів. Основними параметрами при цьому є: тип приводу і потужність двигуна, розподіл кінематичного витягування (для волочильних станів з жорсткими кінематичними зв’язками), швидкість(продуктивність) волочильного стану; система охолодження дроту, волок і емульсії, можлива кількість волок і схема їх розміщення.

4. Визначення величини сумарних і одиничних обтиснень, виходячи із пластичних властивостей матеріалу, отримання необхідних фізико-механічних властивостей готового дроту, забезпечення максимальної продуктивності і мінімізації витрат на виробництво дроту

5. Визначення кратності волочіння, вибір величини ковзання і характеру його розподілу (для волочильних станів із жорсткими кінематичними зв'язками), розрахунок маршрутів волочіння (проміжних діаметрів дроту)

6. Розрахунок геометрії каналу волок, визначення при заданих обтисненнях значень робочих кутів волок із умови забезпечення заданої рівномірності деформації по перерізу дроту (по значенням показника Δ) і мінімального зусилля волочіння.

7. Вибір конструкції і матеріалу волок, типу змащування і способу подачі мастила в середовище деформації.

8. Розрахунок температурних умов деформації і охолодження дроту на волочильному стані

9. Проведення перевірочних розрахунків (отримання необхідних властивостей готового дроту шляхом вибору раціональних температурно-деформаційних режимів волочіння та забезпечення максимально можливого зниження витрат на виробництво дроту.

10. Коректування і перерахунок маршрутів волочіння при отриманні незадовільних результатів при перевірочних розрахунках.

У даній методиці не вказується про вплив умов змащення , температури та швидкості волочіння на механічні властивості готового дроту. Також не розглядається питання коректування умов змащення та температури дроту в процесі волочіння з метою зміни отриманих механічних властивостей готової продукції, які не відповідають вимогам нормативної документації.

Коли механічні властивості готової продукції не відповідають вимогам нормативної документації, то застосовують різні конструкторсько-технологічні рішення, зокрема у роботі [31] пропонують використовувати нову технологію виробництва маловуглецевого дроту типу Св-08Г2С за допомогою волочіння зі зсу-

вом. Метою дослідження було підвищення запасу пластичності, а також удешевлення та спрощення технології виробництва за рахунок відміни операції проміжного відпалу. Експеримент був проведений для етапу попереднього волочіння на проміжний діаметр і було використана лише одна волока зі зсувом. Маршрути волочіння наведено у таблиці 1.1, а результати механічних властивостей дроту представлено на рис. 1.3.

Таблиця 1.1 – Маршрути волочіння дроту сталі Св-08Г2С [32]

Технологія	Діаметр волок, мм								
Експериментальна	6,15	5,4	5,2*	5,0	4,30	3,90	3,5	3,06	2,70	2,39
Класична			5,3							

Примітка * волока зі зсувом

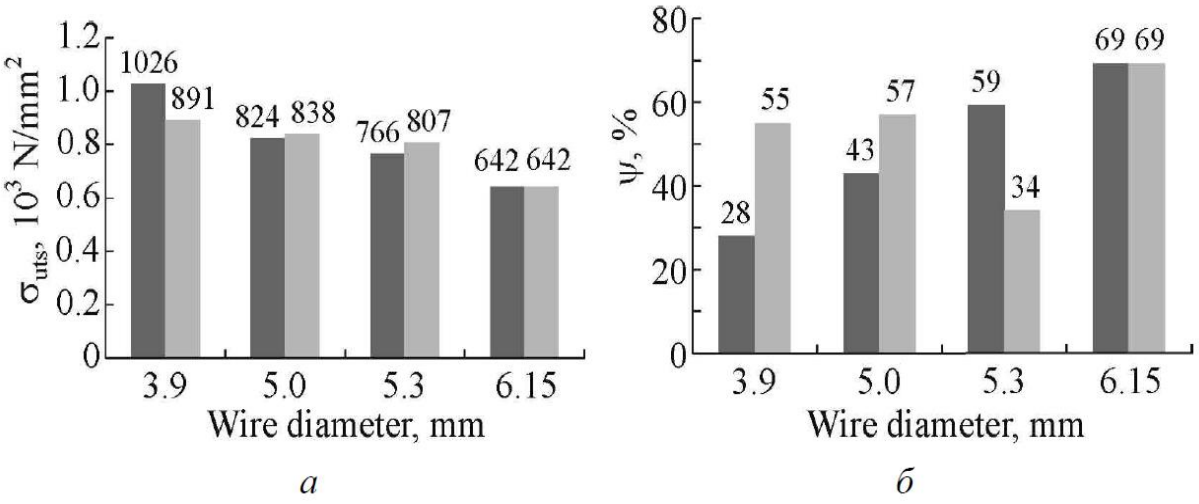


Рисунок 1.3 – Механічні властивості дроту із сталі Св-08Г2С, що виготовлена за класичною( ) і експериментальною ( ) технологіями: а – границя міцності σ_{uts}, б – відносне видовження ψ [30]

Використання даної технології, як видно із рис.1.3 дозволить покращити механічні властивості: відносне звуження дроту виготовленого по експериментальному маршруту залишається достатньо високим (за класичним маршрутом зменшується вдвічі). Крім того аналіз мікроструктури показав заліковуваня пор і мі-

кротріщин при використанні експериментального маршруту у порівнянні з класичним.

У роботі [32] пропонують при побудові маршруту волочіння вибір одиничного ступеня деформації $\dot{\varepsilon}$ в залежності від напівкута волоки і коефіцієнта тертя та виражено наступною залежністю:

$$\dot{\varepsilon} = 1 - \left[\frac{1 - arctg(tg\alpha + f}{1 + arctg(tg\alpha + f}\right]^2, \qquad (1.6)$$

α – робочий напівкут волоки, f – коефіцієнт тертя.

На рис. 1.4 зображено номограму для вибору оптимальних напівкутів волоки та коефіцієнта тертя від одиничного ступеня деформації. Якщо одиничний ступінь деформації $\varepsilon > 1$, або $\varepsilon < 1$, то це призводить до зміни типу напружень в поверхневому шару дроту.

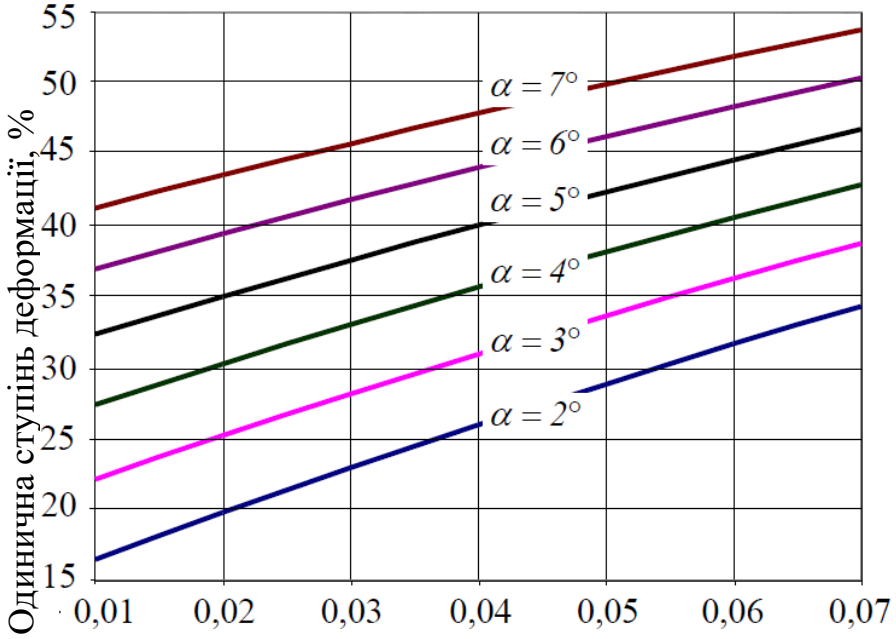


Рисунок 1.4 – Значення одиничного ступеня деформації, що забезпечує рівномірну деформацію по перерізу в залежності від коефіцієнта тертя на напівкута волоки [32]

Використання даної залежності дозволяє підвищити стійкість волочильного інструменту та збільшити швидкість волочіння дроту. Про вплив коефіцієнта тертя, напівкута волоки та одиничного ступеня деформації, які підібрані за даною методикою, на механічні властивості готового дроту інформації автори інформації не вказують.

1.4. Вплив основних показників процесу волочіння на механічні властивості готового дроту

1.4.1 Вплив величини обтиснення та кількості переходів на механічні властивості готового дроту

Одним із основних показників підбору маршруту волочіння є обтиснення. Відомо, що зі збільшенням ступеня обтиснення границі міцності та текучості матеріалу зростають, а відносне видовження навпаки зменшується [33-36].

На рис. 1.5-1.7 наведено залежність зміни механічних властивостей дроту з маловуглецевих марок сталі в залежності від збільшення ступеня обтиснення [33].

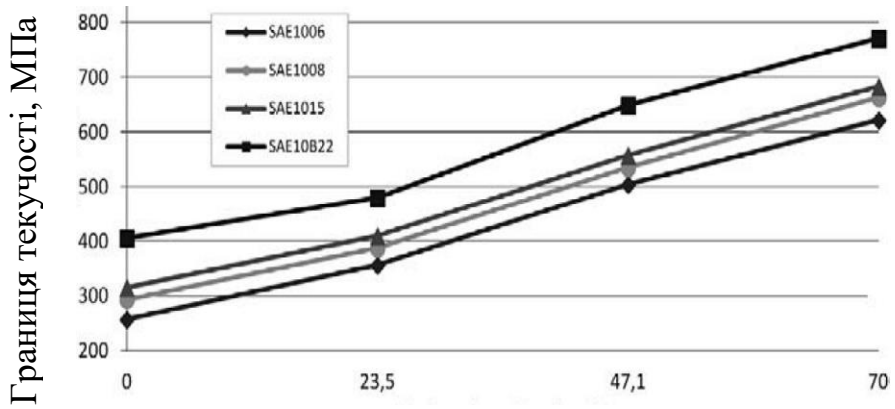


Рисунок 1.5 – Залежність границі текучості від величини обтиснення

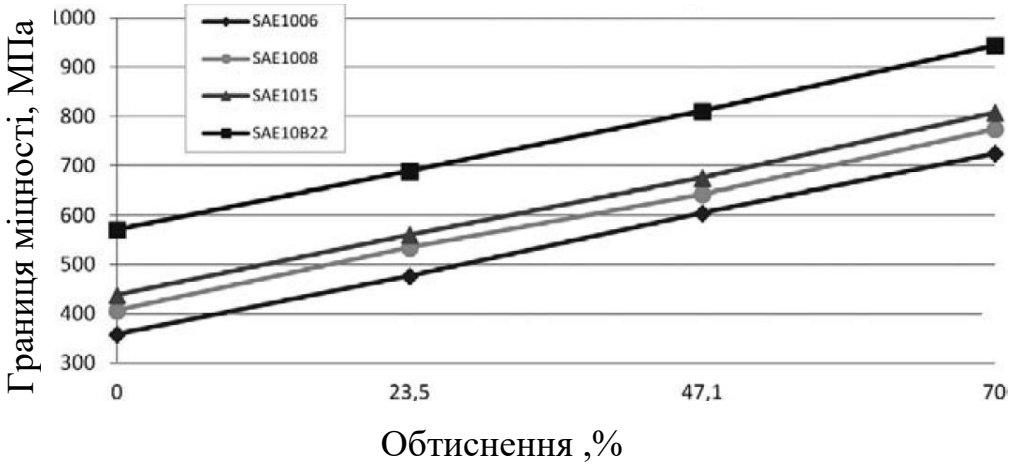


Рисунок 1.6 – Залежність границі міцності від величини обтиснення

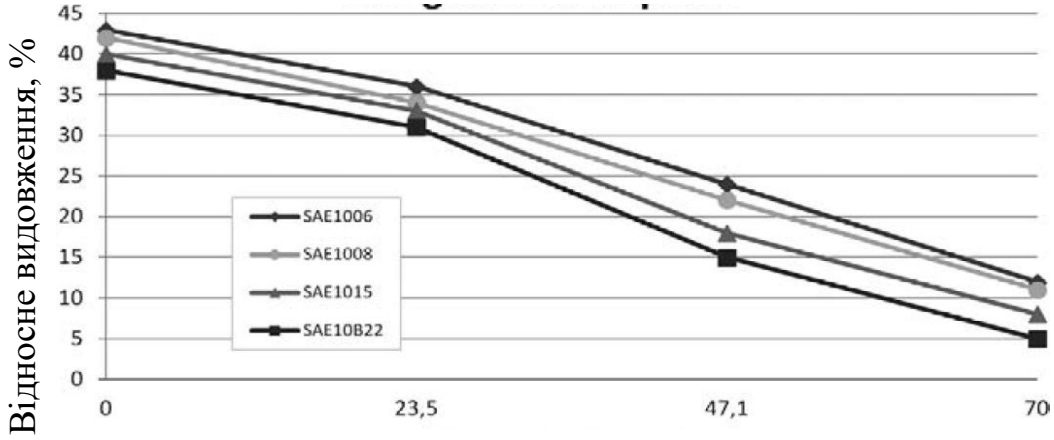


Рисунок 1.7 – Залежність відносного видовження від величини обтиснення

Як свідчать рис. 1.5-1.7 границі текучості міцності при розтягу збільшуються, в той час як відносне видовження зменшується для всіх сталей, коли збільшується обтиснення. Це потрібно враховувати при коректуванні маршруту волочіння для отримання бажаних механічних властивостей дроту виходячи із механічних характеристик катанки.

Результати отримані у роботах [37-38] свідчать, що зі збільшенням кратності волочіння зростають енергозатрати, але при цьому коефіцієнт запасу значно більший. При волочінні дроту з меншою кількістю проходів підвищується температура дроту та з’являється висока ймовірність обриву дроту в процесі виробництва.

1.4.2 Вплив швидкості волочіння на механічні властивості дроту

Про вплив швидкості волочіння на механічні властивості маловуглецевого дроту йдеться у [33], а високовуглецевого – у [39-41]. Вплив швидкості волочіння маловуглецевого дроту на границі міцності і текучості, а також відносного видовження представлено на рис. 1.8-1.10 [33].

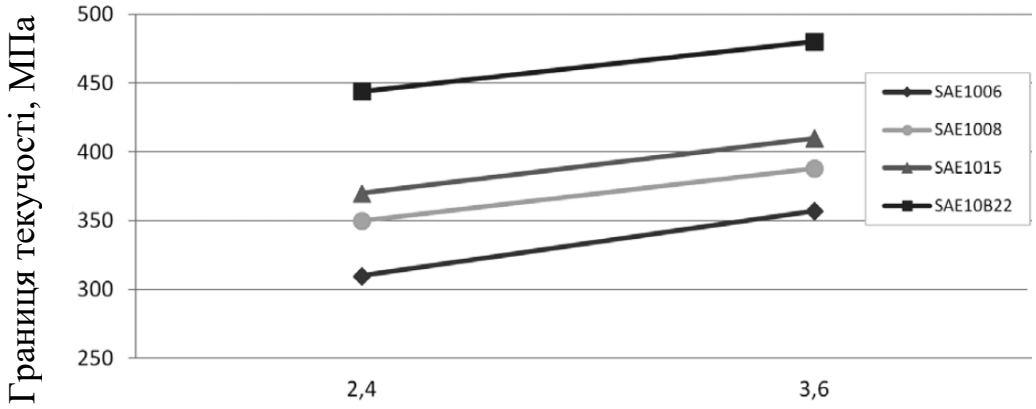


Рисунок 1.8– Залежність границі текучості від швидкості волочіння

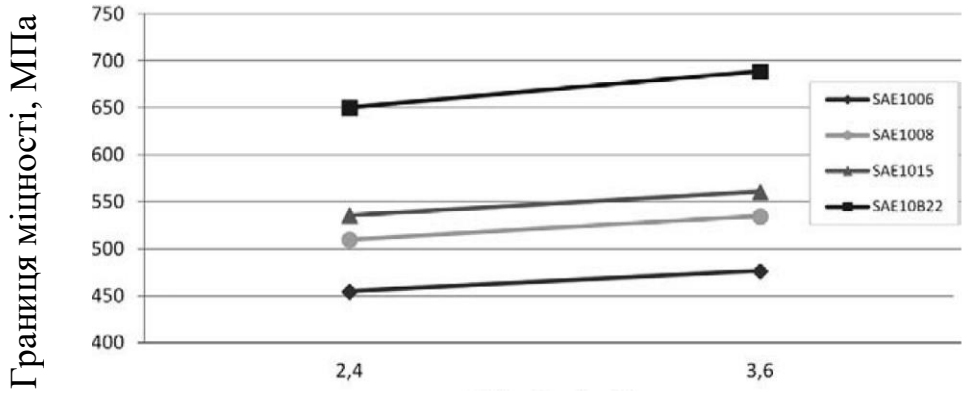


Рисунок 1.9 – Залежність границі міцності від швидкості волочіння

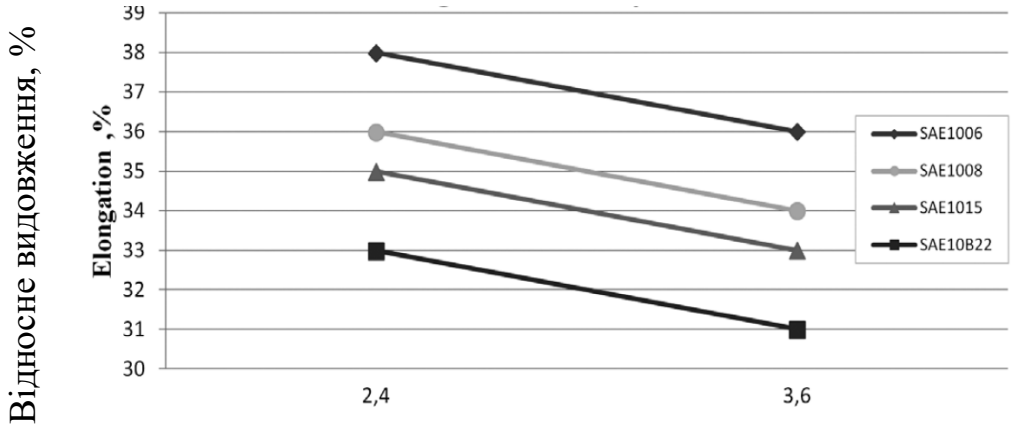


Рисунок 1.10 – Залежність відносного видовження від швидкості волочіння

Як свідчать рис. 1.8 – 1.10 зі збільшенням швидкості волочіння границі міцності і текучості збільшується, а відносне видовження зменшується. Дані результати однакові як для маловуглецевих так високовуглецевих марок сталей.

1.4.3 Вплив кута волоки на механічні властивості дроту

Значна частина робіт [42-46] присвячена визначенню оптимального кута напівконусу волоки, що дозволяє в свою чергу будувати енергозберігаючі маршрути волочіння, підвищити термін використання волок та підібрати оптимальний коефіцієнт витягування, виходячи із заданого напівкута волоки. Автори роботи [43] провели моделювання процесу волочіння в результаті якого виявили, що величина оптимальних напівкутів для процесу волочіння становить $\alpha=7\text{-}12^0$. Застосування волок з напівкутом конусності більше 20^0 призведе до збільшення діаметр перед входом в робочу зону, а процес волочіння перетвориться в процес струган-ня.

У [47-49] розглядають вплив геометрії волоки на ступінь пошкодження дроту та ймовірність його обривів в процесі волочіння. Тільки у [50-51] було проведено дослідження щодо впливу різних значень напівкутів волоки на механічні властивості дроту. Так у [50] було проведено серію експериментів для чотирьох

значень напівкутів волоки та різних довжин калібручого пояска. Результати випробувань механічних властивостей представлені на рис. 1.11-1.12

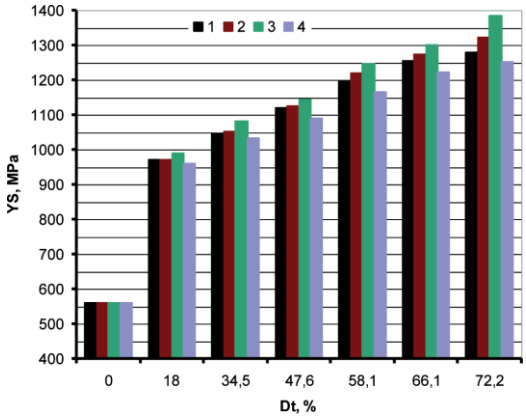


Рисунок 1.11 – Залежність границі текучості для різних напівкутів волоки в процесі волочіння (1 -2^0; 2 -6^0; 3 -10^0; 4 -8^0)

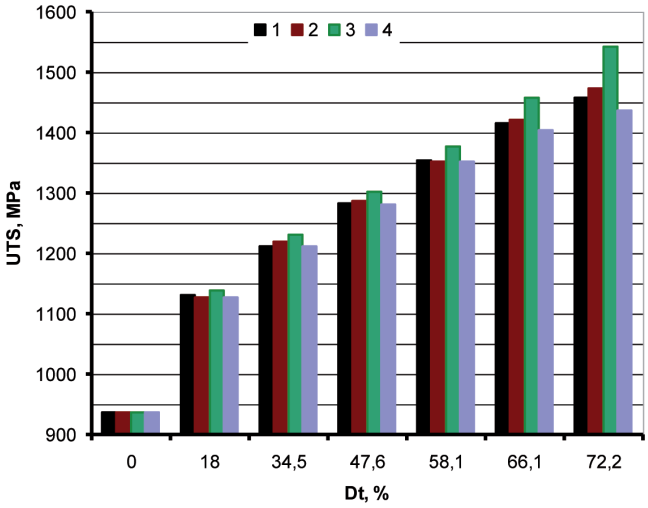


Рисунок 1.12 – Залежність границі міцності для різних напівкутів волоки в процесі волочіння (1 -2^0; 2 -6^0; 3 -10^0; 4 -8^0)

Рис. 1.11 – 1.12 наочно демонструють, що напівкут волоки впливає на механічні властивості дроту, особливо на останніх проходах. Так при напівкуті волоки 10^0 границя текучості дроту вища на 10,7 % та границя міцності на 6,9% у порівнянні з напівкутом волоки 8^0.

Саме тому при коректуванні параметрів процесу волочіння для забезпечення необхідних механічних властивостей дроту це теж необхідно враховувати.

1.4.4 Вплив коефіцієнта тертя на механічні властивості дроту

При розробці раціональних маршрутів волочіння необхідно обов'язково враховувати коефіцієнт тертя [52-54]. Комплексне дослідження описано у роботі [54]: було проведено експерименти про вплив одиничного обтиснення, напівкута волоки та коефіцієнта тертя на неоднорідність деформації та силу волочіння та визначення значущості даних факторів. Результати повнофакторного ескперименту та отримані рівняння регресії виявили, одиничне обтиснення має найбільший вплив (чим нижче це зменшення, тим більше різниця між максимальним та мінімальним рівнями), а також на напівкут волоки (чим більший кут, тим менше рівномірна інтенсивність деформації). Тоді вплив тертя значущий лише щодо загальної потужності волочіння.

Представлена методологія може бути використана для більш комплексного вирішення проблеми (з більшою кількістю факторів на більшій кількості рівнів) та для інших цікавих якісних характеристик, таких як рівень критерію переломів або внутрішні напруження при волочінні.

1.5 Вплив мікроструктури на технологію виробництва зварювального дроту

При виробництві дроту зіштовхуються з таким негативним явищем як обрив дроту в процесі волочіння. Одними з причин обривів є структурні фактори, а саме наявність в її структурі бейніто-мартенситних ділянок [56-57] та наявність неметалевих включень та їх розміщення в структурі катанки [58-60]. Поверхневі дефекти катанки також негативно впливають на процес волочіння дроту, тому вимоги до поверхні катанки також мають бути прописані при вхідному контролі сировини у виробників зварювального дроту [61-62], адже дефекти катанки знижують продуктивність обладнання, передчасну заміну волок, обриви дроту при волочінні.

1.6 Особливості побудови кривих течій зварювальної катанки

Важливою функціональною характеристикою матеріалу, що необхідно використовувати для дослідження механіки та розрахунку низки параметрів процесу волочіння є крива течії, як обов'язкова складова карти матеріалу [63]. Кривою течії $\sigma_i = f(e_i)$ є залежність величини істинних напружень (σ_i) від істинних деформацій (e_i). Постулюється, що ця залежність є єдиною при монотонному складному деформуванні ізотропного матеріалу і майже не залежить від схеми напруженого стану [64-66]. Матеріал катанки, напівфабрикат дроту та кінцевий виріб дроту є анізотропними матеріалами із відповідною розвиненою текстурою. Тому, криві течії, її параметри та інші характеристики будуть справедливі лише для одного головного напрямку деформації. Але це є виправдано, оскільки оцінювання властивостей згідно стандарту ГОСТ 2246-70 здійснюється саме при розтягу вздовж вісі дроту.

В основному для побудови кривих течії використовують такі методи випробувань як розтяг, стиск або кручення [67-69]. Характер кривих течій не залежить від виду деформацій, яким вони отримані, побудова їх може здійснюватися на основі найпростіших випробувань, а результати можуть бути використані при аналіз найскладніших процесів. Для побудови кривих течій зварювальної катанки найзручніше використовувати такий метод випробувань як розтяг. Методи випробувань на стиск або кручення використовувати незручно через малий діаметр вихідної катанки, що вимагає використання нестандартних зразків відповідного розміру та випробовувального обладнання.

Для побудови кривих течій було використано діаграми розтягу, які обробляли за методикою згідно роботи [70]:

$$\sigma_i = \frac{P}{F_0}\frac{l_0 + \Delta l_{зал}}{l_0}, \qquad (1.8)$$

$$e_i = \ln \frac{l_0 + \Delta l_{зал}}{l_0} \tag{1.9}$$

де σ_i – інтенсивність нормальних напружень, МПа; e_i – інтенсивність деформацій; P – розтягувальна сила; F_0 – початкова площа поперечного перерізу зразка; l_0 – робоча довжина зразка, $\Delta l_{зал}$ – залишкова деформація.

Вибір апроксимуючої функції диктується реологічними особливостями матеріалу, зручністю практичного використанням в розрахунках, простотою аналітичного запису та прозорістю фізичного змісту коефіцієнтів апроксимації.

Зокрема, двопараметрична степенева апроксимація П. Людвіга є однією з найпростіших і зручних для аналітичних розрахунків початково ізотропних матеріалів з ізотропним зміцненням [71]:

$$\sigma_i = Ae_i^n, \tag{1.10}$$

де n –показник деформаційного зміцнення; A – модуль (коефіцієнт) зміцнення.

У роботі [63] вказано, що величини стандартних механічних характеристик однозначно пов’язані із кривою зміцнення. Зокрема, границі міцності σ_u та текучості σ_y визначатимуться за величинами A і n, а відносне видовження після розриву δ – за n:

$$\sigma_u = A \cdot \exp(-n) \cdot n^n, \tag{1.11}$$

$$\sigma_y = A \cdot 0{,}002^n, \tag{1.12}$$

$$\delta = \left[\exp(n) - 1\right] \cdot 100\%. \tag{1.13}$$

Трипараметрична функція Г. Свіфта має дещо вищу точність, ніж (1.10) за рахунок наявності деформаційного параметра e_0 [64]:

$$\sigma_i = A_2 \left(e_0 + e_i \right)^{n_2}, \tag{1.14}$$

аналогічною до (1.13) є залежність П. Людвига [71]:

$$\sigma_i = B + A_1 e_i^{n_1}, \tag{1.15}$$

де B – параметр, фізичне значення якого відповідає границі текучості.

Зауважимо, що моделі (1.10), (1.14) –(1.15) є ядром побудови низки моделей матеріалів, що мають властивість до анізотропного зміцнення (із використанням кривої Баушингера) для коректного моделювання процесу волочіння МСЕ.

1.7 Оцінка деформовності зварювального дроту

Як показано в низці робіт [72-81] ефективним інструментом аналізу щодо забезпечення безвідмовності з т.з. руйнування процесів холодного пластичного деформування, є феноменологічна теорія деформовності. Зокрема, для процесу волочіння, який характеризується складним монотонним навантаженням та об'ємністю напруженого стану, найбільш загальним скалярним критерієм, за допомогою якого здійснюватиметься оцінка деформовності, є залежність Огороднікова В. А. [73]

$$\psi = \int_0^{e_u^*} \left(1 + 0,2 arctg \left(\frac{d\eta}{de_u} + \frac{d\chi}{de_u} \right) \right) \frac{e_u^{0,2 arctg \frac{d\eta}{de_u}}}{\left[e_p(\eta, \chi) \right]^{1+0,2 arctg \left(\frac{d\eta}{de_u} + \frac{d\chi}{de_u} \right)}} de_u \le 1 \cdot \tag{1.16}$$

Цей критерій ґрунтується на нелінійній теорії накопичення пошкоджень та може бути застосований для процесів, в яких історія деформування характеризується траєкторіями, для яких похідні $\frac{d\eta}{de_u}$, $\frac{d\chi}{de_u}$ набувають значних величин. В кри-

терії використовуються безрозмірні показники напруженого стану, що складаються з інваріантів тензора чи девіатора напружень:

- показник жорсткості напруженого стану η

$$\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_u} \ , \tag{1.17}$$

- показник, що враховує третій інваріант тензора напружень χ

$$\chi = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3}}{\sigma_u} \ , \tag{1.18}$$

або альтеративний йому показник μ_σ (параметр Надаї-Лоде)

$$\mu_\sigma = 2\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \ . \tag{1.19}$$

В роботах [72 – 74] досліджувались питання оцінки деформовності, але використання представлених методів не дає можливості з необхідною для практики точністю визначити граничні технологічні параметри процесу багатоступінчастого волочіння. Роботи [28-29] присвячені дослідженню оцінки деформовності процесів гарячого пластичного деформування, тому для процесу волочіння це також не може бути використано.

Зокрема, в роботі [72] досліджено шляхи деформування (рис. 1.13) і наведена методика оцінки деформовності при волочінні, але, як показують розрахунки, зокрема для процесу волочіння маловуглецевого сталевого дроту, мають місце значні відхилення розрахунків та експериментальних даних, особливо, коли кількість переходів сягає більше 10. Похибка в низці випадків сягає 200% і більше. Це може бути пов’язано з низкою причин. По-перше, дослідження напружено-деформованого стану (а отже і шляхів деформування, як наслідок його обробки та

аналізу) виконувались із застосування наближених теоретичних підходів, які не здатні, зокрема, оцінити нерівномірність деформацій в перерізі. По-друге, для оцінки деформовності не було враховано вплив об'ємності напруженого стану на пластичність та кривину шляхів деформування. По-третє, технологічний паспорт матеріалу дроту важливо визначати для конкретної партії напівфабрикату. І нарешті, в таких методиках важко враховувати всі особливості перебігу багатоступнчастого волочіння, в т.ч. набуту деформаційну анізотропію.

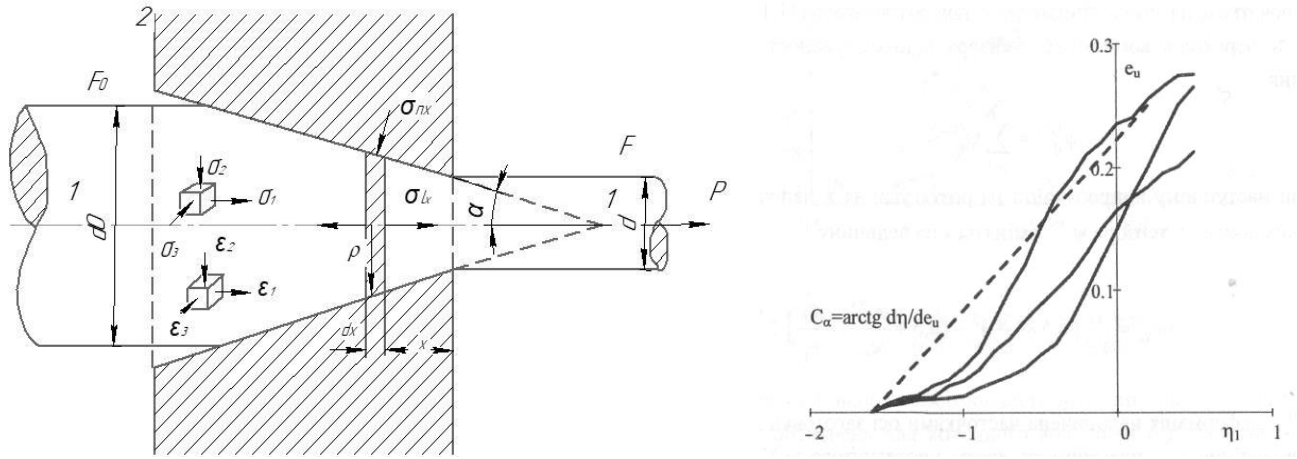


Рисунок 1.13 – Схема волочіння дроту суцільного перерізу та шляхи деформування частинок матеріалу на вісі при волочінні [72]

1.8 Особливості побудови діаграми пластичності зварювальної катанки

Під діаграмою пластичності розуміють залежність пластичності матеріалу від показників напруженого стану.

Для побудови діаграми пластичності проводять випробування на розтяг, стиск та кручення. За результатами випробувань вимірюють необхідні величини для розрахунку граничних деформацій, які розраховують за формулами наведеними у роботі [72].

При розтягу (показник напруженого стану $\eta=1$)

$$e_P(\eta=1)=\ln\frac{l}{l_0}, \tag{1.20}$$

де l_0 та l – робоча довжина зразка до та після випробування відповідно.

При стиску (показник напруженого стану $\eta=-1$)

$$e_P(\eta=-1)=\ln\frac{h_0}{h}, \tag{1.21}$$

де h_0 та h – висота зразка до та після випробування відповідно.

При крученні (показник напруженого стану $\eta=0$)

$$e_P(\eta=0)=\frac{tg\gamma}{\sqrt{3}}, \tag{1.22}$$

де γ – кут між віссю зразка та лінією, що проведена до випробовування, паралельно до вісі зразка.

Апроксимація діаграми пластичності матеріалів в області зміни показника напруженого стану $-3\le\eta\le0$ за Г.Д. Делем має вигляд [82]:

$$e_p=\frac{e_{p-1}e_{p0}\exp(-\eta)}{e_{p-1}+\eta\left[e_{p-1}-2,72e_{p0}\right]}, \tag{1.23}$$

де e_{p-1} – пластичність металу при одноосьовому стиску та e_{p0} – пластичність металу при крученні.

Апроксимація за В.А. Огороднiковим має вигляд [72]:

$$e_p=e_{p0}\exp(-\lambda_{1,2}\eta), \tag{1.24}$$

де $\lambda_{1,2}$ – чутливість пластичності металу до зміни схеми напруженого стану (λ_1 при $0\le\eta\le1$ і λ_2 при $-1\le\eta\le0$).

Коефіцієнти чутливості розраховують за формулами згідно роботи [73]:

$$\lambda_1 = \ln \frac{e_P(\eta = 0)}{e_P(\eta = 1)}, \tag{1.25}$$

$$\lambda_2 = \ln \frac{e_P(\eta = -1)}{e_P(\eta = 0)}. \tag{1.26}$$

Показник напруженого стану при розтягу за формулою П. Бріджмена розраховано за формулою [83]:

$$\eta = 1 + 3 \cdot \ln(1 + \frac{d}{4R}), \tag{1.27}$$

d – діаметр поперечного перерізу зразка по шийці, R – радіус кривизни меридіонального перерізу шийки зразка.

Граничну деформацію при цьому було розраховано за зміною діаметра до та після випробувань:

$$e_P(\eta = 1) = 2 \ln \frac{d_0}{d}, \tag{1.28}$$

де d_0 та d – початковий діаметр зразка та діаметр поперечного перерізу зразка по шийці відповідно.

1.9 Показники якості зварювального дроту

На сьогоднішній день якість, надійність, конкурентоздатність і безпека продукції розглядаються не тільки зі сторони споживача, а й зі сторони виробника. Якщо підприємство не може забезпечити конкурентоздатності своєї продукції, то в умовах ринкової економіки ніякі інвестиції не зможуть спасти підприємство. Основою конкурентоздатності є якість продукції.

Багато виробників обмідненого дроту ідуть на добровільну сертифікацію своєї продукції у різних органах: УКРСЕПРО, Морський Регістр, НАКС, ГОСТ Р,

TUV та ін., а також сертифікують свою систему якості згідно вимог ISO 9001. Це дає підприємству-виробнику збільшення попиту на ринку збуту за рахунок отримання більшої довіри споживачів при виборі конкретних видів зварювальних конструкцій, підтвердження якості та інших характеристик зварювальних матеріалів.

Відмітимо стандарти, які висувають вимоги до якості обмідненого зварювального дроту: у країнах пострадянського простору дріт виготовляють згідно ГОСТ 2246-70, у європейських країнах згідно ISO 14341:2009 (цей стандарт вже вступив у дію в Україні), у США, Китаї та у країнах Тихоокеанського простору згідно американського стандарту AWS A5.18:2005. Кожен із цих стандартів має свої вимоги до обмідненого дроту. Порівняльний аналіз вимог вищевказаних стандартів до якості обмідненого дроту, на прикладі діаметра дроту 1,2 мм наведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Порівняльний аналіз стандартів до якості обмідненого зварювального дроту для дроту 1,2мм

Стандарт / Показник	ГОСТ 2246-70	ISO 14341:2009 (вимоги до розмірів та спіральності дроту) ISO 544:2003	AWS A5.18:2005
1	2	3	4
Хімічний склад дроту, який класифікується по маркам (наведено найпоширеніші марки дроту, які є аналогами)	Св-08ГС (C ≤0,10%; Si=0,6-0,85%; Mn=1,4-1,7%) Св-08Г2С (C=0,05-0,11%; Si=0,70-0,95%; Mn=1,8-2,1%) Також нормується максимальний вміст P; S; Ni; Cr	G3Si1 (C=0,06-0,14%; Si=0,7-1,0%; Mn=1,3-1,6%) G4Si1 (C=0,06-0,14%; Si=0,8-1,2%; Mn =1,6-1,9%) Також нормується максимальний вміст P; S; Ni; Cr; Mo; V; Al; Ti+Zr	ER70S-6 (C=0,06-0,15%; Si=0,8-1,15%; Mn=1,4-1,85%) ER70S-7 (C=0,07-0,15%; Si=0,5-0,8%; Mn=1,5-2,0%) Також нормується максимальний вміст P; S; Ni; Cr; Mo; V
Тимчасовий опір розриву дроту, МПа	882-1323	Не регламентується	Не регламентується
Сумарний вміст міді	Вміст міді у катанці не більше 0,25%	Не більше 0,35%	Не більше 0,50%

1	2	3	4
Механічні властивості наплавленого металу	Не регламентується	Границя текучості, границя міцності, відносне видовження та ударна в'язкість при мінусових температурах	
Спіральність дроту	Не регламентується	Для котушки діаметром 300 мм не більше 50 мм, для котушки діаметром 200 мм не більше 25мм	Не більше 25 мм
Діаметр кільця дроту, що вільно лежить на плоскій поверхні	Не регламентується	Не регламентується	Не менше 380мм
Відхилення по діаметру	-0,09мм	+0,01 – 0,04мм	+0,01 – 0,04мм
Овальність	не більше половини допустимого відхилення по діаметру		

Як видно із таблиці 1.2 радянський ГОСТ 2246-70 значно збільшує допуски відхилення по діаметру та овальності дроту у порівнянні з європейським ISO 14341:2009 та американським AWS A5.18:2005, що негативно впливає на якість зварювально-технологічний властивостей. Дріт занадто низького діаметру може спричинювати сплавлення дроту із внутрішньою поверхнею контактного наконечника, що призводить до швидкого зношування останнього.

Найжорсткіші вимоги до хімічного складу обмідненого дроту висуває стандарт ISO 14341:2009, а найменше вимог - у стандарту ГОСТ 2246-70. Крім того ISO 14341:2009 висуває жорсткіші вимоги до таких шкідливих домішок як сірка (у порівнянні з AWS A5.18:2005) та фосфор (у порівнянні з ГОСТ 2246-70). Надлишковий вміст сірки та фосфору у обмідненому дроті збільшує їхній вміст у зварювальному шві, що має негативні наслідки. Адже підвищений вміст сірки призводить до утворення гарячих тріщин, а фосфору – до утворення холодних тріщин [84].

Найбільший сумарний вміст міді регламентує AWS A5.18:2005, менший - ISO 14341:2009, а ГОСТ 2246-70 висуває вимоги лише до міді в катанці. Великий

сумарний вміст міді призводить збільшення вмісту міді у зварювальному шві, що є недопустимим у ряді відповідальних конструкцій [85]. На практиці при виробництві дроту контролюють такий показник, як товщина мідного покриття, оптимальне значення якої становить 0,15-0,20 мкм та значення має бути стабільним по довжині дроту, що намотаний на котушки. За стабільність даного показника відповідає розчин ванни міднення та її робоча температура. Велике значення товщини мідного покриття призводить до його розшарування, осипання та більшого розбризкування дроту при зварюванні.

Якість намотування обмідненого дроту має забезпечувати рівномірну подачу дроту при механізованих способах зварювання. Показниками якості намотування є діаметр витка дроту, що лежить вільно на плоскій поверхні та висота кінця якого піднімається над поверхнею (спіральність дроту). ГОСТ 2246-70 (див. табл. 1.2) не регламентує вимог до якості намотування дроту, на відміну від AWS A5.18:2005, що нормує намотування дроту за двома показниками, а ISO 14341:2009 висуває вимоги лише до спіральності дроту.

Згідно [86] при великій спіральності дріт виходить із зварювального пальника «ривками» та зі згином у вигляді спіралі – як наслідок це спричиняє неможливість отримати зварювальний шов із заданими геометричними розмірами. Показником якісної намотки є така спіральність дроту, що не перевищує 20 мм.

Діаметр витка дроту також впливає на зварювально-технологічні властивості дроту: як вказано у роботі [87] – якщо діаметр витка дуже низький, то можуть бути наступні проблеми: надмірне зношування наконечника та «гуляння» дуги. Якщо діаметр дуже великий то це може призвести до непостійного контакту дроту наконечнику, в наслідок чого відбувається нестабільний процес зварювання. Діаметр витка залежить від розмірів касети на яку намотаний. Так для касети із зовнішнім діаметром 300 мм діаметр витка має становити 900-1000 мм.

Дріт з непостійним хімічним складом не гарантує добрі зварювально-технологічні властивості та високу якість зварних з’єднань. [86]

ГОСТ 2246-70 регламентує вимоги до тимчасового опору розриву дроту на відміну від ISO 14341:2009 та AWS A5.18:2005. Так, для дроту діаметром 0,8-1,2

мм тимчасовий опір має становити 882-1323 МПа. У роботах [85, 88] вказується, що дріт з такими показниками міцності характеризується достатньою жорсткістю, здатністю безперешкодно проходити по каналах подаючих механізмів напівавтоматичного зварювального обладнання і виходити з пальника строго прямолінійно. Остання технологічна властивість дроту дуже важлива для забезпечення необхідних геометричних розмірів і форми зварного шва, в тому числі для виключення розвиненої «лускатості» поверхні і відсутності бризг в околошовній зоні. Якщо тимчасовий опір розриву менший, згідно [87], то порушується стабільність подачі дроту по направляючим каналам зварювального обладнання, якщо ж більший - збільшується зношування контактних наконечників.

На практиці зустрічаються випадки, коли дріт із тимчасовим опором розриву, що відповідає нормам ГОСТ 2246-70 (особливо діаметр 0,8 мм) надто м'який та заминається у роликах зварювального обладнання. Тому для виробництва якісного, конкурентноздатного дроту повністю виконувати вимоги ГОСТа не є можливим.

ГОСТ 2246-70 не висуває вимог до механічних властивостей наплавленого металу (див. табл. 1.2), на відміну від європейського стандарту ISO 14341:2009 та американського AWS 5.18:2005. Тобто радянський стандарт не може гарантувати якісний дріт для споживача, адже при проектуванні конструкцій із елементами зварювання механічні властивості наплавленого металу відіграють вирішальну роль при виборі виробника обмідненого дроту.

Мають місце випадки, коли споживач може брати продукт гірший за якістю через нижчу ціну у порівнянні з якісним продуктом. Але використання дроту гіршої якості може мати наступні наслідки: збільшується витрата дорогих струмопідвідних наконечників, знижується продуктивність праці через простій обладнання, значно зменшується період експлуатації зварювальних напівавтоматів, нестабільне горіння дуги, погана геометрія зварювального шва, значно нижчі механічні властивості наплавленого металу.

Таким чином, основні чинники, які впливають та формують показники якості обмідненого дроту можна умовно поділити на три групи (рис. 1.14).

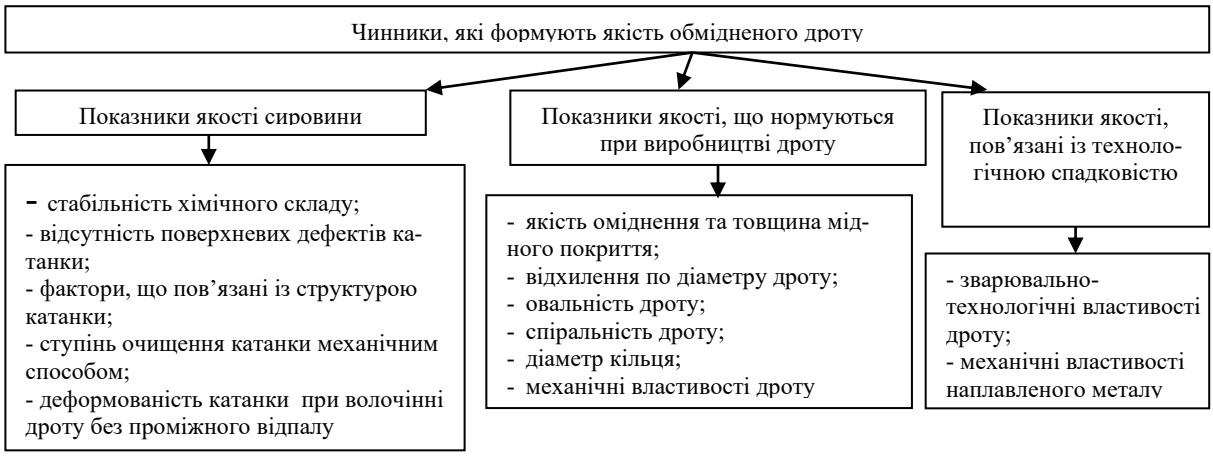


Рисунок 1.14 – Класифікація чинників, які формують якість обмідненого дроту

Охарактеризуємо детальніше кожну групу чинників, з якими зіштовхуються виробники обмідненого дроту та зазначимо їх вплив на якість готової продукції.

Якість сировини є першочерговим фактором, який впливає на якість кінцевого продукту. Катанка для виробництва обмідненого дроту повинна мати стабільний хімічний склад для забезпечення стабільного процесу зварювання.

При виробництві зварювального дроту встановлюють вимоги до сировини, оскільки катанка повинна мати підвищену пластичність. У роботі [89] вказують що зварювальна катанка має підвищену пластичність, якщо в її хімічний склад введено мікродобавки бору та має механічні властивості ($\sigma_B \leq 500$ МПа та $\psi \geq 75\%$) що достатньо для виробництва дроту діаметром 1,2-0,8мм без операцій проміжного відпалу. Саме технологія виробництва катанки і є першочерговим показником виробництва дроту без застосування операцій відпалу шляхом удосконалення її виробництва і хімічного складу [89 – 92].

Як було наведено вище механічний спосіб видалення окалини має ряд переваг у порівнянні із хімічним очищенням катанки від окалини, але при цьому необхідно враховувати те, що ефективність видаленням окалини також залежить від технології виробництва катанки [94 – 95].

Показники якості, що нормуються в процесі виробництва дроту випливають із нормативної документації (діючий стандарт або технічні умови) згідно якої ви-

робляється продукція. Для забезпечення стабільного технологічного процесу необхідно сповнення вимог до якості сировини. Контроль повинен вестися на всіх етапах технологічного процесу. Механічні властивості дроту випливають із оптимально підібраних маршрутів волочіння. Несвоєчасна заміна волок спричинює великі відхилення по діаметру та овальності дроту. Наслідки даних дефектів є наступними: дестабілізація процесу зварювання через непостійність густини струму та ймовірності заклинювання дроту у контактному наконечнику.

Зварювально-технологічні властивості дроту та механічні властивості наплавленого металу цікавлять в першу чергу виробників зварних металоконструкцій. Формування даних показників якості випливає зі стандарту, відповідно якого виготовляється дріт, потреб споживачів продукції та здатності витримати конкуренцію на ринку.

Стабільність горіння дуги зварювального дроту – одна із найважливіших характеристик його зварювально-технологічних властивостей. Це є першочерговим показником якісної продукції для споживачів. Нестабільне горіння дуги впливає на геометричні параметри зварювального шва, хімічний склад наплавленого металу та як наслідок на механічні властивості зварювальних конструкцій [96].

Причини нестабільності горіння дуги, які пов’язані із якістю електродного дроту можуть бути наступними: недостатня міцність зчеплення мідного покриття та його неоднорідність, відхилення від діаметра та надто низька міцність [87-88].

1.10 Висновки до розділу та постановка задач дослідження

В результаті проведеного літературного огляду здійснено аналіз існуючих методів дослідження механіки процесу волочіння, методів оцінки деформовності дроту, принципів визначення технологічних параметрів волочіння, аналіз способів виробництва маловуглецевого зварювального дроту, а також визначені основні показники якості обмідненого зварювального дроту. Недоліками зазначених підходів є недостатня вивченість процесу волочіння з т.з. прогнозування показни-

ків якості готового продукту, в тому числі, з використанням феноменологічної теорії деформовності. В зв’язку з наведеним вище необхідно розв’язати наступні задачі:

- провести огляд та аналіз існуючих методів дослідження механіки процесу волочіння, методів оцінки деформовності дроту, принципів визначення технологічних параметрів волочіння, здійснити аналіз способів виробництва маловуглецевого зварювального дроту, а також визначити основні показники якості обмідненого зварювального дроту;
- сформувати карту матеріалів для процесу волочіння (сталей G3Si1 та Св-08Г2С);
- виконати мікроструктурні дослідження зварювального дроту та визначити зв’язок параметрів мікроструктури зі зварювально-технологічними властивостями дроту;
- виконати аналіз розподілу деформацій по перерізу та особливостей шляхів деформування;
- здійснити оцінку деформовності дроту з маловуглецевих сталей в процесі його багатоступінчастого волочіння для характерного технологічного процесу.
- встановити феноменологічні зв’язки між коефіцієнтом витягування та параметрами кривої зміцнення маловуглецевої сталі зварювального дроту в процесі його багатоступінчастого волочіння;
- розробити методику, що дозволяє на етапі вхідного контролю катанки, прогнозувати показники якості готової продукції для підвищення ефективності процесу волочіння маловуглецевого дроту.

РОЗДІЛ ІІ
МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ. МАТЕРІАЛИ ТА ОБЛАДНАННЯ. КАРТА МАТЕРІАЛІВ G3SI1 ТА СВ-08Г2С

2.1. Особливості технології виготовлення маловуглецевого зварювального дроту марок G3Si1 та Св-08Г2С

Технологічний процес виготовлення та система заводського контролю маловуглецевого зварювального дроту марок G3Si1 та Св-08Г2С, на прикладі підприємства ПрАТ «ПлазмаТек», складається з наступних етапів:

- етап вхідного контролю після проходження якого катанка зберігається на складі сировини та очікує видачу на дільниці переробки;
- попереднє волочіння з отриманням дроту проміжного діаметру 2,5 або 2,0 мм;
- фінішне волочіння з отриманням дроту діаметру 1,6; 1,2; 1,0 або 0,8 мм;
- обміднення дроту;
- пакування готового дроту;
- кінцевий контроль та складування готового дроту.

Охарактеризуємо нижче детальніше кожен із вище зазначених етапів

2.1.1 Етап вхідного контролю та склад сировини

Катанка, яка привезена замовленим транспортом або транспортом постачальника перед складуванням в визначених місцях на дільниці виготовлення зварювального обмідненого дроту проходить візуальний та формальний контроль. Вхідний контроль катанки включає в себе перевірку за такими показниками:

– діаметр;

– кількість, вага;

– відповідність даних вказаних у сертифікаті вимогам стандартів, ТУ і інших нормативних документів по: марці, хімскладу і т.д.;

– контроль механічних властивостей кожної бухти катанки за допомогою випробувань на розтяг.

Результати випробувань вхідного контролю фіксуються у виробничих журналах.

Вимоги до вхідного контролю розробляються на основі стандартів та з врахуванням виробничого досвіду. Зазвичай вимоги до сировини звужують, ніж це вказано у стандартах з метою стабільних параметрів технологічного процесу. Якщо згідно проведеного етапу вхідного контролю сировина не відповідає вимогам технолога, але задовольняє вимоги стандарту, то її переробляють під контролем технолога. У випадку якщо результати вхідного контролю не відповідають вимогам стандартам, то таку сировину не використовують у виробничому процесі з метою уникнення витрат, які включені у собівартість виготовлення дроту.

В складі катанки та дроту, який розташований на дільниці обмідненого дроту, зберігаються мотки катанки та дроту марок сталі Св-08Г2С, Св-08ГС, G3Si1 в очікуванні на процес попереднього волочіння. Мотки катанки в залежності від виробника постачаються вагою від 500 до 2000 кг, бухти дроту після попереднього волочіння формуються вагою до 1000 кг. Кожна партія катанки складається тільки з однієї плавки, та повинна бути відокремлена від інших партій (тобто плавок), щоб уникнути переплутування, оскільки різні плавки мають різний хімічний склад. Також не допускається об’єднання різних плавок в одну партію.

2.1.2 Попереднє волочіння дроту

Для виготовлення дроту на етапі попереднього волочіння волочильник використовує катанку діаметром від 6,5 або 5,5 мм. Кінцевий діаметр дроту може бути 2,0 або 2,5 мм.

На початку процесу катанка проходить етап очищення. За допомогою роликового ломача (рис.2.1) та щіточної очистки механічним способом з катанки знімається шар окалини. Механічний спосіб очищення катанки сьогодні користується великою популярністю у порівнянні з хімічним способом та має ряд пере-

ваг: відсутність забруднення навколишнього середовища, додаткових витрати на травлення катанки, зменшення часу виробництва готової продукції. Додатково, від залишків окалини та сажі, катанка проходить очищення через спеціальну плазмову електродугову установку.

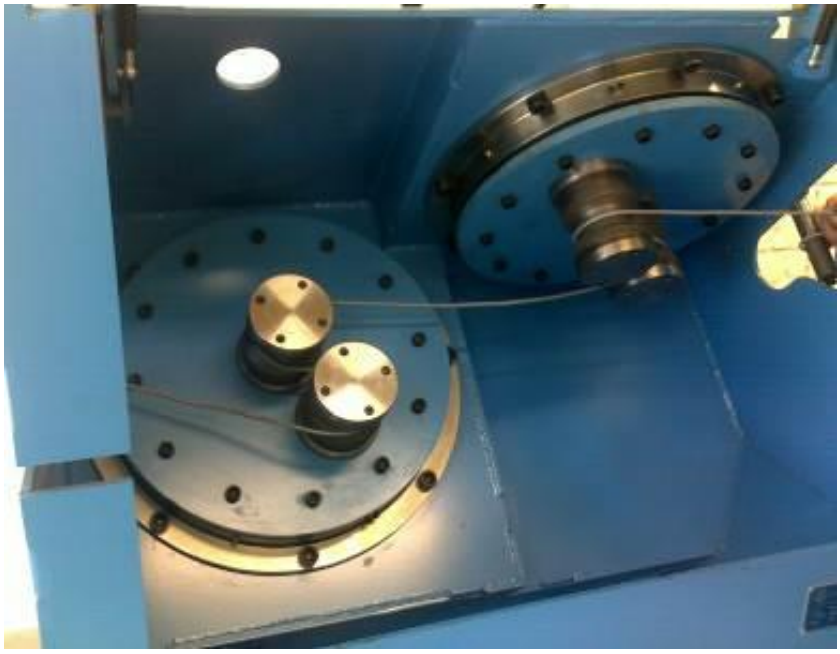


Рисунок 2.1 – Роликовий ломач окалини

Дана плазмова установка використовується за необхідності та дозволяє покращити технологічний процес виробництва дроту та якість продукції, оскільки залишки сажі повністю не видаляються наступними етапами технологічного процесу та є причиною підвищеного розбризкування дроту при зварюванні. Також варто відмітити, що збільшується термін служби волок, ванн очистки, травлення та міднення – відповідно дані ванни потрібно рідше замінювати, внаслідок чого зменшується час на виготовлення продукції та знижується її собівартість.

Попереднє волочіння відбувається на 7-ми блочному стані сухого волочіння (рис. 2.2). Волочильник за допомогою блоку керування (рис 2.3) відповідно до отриманого від майстра виробничого завдання з діаметром дроту який має виготовлятися, задає маршрут з відповідним кінцевим діаметром, необхідну вагу бухти дроту та швидкість волочіння, регулює тиск щіток на щіточній очистці катан-

ки. Використання автоматичного блоку керування процесом волочіння має ряд переваг, зокрема відображення на екрані дійсного діаметру дроту допомагає вчасно замінити волоку на маршруті та уникнути виготовлення напівфабрикату, що не відповідає вимогам.

Рисунок 2.2 – Стан попереднього волочіння

Рисунок 2.3 – Блок керування на стані попереднього волочіння

Маршрути попереднього волочіння наведено в табл. 2.1. Даний маршрут волочіння рекомендований шведським виробником волочильного обладнання Lämneå

Bruk AB та є поступово спадаючим (величина відносних обтиснень поступово зменшується).

Таблиця 2.1 – Маршрути для попереднього волочіння

Параметри маршруту	Вхідний діаметр катанки, мм	Швидкість волочіння, м/с	№ блоку						
			1	2	3	4	5	6	7
Маршрут №1									
Діаметр дроту, мм	5,5	8-14	4,68	3,99	3,42	2,95	2,56	2,24	1,98
Обтиснення, %			27,6	27,31	26,53	25,60	24,69	23,44	21,87
Кут волоки, град			12	12	12	12	12	12	12
Маршрут №2									
Діаметр дроту, мм	5,5	8-14	4,76	4,17	3,68	3,28	2,95	2,69	2,48
Обтиснення, %			25,1	23,25	22,12	20,56	19,11	16,85	15,00
Кут волоки, град			12	12	12	12	12	9	12

Готовий дріт формується в бухти до 1000 кг, які складуються у визначеному місці, а далі поступають на дільницю фінішного волочіння.

Контроль якості дроту після попереднього волочіння здійснюється шляхом перевірки діаметру, овальності та тимчасового опору дроту. Результати проміжного контролю реєструються у виробничих журналах. Завдання проміжного контролю полягає у відбракуванні неякісного напівфабрикату з метою уникнення виготовлення неякісної продукції.

2.1.3 Фінішне волочіння дроту

Дріт на етапі фінішного волочіння виготовляється з бухт дроту виготовленого на етапі попереднього волочіння дроту. Фінішне волочіння дроту відбувається на 9-ти блочному волочильному стані (рис. 2.4). На 8-ми блоках сухого волочіння дріт витягується до необхідного кінцевого діаметру, а за допомогою обертаючої філь'єри, на останньому 9-тому блоці мокрого волочіння (рис. 2.5) відбувається обтиснення покриття для міцного утримання його на дроті, та надання глянцю поверхні дроту. Волочильник за допомогою автоматичної програми (рис. 2.6), відповідно до отриманого від майстра виробничого завдання з діаметром дроту який має виготовлятися, задає маршрут з відповідним кінцевим діаметром, швидкість волочіння, необхідну вагу готового обмідненого дроту який буде намотаний на котушку. Маршрути фінішного волочіння наведено в таблиці 2.2. Даний маршрут волочіння також рекомендований шведським виробником волочильного обладнання Lämneå Bruk AB та є поступово спадаючим (величина відносних обтиснень поступово зменшується).

Рисунок 2.4 – Стан фінішного волочіння

Дріт діаметром 0,8; 1,0; 1,2 або 1,6 мм після процесу фінішного волочіння та обміднення намотується на котушки вагою до 1000 кг.

Рисунок 2.5 – 9 блок фінішного волочіння

Рисунок 2.6 – Блок керування на стані фінішного волочіння

Перебіг процесу фінішного волочіння реєструється у виробничому журналі.

Контроль якості після фінішного волочіння здійснюють для кожної котушки дроту шляхом перевірки діаметру, овальності, спіральності та діаметру кільця дроту, тимчасового опору дроту та відповідності результатів контролю якості по-

криття. Результати контролю фіксують у виробничих журналах. Завдання даного виду контролю відбракування обмідненого дроту полягає у запобіганні потрапляння продукції споживачу.

Таблиця 2.2 – Маршрути фінішного волочіння

Параметри маршруту	Вхідний діаметр дроту, мм	Швидкість волочіння, м/с	№ блоку								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Маршрут №1											
Діаметр дроту, мм	2,48	10-14				2,26	2,07	1,90	1,77	1,66	1,57
Обтиснення, %						16,95	16,11	15,75	13,22	12,04	10,55
Кут волоки, град						12	9	9	9	9	9
Маршрут №2											
Діаметр дроту, мм	2,48	12-18	2,22	1,99	1,79	1,64	1,50	1,39	1,30	1,23	1,17
Обтиснення, %			21,15	19,65	19,09	16,06	16,34	14,13	12,53	10,48	9,52
Кут волоки, град			12	12	12	9	9	12	9	9	9
Маршрут №3											
Діаметр дроту, мм	1,98	17-20	1,78	1,6	1,46	1,34	1,24	1,15	1,08	1,03	0,98
Обтиснення, %			20,79	19,20	16,37	15,76	14,37	13,99	11,80	9,04	9,47
Кут волоки, град			12	12	9	12	9	9	9	9	9
Маршрут №4											
Діаметр дроту, мм	1,98	20-24	1,73	1,52	1,34	1,19	1,07	0,98	0,9	0,83	0,77
Обтиснення, %			25,18	22,80	22,28	21,14	19,15	16,11	15,66	14,95	13,94
Кут волоки, град			12	12	9	12	12	9	9	9	9
Маршрут №5											
Діаметр дроту, мм	1,98	12-18			1,79	1,64	1,50	1,39	1,30	1,23	1,17
Обтиснення, %					18,27	16,06	16,34	14,13	12,53	10,48	9,52
Кут волоки, град					12	9	9	12	9	9	9

2.1.4 Обміднення дроту

Після фінішного волочіння дріт проходить процес очищення, травлення, обміднення та глянсування (рис. 2.7). Процес очищення, травлення та обміднення проходить за допомогою шведської лінії Кондор. Мідне покриття, під час зберігання дроту, частково захищає його від корозії, а під час зварювання знижує контактний опір та коефіцієнт тертя між поверхнею дроту та контактним наконечником.

Рисунок 2.7 – Ванни травлення та обміднення

Кислотні розчини у ванні травлення очищають дріт від залишків мастила після волочіння. Ванна травлення є дуже важливим етапом у виробництві обмідненого дроту – оскільки залишки волочильних мастил на дроту погіршують адгезію мідного покриття з основою та є причиною підвищеного розбризкування дроту в процесі зварювання. У ванні міднення мідь у розчині реагує з залізом, утворюючи мідне покриття на дроті. Реакція є так званою реакцією хімічного заміщення, коли один атом міді змінюється на один атом заліза на поверхні дроту. Залізо розчиняється і накопичується у розчині ванн міднення та травлення. Для промивки дроту перед процесом травлення використовуються ванни гарячої промивки «Gandorget». Дана ванна додатково очищує дріт від залишків волочильних мастил перед травленням і продовжує термін служби ванни травлення, що в свою скорочує час на виготовлення продукції, зменшення забруднення довкілля. Перед проходженням обмідненого дроту через калібрувальний 9-ий блок, дріт попадає у

ванну мокрого мастила де проходить змащування поверхні покриття емульсією для більш якісного обтиснення та ущільнення за допомогою обертаючої філь'єри.

2.1.5 Пакування дроту

Дріт, який пройшов контроль якості і готовий до використання, перед постачанням до споживачів укладається на каркасні або пластикові касети. Процес укладання складається з розмотування дроту з котушки за допомогою розмотки та намотуванні зварювального обмідненого дроту на касети за допомогою напівавтоматичної прицезійної намотки. Намотування обмідненого дроту повинно бути рядним (виток до витка) – це впливає на розмотування дроту в зварювальному автоматі під час процесу зварювання, що може призвести до заплутування дроту та вимушеної зупинки процесу.

Під час укладанні дроту на касети, періодично, але що найменше один раз з кожної котушки працівник ВТК проводить оцінювання спіральності ті діаметру кільця дроту. Вимоги до спіральності та діаметра кільця дроту повинні дотримуватись, так як це впливає на якість готового дроту: якщо діаметр кільця дроту дуже низький то спостерігається надмірне зношування наконечника та «гуляння» дуги.

2.1.6 Кінцевий контроль та складування готового дроту

Кінцевий контроль готового обмідненого дроту складається з:

- контролю хімскладу дроту;
- контролю розмірів дроту і стану його поверхні;
- контролю зварювально-технологічних властивостей дроту;
- контролю механічних властивостей дроту;
- контролю стану покриття (міцність зчеплення покриття з основним металом дроту, залишок мастильних матеріалів, товщина покриття та масова частка міді на поверхні дроту);

- контролю механічних властивостей наплавленого металу.

Реєстрацію результатів контролю працівник ВТК веде в журналі результатів кінцевого контролю зварювального дроту.

Запакований і укладений на піддонах зварювальний обміднений дріт зберігається перед відправкою його до споживача на складі готової продукції в чітко визначених місцях в залежності від марки, діаметру і ваги коробки.

Лише після відповідності показників якості вимогам кінцевого контролю дріт може бути відвантажений до споживача. У випадку невідповідності вимогам дріт споживачу реалізований не може бути.

2.2 Обладнання для випробовувань та досліджень. Вибір, характеристики, аналіз.

Для проведення необхідних досліджень були проведені наступні випробування: хімічний аналіз металу, випробування на розтяг, стиск, кручення, мікроструктурний аналіз металу.

2.2.1 Хімічний аналіз металу

Визначення вмісту хімічних елементів в металевих зразках, які можуть бути виготовлені з катанки, дроту, основного металу та наплавленого металу проводиться на спектрометрі оптично-емісійного типу SpectroMAXx. (рис. 2.8), який використовує CCD-детектори для реєстрації аналітичного сигналу. Для прийому і передачі світлового випромінювання в діапазоні 200 – 780 нм використовують волоконну оптику, що розширює можливості спектрометрів і забезпечує хорошу відтворюваність.

Перед випробування здійснюється попередня підготовка зразка катанки, яка проводиться наступним чином: за допомогою заточного верстата з установленим на ньому шліфувальним кругом доводиться торець зразка до абсолютно рівної поверхні. Потім обробляється поверхня зразка шліфувальним папером. Аналіз

проводиться один раз з торцевої сторони кожного з трьох зразків, або, після зачищення та розплющення повздовж одного зразка виконується три пропалювання.

Рисунок 2.8 – SpectroMAXx

Результати хімічного аналізу фіксуються у лабораторному журналі.

2.2.2 Випробування на розтяг, стиск та кручення

Випробування металу на розтяг проводиться при кімнатній температурі з застосуванням зразків виготовлених відповідно до EN ISO 6892-1:2009 «Металеві матеріали – випробування на розтяг при кімнатній температурі» на розривній машині P5M, яка має свідоцтво про метрологічну повірку. Для кріплення зразків катанки (дроту) були спеціально розроблені захвати, які представлено на рис.2.9. Діаграма розтягу була отримана за допомогою комп’ютерної програми PM7. Для

випробування на розтяг було використано стандартні зразки, які відповідають вимогам стандартів.

Рисунок 2.9 – Розривна машина Р5М

Випробування на стиск проводилось на гідравлічному пресі ПММ-125 із використанням мідної фольги з метою відсутності бочкоутворення та уникнення тертя, де використовувались зразки діаметром 6,5 мм і висотою 12 мм. Випробування на кручення проводилось на машині МК-50, де використовувались зразки діаметром 6,5 мм і довжиною 250 мм. Дані види зразків були нестандартними, оскільки відсутні стандарти для випробувань на стиск та кручення для дроту.

2.2.3 Мікроструктурний аналіз металу

Перегляд зразків і фотографування мікроструктур було здійснено на оптичному мікроскопі NEOPHOT-22 із застосуванням цифрової фотокамери OLYMPUS при різних збільшеннях. Вимірювання твердості за Віккерсом проводили на мікротвердомірі М-400 фірми LECO при навантаженнях 100 г і 1 кг. Вимірювання

розмірів карбідних частинок проводили на мікроскопі VERSAMET при збільшенні ×1500.

Дослідження мікроструктури, визначення кількісного елементного складу виконували із застосуванням скануючої електронної мікроскопії та мікрорентгеноспектрального аналізу на базі аналітичного комплексу, що складається з скануючого електронного мікроскопа JSM-35CF фірми JEOL (Японія) і рентгенівського спектрометра з дисперсією по енергії рентгенівських квантів (модель INCA Energy-350 фірми Oxford Instruments (Великобританія)). Характерною особливістю мікрорентгеноспектрального аналізу є локальність - максимальна область збудження становить 1 мкм. Зображення отримували в режимах вторинних електронів (SEI) і відбитих електронів (BEI) при U = 20 кВ.

2.3 Карта матеріалів G3SI1 та Св-08Г2С

Карта матеріалу являє собою сукупність даних про механічні властивості матеріалу у вигляді констант, функцій, функціоналів, які використовуються для моделювання, розрахунків технологічного процесу обробки тиском, а також прогнозування технологічної спадковості. Детально про карту матеріалу для різних матеріалів і методику його створення описано у роботах [67, 73]. Для процесу волочіння дроту з маловуглецевих сталей до карти матеріалу включимо такі функції: криву течії, стандартні механічні характеристики, діаграму пластичності, криву Баушингера та градуювальник графік твердість-напруження-деформації. Зауважимо, що в такій постановці інформація про карту матеріалів G3Si1 та Св-08Г2С відсутня.

При розробці карти матеріалу певної марки відомості необхідно подавати для однієї плавки, для мінімізації впливу випадкових факторів на складові карти. Тому, далі досліджувались зразки сталей G3Si1 та Св-08Г2С, які виготовлялись з одного мотка кожної бухти катанки відповідно.

2.3.1 Криві течії катанки марок G3SI1 та Св-08Г2С

Для побудови кривих течій були проведені випробування на розтяг згідно ISO 6892-1 «Металеві матеріали – випробування на розтяг при кімнатній температурі» на розривній машині Р5М, яка має свідоцтво про метрологічну повірку. Використовувались зразки катанки з робочою довжиною 200мм та діаметром 5,5мм в стані поставки та зразки відпаленого дроту діаметром 4,75мм в стані проміжного відпалу.

Для дослідження було використано по 5 зразків кожної марки матеріалу різних партій та різних постачальників. Хімічний склад основних елементів кожного зразка проводився за допомогою спектрометра SpectroMAXx, що пройшов метрологічну повірку. Результати вимірювань хімічного складу матеріалів наведено в таблиці 2.3. Хімічний склад даних зразків суттєво не відрізняється та відповідає вимогам стандартів. Саме тому вплив хімічного складу на механічні властивості можна виключити.

Таблиця 2.3– Хімічний склад матеріалу

Марка матеріалу	№ зразка	Масова частка основних елементів, %							
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
G3Si1	Вимоги	0,06–0,14	0,7–1,0	1,3–1,6	≤0,025	≤0,025	≤0,15	≤0,15	≤0,20
	1	0,083	0,814	1,58	0,014	0,0115	0,036	0,019	0,035
	2	0,102	0,74	1,54	0,022	0,014	0,026	0,025	0,041
	6								
	3	0,109	0,701	1,6	0,019	0,0125	0,021	0,016	0,032
	7								
	4	0,105	0,753	1,60	0,021	0,0058	0,024	0,031	0,062
	5	0,121	0,721	1,587	0,021	0,0065	0,039	0,033	0,053

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Св-08Г2С	Вимоги	0,05 –0,11	0,7– 0,95	1,8– 2,1	≤0,030	≤0,025	≤0,20	≤0,25	≤0,20
	1	0,101	0,731	1,938	0,023	0,014	0,021	0,009	0,019
	6								
	7								
	8								
	2	0,103	0,726	2,05	0,023	0,009	0,024	0,014	0,02
	3	0,089	0,702	1,932	0,02	0,0142	0,025	0,017	0,03
	4	0,078	0,746	1,81	0,012	0,0075	0,034	0,073	0,152
	5	0,072	0,702	1,892	0,012	0,0076	0,045	0,06	0,133

У таблицях 2.4 та 2.5 наведено стандартні механічні властивості матеріалів G3Si1 та Св-08Г2С: $\sigma_{вр}$ – границя міцності, МПа; σ_T – границя текучості, МПа; Δl – відносне видовження, %; ψ, – відносне звуження, %; а також виробники даних партій катанки та умови виробництва з неї обмідненого дроту.

Таблиця 2.4–Механічні властивості катанки G3Si1

№ зразка	Механічні властивості				№ плавки	Виробник	Примітка
	$\sigma_{вр}$, МПа	σ_T, МПа	Δl, %	ψ, %			
1	2	3	4	5	6	7	8
1	529	350	33	72	352092	Метін-вест	Без відпалу було виготовлено дріт діаметром 1,2 мм
2	538	359	28	63	260399	Арселор Міттал	В процесі волочіння спостерігались обриви дроту
6	442	282	30	71			Зразок відпаленого дроту
3	553	392	30	65	260401		В процесі волочіння спостерігались обриви дроту

1	2	3	4	5	6	7	8
7	421	283	31,5	73			Зразок відпаленого дроту
4	571	430	25	74	240086	Метін-вест	Без відпалу було виготовлено дріт діаметром 1,0-1,2 мм
5	559	413	27,5	72	240085		

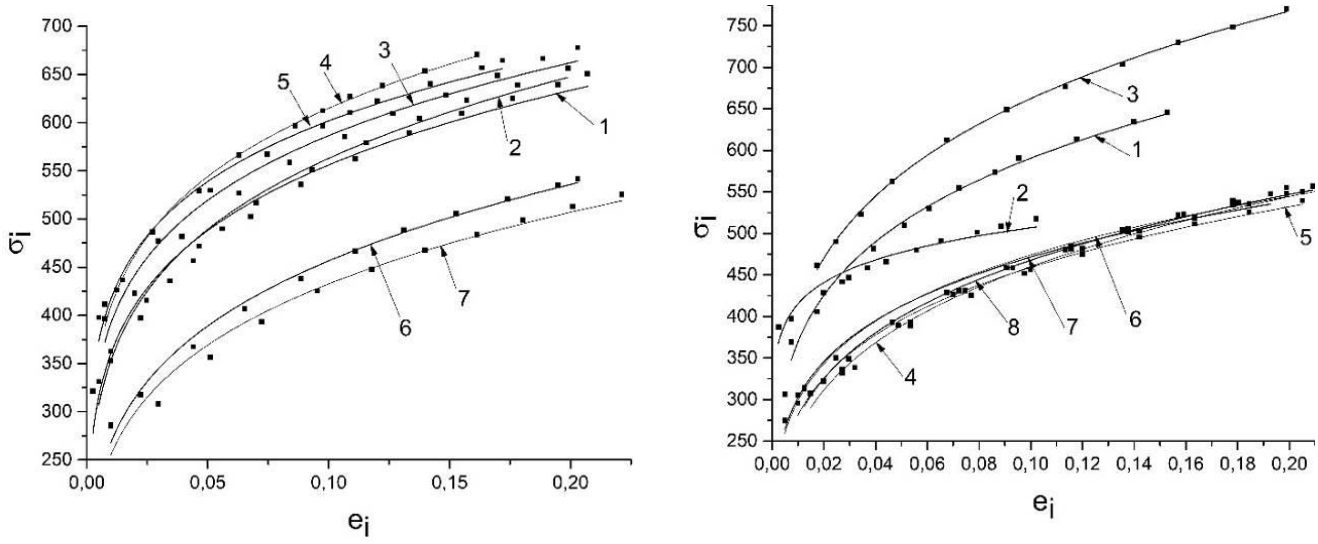
Так для аналізу було використано зразки різних виробників, які відрізнялись умовами переробки. Так в процесі переробки катанки виробництва Арселор Міттал спостерігались обриви дроту при волочінні, а також неможливість виготовити дріт із необхідними механічними характеристиками без операції проміжного відпалу. Із катанки виробництва НСММЗ Росія виготовляють дріт без операцій проміжного відпалу. Як сказано вище хімічний склад даних виробників суттєво не відрізняється між собою.

Таблиця 2.5 –Механічні властивості катанки Св-08Г2С

№ зразка	Механічні властивості				№ плавки	Виробник	Примітка
	$\sigma_{вр}$, МПа	σ_T, МПа	Δl, %	ψ, %			
1	2	3	4	5	6	7	8
1	554	399	20,5	45	252031	Арселор Міттал	В процесі волочіння спостерігались обриви дроту
6	455	302	32	73			Зразки відпаленого дроту
7	452	309	28,5	72			
8	452	311	31,5	72			
2	503	425	33	76	343772	Метінвест	Без відпалу було виготовлено дріт діаметром 1,2 мм
3	631	453	25	60	260585	Арселор Міттал	В процесі волочіння спостерігались обриви дроту

1	2	3	4	5	6	7	8
4	450	303	32	72	20120	ООО «НЛМК Метиз» Росія	Було виготовлено дріт діаметром 1,0-0,8 мм без операції проміжного відпалу
5	439	301	30	60	26309	НСММЗ Росія	Без відпалу було виготовлено дріт діаметром 1 мм

На рис 2.10 представлено криві течії для катанки G3Si1 та Св-08Г2С за допомогою степеневої функції П. Людвіга (1.10). Значення коефіцієнтів апроксимації, а також скорегованого коефіцієнта детермінації R^2_{adj} наведено в табл. 2.6 та 2.7.



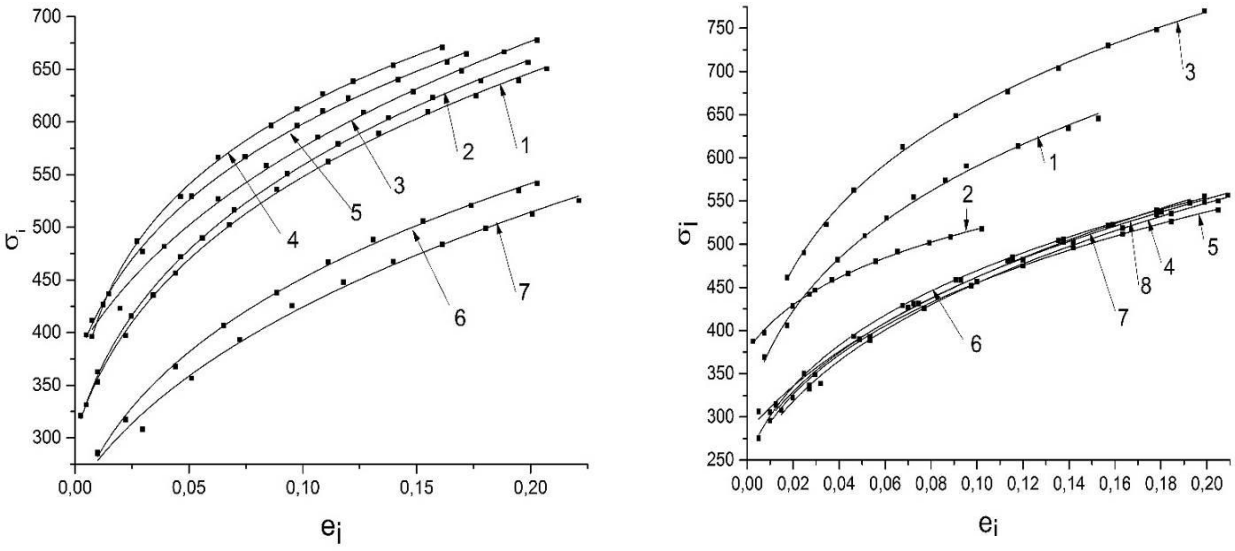
а) б)

Рисунок 2.10 – Криві течії апроксимовані за (1.10) показані суцільною лінією (σ_i вимірюється в МПа):

а) G3Si1; б) Св-08Г2С (позначення в таблиці 2.4 та 2.5)

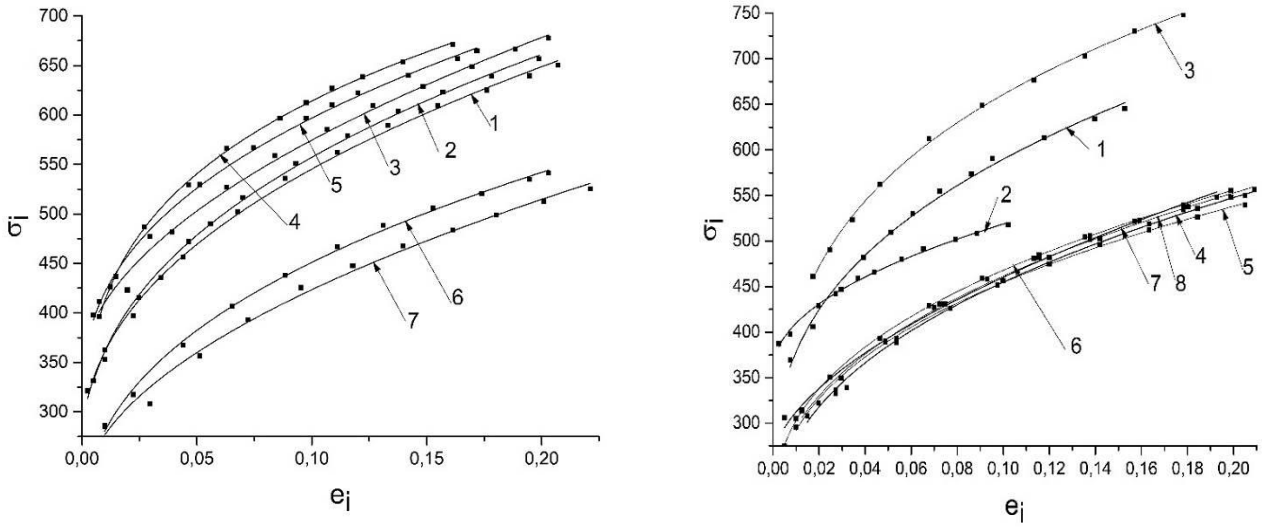
На рис. 2.11 наведено криві течії побудовані за допомогою функції (1.14) Г. Свіфта

На рис.2.12 представлено криві течії побудовані за допомогою трьохпараметричної функції (1.15) П. Людвига.. Значення коефіцієнтів апроксимації та скорегованого коефіцієнта детермінації R^2_{adj} наведено в таблицях 2.6 та 2.7.



а) б)

Рисунок 2.11 – Криві течії апроксимовані за (1.14)
показані суцільною лінією (σ_i вимірюється в МПа):
а) G3Si1; б) Св-08Г2С (позначення в таблиці 2.6 та 2.7)



а) б)

Рисунок 2.12 – Криві течії апроксимовані за (1.15)
показані суцільною лінією (σ_i вимірюється в МПа): а) G3Si1; б) Св-08Г2С
(позначення в таблиці 2.6 та 2.7)

Таблиця 2.6–Значення коефіцієнтів апроксимації для матеріалу G3Si1

№ зразка/ № кривої	Функція (1.10)			Функція (1.14)				Функція (1.15)			
	A, МПа	n	R^2_{adj}	A_2, МПа	e_0	n_2	R^2_{adj}	B, МПа	A_1, МПа	n_1	R^2_{adj}
1	858 ±23	0,188 ±0,011	0,974	967 ±9	-0,011 ±0,001	0,258 ± 0,006	0,999	257 ± 14	798 ± 21	0,442 ± 0,03	0,997
2	897± 17	0,202± 0,007	0,988	981± 9	-0,009 ±0,001	0,254 ±0,005	0,999	232 ±12	817± 10	0,399± 0,02	0,999
3	878± 25	0,175± 0,012	0,964	1021 ± 32	-0,028 ±0,008	0,279 ±0,024	0,995	343 ±21	792 ±46	0,535± 0,065	0,993
4	924± 7	0,177± 0,003	0,998	953 ±8	-0,003 ±0,0008	0,193± 0,004	0,999	163 ±30	816± 16	0,257± 0,021	0,999
5	869± 17	0,159± 0,007	0,983	963 ± 11	-0,012 ±0,002	0,217± 0,007	0,999	306 ±17	736± 18	0,403± 0,035	0,998
6	778± 13	0,231± 0,007	0,992	840± 13	-0,011 ±0,002	0,283± 0,01	0,999	170 ±20	713 ±12	0,405± 0,036	0,998
7	733± 23	0,229± 0,014	0,972	838± 34	-0,023 ±0,009	0,326± 0,032	0,993	214± 26	696± 42	0,523± 0,078	0,99

Для порівняльного аналізу побудови кривих течій було взято два зразки після відпалу різних поставок для матеріалу G3Si1 (плавки 260399 та 260401). Коефіцієнт зміцнення n отриманий в результаті апроксимації за П. Людвігом (1.10) до відпалу для плавки 260399 становив 0,202 та для плавки 260401 – 0,175, а після відпалу n дорівнював 0,231 та 0,229 відповідно. Значення коефіцієнта A після відпалу стали нижчі: до відпалу для плавки 260399 A= 897МПа та для плавки 260401 A= 878 МПа, після відпалу значення A стало 778 МПа та 733 МПа відповідно. Тобто для суттєвої стабілізації механічних властивостей необхідно застосувати проміжні операції термообробки дроту, зокрема відпал.

Для порівняльного аналізу матеріалу Св-08Г2С було взято одну поставку (плавка 252031): один зразок до відпалу (зразок №1) та три зразки після відпалу (№№6-8). Значення коефіцієнтів A і n згідно функції (1.10) становило 944 МПа та 0,204 та після відпалу A і n дорівнюють 753 МПа і 0,201; 736 МПа і 0,193 та 787 МПа і 0,226 відповідно. Дані значення свідчать про зменшення коефіцієнта A, а зміна коефіцієнта n має неоднозначний характер (дослідження проводились на прикладі одного мотка катанки).

Таблиця 2.7 –Значення коефіцієнтів апроксимації для матеріалу Св-08Г2С

№ зразка/ № кривої	Функція (1.10)			Функція (1.14)				Функція (1.15)			
	A, МПа	n	R^2_{adj}	A_2, МПа	e_0	n_2	R^2_{adj}	B, МПа	A_1, МПа	n_1	R^2_{adj}
1	944± 18	0,204± 0,007	0,989	1020 ±25	-0,008± 0,002	0,245± 0,013	0,996	214 ±39	861 ±22	0,360± 0,05	0,995
2	619± 14	0,087± 0,007	0,946	724 ±11	-0,015± 0,002	0,155± 0,008	0,998	357 ±8	495 ±33	0,487± 0,044	0,996
3	1081 ±6	0,213± 0,002	0,999	1097 ±12	-0,003± 0,0018	0,223± 0,007	0,999	99 ±57	1010 ±38	0,254± 0,029	0,999
4	804± 14	0,242± 0,008	0,992	862 ±19	-0,014± 0,004	0,293± 0,016	0,997	170 ± 32	727 ±14	0,407± 0,051	0,996
5	749± 11	0,213± 0,006	0,994	802 ±10	-0,01± 0,002	0,257± 0,008	0,999	174 ±19	667 ±8	0,377± 0,032	0,999
6	753± 14	0,201± 0,007	0,989	827 ±9	-0,009± 0,001	0,256± 0,006	0,999	196 ± 5	691 ±5	0,404± 0,011	0,999
7	736± 29	0,193± 0,015	0,951	906 ±42	-0,029± 0,009	0,328± 0,035	0,993	261 ± 18	771 ±68	0,587± 0,077	0,989
8	787± 17	0,226± 0,009	0,989	858 ±29	-0,015± 0,007	0,286± 0,025	0,994	198 ± 38	708 ±24	0,428± 0,073	0,992

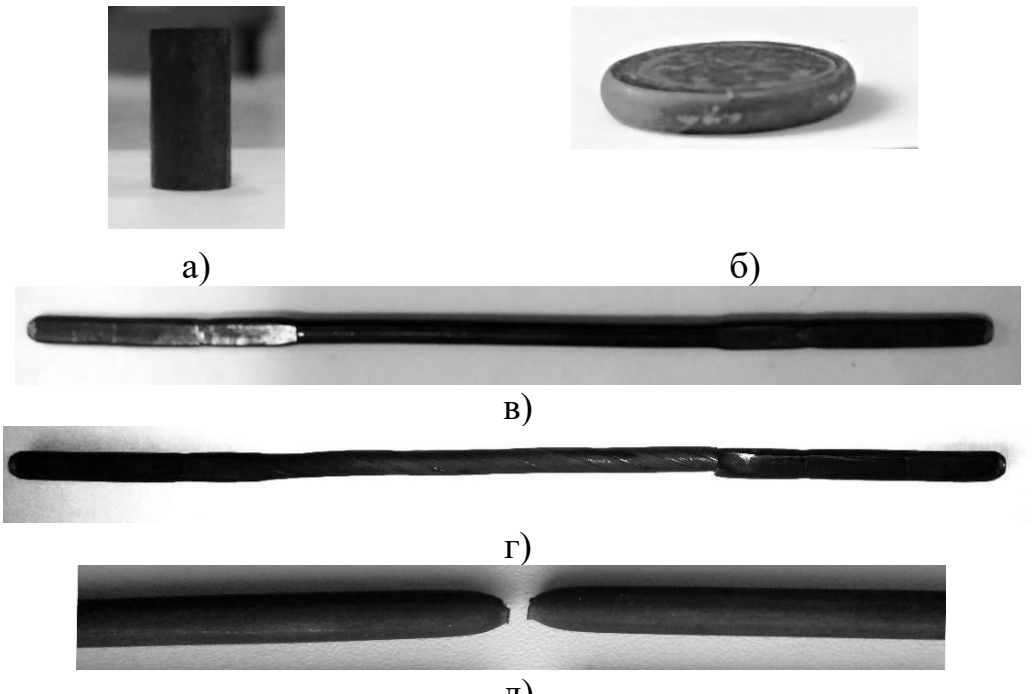
Значення коефіцієнта детермінації, які наведені в таблицях 2.6 та 2.7 для кожної апроксимувальної функції (1.10) менше, ніж для функцій (1.14) та (1.15). Апроксимацію П. Людвига (1.10) краще використовувати для аналітичних розрахунків, а апроксимації Г.Свіфта (1.14) та трьохпараметричну функцію П. Людвига (1.15) для моделювання. Адже чим ближче значення скорегованого коефіцієнта детермінації до 1, тим точніше описані експериментальні дані.

2.3.2 Діаграми пластичності катанки марок G3SI1 та Св-08Г2С

Для побудови діаграми пластичності та її подальшої апроксимації було проведено наступні види випробувань:

- випробування на розтяг, яке проводилось на розривній машині Р5М, де використовувались зразки кожної марки матеріалу діаметром 6,5 мм і робочою довжиною 200 мм;
- випробування на стиск, яке проводилось на гідравлічному пресі ПММ-125 із використанням мідної фольги з метою відсутності бочкоутворення та уникнення тертя, де використовувались зразки діаметром 6,5 мм і висотою 12 мм;
- випробування на кручення проводилось на машині МК-50, де використовувались зразки діаметром 6,5 мм і довжиною 250 мм.

На рис. 2.13 наведено фото зразків, які використовувались для випробувань для побудови діаграми пластичності.



а) б) в) г) д)

Рисунок 2.13 – Фото зразків до та після випробувань: а) на стиск; б) після стиску; в) на кручення; г) після кручення; д) після розтягу

За результатами проведених випробувань та формулами (1.20) – (1.22) було проведено розрахунок необхідних даних для побудови діаграми пластичності, які наведено у таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Значення експериментальних даних для побудови діаграми пластичності

Марка матеріалу	Значення граничних деформацій			Коефіцієнти чутливості	
	$e_P(\eta=-1)$	$e_P(\eta=0)$	$e_P(\eta=1)$	λ_1	λ_2
G3Si1	2,102	0,425	0,27	0,454	1,599
Св-08Г2С	1,696	0,27	0,254	0,061	1,838

Діаграму пластичності матеріалів G3Si1 та Св-08Г2С в області зміни показника напруженого стану $-3 \le \eta \le 0$ було апроксимовано за Г.Д. Делем. Для матеріалу G3Si1 функція (1.23) набуде вигляду:

$$e_p = \frac{0,893\exp(-\eta)}{2,102 + 0,946\eta}.$$

Для матеріалу Св-08Г2С функція (1.23) набуде вигляду:

$$e_p = \frac{0,458\exp(-\eta)}{1,696 + 0,962\eta}.$$

Також діаграму пластичності було апроксимовано за функцією (1.24) В.А. Огороднікова. Коефіцієнти чутливості $\lambda_{1,2}$ було розраховано за наступними формулами (1.25) – (1.26) та розраховані дані наведено у таблиці 2.6:

Показник напруженого стану при розтягу було розраховано за формулою (1.27) П. Бріджмена та граничну деформацію за (1.28). Значення необхідних екс-

периментальних даних, які потрібні для розрахунку за (1.27) та (1.28) наведено у таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Значення експериментальних даних для розрахунку показника напруженого стану за Бріджменом

Марка матеріалу	Початковий діаметр зразка, d_0 мм	Діаметр поперечного перерізу зразка по шийці d, мм	Радіус кривизни шийки, R, мм	Гранична деформація, e_p	Показник напруженого стану η
G3Si1	6,5	2,84	1,04	1,657	2,558
Св-08Г2С	6,5	3,89	2,885	1,055	1,861

Побудовані діаграми пластичності матеріалів G3Si1 та Св-08Г2С та відповідні апроксимації представлено на рис. 2.14.

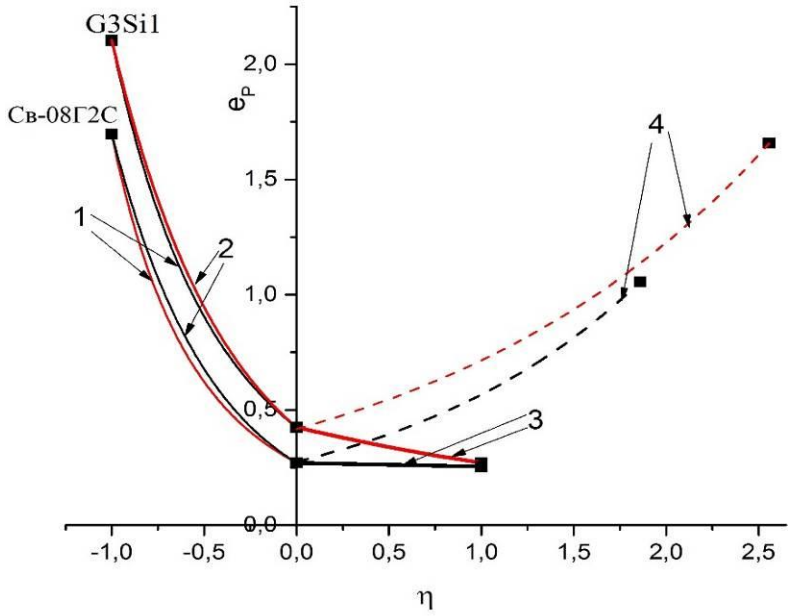


Рисунок 2.14 – Діаграми пластичності матеріалів G3Si1 та Св-08Г2С:
1 – апроксимація за (1.23), 2,3 – за (1.24) та 4 – за (1.27)

Як свідчить рис. 2.14 пластичність матеріалів G3Si1 та Св-08Г2С добре описується функціями (1.23) та (1.24) у від'ємній області показника напруженого стану η. У додатній області показника η при розрахунку за формулою Бріджмена при розтягу спостерігається суттєве збільшення пластичності від η. Тобто функція, що описує пластичність при даних значеннях є немонотонною, що в свою чергу несе за собою невизначеність при апроксимації виразом (1.27).

Діаграма пластичності матеріалу G3Si1 свідчить про те, що катанка має значно кращу здатність до переробки, ніж матеріал Св-08Г2С. На основі даних табл.2.4 та 2.5 варто відмітити наступне: відносне звуження після розриву для катанки G3Si1 72-74% (63-65% для зразків, які потім проходили операцію відпалу) та для Св-08Г2С 60-76% (45% для зразків, які потребували операцію проміжного відпалу). Так, при переробці катанки Св-08Г2С із відносним звуженням 60% в процесі волочіння спостерігались обриви дроту, що значно ускладнювало процес виробництва та зменшення продуктивності праці через простої обладнання.

Виробничий досвід підтверджує те, що проміжний відпал при виробництві дроту із зварювальної катанки марки G3Si1 використовують набагато рідше, ніж при переробці катанки Св-08Г2С.

2.3.3 Крива Баушингера та градуювальний графік твердість-напруження-деформації катанки марок G3SI1 та Св-08Г2С

Відомо, що процес волочіння має ознаки немонотонного – матеріал в осередку деформації із зони стиску переходить в зону розтягу. В результаті цього в матеріалі спостерігається ефект Баушингера, що полягає в зниженні напруження текучості, при зміні знаку деформації [97]. Для врахування анізотропного зміцнення розглядають таку характеристику матеріала, як криву Баушингера в координатах $\beta = f(e_i)$, де $\beta = \frac{\sigma_i''}{\sigma_i'}$ – відношення границі текучості на стиск після розтягу до інтенсивності напружень e_i [72].

Для побудови кривої Баушингера були проведені випробування матеріалів марок G3Si1 та Св-08Г2С на розтяг, де зразки катанки розтягували до різних значень e_i і розвантажували. Далі вирізали зразки на стиск таким чином, щоб стиск проходив в напрямку протилежному розтягу.

Для практичного використання в теоретичних розрахунках, моделювання із застосуванням сучасних програм МСЕ, криву Баушингера апроксимуємо степеневою функцією [97]:

$$\beta(\mathrm{e}_i) = \beta_0 + (1-\beta_0)\cdot \exp\left[-k\cdot \mathrm{e}_i^2\right], \tag{2.13}$$

де $k = -\dfrac{\ln(0.5)}{\mathrm{e}_{i1}^2}$, в якому e_{i1} відповідає середньому значенню $\beta_1 = \dfrac{1+\beta_0}{2}$.

Значення β_0 та k для G3Si1 склали β_0 = 0,164; k = 2046; для Св-08Г2С – β_0 = 0,143; k = 2122.

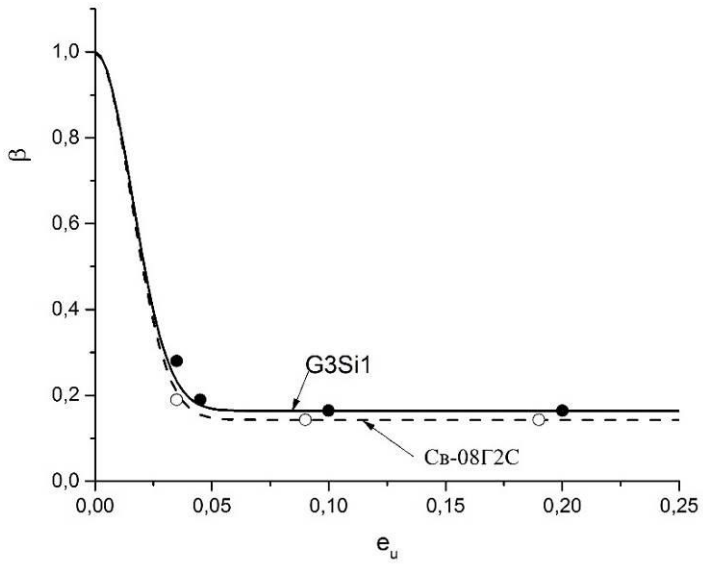


Рисунок 2.15 – Графік залежності коефіцієнта Баушингера від попередньої пластичної деформації

Оцінка технологічної спадковості для процесу волочіння може бути здійснена за твердістю дроту після технологічної переробки. Градуювальний графік

твердість-напруження-деформації дає можливість прогнозувати твердість після волочіння за величиною витягування, а також може бути використаний для експериментально-розрухункових методів оцінювання напружено-деформованого стану заготовки при її деформуванні [72, 75, 97].

Для побудови градуювального графіка твердість-напруження-деформації для матеріалу G3Si1 було проведено вимірювання твердості за Віккерсом катанки у 5 точках, напівфабрикату (4 зразки) та готового дроту діаметром 0,8 мм (5 зразків). За результатами вимірювань було побудовано градуювальний графік, який наведено на рис. 2.16. Зазначимо, що відхилення значення твердості катанки не перевищувало 10%.

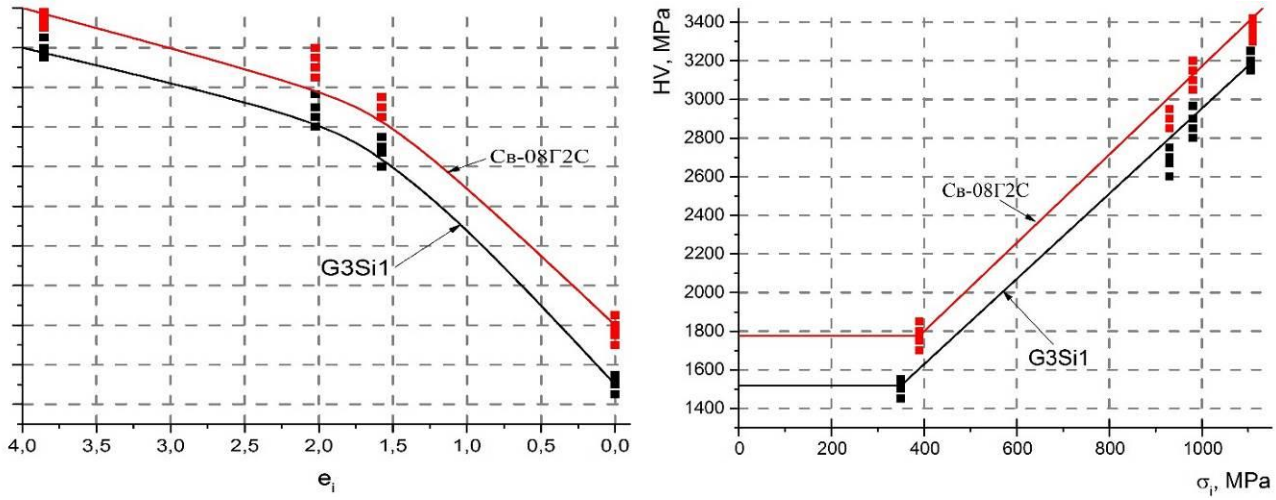


Рисунок 2.16 – Градуювальний графік матеріалів G3Si1 та Св-08Г2С твердість (*HV*)–напруження (σ_i)–деформації (e_i).

2.4 Висновки

1. Сформовано карту матеріалів марок G3Si1 та Св-08Г2С в стані постачання, що дає достатню для технолога уяву про поведінку матеріалу в пластичній області. Криві течії необхідні для розрахунку енергосилових параметрів, визначення напруження волочіння, а також моделювання процесу волочіння методом скінчених елементів (МСЕ) тощо. Криві течії (втім як і стандартні механічні характеристики) зварювальної катанки марок G3Si1 та Св-08Г2С різних партій постачання

суттєво відрізняються, що пов'язаний насамперед з умовами виготовлення напівфабрикату (з виробником). Хімічний склад в межах, визначених стандартами, чинить незначний вплив на механічні характеристики катанки.

2. Операція відпалу суттєво стабілізує криву течії матеріалів різних плавок незалежно від їх вихідних механічних характеристик в стані постачання. При цьому криві течії сталей G3Si1 та Св-08Г2С після відпалу статистично майже не відрізняються. Отже, при проектуванні процесу волочіння, його моделюванні варто користуватись саме кривими в стані відпалу.

3. При використанні катанки без операцій проміжного відпалу дійсні параметри, що реалізуються в процесі волочіння (енергосилові параметри, напруження, деформовность та ін.) можуть дещо відрізнятись від розрахункових, що вимагає вносити корективи в відповідні розрахунки із використанням конкретних значень коефіцієнтів кривої течії. В цьому випадку перед волочінням необхідно обов'язково проводити механічні випробовування матеріалу, що дасть змогу оцінити можливості щодо технологічної переробки. При цьому варто орієнтуватись не на стандартні механічні характеристики, а на технологічні функції (зокрема криву течії, діаграму пластичності та ін.), що потребує розробки окремих методів оцінювання технологічних можливостей для певних умов волочіння конкретної партії катанки.

4. Діаграми пластичності є надзвичайно важливою функцією для оцінювання можливості формозмінювання без руйнування за феноменологічними критеріями деформовності, при чому пластичність сталі G3Si1 значно вища, ніж Св-08Г2С, тому її можна рекомендувати до використання без проміжних відпалів. Коефіцієнт Баушингера в області розвинених деформацій досліджених матеріалів склав 0,14...0,16, що вказує на високу чутливість досліджених сталей до формаційної анізотропії. Цей факт треба враховувати, зокрема при моделюванні волочіння МСЕ. Градуювальний графік твердість (HV)–напруження (σ_i)–деформації (e_i) дає змогу оцінити твердість дроту після його волочіння, що є важливим при прогнозуванні якості продукції.

РОЗДІЛ ІІІ МІКРОСТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ДРОТУ ТА ЙОГО ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ІЗ ЗВАРЮВАЛЬНО-ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

У даному розділі було проведено мікроструктурний та рентгеноспектральний аналіз зразків зварювального дроту, які характеризуються стабільним та нестабільним горінням дуги.

3.1 Мікроструктурний аналіз катанки марок G3Si1 та Св-08Г2С

Як було сказано вище від виробника катанки суттєво залежить технологічний процес виготовлення дроту. Тому було проведено мікроструктурний аналіз зразків катанки марок G3Si1 та Св-08Г2С двох відомих виробників ММЗ, Молдова і Saarstahl, Німеччина. Дані виробники катанки гарантують виробництво зварювального дроту, який задовільняє вимоги ГОСТ 2246-70 без операцій проміжного відпалу.

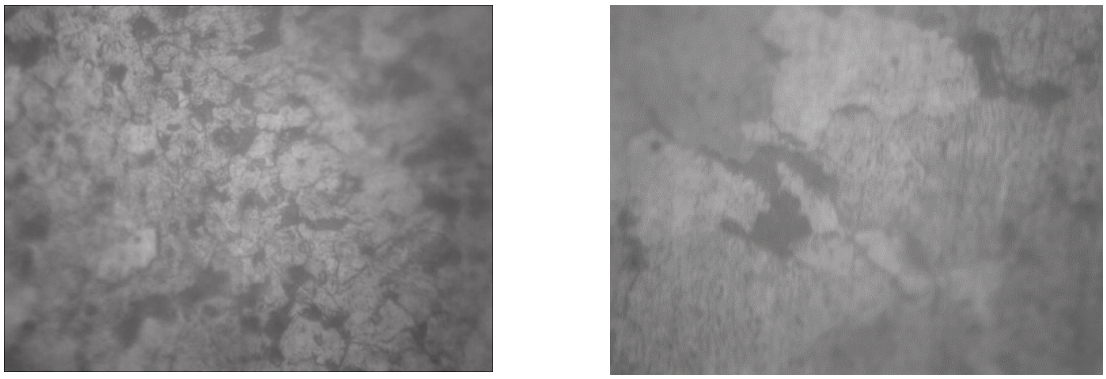
Для виявлення мікроструктури були відібрані зразки катанки кожної марки вказаних виробників (рис 3.1) – перелік зразків наведено у табл. 3.1 Підготовлені мікрошліфи були протравлені хімічно в 4% спиртовому розчині азотної кислоти.

Рисунок 3.1 – Зразки катанки для мікроструктурного аналізу

Таблиця 3.1 – Зразки катанки для мікроструктурного аналізу

№ плавки	Марка катанки	Виробник катанки
21402176	G3Si1	ММЗ, Молдова
21402175	Св-08Г2С	ММЗ, Молдова
864819	G3Si1	Saarstahl, Німеччина
864664	Св-08Г2С	Saarstahl, Німеччина

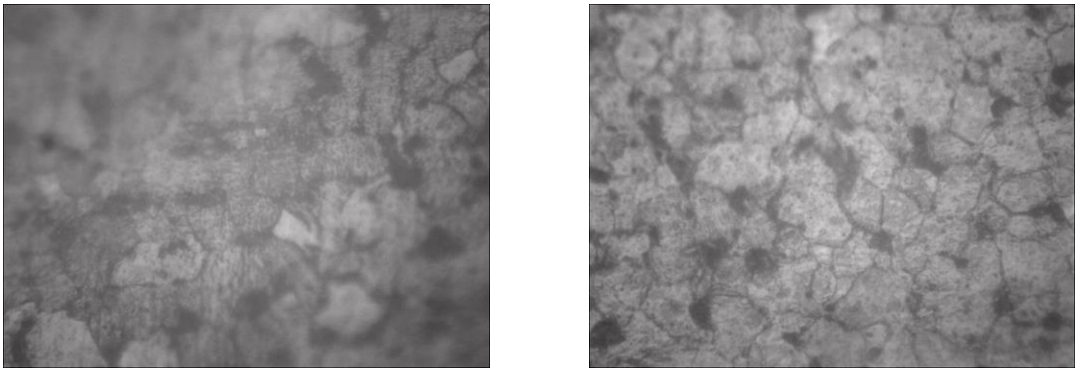
Результати мікроструктурного аналізу представлено на рис.3.2 та 3.3



а) б)

Рисунок 3.2 – Мікроструктура катанки марки G3Si1 х1000:

а) плавка 864819, б) плавка 21402176



а) б)

Рисунок 3.3 – Мікроструктура катанки марки Св-08Г2С х1000:

а) плавка 864864, б) плавка 21402175

При виробництві дроту із катанки даних марок було відмічено, що при переробці катанки виробника Saarstahl, Німеччина дріт волочився відмінно, обривів

не було при виготовленні дроту діаметром 0,8мм. А при виробництві дроту із катанки ММЗ, Молдова спостерігались обриви дроту, що значно ускладнює процес виробництва дроту діаметром 0,8мм. Варто відмітити ще те, що дріт виготовлений із плавок 864819 та 864819 має кращі зварювально-технологічні властивості (а саме менше розбризкування), ніж дріт виготовлений із плавок 21402175 і 21402176. Як видно із рис. 3.2 та 3.3 для катанки плавок 864819 та 864819 більш дрібніша рівномірна структура, яка складається із ферито-перлітних ділянок у порівнянні з катанкою 21402175 і 21402176.

3.2 Мікроструктурний аналіз зварювального дроту

Металографічні дослідження проводились для п'яти зразків зварювального дроту марки G3Si1 (аналог Св-08ГС) діаметром 0,8 мм, детальну інформацію про які наведено у таблиці 3.2. Зразок №5 (для порівняння) взято з дроту китайського виробника, який має попит на ринку зварювальних матеріалів та добрі зварювально-технологічні властивості.

Таблиця 3.2–Зразки для досліджень

№ зразка	№ плавки	Виробник катанки	Зварювально-технологічні властивості (горіння дуги)
1	21181	ТОВ «НЛМК-Метиз», Росія	стабільне
2	21181	ТОВ «НЛМК-Метиз», Росія	нестабільне
3	260399	Arcelor Mital, Кривий Ріг, Україна	стабільне
4	260399	Arcelor Mital, Кривий Ріг, Україна	нестабільне
5	-	Дріт китайського виробництва	стабільне

Перегляд зразків і фотографування мікроструктур було здійснено на оптичному мікроскопі NEOPHOT-22 із застосуванням цифрової фотокамери OLYMPUS

при різних збільшеннях. Вимірювання твердості за Віккерсом проводили на мікротвердомірі М-400 фірми LECO при навантаженнях 100 г і 1 кг. Результати вимірювань твердості наведено у таблиці 3.4. Вимірювання розмірів карбідних частинок проводили на мікроскопі VERSAMET при збільшенні ×1500. Забрудненість неметалічними включеннями зразків №1–№5 приблизно однакова і відповідає балу №1 згідно ГОСТ 1778-70 за шкалою «Оксиди точкові».

Для виявлення мікроструктури підготовлені мікрошліфи були протравлені хімічно в 4% спиртовому розчині азотної кислоти.

На рис. 3.4 представлено мікроструктура зразка №1, що являє собою дисперсну ферито-карбідну суміш (рис. 3.5, 3.6). Максимальний розмір карбідних частинок 1,2 ... 1,5мкм, середній розмір приблизно 1 мкм. Карбіди рівномірно розташовані по всьому полю зору шліфа.

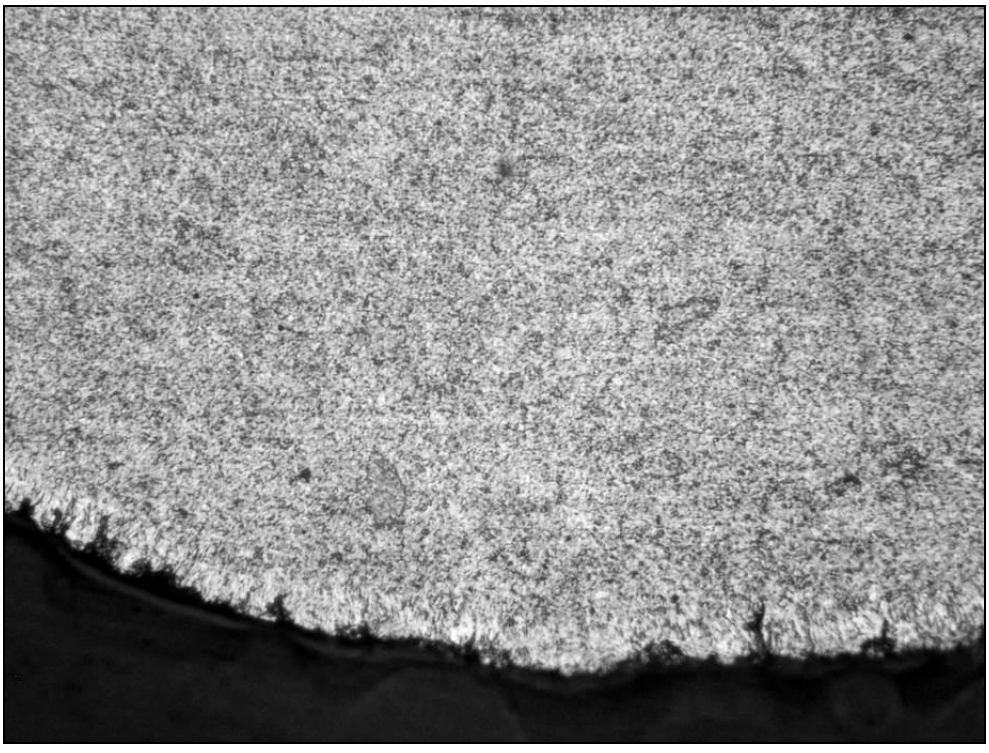


Рисунок 3.4 – Мікроструктура біля краю зразка №1 х500

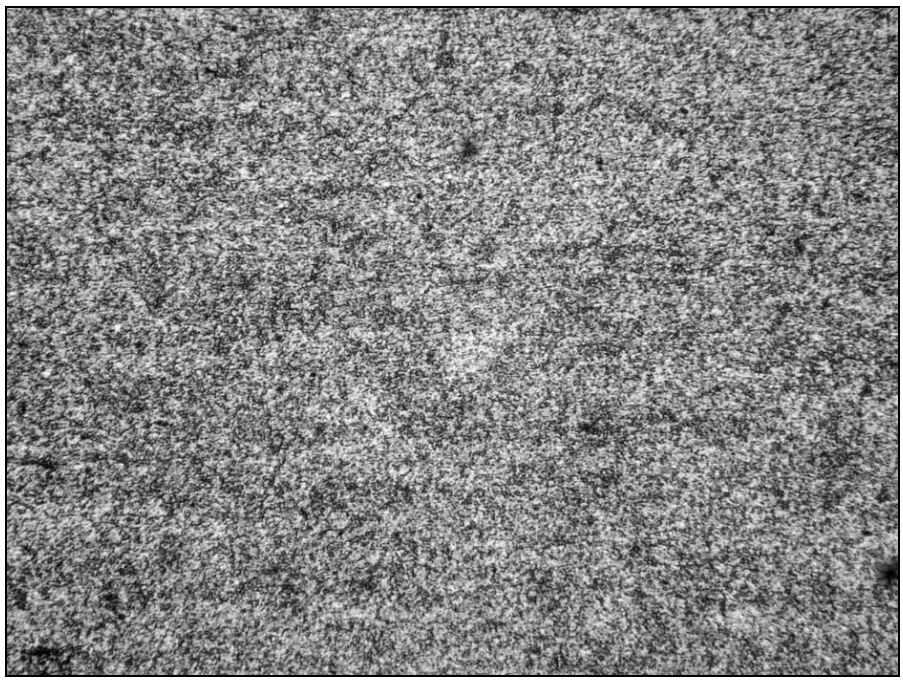


Рисунок 3.5 – Мікроструктура дроту зразка №1, х500

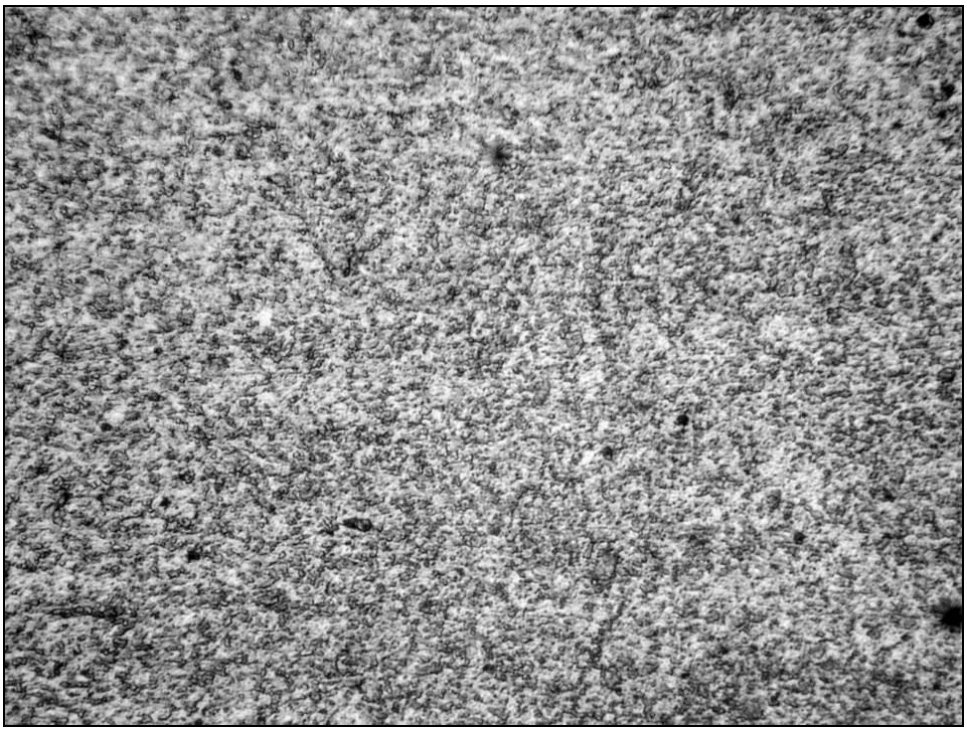


Рисунок 3.6 – Мікроструктура дроту зразка №1, х1000

Мікроструктура зразка №2 (рис.3.7) також є ферито-карбідною сумішшю, однак, у порівнянні зі структурою зразка №1 має відмінні риси: в структурі спостерігаються зкоагульовані карбіди у вигляді темних ділянок мікроструктури

(рис. 3.8, 3.9). Розмір частинок: максимальний – 0,8 ... 1,0 мкм, середній < 1мм – приблизно 0,5 ... 0,8мкм.

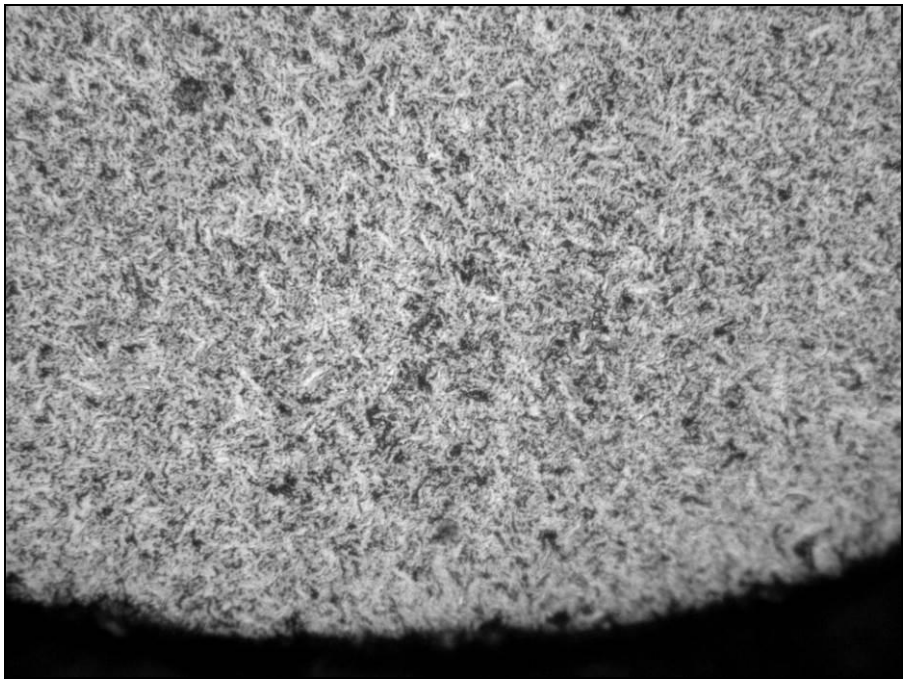


Рисунок 3.7 – Мікроструктура біля краю зразка №2 х500

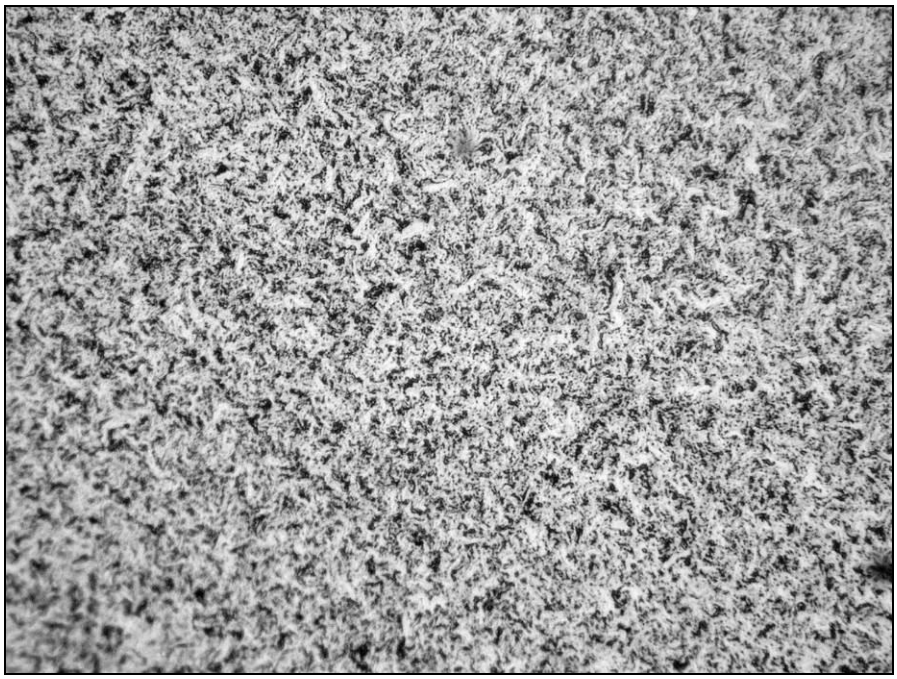


Рисунок 3.8 – Мікроструктура дроту зразка №2, х500

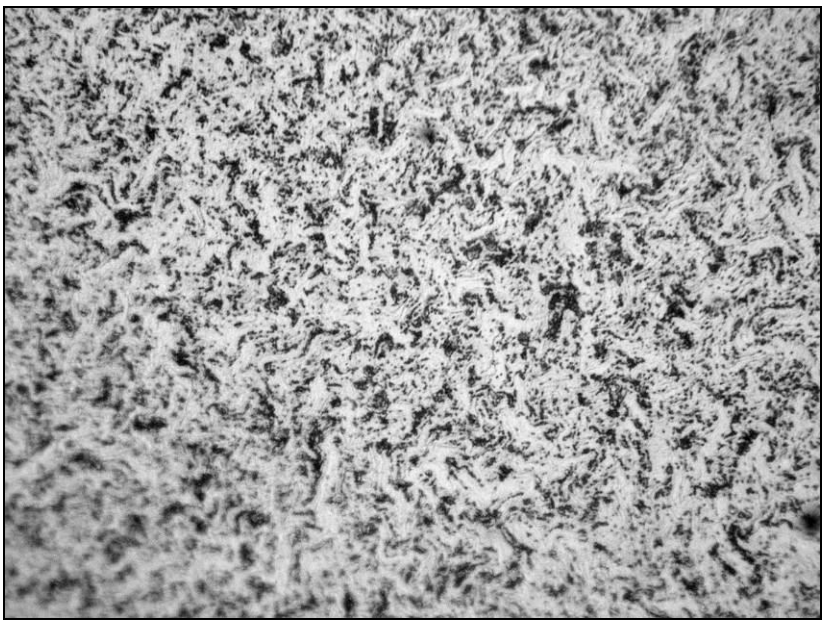


Рисунок 3.9 – Мікроструктура дроту зразка №2, х1000

У мікроструктурі зразка №3 (рис. 3.10) спостерігається рівномірне розташування карбідної складової з невеликими ділянками зкоагульованих карбідів і карбідів, що утворюють ланцюжки (рис. 3.10, 3.11). Розміри карбідних частинок: максимальний розмір часток приблизно 1 мкм, зустрічаються поодинокі карбіди розміром до 2 мкм, середній розмір частинок – менше 1 мкм.

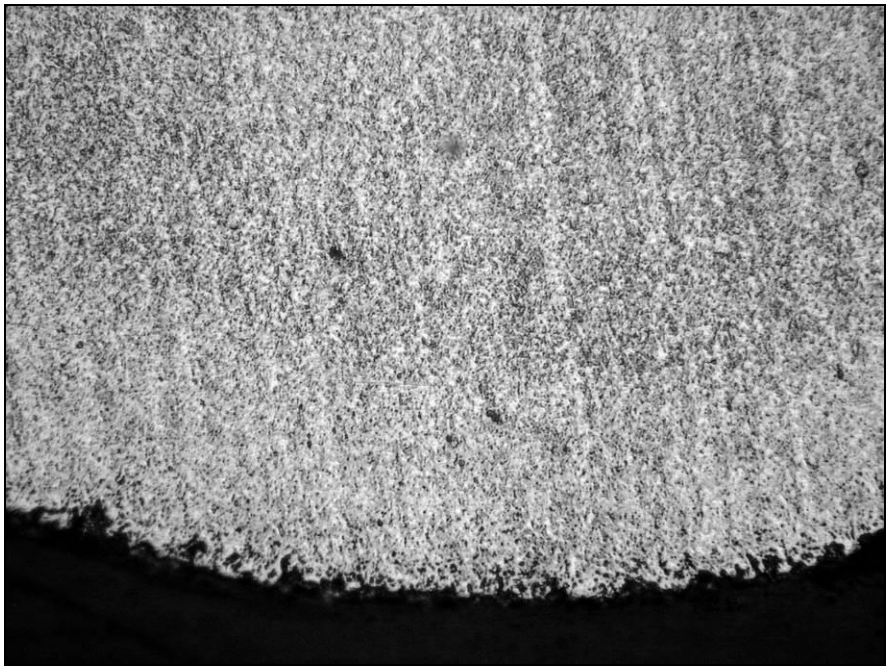


Рисунок 3.10 – Мікроструктура біля краю зразка №3 х500

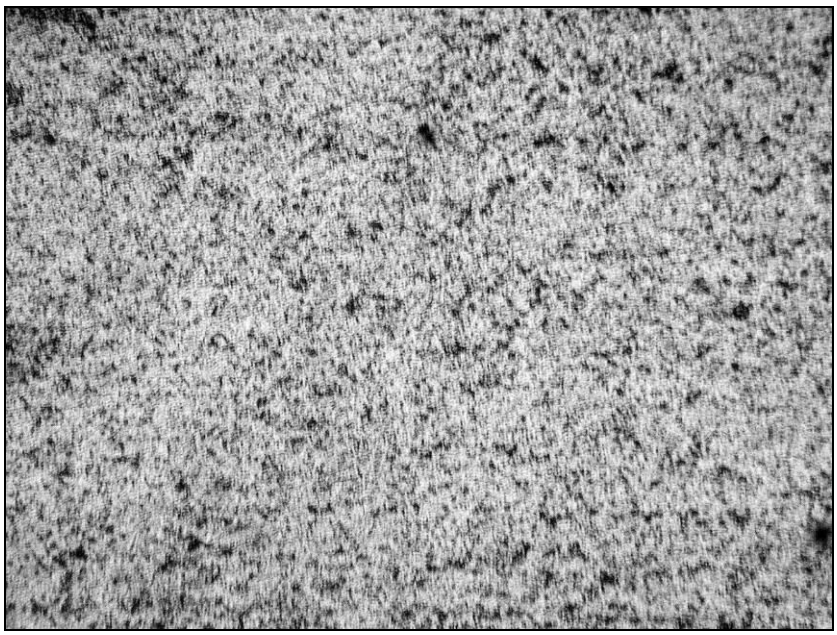


Рисунок 3.11 – Мікроструктура дроту зразка №3, х500

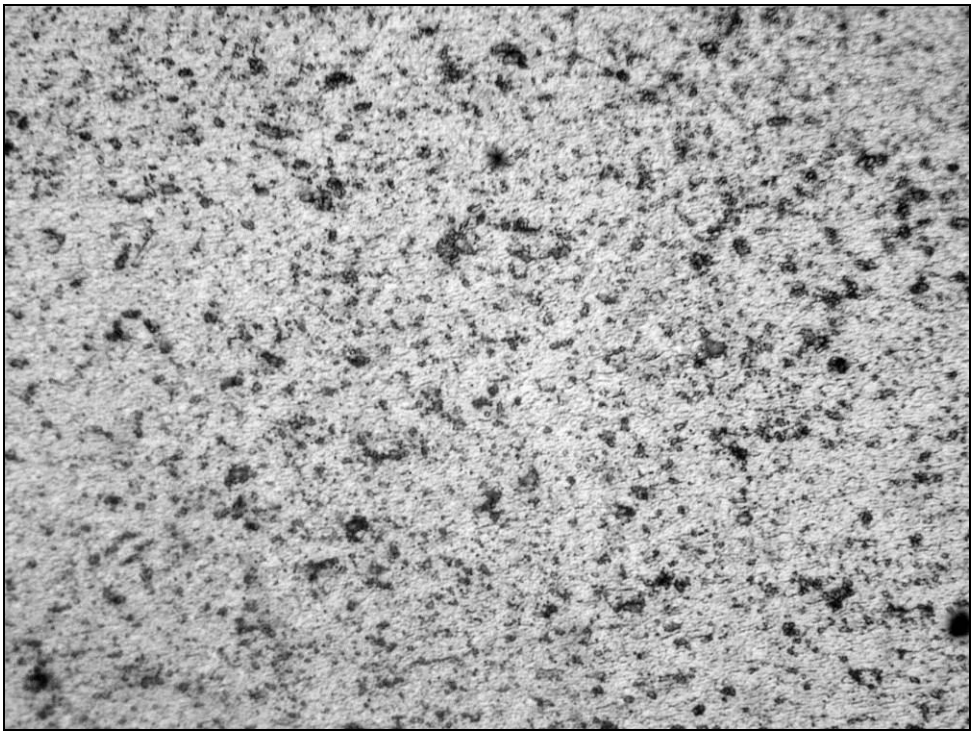


Рисунок 3.12 – Мікроструктура дроту зразка №3, х1000

Відмінною особливістю ферито-карбідної суміші зразка №4 (рис. 3.13) є менша кількість карбідів у порівнянні зі зразком №3 і, як наслідок, зниження твердості по Віккерсу (таблиця 3.3) (рис. 3.14, 3.15). Спостерігається невелика кіль-

кість скоагульованих карбідів (рис. 3.13). Максимальний розмір карбідних включень – 2,5 ... 3мкм, середній розмір карбідів – 1,2 ... 1,5мкм.

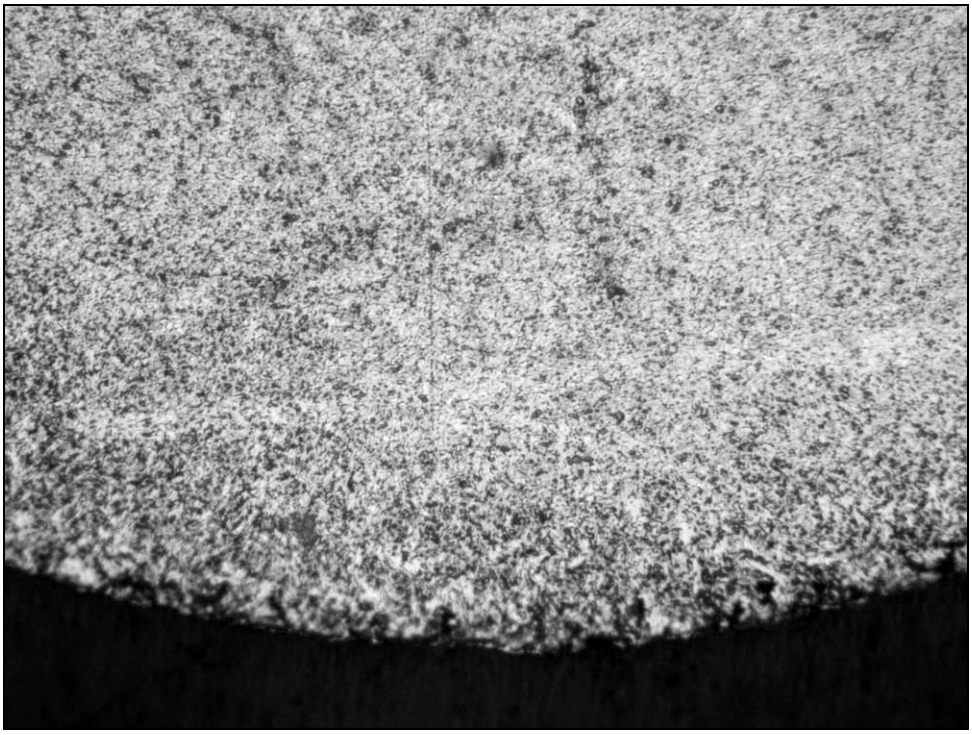


Рисунок 3.13 – Мікроструктура біля краю зразка №4 х500

Рисунок 3.14 – Мікроструктура дроту зразка №4, х500

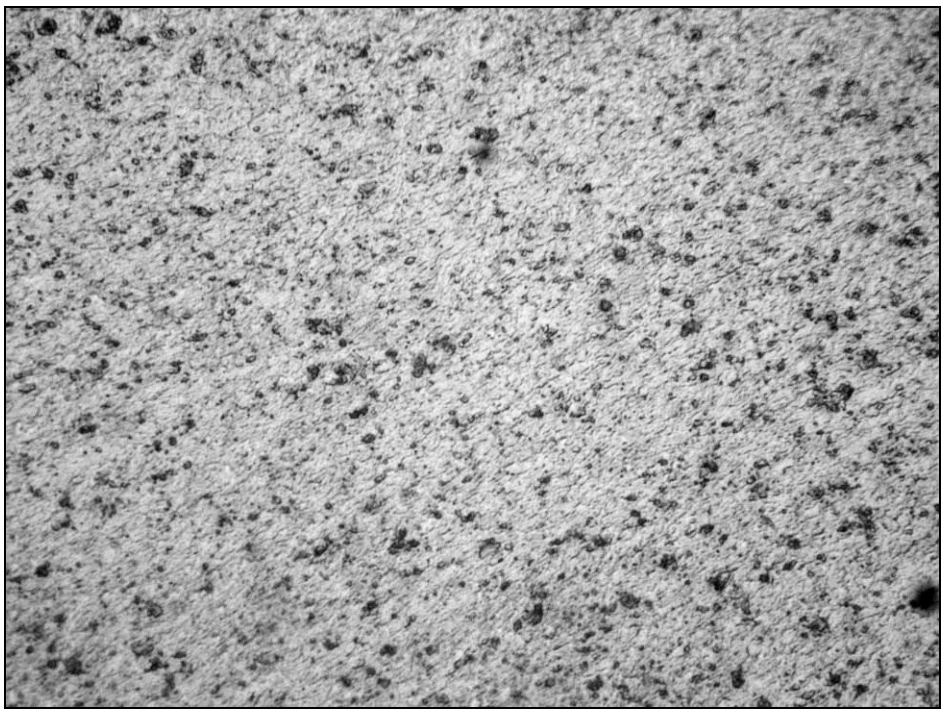


Рисунок 3.15 – Мікроструктура дроту зразка №4 х1000

Мікроструктура зразка №5 (рис. 3.16-3.18) є однорідною ферріто-карбідною сумішшю. Максимальний розмір карбідів – приблизно 2,2мкм, середній розмір – 1,8 ... 2,0мкм.

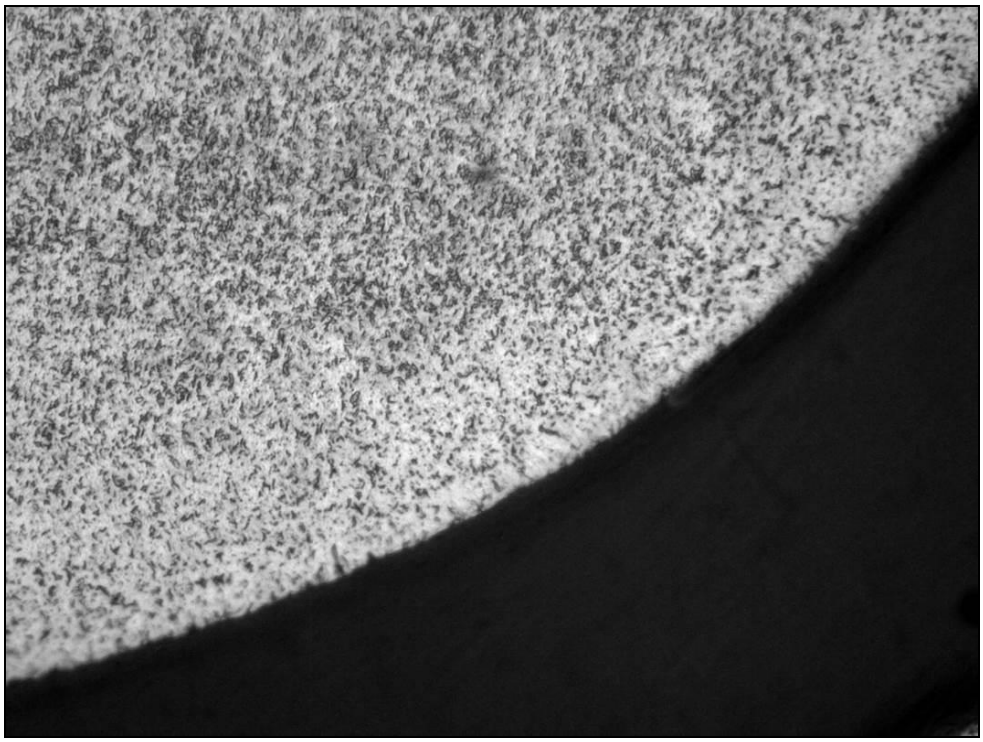


Рисунок 3.16 – Мікроструктура біля краю зразка №5 х500

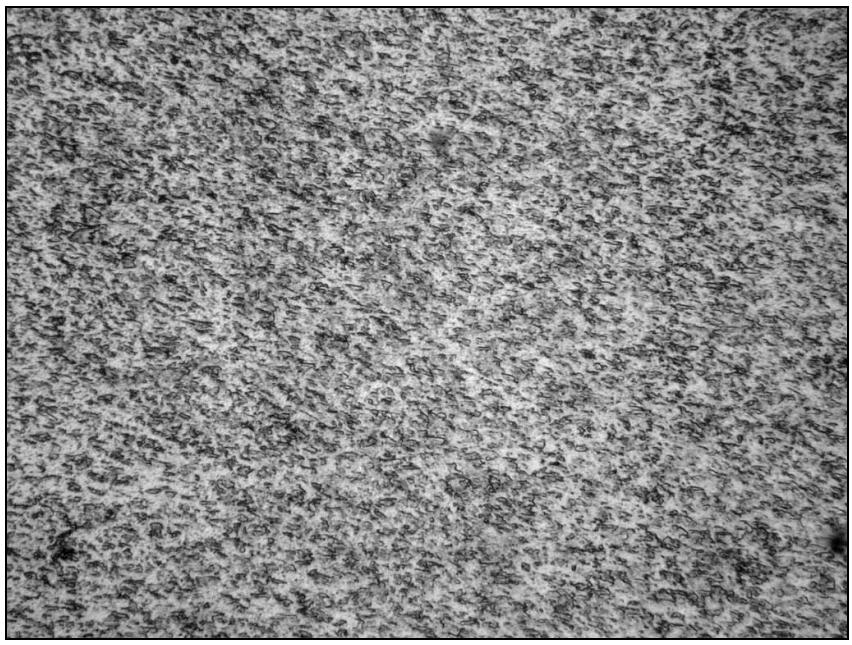


Рисунок 3.17 – Мікроструктура дроту зразка №5, х500

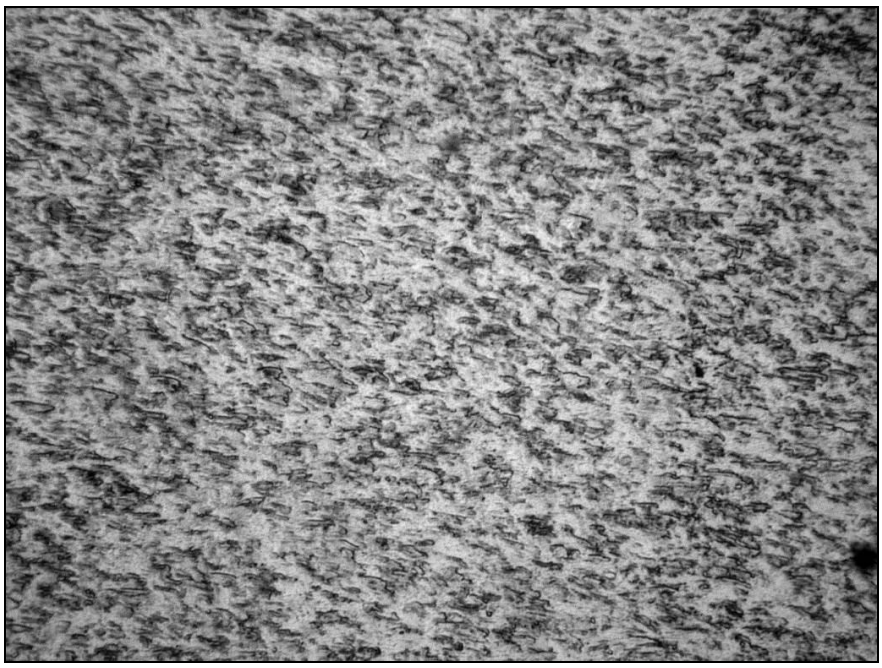


Рисунок 3.18 – Мікроструктура дроту зразка №5, х1000

Були проведені додаткові вимірювання твердості за Віккерсом для зразків дроту №1-5, результати вимірювань наведені в таблиці 3.3. Градуювальний графік твердість-напруження-деформації для даного матеріалу G3Si1 наведено на рис. 2.16.

Таблиця 3.3 – Результати вимірювань твердості за Віккерсом

№ зразка	Твердість катанки діаметром 5,5 мм, МПа	Твердість дроту діаметром 0,8 мм, МПа при навантаженнях	
		100 г	1 кг
1	1530, 1531, 1533	2764; 2773; 2773; 2773; 2773	3116; 3116; 3116
2		2528; 2528; 2528; 2528; 2490; 2685; 2793; 2685; 2793; 2793; 2793; 2312; 2793	3145; 3106; 3106
3	1646, 1653, 1661	3028; 3155; 3155; 3155; 2910; 2910; 3155	3136; 3214; 3204
4		2910; 2910; 2685; 2685; 2685	3136; 3185; 3116
5	————	3499; 3499; 3499; 3499; 3499	3626; 3626; 3626

Результати вимірювань твердості за Віккерсом (табл. 3.3) свідчать, що підвищена та стабільна твердість зварювального дроту характерна для зразків із найкращим горінням дуги.

3.3 Мікроструктурний аналіз за допомогою методів електронної мікроскопії та визначення кількісного елементного складу

Для з'ясування причини відмінностей в мікроструктурі і твердості зразків дроту було досліджено методами електронної мікроскопії та рентгеноспектрального аналізу. Дослідження мікроструктури проводили при збільшеннях х600, х2000, х6000, х20000 на тих зразках, на яких проведено вимірювання твердості – на фотографіях видно ромбовидні відбитки від алмазного конуса індентора твердоміра. Зображення знімали у вторинних електронах, що дозволяє аналізувати ре-

льєф поверхні. Визначення кількісного елементного складу виконували як з макроділянок (при збільшенні х600), так і локально окремих структурних складових (при збільшенні х20000), всі результати представлені в % (масових).

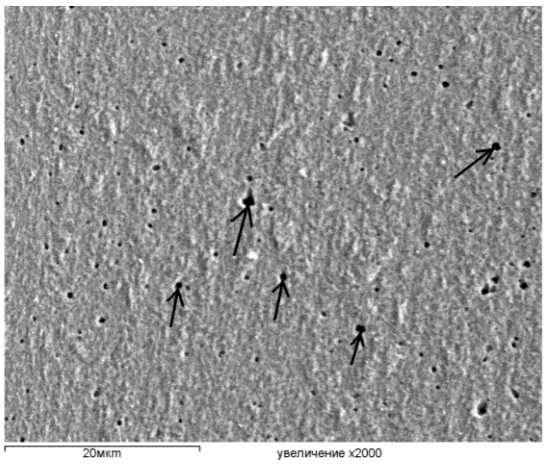
Макроаналіз елементного складу наведено в таблиці 3.5. Звідси випливає, що у всіх п'яти зразків близькі значення основних легуючих елементів (Si, Mn). Однак необхідно відзначити, що даним аналізом визначити точне значення вуглецю в металі не вдається через поверхневі ефекти, тому він був виключений з результатів аналізу.

Таблиця 3.4– Хімічний склад зразків

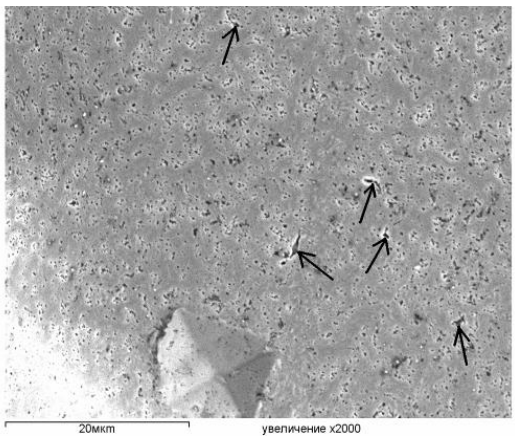
Зразок	Si	Mn	Fe
№1	0.79	1.57	97.64
№2	0.68	1.60	97.72
№3	0.59	1.61	97.81
№4	0.82	2.10	97.07
№5	0.91	1.70	97.39

Результати мікроскопічних досліджень всіх п'яти зразків при однаковому збільшенні (х2000) представлені на рис. 3.5. Звідси випливає, що у зразків №1-№4 присутні пори - на малюнках вони виглядають у вигляді чорних плям, найбільші відзначені чорними стрілками. У зразка №5 пористість відсутня.

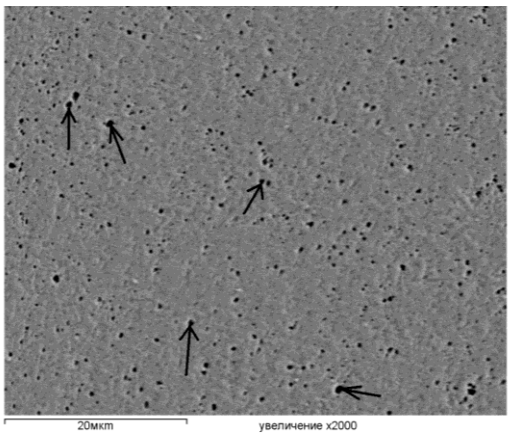
Крім того, зразки №1 та №3 схожі невисокою щільністю, округлою формою і невеликим розміром пор. У зразка №2 найвища щільність пор, і хоча розмір їх не дуже великий, але багато з них мають витягнуту тріщиноподібну форму з гострими краями. У зразка №4 щільність пор не дуже висока, але вони найбільшого розміру, витягнуті у вигляді «червоточини», можливо через злиття ланцюжків пор.



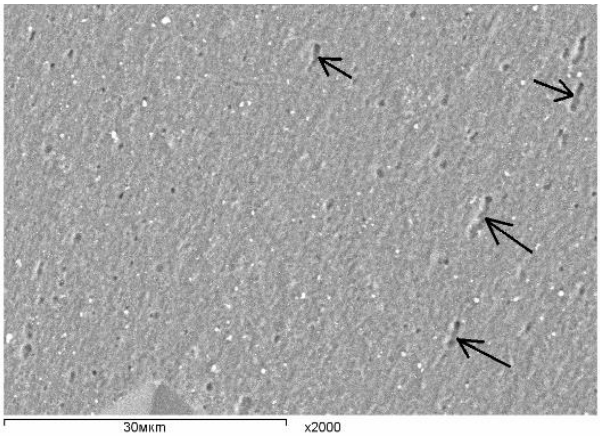
№1



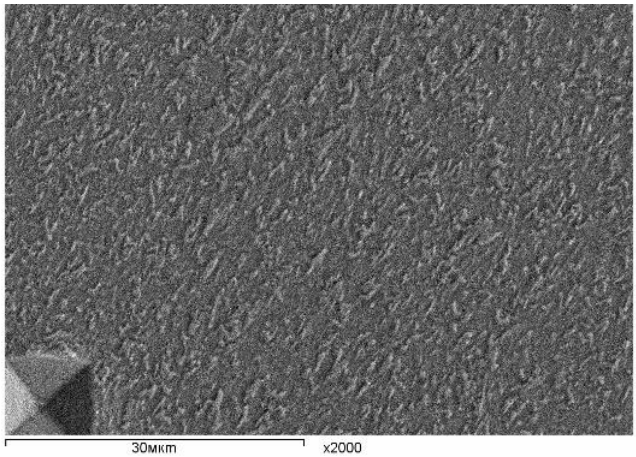
№2



№3



№4

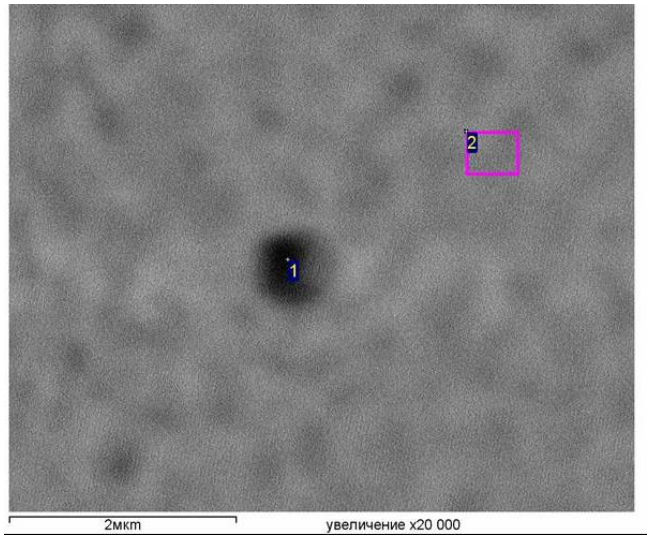


№5

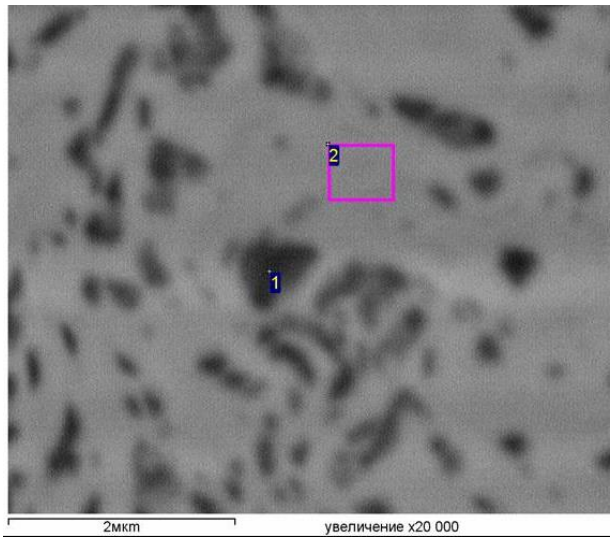
Рисунок 3.19 – Зображення поверхні зразків в режимі вторинних електронів при однаковому збільшенні x2000

Для з’ясування особливостей причин виникнення пор проведено локальний аналіз елементного складу (рис.3.20). Аналіз проводили всередині пори і по матриці металу поза порою. Виявлено, що хімічний склад за Si, Mn, Fe в середині пор

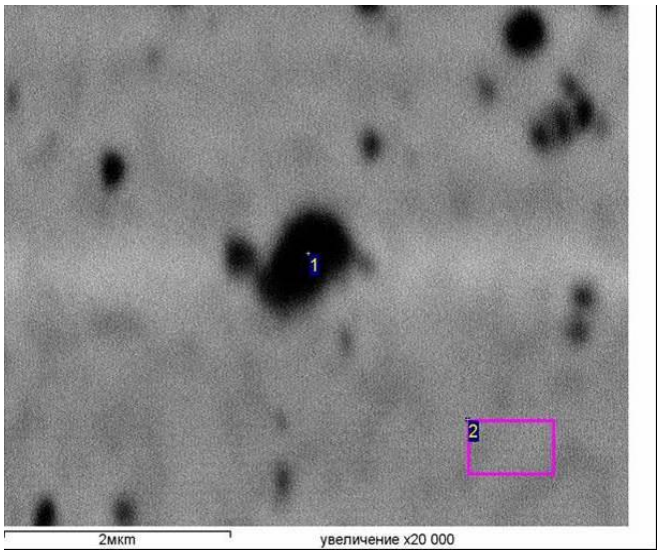
близький до складу матриці металу (відхилення у вмісту елементів відрізняється не більше 10...15%), отже ймовірно виникнення пор обумовлено газовою природою.



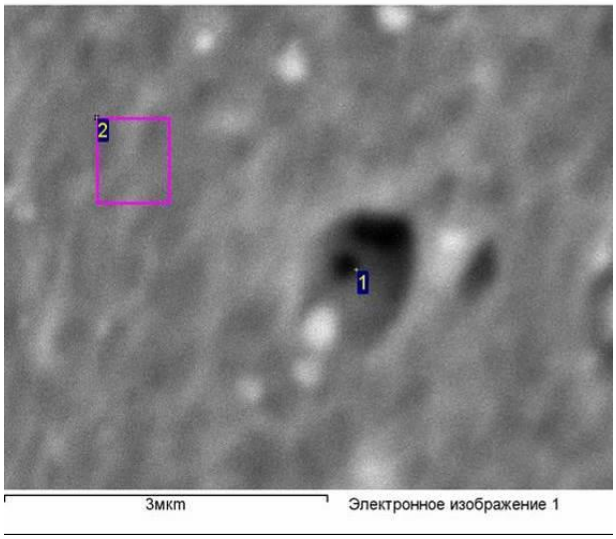
Зразок №1



Зразок №2



Зразок №3



Зразок №4

Рисунок 3.20 – Результати локального аналізу чотирьох зразків:

1- точка аналізу всередині пори (результат в таблиці 4.5)

2- зона аналізу поза порою (результат в таблиці 4.5)

Таблиця 3.5 –Хімічний склад локального аналізу

№ зразка	Місце аналізу	Вміст елементів,%		
		Si	Mn	Fe
1	1	0.27	1.93	94.02
	2	0.63	1.59	93.11
2	1	1.00	1.96	97.04
	2	0.84	1.82	97.35
3	1	0.70	1.27	95.16
	2	0.90	1.53	94.69
4	1	0.48	2.20	93.66
	2	0.80	1.88	95.38

Також було проведено додаткові дослідження зразків №2 і №5 на газовий аналіз (кисень, водень, азот), результати якого наведено в таблиці 3.6. У той час як значення кисню і водню у випробуваних зразків близькі, значення азоту сильно відрізняються. Підвищений вміст азоту в зразку №2 може означати, що виявлена пористість обумовлена саме цим газом.

Таблиця 3.6 –Результати газового аналізу (вміст в % масових)

№ зразка	Кисень (O)	Водень (H)	Азот (N)
Зразок №2	0,0185	0,0017	0,0107
Зразок №5	0,0123	0,0018	0,0050

3.3 Взаємозв’язок кривої течії і мікроструктури зварювальної катанки марки G3Si1 та Св-08Г2С

Важливим моментом в організації виробництва якісного дроту є попередній контроль механічних властивостей вихідного матеріалу заготовки – катанки у стані постачання. Особливий інтерес становить можливість з’ясування зварюва-

льно-технологічних властивостей на стадії проектування технологічного процесу. Здійснення контролю механічних характеристик представляє собою нескладний процес, тому можливість його застосування для прогнозування зварювально-технологічних властивостей дроту є привабливим. Однією з найважливіших характеристик матеріалу в пластичній області є крива течії (зміцнення) за якою можна розраховувати енергосилові характеристики, здійснювати моделювання МКЕ та досліджувати механіку процесу волочіння.

З метою з'ясування механічних властивостей катанки плавок 21181 та 260399 було проведено випробування на розтяг згідно ISO 6892-1 «Металеві матеріали – випробування на розтяг при кімнатній температурі» на розривній машині IP100, яка має свідоцтво про метрологічну повірку. Використовувались зразки катанки в стані поставки з робочою довжиною 200 мм та діаметром 5,5 мм. На рис.3.21 наведено криві течії катанки марки G3Si1 плавок №21181 та № 260399, які побудовані як і у п. 2.3.1. У таблиці 3.8 наведено значення розрахованих коефіцієнтів апроксимації та стандартні механічні характеристики матеріалу, які були визначені при випробуванні на розтяг.

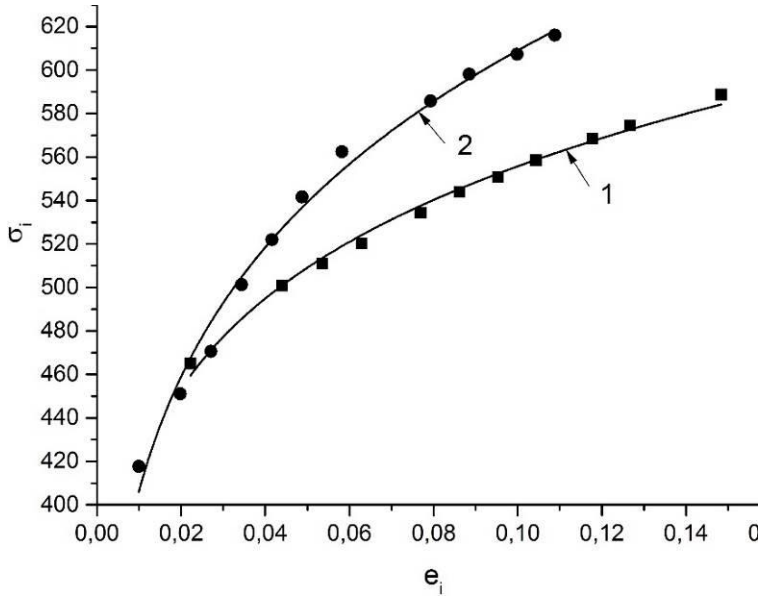


Рисунок 3.21 – Криві течії показані суцільною лінією (крива 1 – плавка 21181; крива 2 – плавка 260399 та σ_i вимірюється в МПа) апроксимовані за (1.10)

Таблиця 3.7 – Значення коефіцієнтів апроксимації та стандартних механічних характеристик

№ кривої	Значення коефіцієнтів апроксимації			Механічні властивості		
	A, МПа	n	R^2_{adj}	$\sigma_{вр}$, МПа	σ_T, МПа	Δl, %
1	744±7	0,126±0,004	0,992	507	450	30,25
2	913±18	0,176±0,006	0,988	552	425	25

Характерною особливістю досліджених матеріалів є відносно невисокий коефіцієнт зміцнюваності n (0,12...0,18), що значно нижче, ніж для матеріалів, як було досліджено вище і для яких не спостерігалось погіршення зварювально-технологічних властивостей дроту. Цей факт може свідчити про наступне: невисока зміцнюваність матеріалу катанки в стані постачання (коефіцієнт n менше за 0,18) вказує на можливі зниження показників якості готового дроту через нестабільність горіння дуги.

Отримані криві течії катанки показують, що у вихідному стані їх фізико-механічні властивості значно відрізняються, що зумовлено певною розбіжністю в хімічному складі та технологічною обробкою напівфабрикату. Тому можна зробити висновок, що вихідні фізико-механічні характеристики катанки хоча і формуються хімічним складом (в межах стандартів), але слабко впливають на зварювально-технологічні характеристики за умови відповідності готової продукції нормативним вимогам. Технологічна історія та культура виробництва катанки відіграє значну роль в її подальшій переробці в якісний дріт. Зокрема це стосується наявності газових включень (пор), зкоагульованих карбідів тощо. Крім того наявні пори в катанці безпосередньо знижують властивість металу до зміцнення при його пластичному формозмінюванні. В свою чергу наявність пор в матеріалі катанки у стані постачання зумовлює їх наявність в структурі дроту. Ця особливість може бути покладено в основу експерс-діагностики матеріалу катанки. Якщо коефіцієнт зміцнюваності n матеріалу катанки в стані постачання менший за 0,18 (при апрок-

симації кривої течії за двопараметричною степеневою функцією Людвіга), то це вказує на можливі зниження показників якості готового дроту через нестабільність горіння дуги, що потребує додаткового контролю готової продукції, наприклад шляхом вимірювання твердості на різних ділянках дроту або його мікроструктурного аналізу.

3.5 Висновки

1. Визначено, що стабільність горіння зварювального дроту забезпечується не тільки показниками готової продукції, які нормуються згідно існуючих стандартів, а й від однорідності структури катанки, яку використовує виробник дроту в процесі його виготовлення. Мікроструктурний аналіз низьковуглецевого зварювального дроту для ділянок зі стабільним та нестабільним горінням дуги показав, що найкращому горінні дуги відповідає рівномірний розподіл карбідної фази у феритній матриці.

2. Підвищена пористість зварювального дроту може бути викликана наявністю в ньому газів (зокрема, підвищеного вмісту азоту – більше ніж 0,10% - 0,0107%) та спричинює зниження твердості дроту та як наслідок нестабільне горіння зварювальної дуги.

3. Результати вимірювання твердості за Віккерсом показали, що найкраще горіння дуги притаманне зразкам дроту, який характеризується підвищеною та стабільною твердістю.

4. Якщо коефіцієнт зміцнюваності n матеріалу катанки в стані постачання менший за 0,18, то це вказує на суттєві зниження показників якості готового дроту через нестабільність горіння дуги, принаймні, для мінімальних діаметрів дроту 0,8–1,0 мм.

5. За результатами мікроструктурного аналізу зварювального дроту відзначено, що наявність зкоагульованих карбідів у його мікроструктурі характерно для ділянок із нестабільним горінням дуги.

6. Розбіжність твердості катанки спричинює розбіжності твердості готового дроту та впливає на стабільність горіння дуги дроту діаметром 0,8 мм.

7. Вимірювання твердості катанки на етапі вхідного контролю дозволяє прогнозувати показники якості готового дроту 0,8 мм. Так, наприклад, якщо на етапі вхідного контролю було виявлено, що твердість катанки має розбіжності, то це унеможливлює виготовити дріт діаметром 0,8 мм, який буде мати хороші зварювально-технологічні властивості. Тому є доцільним виготовити із даних мотків катанки дріт діаметром 1,6 або 1,2 мм.

РОЗДІЛ IV
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВОЛОЧІННЯ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА ФЕНОМЕНОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ ЗМІЦНЕННЯ МАЛОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ

4.1 Моделювання процесу волочіння МСЕ

Теоретичне дослідження механіки процесу волочіння було здійснено методом скінчених елементів (МСЕ) – одним із найбільш потужних методів, що здатен враховувати переважну більшість чинників, які істотно впливають на перебіг процесу. Серед них – найбільш повна модель матеріалу, у вигляді її карти, що містить параметри деформаційної анізотропії, швидкісного зміцнення, реальних умов тертя тощо.

Насамперед, для оцінки деформовності, залишкової пластичності, технологічної спадковості на основі сучасних уявлень, необхідно мати детальну інформацію про НДС в процесі волочіння.

Отримання найбільш повної інформації щодо механіки процесу багатоступінчастого волочіння маловуглецевого дроту здійснено для типового для виробництва технологічного процесу (табл. 2.1 та 2.2) із врахуванням реальної карти матеріалу G3Si1 (розділ 2.2).

Побудову моделі МСЕ здійснено класичним способом із застосуванням пакету програм LS-DYNA (виконавчу частину робочого K-файлу наведено в додатку Б).

Для моделювання використали принцип оберненого руху – заготовка вважалась нерухомою і закріпленою одним кінцем (накладена кінематична заборона на рух вузлів верхнього перерізу в осьовому напрямку), а інструменти – волоки – рухаються зі швидкістю волочіння, яка для кожного етапу задається окремо.

Вихідна заготовка – катанка діаметром d = 5,5 мм, моделювалась у вигляді циліндра довжиною 55 мм. Така довжина є мінімальною (а отже і раціональною) з точки зору отримання даних на стаціонарній ділянці заготовки. Задача

розв’язувалась у вісесиметричній постановці (рис. 4.1). Кількість елементів, на які розбивалась заготовка – 121000 (вихідний розмір елемента 0,05х0,05 мм).

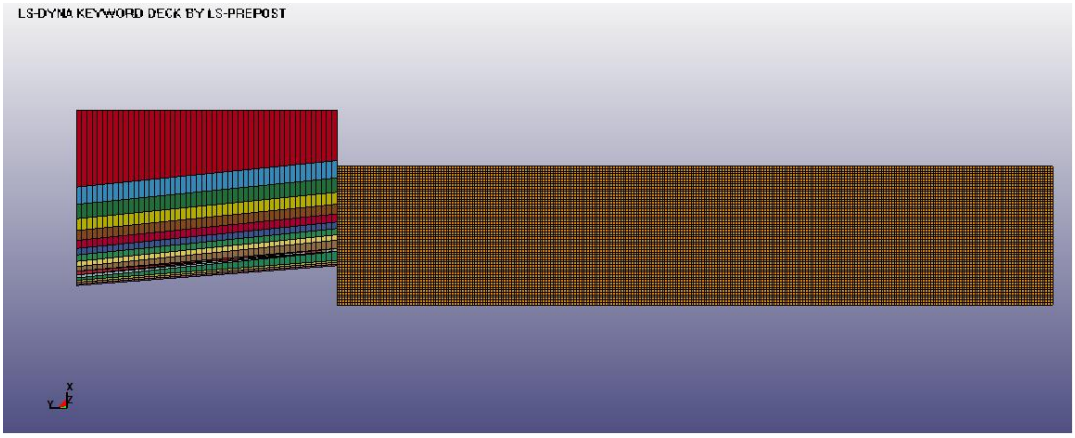


Рисунок 4.1 – Геометрична модель процесу багатоступінчастого волочіння для розрахунку МСЕ (LS-DYNA)

Властивості матеріалу задавались у вигляді його карти (див. розділ 2.2). Зауважимо, що незначні відхилення в хімічному складі, що визначають марку маловуглецевого дроту, і зумовлені цим чинником відмінності в їх механічних властивостях, практично не впливають на кінематику процесу та його характеристики, виражені через показники напруженого стану. Це твердження було висунуто в роботах [72, 82] і підтверджується отриманими розрахунками, зокрема, і для даного процесу волочіння. Тому, рисунки наведені для лише одного матеріалу - G3Si1 (A=836 МП, n=0,234). Перерахунок величин напружень для матеріалів з довільною реологію може бути здійснено за залежностями, що випливають із методу еквівалентної оцінки [97].

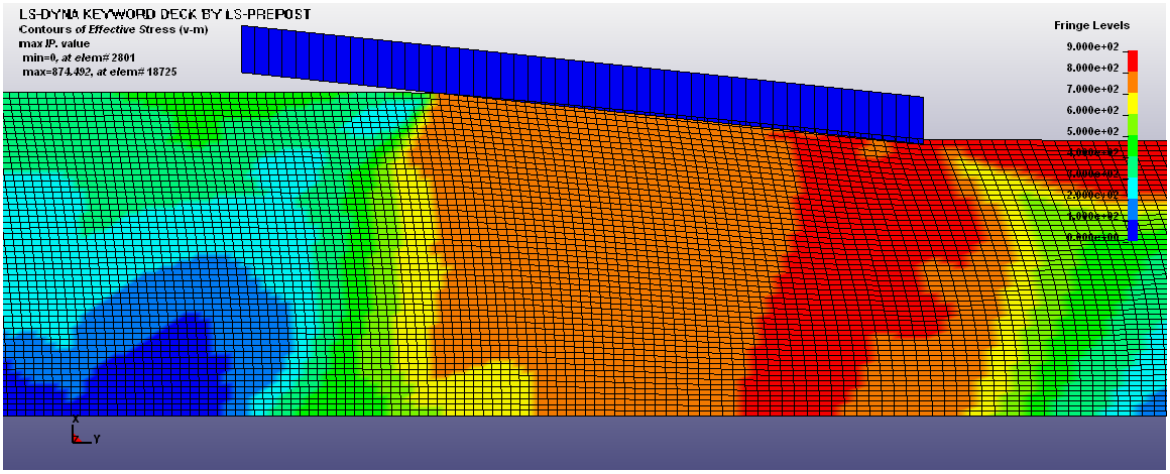
Волоки моделювались у вигляді абсолютно жорстких тіл, що є виправдано з т.з. стабільності розрахунків та споживаних програмою ресурсів комп’ютера з практично незмінними результатами в порівнянні з моделлю у вигляді деформованого тіла.

Коефіцієнт тертя задавали за Кулоном – f = 0,05 [20].

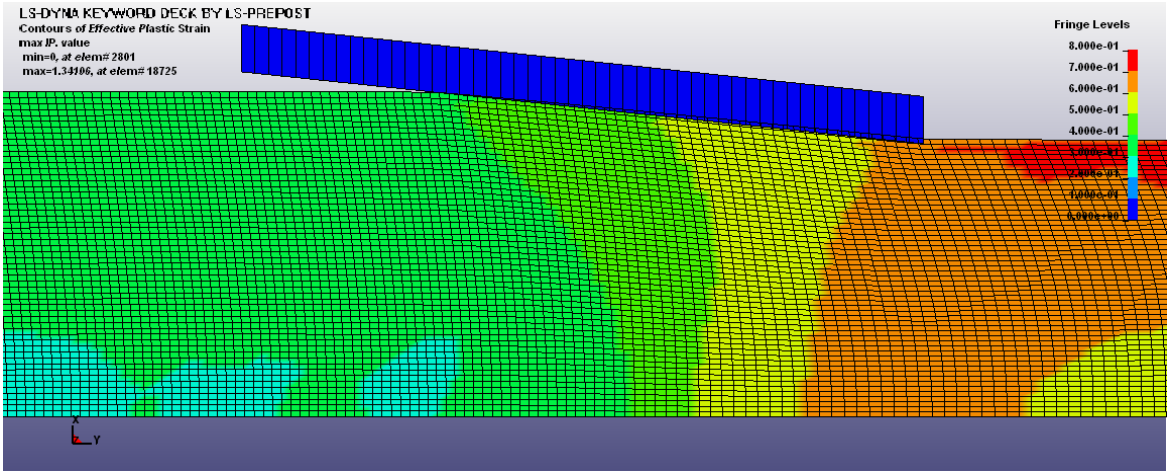
Час обрахунку моделі на ПК (4 ядра, 2,8 ГГц) склав 5.5 годин.

Обробку отриманих даних здійснювали програмними засобами LS-DYNA, що дозволяють практично усунути «чисельні шуми», які притаманні розрахункам величин гідростатичного тиску та нормальних напружень.

На рисунках 4.2 – 4.4 показані епюри компонент тензора напружень, деформацій, інтенсивності напружень, деформацій тощо. Ці величини необхідні, в тому числі, для оцінки деформовності, технологічної спадковості. Для прикладу наведено лише розрахунки при проходженні 2-ї волоки. Проте загальна картина подібна для всіх етапів волочіння.

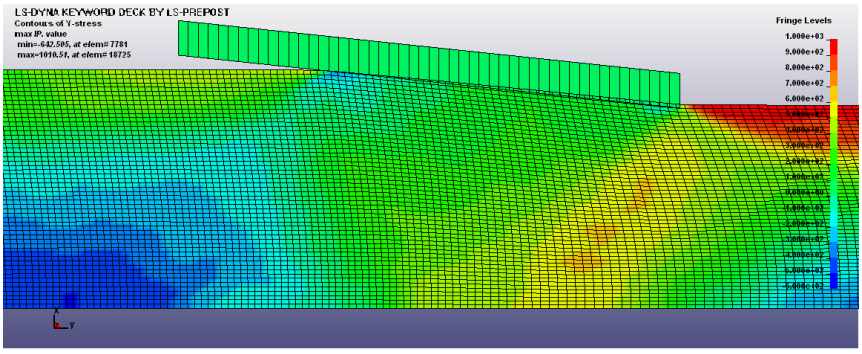


Інтенсивність нормальний напружень (σ_i), МПа

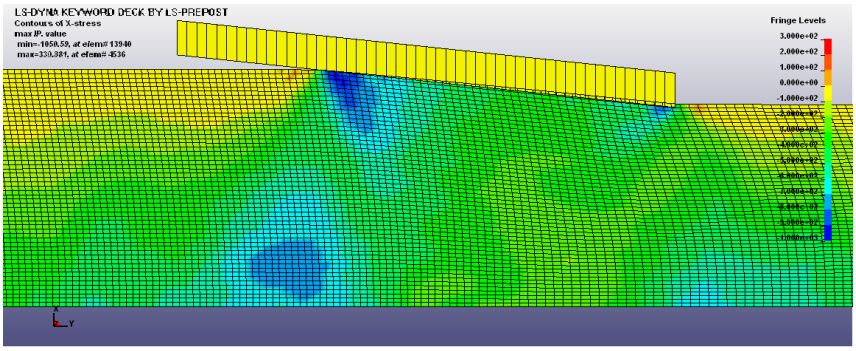


Накопичена інтенсивність деформацій (e_i)

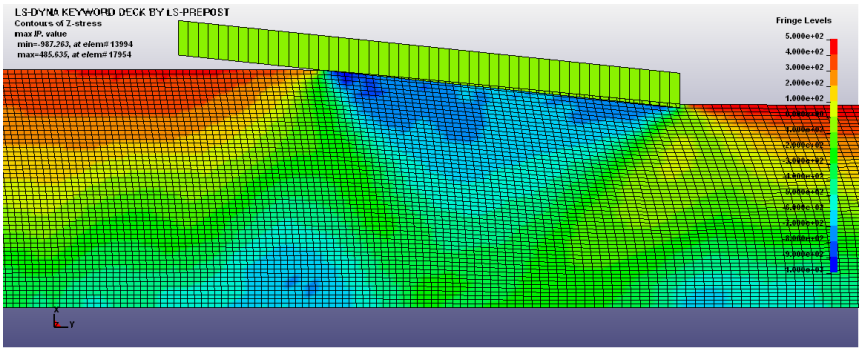
Рис. 4.2 – Моделювання волочіння МСЕ (прохід через другу волоку, розподіл інтенсивності нормальних напружень та деформацій)



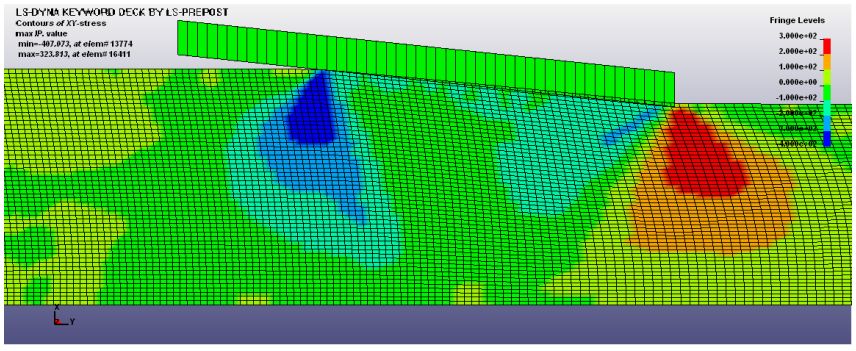
Осьове нормальне напруження (σ_z)



Радіальне нормальне напруження (σ_ρ)



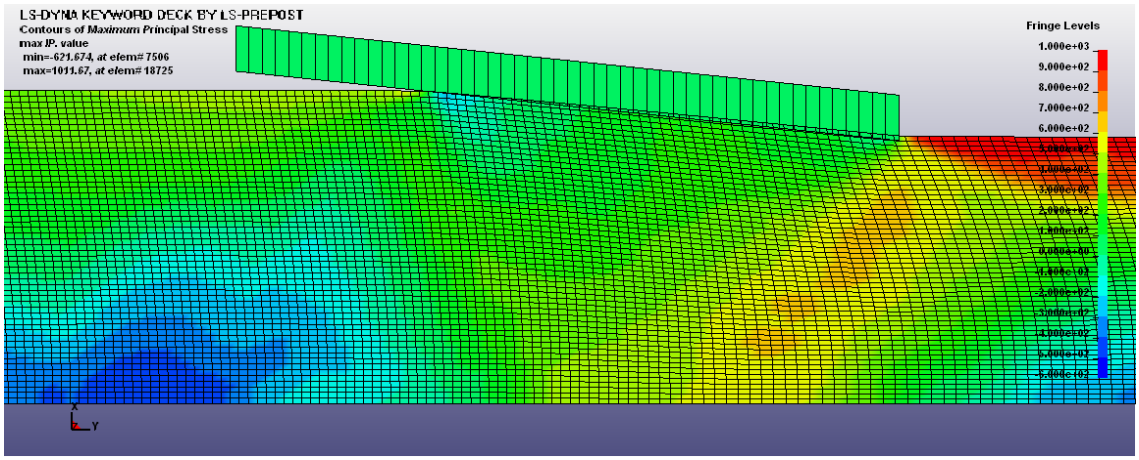
Колове нормальне напруження (σ_θ)



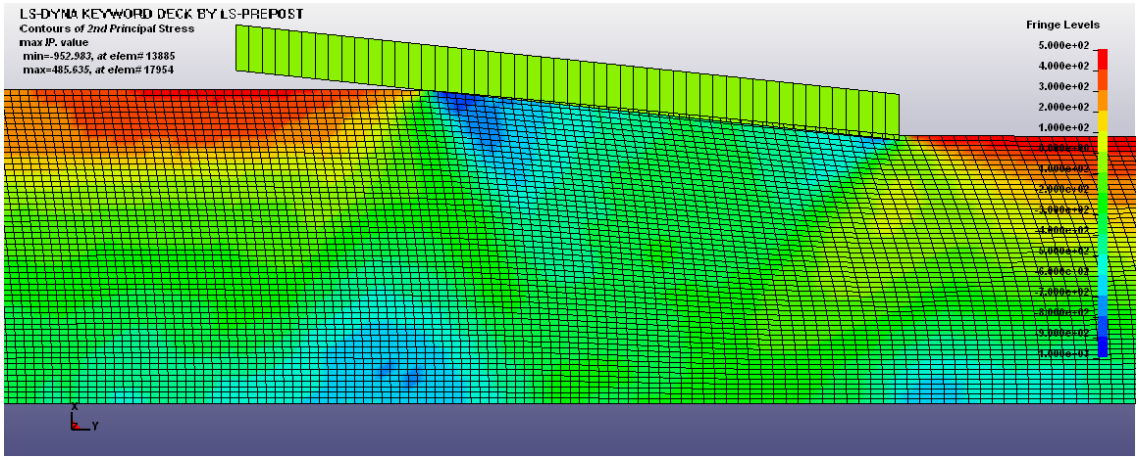
Дотичне напруження ($\tau_{\rho z}$)

Рисунок 4.3 – Моделювання волочіння МСЕ

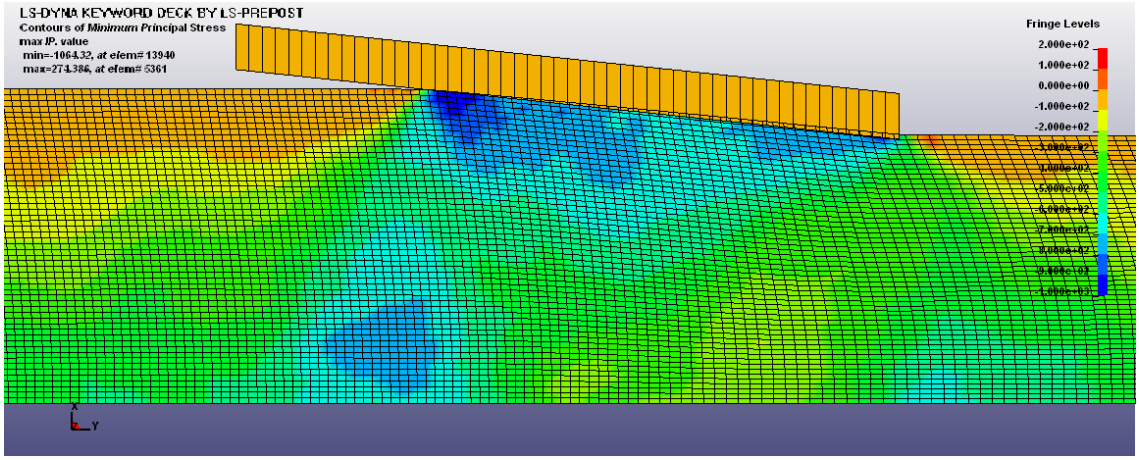
(прохід через другу волоку, компоненти тензора напружень), МПа



Перше головне напруження – (σ_1)



Друге головне напруження – (σ_2)



Третє головне напруження – (σ_3)

Рисунок 4.4. – Моделювання волочіння МСЕ

(прохід через другу волоку, розподіл головних напружень), МПа

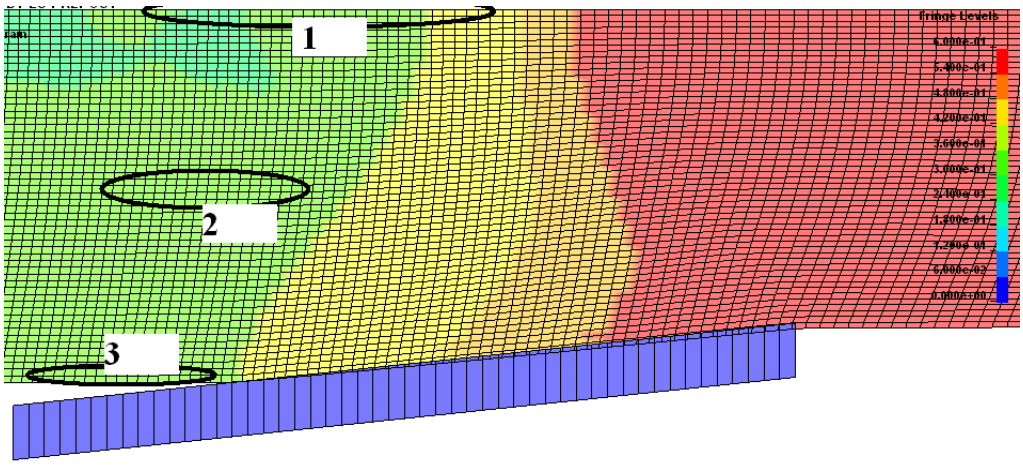


Рисунок 4.5 – Моделювання волочіння МСЕ
(прохід через другу волоку, розподіл накопиченої інтенсивності деформацій). Характерні зони, для яких вивчались шляхи деформування

4.2 Розподіл інтенсивності накопичених деформацій

Після виконання відповідної обробки отриманих результатів представимо розподіл інтенсивності накопичених деформацій по перерізу дроту на різних етапах волочіння (рис. 4.6). Для наочності сприйняття рисунку показані лише 5 етапів волочіння (з діаметра 5,5 до 2,5 мм, для інших етапів графіки мають подібний характер).

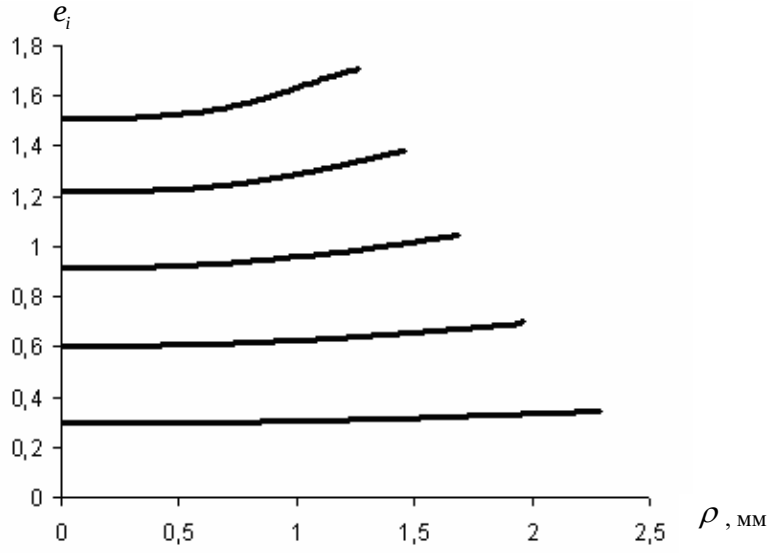


Рисунок 4.6 – Розподіл деформацій по перерізу на перших 5-ти етапах волочіння
(маршрут 5,5→4,68→3,99→3,42→2,95→2,56 (діаметр, мм)

Віднесемо абсцису розрахункових точок отриманих графіків до поточного діаметру на певному етапі волочіння, а ординату – до деформації на поверхні. В результаті отримуємо розташування розрахункових точок близько до кривої, характер якої носить вигляд параболи (рис. 4.7). Апроксимуємо експериментальні точки функцією

$$\bar{e}_i = \bar{e}_0 + (1-\bar{e}_0)\cdot\bar{\rho}^2 = m + (1-m)\cdot\bar{\rho}^2, \qquad (4.1)$$

де $\bar{e}_0 = \bar{e}_{0n} = \frac{e_{0n}}{e_{1n}} = \frac{e_{\min}}{e_{\max}} = m = 0{,}87 \pm 0{,}001$ - коефіцієнт нерівномірності деформацій, практично не залежить від числа переходів та ступеня витягування;

e_{0n} – накопичена інтенсивність деформацій на вісі дроту на n - му переході.

e_{1n} – накопичена інтенсивність деформацій на поверхні дроту на n - му переході.

$\bar{e}_i = \bar{e}_{in} = \frac{e_{in}}{e_{1n}}$ – відносна накопичена інтенсивність деформацій в точці, відносна координата якої по радіусу дорівнює $\bar{\rho} = \frac{\rho_n}{r_{0n}} = \frac{2\rho_n}{d_{0n}}$.

Зауважимо, що функція (4.1) досить точно описує відповідний розподіл – скоригований коефіцієнт детермінації складає R_{adj} = 0,98.

Також відмітимо, що незалежно від числа переходів та ступеня витягування середня деформація спостерігається на відстані $\bar{\rho}_m = \frac{\rho}{r_0} = 0{,}5$ і її величина сягає 0,9 від максимальної на поверхні $\bar{e}_{im} = 2\ln\frac{d_0}{d_n} \Big/ e_{1n} = 0{,}9$.

Що дозволяє із використанням класичних формул визначення накопиченої інтенсивності деформацій визначати величину e_i на вісі, поверхні і в довільній точці дроту в його поперечному перерізі на n - му переході, зокрема

$$e_{\max} = 1{,}11\cdot 2\ln\frac{d_0}{d_n}, \qquad (4.2)$$

$$e_{\min} = 0,96 \cdot 2 \ln \frac{d_0}{d_n}. \qquad (4.3)$$

Коефіцієнт нерівномірності деформацій для дослідженого маршруту волочіння становить $m = 0,87$. Для маршрутів волочіння, які суттєво відрізняються за своїми технологічними параметрами від дослідженого, необхідно виконувати додаткове вивчення щодо значення m, проте отримані загальні формули за своєю структурою не зазнають змін, що може бути використано як в практичному, так і теоретичному аспекті подальшого використання отриманих результатів.

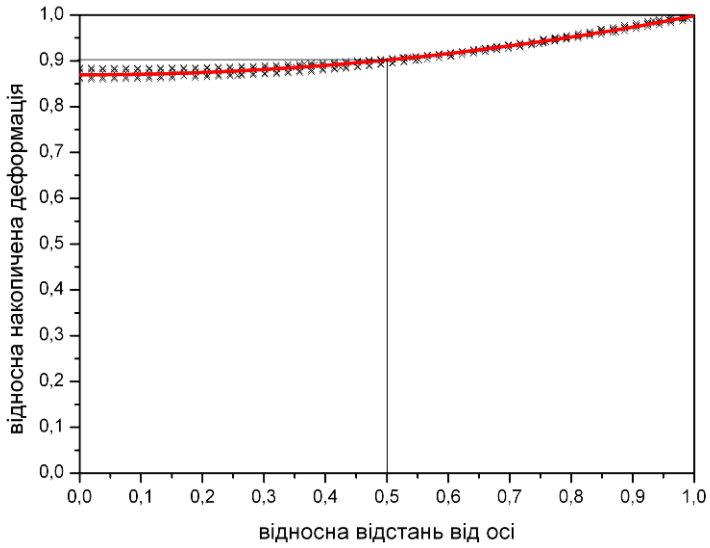


Рисунок 4.7 – Розподіл відносної накопиченої інтенсивності деформацій в залежності від відносної радіальної координати $\bar{\rho} = \frac{\rho}{r_0}$

Тому, при використанні теоретичного аналізу варто зауважити, що дійсні деформації на вісі, за якими оцінюється деформовність, будуть менші (в 0,97 раз від середньологарифмічних), а на поверхні в 1,11 раз більші. При цьому, коли ступінь накопичених деформацій сягає, наприклад, 4-х (характерно для процесу волочіння маловуглецевого дроту), то дійсні деформації на вісі і на поверхні будуть 3,9 і 4,44, що є суттєво при призначенні граничних режимів волочіння з максимальним ступенем витягування.

4.3 Оцінка деформовності в процесі волочіння

Для оцінки деформовності в процесі волочіння побудуємо шляхи деформування в небезпечній області, яка знаходиться на вісі дроту (підтверджується експериментально для різних умов волочіння). Для наочності і порівняння покажемо також шляхи деформування точок на поверхні і на відстані 0,5 радіуса від поверхні зразка (рис. 4.8).

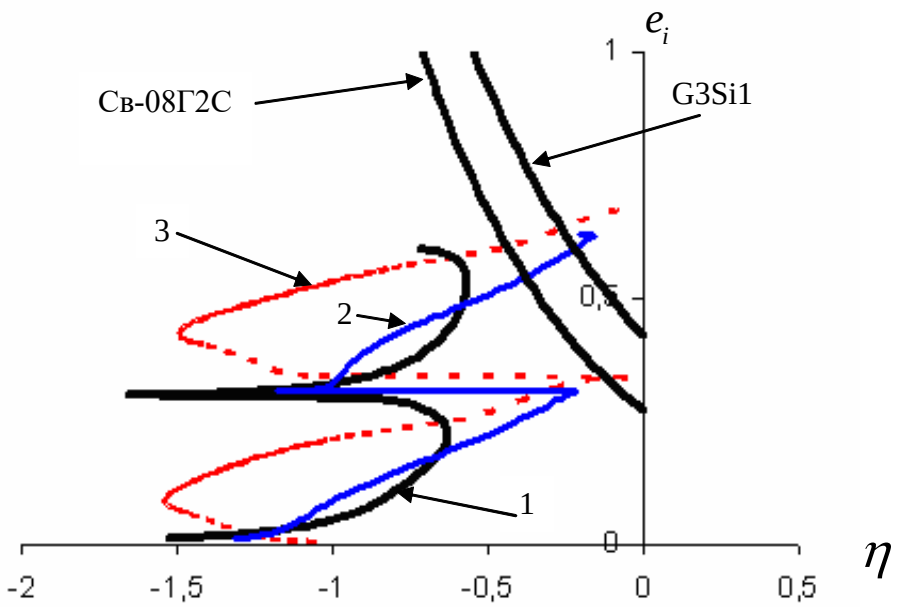


Рисунок 4.8 – Шляхи деформування в зонах 1–3 (див. рис. 4.5)
для 2-х перших переходів волочіння та діаграми пластичності матеріалу
дроту марок G3Si1 та Св-08Г2С

Як видно з рис.4.8, отримані шляхи деформування значно відрізняються від тих, що були досліджені в роботах [72-74] (див. рис. 1.13). Це вносить суттєві корективи в оцінку деформовності в процесі волочіння з використанням відповідних критеріїв. Також зауважимо, що характерною особливістю шляхів деформування в небезпечній області є їх значна кривина, при суттєвих значеннях першої похідної, яка до того ж змінює знак ($\frac{d\eta}{de_u}$ = –15...9).

Побудуємо також шляхи деформування як функції зміни величини накопиченої інтенсивності деформацій від показника $e_i(\chi)$ та параметра Надаи-Лоде $e_i(\mu_\sigma)$ (рис. 4.9). Як було зазначено у вступі, така інформація є важливою з точки зору вибору критерію деформовності. Оскільки небезпечна область припадає на вісь дроту, що волочать, то графіки побудовано для цієї зони заготовки. Як видно з рисунку, характерною особливістю цих графіків є практично лінійна залежність та незмінність цих параметрів в ході процесу багатоступінчастого волочіння. Це означає, що враховувати першу і другу похідну шляхів деформування $e_i(\chi)$ чи $e_i(\mu_\sigma)$ не потрібно. З іншого боку врахувати зміну пластичності металу (діаграму пластичності) при $\chi \neq 0$ є важливим, як показано в роботі [74].

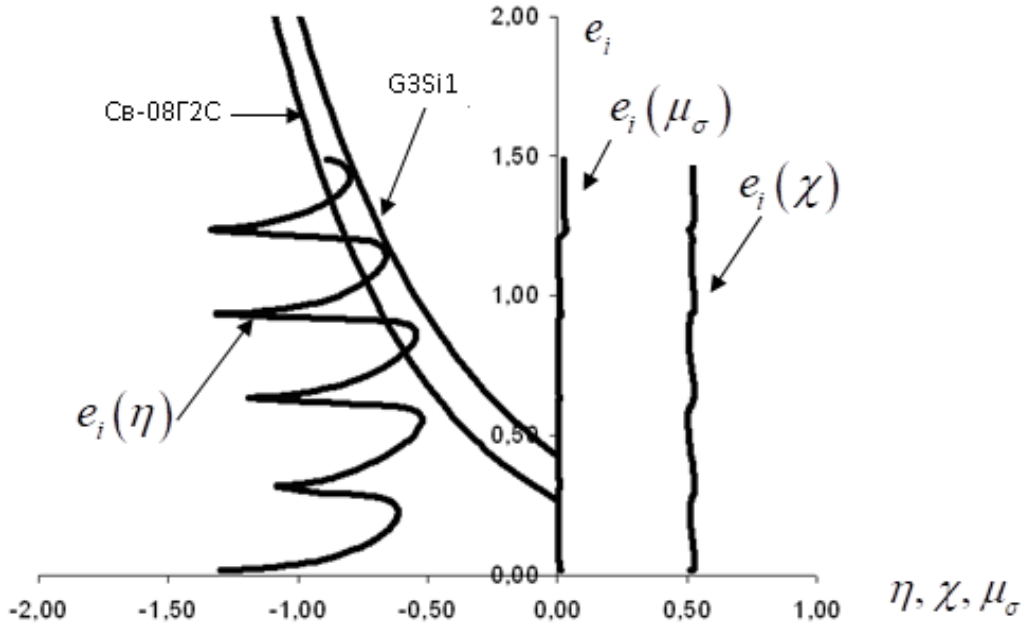


Рисунок 4.9 – Шляхи деформування частинок матеріалу в небезпечній області (на вісі) (перші 5 переходів) та діаграми пластичності матеріалів

Отже, оцінку деформовності дроту в процесі багатоступінчастого волочіння необхідно здійснювати за критерієм (1.16).

У відповідності до методики врахування третього інваріанту тензора напружень при оцінці деформовності (В.А. Огороднiков) діаграма пластичності

втрачає наочність сприйняття у вигляді графіка. Запишемо функцію, яка буде її визначати, з врахуванням даних роботи [72]

$$\eta_\chi(e_i)=\eta(e_i)\left[1+\left(\mathrm{A}\cdot\eta^2(e_i)+B\cdot\eta(e_i)+C\right)\chi\right], \quad (4.4)$$

або при $\chi=0,5$

$$\eta_\chi(e_i)=\eta(e_i)\left[1+0,5\left(\mathrm{A}\cdot\eta^2(e_i)+B\cdot\eta(e_i)+C\right)\right] \quad (4.5).$$

У таблиці 4.1 наведено результати, які дає оцінка використаного ресурсу пластичності, із врахуванням властивості адитивності використаного ресурсу пластичності $\psi=\sum\psi_i$ (зауважимо, що процес деформації монотонний та складний). Як видно з розрахунків, оцінку деформовності необхідно виконувати із врахуванням третього інваріанта тензора напружень, в іншому випадку похибка може сягати значних величин. Також зауважимо, що зміна режимів волочіння чи матеріалу тягне за собою необхідність щоразу здійснювати доволі трудомістке та незручне в умовах виробництва моделювання процесу МСЕ та обробку даних, а також ретельного вивчення діаграми пластичності для конкретного оброблюваного волочінням матеріалу.

Таблиця 4.1 – Оцінка використаного ресурсу пластичності при волочінні

Матеріал	Використаний ресурс пластичності, визначений без врахування третього інваріанта тензора напружень	Використаний ресурс пластичності, визначений із врахуванням третього інваріанта тензора напружень	Примітки
G3Si1	1,83	0,92	Обривність відсутня
Св-08Г2С	2,34	1,11	Висока обривність

4.4 Феноменологічна модель зміцнення маловуглецевих сталей в процесі багатоступінчатого волочіння

Для отримання феноменологічної моделі зміцнення маловуглецевих сталей експериментальному дослідженню підлягали зразки дроту на різних етапах волочіння за наведеними маршрутами.

Побудову кривої течії та визначення механічних характеристик металу дроту здійснювали шляхом проведення випробувань на розтяг згідно ISO 6892-1 «Металеві матеріали – випробування на розтяг при кімнатній температурі» на розривній машині Р5М, яка має свідоцтво про метрологічну повірку.

Для дослідів використовувались такі типи зразків:

– зразки діаметром 5,5 мм, що отримані з катанок різних партій (в стані постачання);

– зразки напівфабрикату дроту діаметрів 2,5 та 2,0 мм (після попереднього волочіння);

– зразки готового обмідненого зварювального дроту діаметрів 0,8; 1,0; 1,2 та 1,6 мм (після фінішного волочіння).

Робоча довжина зразків становила 200 мм.

В результаті експериментів встановлено, що криві течії як вихідного матеріалу катанки, так і дроту після волочіння, слідують двопараметричному степеневому закону зміцнення (1.10) за П. Людвігом із коефіцієнтом детермінації не меншим 0,95. Для вихідного матеріалу (катанки в стані постачання) (1.10) має вигляд

$$\sigma_i = A_0 e_i^{n_0}, \tag{4.6}$$

де A_0, n_0 – коефіцієнти апроксимації – модуль та показник зміцнення недеформованого металу.

Зауважимо, що вибір закону (1.10) є виправданим з точки зору взаємозв'язку коефіцієнтів апроксимації з названими вище інженерними механічними характеристиками матеріалу при розтягу [63].

Після кожного переходу волочіння матеріал набуває інших властивостей із збереженням здатності зміцнюватись за степеневим законом при подальшому розтягу дроту вздовж його вісі (1.10) має вигляд

$$\sigma_i = Ae_i^n, \tag{4.7}$$

де *A, n* – поточний модуль та показник зміцнення матеріалу на певному етапі волочіння, які залежать від коефіцієнта витягування.

Величину коефіцієнта витягування розраховують за формулою (1.3).

Статистична обробка отриманих даних виявила характерні апроксимуючі функції параметрів *A* та *n* від коефіцієнта витягування $\ln \mu$.

Модуль зміцнення –

$$A = A_0 \cdot \exp(k \cdot \ln \mu), \tag{4.8}$$

де *k* – коефіцієнт апроксимації.

Показник зміцнення –

$$n = n_\infty + (n_0 - n_\infty) \cdot a^{\ln \mu}, \tag{4.9}$$

де n_∞, a – коефіцієнти апроксимації.

Фізичний зміст коефіцієнта a прослідковується з виразу

$$a = \frac{n_{\ln \mu = 1} - n_\infty}{n_0 - n_\infty}, \tag{4.10}$$

де $n_{\ln\mu=1}$ – значення показника зміцнення n при $\ln\mu=1$, тобто при зменшенні вихідної площі перерізу в 2,71 рази, n_∞ – значення показника зміцнення n при $\ln\mu=\infty$.

Отже, кінцева феноменологічна модель (4.7) опису кривої зміцнення після кожного проходу через волоку набуде вигляду

$$\sigma_i = A_0 \cdot \exp(k \cdot \ln\mu) \cdot e_i^{n_\infty+(n_0-n_\infty)\cdot a^{\ln\mu}}. \qquad (4.11)$$

Як вказано у пункті 1.6 величини стандартних механічних характеристик пов'язані із кривою зміцнення та визначатимуться за формулами (1.11) – (1.13). Формула (1.12) є оціночною з відносно великими довірчими інтервалами і наведена для цілісного уявлення про зв'язок між границею текучості і кривою зміцнення. Формула (1.13) буде справедливою при відносно великих робочих довжинах випробовуваних зразків, коли впливом місцевого звуження можна знехтувати. В нашому випадку робоча довжина зразків була 200 мм при діаметрах менше 5,5 мм, що забезпечує коректність використання виразу (1.13).

На рис. 4.10 наведено зміну коефіцієнта n в залежності від інтегральної деформації витягування. Значення розрахованих коефіцієнтів за формулою (4.9) наведено в таблиці 4.2 для кожної з досліджуваних марок маловуглецевих сталей.

Таблиця 4.2 – Значення коефіцієнтів моделі (4.9)

Матеріал	n_∞	n_0	a	R^2_{adj}
Св08-Г2С	0,0372±0,00345	0,260±0,00889	0,211±0,0386	0,998
G3Si1	0,0362±0,00369	0,234±0,00947	0,217±0,0452	0,997

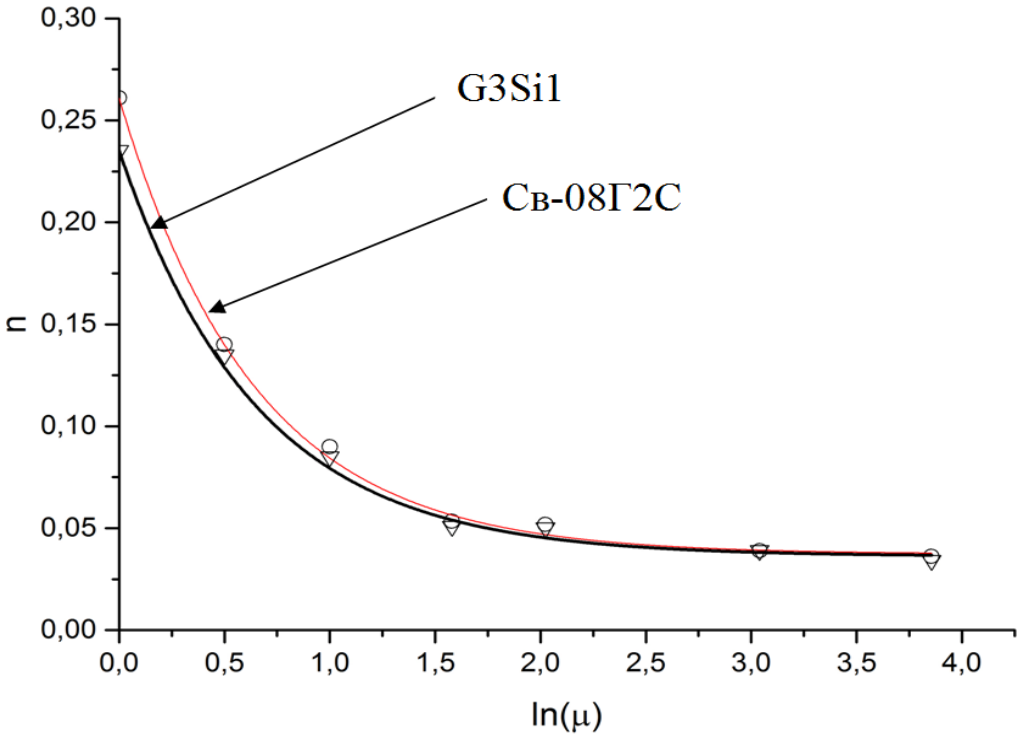


Рисунок 4.10 – Зміна коефіцієнта n в залежності
від інтегральної деформації витягування

Отже, коефіцієнт n прямує асимптотично до певної константи n_∞, яка близька до нуля, тобто матеріал набуває властивостей ідеально пластичного матеріалу. Але, через набуту деформаційну анізотропію незначна властивість до зміцнення, що виражається показником n, зберігається. При цьому пластичність металу майже вичерпана, про що свідчать низькі значення відносного видовження після розриву дроту на фінішних етапах волочіння. Це означає, що використаний ресурс пластичності металу наближається до одиниці.

На рис. 4.11 наведено зміну коефіцієнта A в залежності від інтегральної деформації витягування. Значення розрахованих коефіцієнтів за формулою (4.8) наведено в таблиці 4.3 для кожної з досліджуваних марок маловуглецевих сталей. Як видно з рисунка, модуль зміцнення нелінійно зростає, що зумовлює підвищення характеристик міцності (4.8), (4.9). Фізичне обґрунтування збільшення A полягає в значному зростанні щільності дислокацій в процесі багатоступінчастого волочіння, які створюють відповідний опір подальшій пластичній формозміні.

Таблиця 4.3 – Значення коефіцієнтів розрахованих за формулою (4.8)

Матеріал	A_0, МПа	k	R^2_{adj}
СВ08-Г2С	854±35	0,167±0,0144	0,973
G3Si1	836±34	0,167±0,0141	0,974

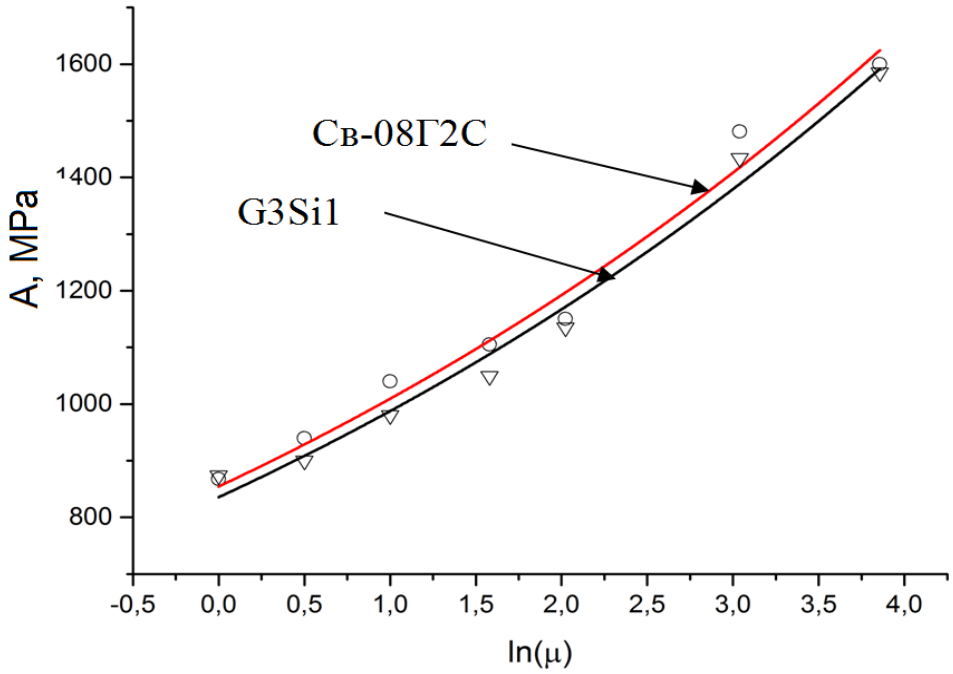


Рисунок 4.11 – Зміна коефіцієнта A в залежності від інтегральної деформації витягування

Представлення апроксимацій в вигляді (4.8) та (4.9) може набути практичного значення не тільки для маловуглецевих сталей типу Св-08Г2С та G3Si1, але й для інших марок сталей, оскільки в них входять коефіцієнти початкової кривої зміцнення (для катанки), а закон зміцнення більшості металів відповідає степеневому. Зручним є також те, що в залежностях є лише по одному невідомому коефіцієнту k та a. Ці параметри для інших марок сталей повинні визначатись експериментально, шляхом випробовувань зразків дроту після волочіння. В першому наближенні можна припустити, що і ці коефіцієнти не суттєво залежатимуть від параметрів процесу та властивостей матеріалу. Це дасть змогу скористатись ними для передбачення механічних властивостей і побудови феноменологічної матема-

тичної моделі поведінки металу в процесі волочіння довільних сталей. Для уточнення відповідних моделей варто провести постановочні експерименти на кожній з марок сталей, які підлягають технологічній обробці, знайти k та a для кожної групи. Далі слід випробувати лише вихідний матеріал в стані постачання. Розрахунки за формулами (1.11)–(1.13) дадуть передбачувані значення характеристик міцності та пластичності і якщо вони не відповідатимуть вимогам стандарту, то необхідно провести операції відпалу, або відмовитись від такої партії металу.

4.5 Підтвердження моделі на основі експериментів

Для перевірки моделі проведено досліди на стані попереднього волочіння за маршрутом №2 (див. табл. 2.1) для марки сталі Св-08Г2С. Відібрано зразки катанки та дроту після кожного переходу для проведення випробувань на розтяг. Розраховані експериментальні значення коефіцієнтів A і n наведено в таблиці 4.4. За формулами (4.8) та (4.9) розраховано теоретичні значення коефіцієнтів A і n (табл.4.4). У таблиці 4.5 наведено експериментальні та розрахункові значення границі міцності та відносного видовження дроту

Таблиця 4.4 – Значення експериментальних та розрахункових коефіцієнтів для матеріалу Св-08Г2С

Діаметр зразка	$\ln \mu$	A, МПа			n		
		розрахунок	експеримент	похибка, %	розрахунок	експеримент	похибка, %
1	2	3	4	5	6	7	8
5,5	-		883			0,178	
4,76	0,289	927	895±9	3,54	0,127	0,119±0,0017	6,72
4,17	0,554	969	969±4	0,05	0,097	0,101±0,0008	3,96
3,68	0,804	1010	967±14	4,43	0,078	0,077±0,0028	1,30

1	2	3	4	5	6	7	8
3,28	1,034	1049	955±6	9,84	0,065	0,07±0,00119	7,14
2,95	1,246	1087	989+4	9,91	0,057	0,063±0,0008	9,52
2,69	1,430	1121	1115±3	0,56	0,052	0,05±0,0004	4,00
2,48	1,593	1152	1263±8	8,79	0,049	0,045±0,00132	8,89
1,2	3,048	1468	1440±6	1,94	0,038	0,0347±0,0004	9,51

Таблиця 4.5 – Значення експериментальних та розрахункових стандартних механічних характеристик для матеріалу Св-08Г2С

Діаметр зразка	Границя міцності, МПа			Відносне видовження, %		
	розрахунок	експеримент	похибка, %	розрахунок	експеримент	похибка, %
4,76	628	628	9,77	13,54	12,65	7,04
4,17	701	754	7,03	10,19	10,5	2,95
3,68	766	813	5,78	8,11	8	1,38
3,28	823	817	0,73	6,72	6,5	9,7
2,95	872	854	2,09	5,87	6,25	6,08
2,69	913	1005	9,15	5,34	5,5	2,91
2,48	946	1048	9,73	5,02	4,75	5,68
1,2	1248	1239	0,75	3,87	3,55	9,01

Також проведено досліди для марки матеріалу G3Si1. Випробуванню піддавали такі зразки:

– зразки катанки діаметром 5,5 мм в стані постачання;

– зразки дроту після стану попереднього волочіння діаметром 2,5 мм, виготовленого за маршрутом №2, який вказано у таблиці 2.1;

– зразки дроту після стану попереднього волочіння діаметром 2 мм, виготовленого за маршрутом №1, який вказано у таблиці 2.1;

– зразки омідненого дроту після стану фінішного волочіння діаметром 1,2 мм, виготовленого за маршрутом №2, який вказано у таблиці 2.2;

– зразки омідненого дроту після стану фінішного волочіння діаметром 0,8 мм, виготовленого за маршрутом №4, який наведено у таблиці 2.2.

Вхідні значення коефіцієнтів отримані експериментально: A_0=894 МПа та n_0=0,223. Розраховані та експериментальні значення коефіцієнтів A і n та стандартних механічних характеристик наведено в таблицях 4.6 і 4.7 відповідно.

Таблиця 4.6 – Значення експериментальних та розрахункових коефіцієнтів для матеріалу G3Si1

Діаметр зразка	*ln μ*	*A,* МПа			*n*		
		розрахунок	експеримент	похибка, %	розрахунок	експеримент	похибка, %
2,5	1,577	1163,880	1129,122	3,08	0,053	0,0535	0,93
2,0	2,023	1253,939	1151,135	8,93	0,045	0,0464	3,02
1,2	3,045	1487,215	1476,069	0,76	0,038	0,0392	3,06
0,8	3,856	1702,897	1783,091	4,5	0,037	0,0392	5,61

Таблиця 4.7 – Значення експериментальних та розрахункових стандартних механічних характеристик для матеріалу G3Si1

Діаметр зразка	Границя міцності, МПа			Відносне видовження, %		
	розрахунок	експеримент	похибка, %	розрахунок	експеримент	похибка, %
2,5	944,66	915	3,24	5,44	5,5	1,09
2,0	1042,62	953	9,40	4,60	4,75	3,16
1,2	1264,45	1250	1,16	3,87	4	3,25
0,8	1452,59	1510	3,80	3,77	4	5,75

Як видно з таблиць порівняння, отримана феноменологічна модель досить точно для інженерних практичних розрахунків дає змогу оцінити параметри кривої зміцнення, границю міцності та відносне видовження після розриву. Зауважимо також, що ця модель буде найкраще описувати зміну механічних характеристик саме для розглянутого варіанту волочіння (який характеризується геометричними та конструктивними параметрами матриці, умовами змащення, швидкістю волочіння, кількістю проходів і т.д.), оскільки ці фактори спричиняють вплив на досліджувані величини опору пластичному деформуванню. Проте саме отримана модель і має практичне значення, оскільки більшість технологічних процесів найвідоміших світових виробників побудована за схожою схемою, вказаною в табл. 2.1 та 2.2.

4.6 Методика здійснення вхідного контролю для виробництва дроту з маловуглецевих сталей

Методика здійснення вхідного контролю для виробництва дроту з маловуглецевих сталей полягає у наступному:

- при надходженні катанки на склад сировини відібрати зразок з кожного мотка для проведення випробувань на розтяг;
- провести випробування на розтяг з отриманням діаграми розтягу;
- побудувати криву криву «напруження – деформація» та визначити коефіцієнти кривої зміцнення A_0, n_0;
- згідно плану виробництва визначити за формулою (1.3) величину коефіцієнта витягування;
- розрахувати за формулами (4.8) та (4.9) коефіцієнти *A, n* для даного діаметру дроту;
- розрахувати за формулами (1.11)–(1.13) механічні характеристики дроту;
- звірити розраховані механічні характеристики дроту з вимогами нормативної документації та відібрати мотки катанки, які відповідають вимогам для пе-

реробки;

- у випадку невідповідності вимогам провести розрахунок механічних властивостей мотків катанки для інших діаметрів та скорегувати план виробництва або ж відправити на проміжний відпал.

Рисунок 11 - Схема проведення вхідного контролю для виробництва дроту з маловуглецевих сталей

На рис. 11 представлено схему, яка відображає методику здійснення вхідного контролю для виробництва дроту з маловуглецевих сталей, що забезпечує раціональне планування виробництва та належну якість виготовленої продукції. Дана методика дозволяє прогнозувати механічні характеристики готового дроту, запобігти таких видів браку як невідповідність вимогам нормативної документації механічних властивостей дроту та пов’язаних з цим наслідків, зменшити час на технологічну підготовку, а також уникнути простоїв обладнання (що пов’язані з обривами дроту в процесі волочіння).

Вхідний контроль механічних властивостей катанки є необхідною умовою прогнозування окремих показників якості продукції (границі міцності, текучості, відносне видовження після розриву, твердість) і запобігання технологічним відмовам (уникнення обривів дроту діаметрів 0,8 та 1,0 мм на етапі фінішного волочіння) в процесі її отримання, що суттєво впливає в цілому на ефективність виробництва.

Запобігання операцій проміжного відпалу для окремих партій, розбракування сировини за своїми технологічними характеристиками (картою матеріалу) суттєво зменшує час на технологічну підготовку, що пов’язано з конкретними умовами виробництва. Наприклад, технологічний процес виробництва дроту з мотка катанки займає одну добу без операції проміжного відпалу, натомість за наявності відпалу повний цикл виробництва займає декілька діб (тобто час на технологічну підготовку виробництва збільшується мінімум на 100%). Очевидно, що цей показник залежить від особливостей організації виробництва на конкретному підприємстві. Зауважимо також, що операція проміжного відпалу збільшує собівартість виготовлення продукцію до 10%, що пояснюється збільшенням витрат на електроенергію, заробітну платою працівників, з витратами матеріальних ресурсів на обслуговування дільниці відпалу тощо.

4.7 Висновки

1. Вивчення деформацій по перерізу раціонально здійснювати через представлення їх у відносних одиницях, оскільки графіки практично співпадають для різних переходів та діаметрів заготовок. Коефіцієнт нерівномірності деформацій практично не залежить від числа переходів та ступеня витягування і становить 0,87.

2. Шляхи деформування в небезпечній області – на вісі – мають інший вигляд, ніж вважалось раніше, при цьому спостерігається значна зміна похідної та кривини траєкторій деформування. Шляхи деформування, побудовані через показники χ та μ_σ мають вигляд майже константи, що значно спрощує їх врахування в при оцінці деформовності в процесі волочіння.

3. Побудована обчислювальна схема, що дозволяє врахувати третій інваріант тензора напружень відповідно до критерію деформовності (1.16) та оцінити вплив цього інваріанту на деформівність маловуглецевого зварювального дроту в процесі його волочіння в існуючих на практиці маршрутах волочіння і здійснити в подальшому на цій основі оцінку технологічної спадковості у вигляді залишкової пластичності, твердості тощо.

4. В подальших дослідженнях представляє інтерес порівняння отриманих результатів оцінки деформівності з результатами, що можуть бути отримані на основі застосування тензорного критерію деформівності [80] та критерію, що враховую особливості високотемпературного деформування [81].

5. Отримана феноменологічна модель зміцнення маловуглецевого зварювального дроту (марок G3Si1 та Св-08Г2С) в процесі волочіння встановлює залежність коефіцієнтів кривої зміцнення (за двопараметричною функцією П. Людвіга) від інтегральної деформації витягування. Коефіцієнт деформаційного змінення прямує асимптотично до константи, що наближається до нуля, тобто матеріал дроту з великими степенями витягування набуває властивостей ідеально пластичного матеріалу. Модуль зміцнення має властивість до експоненціального зростання. Модель також можна використати для відповідних розрахунків для реологічно

подібних (до досліджених) матеріалів, що значно розширює межі її практичного використання.

6. Розроблено методику проведення вхідного контролю катанки для виробництва дроту з маловуглецевих сталей, що дозволяє за результатами випробувань на розтяг розрахувати криву течії, показники міцності, пластичності дроту на будь-якому етапі волочіння, а отже спрогнозувати механічні властивості готового дроту різних діаметрів. Якщо шукані показники для певного діаметру дроту не будуть відповідати вимогам стандартів, то необхідно провести операції, які змінять вихідні властивості металу (наприклад, здійснити відпал) або провести повторний розрахунок для іншого діаметру.

7. Результати роботи впроваджені на підприємстві ПрАТ «ПлазмаТек» (м. Вінниця), що забезпечили раціональне планування виробництва дроту різних діаметрів для кожної партії катанки та сприяли уникненню виготовлення неякісної продукції, а також у навчальний процес ВНТУ. Прогнозування механічних властивостей зварювального дроту підвищило ефективність виробництва зварювального дроту за рахунок отримання продукції з прогнозованими характеристиками якості, уникнення технологічних відмов та раціонального планування виробництва, зменшення часу на технологічну підготовку (до 100%), економії матеріальних та енергетичних ресурсів (до 10%). Крім того на етапі вхідного контролю сировини отримана модель дозволила скласти раціональний план виробництва дроту різних діаметрів.

ВИСНОВКИ

Робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі – підвищення ефективності процесу волочіння зварного маловуглецевого дроту шляхом раціонального проектування технології виробництва з використанням максимального ресурсу пластичності матеріалу та прогнозування показників якості готового продукту.

1. В результаті проведеного літературного огляду здійснено аналіз існуючих методів дослідження механіки процесу волочіння, методів оцінки деформовності дроту, принципів визначення технологічних параметрів волочіння, аналіз способів виробництва маловуглецевого зварювального дроту, а також визначені основні показники якості обмідненого зварювального дроту. Недоліками зазначених підходів є недостатня вивченість процесу волочіння з т.з. прогнозування показників якості готового продукту, в тому числі, з використанням феноменологічної теорії деформовності.

2. Сформовано карту матеріалів G3Si1 та Св-08Г2С в стані постачання, що дає достатню для технолога уяву про поведінку матеріалу в пластичній області. Криві течії (втім як і стандартні механічні характеристики) зварювальної катанки марок G3Si1 та Св-08Г2С різних партій постачання суттєво відрізняються, що пов’язаний насамперед з умовами виготовлення напівфабрикату (з виробником). Хімічний склад в межах, визначених стандартами, чинить незначний вплив на механічні характеристики катанки. Діаграми пластичності є необхідною функцією для оцінювання можливості формозмінювання без руйнування за феноменологічними критеріями деформовності, при чому пластичність сталі G3Si1 значно вища, ніж Св-08Г2С, тому її можна рекомендувати до використання без проміжних відпалів. Коефіцієнт Баушингера в області розвинених деформацій досліджених матеріалів склав 0,14...0,16, що вказує на високу чутливість досліджених сталей до деформаційної анізотропії. Цей факт треба враховувати, зокрема при моделюванні волочіння МСЕ. Градуювальний графік твердість (HV)–напруження (σ_i)–деформації (e_i) дає змогу оцінити твердість дроту після його волочіння, що є важ-

ливим при прогнозуванні якості продукції.

3. Встановлено, що зварювально-технологічні властивості дроту (стабільність горіння дуги) залежить від показників готової продукції, які нормуються згідно існуючих стандартів, а й від однорідності структури катанки, яку використовує виробник дроту в процесі його виготовлення. Мікроструктурний аналіз показав, що найкращому горінні дуги відповідає рівномірний розподіл карбідної фази у феритній матриці, а для ділянок із нестабільним горінням дуги характерна наявність зкоагульованих карбідів. Підвищена пористість зварювального дроту може бути викликана наявністю в ньому газів (зокрема, підвищеного вмісту азоту – більше ніж 0,10% – 0,0107%) та спричинює зниження твердості дроту та як наслідок нестабільне горіння зварювальної дуги. Якщо коефіцієнт зміцнюваності *n* матеріалу катанки в стані постачання менший за 0,18, то це вказує на суттєві зниження показників якості готового дроту через нестабільність горіння дуги, принаймні, для мінімальних діаметрів дроту 0,8 – 1,0 мм.

4. Встановлено, що дослідження деформацій по перерізу раціонально здійснювати через представлення їх у відносних одиницях, оскільки графіки практично співпадають для різних переходів та діаметрів заготовок. Коефіцієнт нерівномірності деформацій практично не залежить від числа переходів та ступеня витягування і становить 0,87. Шляхи деформування в небезпечній області (на вісі) характеризуються значною зміною першої похідної та кривини відповідних траекторій. Шляхи деформування, побудовані через показники χ та μ_σ мають вигляд близький до константи, що значно спрощує їх врахування при оцінці деформовності в процесі волочіння.

5. Побудована обчислювальна схема, що дозволяє врахувати третій інваріант тензора напружень відповідно до критерію деформовності за Огороднікови В.А. та оцінити вплив цього інваріанту на деформовність маловуглецевого зварювального дроту в процесі його волочіння в існуючих на практиці маршрутах волочіння і здійснити в подальшому на цій основі оцінку технологічної спадковості у вигляді залишкової пластичності, твердості тощо.

6. Отримана феноменологічна модель зміцнення маловуглецевого зварюва-

льного дроту (марок G3Si1 та Св-08Г2С) в процесі волочіння встановлює залежність коефіцієнтів кривої зміцнення (за двопараметричною функцією П. Людвіга) від інтегральної деформації витягування. Коефіцієнт деформаційного змінення n прямує асимптотично до константи, що наближається до нуля, тобто матеріал дроту з великими степенями витягування набуває властивостей ідеально пластичного матеріалу. Модуль зміцнення має властивість до експоненціального зростання. Модель також можна використати для відповідних розрахунків для реологічно подібних (до досліджених) матеріалів, що значно розширює межі її практичного використання.

7. Розроблено методику проведення вхідного контролю катанки для виробництва дроту з маловуглецевих сталей, що дозволяє за результатами випробувань на розтяг розрахувати криву течії, показники міцності, пластичності дроту на будь-якому етапі волочіння, а отже спрогнозувати механічні властивості готового дроту різних діаметрів. Якщо шукані показники для певного діаметру дроту не будуть відповідати вимогам стандартів, то необхідно провести операції, які змінять вихідні властивості металу (наприклад, здійснити відпал) або провести повторний розрахунок для іншого діаметру.

8. Результати роботи впроваджені на підприємстві ПрАТ «ПлазмаТек» (м. Вінниця), що забезпечили раціональне планування виробництва дроту різних діаметрів для кожної партії катанки та сприяли уникненню виготовлення неякісної продукції, а також у навчальний процес ВНТУ. Прогнозування механічних властивостей зварювального дроту підвищило ефективність виробництва зварювального дроту за рахунок отримання продукції з прогнозованими характеристиками якості, уникнення технологічних відмов та раціонального планування виробництва, зменшення часу на технологічну підготовку (до 100%), економії матеріальних та енергетичних ресурсів (до 10%). Крім того на етапі вхідного контролю сировини отримана модель дозволила скласти раціональний план виробництва дроту різних діаметрів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] О. В. Грушко і Ю.О. Слободянюк, «Особливості формування показників якості обмідненого зварювального маловуглецевого дроту», *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії,* №47(1166), с. 25 – 28, 2015.

[2] О. В. Грушко, Ю.О. Слободянюк і Р.С. Ткаченко, «Криві течії катанки марок G3Si1 та Св-08Г2С», *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр.*, №1(42), с. 207 – 213, 2016.

[3] O. Grushko and Y. Slobodyanyuk, «Microstructure of low-carbon steel wire and its welding and fabrication properties», *Metallurgical and Mining Industry*, №11, pp. 44-50, 2016.

[4] A.V. Grushko, V.V. Kukhar and Y.O. Slobodyanyuk, «Phenomenological model of low-carbon steels hardening during multistage drawing», *Solid State Phenomena,* Vol. 265, pp. 114-123, 2017.

[5] О.В. Грушко, О.В. Гуцалюк та Ю.О. Слободянюк «Спосіб відбору партій сталевої маловуглецевої катанки для волочіння дроту з прогнозованими механічними характеристиками», Пат.123757 Україна, МПК G01N 3/08, G01N 3/28 № u 2017 08508, Бюл. №5, заявл. 19.08.2017, опубл. 12.03.2018.

[6] О.В. Грушко і Ю.О. Слободянюк, «Механічні характеристики сталей G3SI1 та СВ-08Г2», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4, с. 103-109, 2018.

[7] О.В. Грушко, В.А. Огороднiков та Ю.О. Слободянюк, «Деформовність маловуглецевого дроту в процесі його багатоступінчастого холодного волочіння волочіння», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 103-110, 2019.

[8] О.В. Грушко та Ю.О. Слободянюк, «Підвищення ефективності технологічного процесу волочіння дроту з маловуглецевих сталей», на *1-ій Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2019»,* Вінниця, ВНТУ, 13 – 15 травня 2019, с. 80-81.

[9] О.В. Грушко та Ю.О. Слободянюк, «Особливості мікроструктури зварю-

вального дроту марки G3Si1» на *Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта»,* Одеса – Київ, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 21 – 24 червня 2016, с. 75.

[10] О.В. Грушко та Ю.О. Слободянюк, «Зміцнення маловуглецевого зварювального дроту в процесі його багатоступінчатого волочіння» на *VIII-ій Міжнародній науково-технічній конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти»,* Київ – Херсон, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 29 травня – 02 червня 2017, с. 159-160.

[11] О.В. Грушко та Ю.О. Слободянюк, *«*Карти матеріалів G3Si1 та Св-08Г2С*»* на *IX-ій Міжнародній науково-технічній конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», Київ – Херсон, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,* 28 травня – 01 червня 2018, с. 255-256.

[12] О.В. Грушко та Ю.О. Слободянюк, «Побудова кривих течій для маловуглецевої зварювальної катанки» на *Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи (МТН-2016)»,* Вінниця, ВНТУ, 4 – 10 травня 2016. [Електронний ресурс]. Режим доступу:

http://conf.inmad.vntu.edu.ua/fm/index.php?page=materials&line=25&mat=285

[13] О.В. Грушко та Ю.О. Слободянюк, «Вплив мікроструктури маловуглецевого дроту на його зварювально-технічні властивості» на *Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи (МТН-2017)»,* Вінниця, ВНТУ, 12 – 17 червня 2017. [Електронний ресурс]. Режим доступу:

http://conf.inmad.vntu.edu.ua/fm/index.php?page=materials&line=34&mat=429

[14] О.В. Грушко та Ю.О. Слободянюк, «Формування показників якості обмідненого зварювального мало вуглецевого дроту в процесі його холодного волочіння» на *XLVIII-ій Науково-технічній конференція факультету машинобудування та транспорту,* Вінниця, ВНТУ, 02 – 11 березня 2016. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-

2016/paper/view/1319

[15] О.В. Грушко, Ю.О. Слободянюк та Р.С. Ткаченко, «Феноменологічна модель зміцнення маловуглецевих сталей в процесі їх багатоступінчатого волочіння» на *XLVI -ій Науково-технічній конференція факультету машинобудування та транспорту,* Вінниця, ВНТУ, 27 – 28 березня 2017. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2017/paper/view/2730.

[16] О.В. Грушко та Ю.О. Слободянюк «Діаграми пластичності маловуглецевих сталей типу G3Si1 та Св-08Г2С» на *XLVII -ій Науково-технічній конференція факультету машинобудування та транспорту,* Вінниця, ВНТУ, 21 – 23 березня 2018. [Електронний ресурс]. Режим доступу:

https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2018/paper/view/4796.

[17] О.В. Грушко та Ю.О. Слободянюк, «Мікроструктурний аналіз дроту з маловуглецевих зварювальних сталей» на *XLVIII-ій Науково-технічній конференція факультету машинобудування та транспорту,* Вінниця, ВНТУ, 22 березня 2019. [Електронний ресурс]. Режим доступу:

https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2019/paper/view/7942

[18] В.В. Парусов, А.Б. Сычков и Э.В. Парусов, *Теоретические и технологические основы производства высокоэффективных видов катанки*. Днепропетровск, Украина: АРТ-ПРЕСС, 2012.

[19] В.П. Костюченко, М.А. Таранец, З.А. Дегтяренко, С.А. Шамин, В.Д. Кузяков, «Особенности производства сварочной омедненной проволоки Св-08Г2С», *Метизы*, №2(18), с. 60-63, 2008.

[20] И.Л. Перлин, М.З. Ерманок, *Теория волочения*. Москва, СРСР: Металлугия, 1971.

[21] Л.А. Красильников, А.Г. Лысенко, *Волочильщик проволоки*. Москва, СРСР: Металлургия, 1987.

[22] В. Бэкофен, *Процессы деформации*. Калифорния, США: Массачусетс. Пер. с англ. М.:Металлургия,1972.

[23] В.В. Битков, *Технологии и машины для производства проволоки*. Екатеринбург, Россия: УрО РАН, 2004.

[24] Ю.И. Коковихин, *Технология сталепроволочного производства*. Киев, Украина, 1995.

[25] Л.А.Красильников, А.Г. Лысенко, *Волочильщик проволоки*. М.: Металлургия, 1987.

[26] В.А. Харитонов, А.Ю. Столяров, *Совершенствование технологии производства высокопрочной проволоки для армирующих материалов автомобильных шин*. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск.гос.техн.ун-та им. Г.И. Носова, 2016.

[27] В. М. Михалевич, Тензорні моделі накопичення пошкоджень. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1998.

[28] В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк і О. В. Краєвський, «Порівняльне дослідження моделей граничних пластичних деформацій», *Вісник машинобудування та транспорту,* № 2(8), с. 56-64, 2018.

[29] В.А. Харитонов и А.Ю. Столяров, «Влияние геометрических параметров очага деформации на разрушение проволоки при волочении», *Вестник МГТУ им. Носова,* №1, с. 33-39, 2013.

[30] В.А. Харитонов, С.М. Головизин, *Проектирование режимов высокоскоростного волочения проволоки на основе моделирования*. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск.гос.техн.ун-та им. Г.И. Носова, 2011.

[31] Е.Г. Пашинская, В.Н. Варюхин, А.А. Максакова, А.И. Максаков, А.А. Толпа и А.В. Макарова, «Влияние технологии волочения со сдвигом на структуру и свойства низкоуглеродистой проволоки», *Физика и техника высоких давлений*, №1, том 24, с. 120-126, 2014.

[32] Л.В. Радионова, «Аналитические исследования влияния технологических параметров на скорость деформации при высокоскоростном волочении проволоки», *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*, №1, с. 28-33, 2014.

[33] C. S. Cetinarslan and A.Guzey, «Tensile properties of cold-drawn low-carbon steel wires under different process parameters», *Materiali in tehnologije – Materials and technology,* Vol. 47, Issue 2, pp. 245-252, 2013.

[34] N.A. Raji, O. O. Oluwole «Influence of Degree of Cold-Drawing on the Mechanical Properties of Low Carbon Steel», *Materials Sciences and Applications*, №2, pp. 1556-1563, 2011.

[35] C. S Çetinarslan «A study on influences of some process parameters on cold drawing of ferrous wires», *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences,* Vol. 19, pp. 221-228, 2012.

[36] В.А. Харитонов, А.Ю. Манякин, М.В. Чукин, Ю.А. Дрёмов, М.А. Тикеев, М.Ю. Усанов, *Совершенствование режимов деформации и инструмента при волочении круглой проволоки*. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011.

[37] А.М. Должанский и Н.Н. Очеретная «Определения маршрутов волочения при уменьшении интенсивности упрочнения проволоки», *Металлургическая и горнорудная промышленность*, №2, с.60-62, 2008.

[38] С.М. Головизин, Д.С. Терских, В.А. Харитонов и Л.Э.Пыхов «Влияние кратности и скорости волочения на качество высокоуглеродистой проволоки», *Сталь*, №11, с.46-48, 2016.

[39] С.М. Головизин, В.В.Покачалов и Л.Э. Пыхов, «Влияние скорости волочения на механические свойства высокопрочной арматурной проволоки», *Вестник МГТУ им. Носова*, №4, с.71-75, 2015.

[40] С.М. Головизин и В.В. Покачалов, «Исследования остаточных напряжений проволоки для армирования предварительно напряженных бетонных конструкций», *Моделирование и развитие процессов ОМД*, №19, с. 46-50, 2013.

[41] С.М. Головизин и Д.С. Терских, «Влияние скорости волочения и величины дельта-фактора на механические свойства высокопрочной арматурной проволоки», *Моделирование и развитие процессов ОМД*, №22, с. 144-150, 2016.

[42] Г.Л. Колгоморов, Т.В. Чернова и Ю.А. Бурдина, «Эффективность оптимизации геометрии технологического инструмента для волочения», *Вестник МГТУ им. Носова*, №3, с.55-58, 2015.

[43] Г.Л. Колгоморов, Т.В. Чернова и В.Г. Савченко, «Оптимальная геометрия и износ волочильного инструмента», *Вестник ПГТУ. Механика*, №1, с. 146-150, 2009.

[44] Г.Н. Гурьянов, «Методика расчёта оптимального угла рабочего конуса волоки при волочении круглого сплошного профиля», *Металлургическая и горнорудная промышленность*, №6, с.58-50, 2010.

[45] В.Ф. Даненко и Л.М. Гуревич, «Моделирование волочения стальной проволоки при различных углах рабочего конуса волоки», *Моделирование и развитие процессов ОМД*, №20, с. 90-97, 2014.

[46] В.А. Николаев, «Влияние технологических параметров на процесс волочения проволоки. Сообщение 1», *Металлургическая и горнорудная промышленность*, №1, с.68-72, 2015.

[47] А.Б. Иванцов и Д.О. Григоренко, «Влияние геометрических параметров монолитной волоки на пластические характеристики проволоки», *Моделирование и развитие процессов ОМД*, №20, с. 97-105, 2014.

[48] V. Tittel, M. Zelenay, Ľ. Kudelas, «Effect Of Drawing Angle Size Of A Die Onwire Drawing And Bunching Process», *Metal*, №5, pp. 23-29, 2012.

[49] И.И. Крымчанский, «Высокоскоростное волочение стальной проволоки и волочильный инструмент», *Сталь*, №12, с.41-47, 2013.

[50] J. Adamczyk, M. Suliga, J.W. Pilarczyk, M. Burdek, «The influence of die approach and bearing part of die on mechanical-technological properties of high carbon steel wires», *Archives of metallurgy and materials*, №57, pp.1105-1110, 2012.

[51] Ž. Jokovic and N. Djapic, «Optimization of *a* cold wire drawing technological process», *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, Vol. 50, Issue 5, pp. 653-660, 2015.

[52] А.Г. Корчунов и Д.В. Константинов, «Моделирование процесса волочения проволоки с учетом зависимости коэффициента трения от температуры ко-

нтактной поверхности», *Металлургические процессы и оборудование*, №4, с. 16-23, 2013.

[53] А.Г. Корчунов и Д.В. Константинов, «Влияние нестационарности коэффициента трения на характер НДС в очаге деформации при волочении проволоки», *Механическое оборудование металлургических заводов*, № 2, с.129-135, 2013.

[54] Г.Л. Колгоморов, В.Н. Трофимов и Т.В. Чернова, «Влияние улучшенного (смешанного) режима трения при волочении», *Вестник МГТУ им. Носова*, №1, с.31-33, 2013.

[55] R. Fabik and P/ Halfarová, «Impact of drawing process parameters on uniformity of strain in spring wire», *Metal*, pp.50-52, 2011.

[56] А.М. Нестеренко, А.Б. Сычков и А.Ю. Жукова, «Металловедческое исследование причин обрывности при волочении катанки из стали Св-08Г2С», *Литье и металлургия,* №1(59), с. 105-109, 2011.

[57] М.П. Барышников, М.В. Чукин, Г.С. Гун и А.Б. Бойко, «Анализ влияния неоднородности структуры на напряженно-деформированное состояние стальной проволоки в процессе волочения», *Известия ТулГУ. Технические науки*, №10 ч.1, с. 57-62, 2014.

[58] М.П. Барышников, М.В. Чукин и А.Б. Бойко. «Исследование поврежденности проволоки в процессе волочения в зависимости от расположения неметаллических включений», *Вестник ЮрГУ. Серия Металлургия*, Т.16№1, с. 46-53, 2016.

[59] Г.Н. Катылков, «Влияние качества катанки технологических параметров волочения на пластичность высокопрочной проволоки», *Литье и металлургия*, №3(31), с. 159-161, 2004.

[60] А.Н. Савенок ,Т.П. Куренкова, И.В. Борисовец и А.А. Сахарная, «Влияние поверхностных дефектов наследованных с катанки, на качество холоднотянутой проволоки», *Литье и металлургия*, №4(68), с. 35-39, 2012.

[61] А.М. Должанский, В.С. Ковалев, Е.А. Петлеваный, И.Н. Ломов и О.Б. Ломова, «Влияние поверхностных дефектов катанки на качество проволоки и

условия волочения», *Металлургическая и горнорудная промышленность,* №1, с.49-51, 2007.

[62] А.М. Должанский, Е.А. Петлеваный и К.Л. Суслова, «Влияние поверхностных дефектов стальной катанки на стабильность процесса волочения и закономерности их деформирования. Сообщение 2», *Металлургическая и горнорудная промышленность*, №2, с.39-42, 2014.

[63] О. В. Грушко, «Феноменологічні аспекти створення карт матеріалів для процесів холодного пластичного деформування», *Обработка материалов давлением: сб. науч. тр.*, №1(34), с. 85-95, 2013.

[64] M. W. Swift, «Plastic instability under plane stress», *Int. J. Mech. Phys. Solid*, № 1, pp. 1–18, 1952.

[65] P. Ludwik, *Elemente der technologischen Mechanik*. J. Springer-Verlag, Berlin, 1909.

[66] E. Voce, «A practical strain-hardening function», *Metallurgia*, №51(307), pp.219-226, 1955.

[67] В. А. Кроха, *Упрочнение металлов при холодной пластической деформации,* М.: Машиностроение, 1980.

[68] П. И. Полухин, Г. Я. Гун, и А. М. Галкин, *Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: справочник*. М.: Металлургия, 1983.

[69] А. В. Третьяков, Г. К. Трофимов и М. К. Гурьянова, *Механические свойства сталей и сплавов при пластиче-ском деформировании : справочник*. М.: Машиностроение, 1971.

[70] Г. А. Смирнов-Аляев и В. П. Чикидовский, *Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением*. Л. : Машиностроение, 1972.

[71] П. Людвиг, «Основы технологической механики», *Расчеты на прочность: сборник научных трудов*, вып. 15, с. 130–166, 1970.

[72] В. А. Огородников, *Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении.* К., СРСР: УМК ВО, 1989.

[73] В. А. Огородников, А. В. Грушко и А. В. Гуцалюк, «Выбор критериев деформируемости при оценке использованного ресурса пластичности в процессах

обработки металлов давлением», *Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : зб. наук. пр. Серія : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії,* № 43 (1086), с. 127–136, 2014.

[74] В.А. Огороднiков, О. Ю. Співак та О. В. Грушко, *Деформація волочінням і фізико-механічні властивості тонких термопарних дротів.* Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2014.

[75] А.В. Грушко, *Карты материалов в холодной обработке давлением*. Винница: ВНТУ, 2015.

[76] В. А. Матвийчук и И. С. Алиев, *Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов: Монография*. Краматорск: ДГМА, 2009.

[77] В. А. Матвійчук та В. М. Михалевич, «Розвиток процесів локального деформування» у *Теорія та практика обробки металів тиском*. *Монографія.* Запоріжжя, Україна: Моторсіч, 2016, с. 339-360.

[78] В.А. Тітов, Н.К. Злочевська, О.Я. Качан, А.В. Тітов та Е.В. Кондратюк, *Технологічна механіка забезпечення міцності та якості деталей пластичним деформуванням.* К., Україна: КВІЦ, 2016.

[79] А.В. Тітов та В. М. Михалевич, «Аналітичне розв’язання основної задачі теорії деформівності*», Обробка матеріалів тиском.* № 2 (45), с. 3-10, 2017.

[80] В.М. Михалевич і Ю. В. Добранюк, *Моделювання напружено-деформованого та граничного станів поверхні циліндричних зразків при торцевому стисненні*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2013.

[81] V. Kraievskyi, V. Mykhalevych, Y. Dobranyuk, D. Sawicki and K. Mussabekov, "Selection of optimal path of strain rate change in the process of multistage hot deformation under the condition of the equal duration of stages", *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, Proc. SPIE 10808, 2018.

[82]. Г. Д. Дель, *Технологическая механика*. М. : Машиностроение, 1978.

[83]. П. Бриджмен*, Исследование больших пластических деформаций и разрыва*. М.: Наука, 1955.

[84] В.Я. Кононенко, *Сварка в среде защитных газов плавящимся и неплавящимся электродом*. Киев: ТОВ «Ника-Принт», 2007.

[85] В.А. Медюшко, «Некоторые особенности производства и применения проволоки типа СВ-08Г2С», *Метизы*, №2(18), с.64-66, 2009.

[86] В.А Медюшко, О.Н. Разорёнов, В.И. Криворотов и Ю.В. Медюшко, «Анализ показателей качества сварочной проволоки методом статистической оценки стабильности ее химического состава», *Индустрия*, №2(49), с.76-77, 2007.

[87] Н.М. Воропай и М.В. Бринюк, «Технологические свойства омедненной сварочной проволоки», *Сварщик*, №4, с. 16-20, 2002.

[88] С.Т. Римский, В.И. Галинич и Р.Н.Шевчук, «Методика определения количественных показателей, характеризирующих сварочно-технологические свойства проволоки при механизированной сварке в защитных газах», *Сварщик*, №1, С.16 – 22, 2015.

[89] А.Б. Сычков, А.Н. Завалищин и А.Б. Перчаткин, «Структурообразование в катанке повышенной деформируемости из низкоуглеродистой легированной стали Св-08Г2С с микродобавками бора», *Вестник МГТУ им. Носова*, №2, С.50-53, 2012.

[90] М. Кижнер, А.Б. Сычков, М.А. Шекшеев, С.О. Малашкин и Г.Я. Камалова, «Влияние металлургических факторов и термической обработки на формирование структуры сварочной катанки», *Вестник МГТУ им. Носова*, №3, с. 55-70, 2016.

[91] И.В. Деревянченко, А.Б. Сычков, М.А. Жигарев, А.Б. Перчаткин, О.Л. Кучеренко, В.В. Парусов и О.В. Парусов, «Производство катанки качественного сортамента в условиях ОАО «Молдавский металлургический завод», *Металлургическая и горнорудная промышленность*, №1, с.9-14, 2010.

[92] Е.Г. Пашинская, А.В. Завдовеев, Л.С. Метлов, Ю.И. Непочатых, А.А. Максакова, и В.М. Ткаченко, «Нетривиальные изменения физико-механических свойств и структуры малоуглеродистой проволоки, полученной прокаткой со сдвигом и холодным волочением», *Materials Physics and Mechanics*, № 2, том 24, с. 163-177, 2015.

[93] В.В. Парусов, О.В. Парусов, А.Б. Сычков, М.А. Жигарев, С.Ю. Жукова, А.В. Перегудов, «Исследование к способности удалению окалины с поверхности катанки из стали Св-08Г2С», *Металлургическая и горнорудная промышленность,* №5, с.70-72, 2006

[94] А.Б. Сычков, «Исследование качества окалины и способность ее к удалению перед волочением катанки», *Вестник МГТУ им. Носова*, №1, с.51-61, 2008.

[95] А.Б. Сычков, М.А. Жигарев, С.Ю. Жукова, А.В. Перчаткин, А.В, Перегудов, А.М. Нестеренко и В.В. Парусов, *Формирование оптимальных свойств окалины на поверхности катанки*. Бендеры: Полиграфист, 2008.

[96] В.А. Луценко, М.А. Муриков, В.А. Поляков, В.А. Кондрашкин, В.И. Грицаенко, «Особенности и перспективы производства катанки сварочного назначения с высокой технологической пластичностью», *Литье и металлургия,* №3(66), с. 56-58, 2012.

[97] Д. В.Хван, *Повышение эффективности в обработке металлов давлением*. Воронеж : Изд-во Воронеж. ун-та, 1995.

ДОДАТКИ

Додаток А

Акти впровадження

ПрАТ «ПлазмаТек»
Пошт. адреса: 21036, м.Вінниця, вул. Максимовича, 18
Юр. адреса: 21036, м.Вінниця, вул. Максимовича, 18
тел/факс: +38(0432) 55-49-71, 55-49-72 E-mail: info@plasmatec.com.ua, www.plasmatec.com.ua

ЗАТВЕРДЖУЮ
Генеральний директор ПрАТ «ПлазмаТек»
_____ В.П. Слободянюк
«30» сер 2018 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів дисертаційної роботи Слободянюк Юлії Олегівни
на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук

Даним актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи Слободянюк Ю.О. впроваджені в ПрАТ «ПлазмаТек» при розробці технологічної документації волочіння дроту з сталевої маловуглецецевої катанки.

Теоретичні та експериментально-теоретичні моделі використані для:

- відбору партій сталевої маловуглецевої катанки марок G3Si1 та Св-08Г2С для волочіння дроту з прогнозованими механічними характеристиками;
- визначення технологічного паспорту матеріалів G3Si1 та Св-08Г2С в стані постачання, що складається з кривої течії, діаграми пластичності, кривої Баушингера та градуювального графіка твердість-напруження-деформації;
- експрес-аналізу щодо визначення зварювально-технологічних властивостей зварювального дроту за коефіцієнтом зміцнення катанки.

Розроблені методики дали змогу:

- на етапі вхідного контролю катанки за допомогою випробування на розтяг розподілити всю партію сировини згідно плану виробництва та скорегувати його з врахуванням виготовлення дроту різних діаметрів без операції проміжного відпалу. Сировина, яка не задовольняє вимоги нормативної документації відправляється на відпал. Похибка даних розрахунків не перевищує 10% та дозволяє на етапі вхідного контролю відбраковувати бухти катанки та уникнути економічні ризики, що пов'язані з виготовленням неякісної продукції;
- визначити, що хімічний склад в межах допусків, які визначені відповідними стандартами, чинить незначний вплив на механічні характеристики катанки. Пластичність сталі G3Si1 значно вища, ніж Св-08Г2С, тому її прийнято використовувати без проміжних відпалів;
- прогнозувати показники якості готової продукції за зварювально-технологічними властивостями дроту (стабільністю горіння дуги) без проведення трудомісткого мікроструктурного та хімічного аналізу.

Впроваджені рекомендації забезпечили раціональне планування виробництва дроту різних діаметрів для кожної партії катанки та сприяли уникненню виготовлення неякісної продукції. Економічний ефект залежить від конкретних обсягів виробництва та показників якості металу та не визначався.

Даний акт призначено для пред'явлення в спеціалізовані вчені ради з захисту дисертацій і не є підставою для висунення фінансових вимог.

Начальник технологічного бюро А.О. Андріїшин

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор з НПР по ОНП та НМЗ
Вінницького національного
технічного університету

_____ О.М. Васілевський
«20» ____06____ 2019 р.

ДОВІДКА
про використання результатів кандидатської дисертації
Слободянюк Юлії Олегівни
в навчальному процесі ВНТУ

Комісія в складі зав. кафедри опору матеріалів та прикладної механіки (ОМПМ), д.т.н., проф. Огороднікова В.А. та професора кафедри ОМПМ, к. т. н., доц. Федотова В.О. встановила, що результати теоретичних та експериментальних досліджень, що містяться в дисертаційні роботі Слободянюк Ю.О. „Підвищення ефективності волочіння зварювального дроту з маловуглецевих сталей на основі розвитку теорії деформовності та удосконалення моделі матеріалу" використані в навчальному процесі Вінницького національного технічного університету у вигляді:

- методик експериментальних досліджень процесу волочіння, що дозволяє прогнозувати показники якості готової продукції за допомогою випробувань на розтяг;
- методик прогнозування показників якості продукції за зварювально-технологічними властивостями дроту без проведення трудомісткого мікроструктурного та хімічного аналізу;
- результатів теоретичного аналізу та моделювання методом скінченних елеменетів процесу волочіння дроту.

Наведені результати використані в лекційному матеріалі, при проведенні лабораторних робіт з таких дисциплін: „Опір матеріалів", „Механіка матеріалів і конструкцій".

Довідка призначена для надання в спеціалізовану раду Д 05.052.03 при Вінницькому національному технічному університеті.

Зав. кафедри ОМПМ, д.т.н., проф. _____ Огороднікова В. А.

Професор кафедри ОМПМ, к. т. н., доц. _____ Федотов В.О.

Додаток Б

Моделювання методом скінченних елементів

```
$# LS-DYNA Keyword file created by LS-PrePost(R) V4.2 - 01Apr2016(16:00)
$# Created on Jul-07-2018 (12:37:44)
*KEYWORD
*TITLE
$#                                                                         title
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
*CONTROL_CONTACT
$#  slsfac    rwpnal    islchk    shlthk    penopt    thkchg     orien    enmass
       0.1       1.0         1         0         1         1         1         0
$#  usrstr    usrfrc     nsbcs    interm     xpene     ssthk      ecdt   tiedprj
         0         0        10         0       4.0         0         0         0
$#   sfric     dfric       edc       vfc        th     th_sf    pen_sf
       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
$#  ignore    frceng   skiprwg    outseg   spotstp   spotdel   spothin
         0         0         0         0         0         0       0.0
$#    isym    nserod    rwgaps    rwgdth     rwksf      icov    swradf    ithoff
         0         0         1       0.0       1.0         0       0.0         0
$#  shledg    pstiff    ithcnt    tdcnof     ftall    unused    shltrw
         0         0         0         0         0                 0.0
*CONTROL_ENERGY
$#    hgen      rwen    slnten     rylen
         2         2         2         2
*CONTROL_SHELL
$#  wrpang     esort     irnxx    istupd    theory       bwc     miter      proj
      20.0         1        -1         1         2         2         1         0
$# rotascl    intgrd    lamsht    cstyp6    tshell
       1.0         0         0         1         0         0         0         0
$# psstupd   sidt4tu     cntco    itsflg    irquad
         0         0         0         0         2
*CONTROL_TERMINATION
$#  endtim    endcyc     dtmin    endeng    endmas
     0.016         0       0.0       0.0       0.0
*CONTROL_TIMESTEP
$#  dtinit    tssfac      isdo    tslimt     dt2ms      lctm     erode     ms1st
       0.0       0.9         0       0.0       0.0         0         0         0
$#  dt2msf   dt2mslc     imscl    unused    unused     rmscl
       0.0         0         0                           0.0
*DATABASE_BNDOUT
$#      dt    binary      lcur     ioopt
1.60000E-6         0         0         1
*DATABASE_DEFGEO
$#      dt    binary      lcur     ioopt
1.60000E-6         0         0         1
*DATABASE_DEFORC
$#      dt    binary      lcur     ioopt
1.60000E-6         0         0         1
*DATABASE_GCEOUT
$#      dt    binary      lcur     ioopt
1.60000E-6         0         0         1
*DATABASE_GLSTAT
```

```
$#      dt    binary      lcur     ioopt
1.60000E-6         0         0         1
*DATABASE_JNTFORC
$#      dt    binary      lcur     ioopt
1.60000E-6         0         0         1
*DATABASE_MATSUM
$#      dt    binary      lcur     ioopt
1.60000E-6         0         0         1
*DATABASE_NCFORC
$#      dt    binary      lcur     ioopt
1.60000E-6         0         0         1
*DATABASE_RBDOUT
$#      dt    binary      lcur     ioopt
1.60000E-6         0         0         1
*DATABASE_RCFORC
$#      dt    binary      lcur     ioopt
1.60000E-6         0         0         1
*DATABASE_RWFORC
$#      dt    binary      lcur     ioopt
1.60000E-6         0         0         1
*DATABASE_SLEOUT
$#      dt    binary      lcur     ioopt
1.60000E-6         0         0         1
*DATABASE_SPCFORC
$#      dt    binary      lcur     ioopt
1.60000E-6         0         0         1
*DATABASE_SWFORC
$#      dt    binary      lcur     ioopt
1.60000E-6         0         0         1
*DATABASE_BINARY_D3DUMP
$#    cycl      lcdt      beam     npltc    psetid
  474375.0         0         0         0         0
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$#      dt      lcdt      beam     npltc    psetid
5.00000E-6         0         0         0         0
$#   ioopt
         0
*DATABASE_BINARY_D3THDT
$#      dt      lcdt      beam     npltc    psetid
1.60000E-6         0         0         0         0
*DATABASE_FORMAT
$#   iform   ibinary
         0         0
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID
$#     pid       dof       vad      lcid        sf       vid     death     birth
        16         2         0         1       1.0         0       0.0       0.0
$#     pid       dof       vad      lcid        sf       vid     death     birth
        15         2         0         2       1.0         0       0.0       0.0
$#     pid       dof       vad      lcid        sf       vid     death     birth
        14         2         0         3       1.0         0       0.0       0.0
$#     pid       dof       vad      lcid        sf       vid     death     birth
        13         2         0         4       1.0         0       0.0       0.0
$#     pid       dof       vad      lcid        sf       vid     death     birth
        12         2         0         5       1.0         0       0.0       0.0
$#     pid       dof       vad      lcid        sf       vid     death     birth
        11         2         0         6       1.0         0       0.0       0.0
```

```
$#     pid       dof       vad      lcid        sf       vid     death     birth
        10         2         0         7       1.0         0       0.0       0.0
$#     pid       dof       vad      lcid        sf       vid     death     birth
         9         2         0         8       1.0         0       0.0       0.0
$#     pid       dof       vad      lcid        sf       vid     death     birth
         8         2         0         9       1.0         0       0.0       0.0
$#     pid       dof       vad      lcid        sf       vid     death     birth
         7         2         0        10       1.0         0       0.0       0.0
$#     pid       dof       vad      lcid        sf       vid     death     birth
         6         2         0        11       1.0         0       0.0       0.0
$#     pid       dof       vad      lcid        sf       vid     death     birth
         5         2         0        12       1.0         0       0.0       0.0
$#     pid       dof       vad      lcid        sf       vid     death     birth
         4         2         0        13       1.0         0       0.0       0.0
$#     pid       dof       vad      lcid        sf       vid     death     birth
         3         2         0        14       1.0         0       0.0       0.0
$#     pid       dof       vad      lcid        sf       vid     death     birth
         2         2         0        15       1.0         0       0.0       0.0
$#     pid       dof       vad      lcid        sf       vid     death     birth
         1         2         0        16       1.0         0       0.0       0.0
*CONTACT_2D_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#     cid                                                                 title
         11-17
$#    sids      sidm     sfact      freq        fs        fd        dc     membs
        17         1       1.0        50       0.1      0.08       0.0         6
$#  tbirth    tdeath       sos       som       nds       ndm       cof      init
       0.0     0.001       1.0       1.0         0         0         0         0
*SET_PART_LIST
$#     sid       da1       da2       da3       da4    solver
        17       0.0       0.0       0.0       0.0MECH
$#    pid1      pid2      pid3      pid4      pid5      pid6      pid7      pid8
        17         0         0         0         0         0         0         0
*SET_PART_LIST
$#     sid       da1       da2       da3       da4    solver
         1       0.0       0.0       0.0       0.0MECH
$#    pid1      pid2      pid3      pid4      pid5      pid6      pid7      pid8
         1         0         0         0         0         0         0         0
*CONTACT_2D_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#     cid                                                                 title
         22-17
$#    sids      sidm     sfact      freq        fs        fd        dc     membs
        17         2       1.0        50       0.1      0.08       0.0         6
$#  tbirth    tdeath       sos       som       nds       ndm       cof      init
     0.001     0.002       1.0       1.0         0         0         0         0
*SET_PART_LIST
$#     sid       da1       da2       da3       da4    solver
         2       0.0       0.0       0.0       0.0MECH
$#    pid1      pid2      pid3      pid4      pid5      pid6      pid7      pid8
         2         0         0         0         0         0         0         0
*CONTACT_2D_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#     cid                                                                 title
         33-17
$#    sids      sidm     sfact      freq        fs        fd        dc     membs
        17         3       1.0        50       0.1      0.08       0.0         6
$#  tbirth    tdeath       sos       som       nds       ndm       cof      init
     0.002     0.003       1.0       1.0         0         0         0         0
```

```
*SET_PART_LIST
$#     sid       da1       da2       da3       da4    solver
         3       0.0       0.0       0.0       0.0MECH
$#    pid1      pid2      pid3      pid4      pid5      pid6      pid7      pid8
         3         0         0         0         0         0         0         0
*CONTACT_2D_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#     cid                                                              title
          44-17
$#    sids      sidm     sfact      freq        fs        fd        dc     membs
          17         4       1.0        50       0.1      0.08       0.0         6
$#  tbirth    tdeath       sos       som       nds       ndm       cof      init
     0.003     0.004       1.0       1.0         0         0         0         0
*SET_PART_LIST
$#     sid       da1       da2       da3       da4    solver
         4       0.0       0.0       0.0       0.0MECH
$#    pid1      pid2      pid3      pid4      pid5      pid6      pid7      pid8
         4         0         0         0         0         0         0         0
*CONTACT_2D_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#     cid                                                              title
          55-17
$#    sids      sidm     sfact      freq        fs        fd        dc     membs
          17         5       1.0        50       0.1      0.08       0.0         6
$#  tbirth    tdeath       sos       som       nds       ndm       cof      init
     0.004     0.005       1.0       1.0         0         0         0         0
*SET_PART_LIST
$#     sid       da1       da2       da3       da4    solver
         5       0.0       0.0       0.0       0.0MECH
$#    pid1      pid2      pid3      pid4      pid5      pid6      pid7      pid8
         5         0         0         0         0         0         0         0
*CONTACT_2D_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#     cid                                                              title
          66-17
$#    sids      sidm     sfact      freq        fs        fd        dc     membs
          17         6       1.0        50       0.1      0.08       0.0         6
$#  tbirth    tdeath       sos       som       nds       ndm       cof      init
     0.005     0.006       1.0       1.0         0         0         0         0
*SET_PART_LIST
$#     sid       da1       da2       da3       da4    solver
         6       0.0       0.0       0.0       0.0MECH
$#    pid1      pid2      pid3      pid4      pid5      pid6      pid7      pid8
         6         0         0         0         0         0         0         0
*CONTACT_2D_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#     cid                                                              title
          77-17
$#    sids      sidm     sfact      freq        fs        fd        dc     membs
          17         7       1.0        50       0.1      0.08       0.0         6
$#  tbirth    tdeath       sos       som       nds       ndm       cof      init
     0.006     0.007       1.0       1.0         0         0         0         0
*SET_PART_LIST
$#     sid       da1       da2       da3       da4    solver
         7       0.0       0.0       0.0       0.0MECH
$#    pid1      pid2      pid3      pid4      pid5      pid6      pid7      pid8
         7         0         0         0         0         0         0         0
*CONTACT_2D_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#     cid                                                              title
          88-17
```

```
$#    sids      sidm     sfact      freq        fs        fd        dc     membs
        17         8       1.0        50       0.1      0.08       0.0         6
$#  tbirth    tdeath       sos       som       nds       ndm       cof      init
     0.007     0.008       1.0       1.0         0         0         0         0
*SET_PART_LIST
$#     sid       da1       da2       da3       da4    solver
         8       0.0       0.0       0.0       0.0MECH
$#    pid1      pid2      pid3      pid4      pid5      pid6      pid7      pid8
         8         0         0         0         0         0         0         0
*CONTACT_2D_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#     cid                                                               title
         99-17
$#    sids      sidm     sfact      freq        fs        fd        dc     membs
        17         9       1.0        50       0.1      0.08       0.0         6
$#  tbirth    tdeath       sos       som       nds       ndm       cof      init
     0.008     0.009       1.0       1.0         0         0         0         0
*SET_PART_LIST
$#     sid       da1       da2       da3       da4    solver
         9       0.0       0.0       0.0       0.0MECH
$#    pid1      pid2      pid3      pid4      pid5      pid6      pid7      pid8
         9         0         0         0         0         0         0         0
*CONTACT_2D_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#     cid                                                               title
        1010-17
$#    sids      sidm     sfact      freq        fs        fd        dc     membs
        17        10       1.0        50       0.1      0.08       0.0         6
$#  tbirth    tdeath       sos       som       nds       ndm       cof      init
     0.009      0.01       1.0       1.0         0         0         0         0
*SET_PART_LIST
$#     sid       da1       da2       da3       da4    solver
        10       0.0       0.0       0.0       0.0MECH
$#    pid1      pid2      pid3      pid4      pid5      pid6      pid7      pid8
        10         0         0         0         0         0         0         0
*CONTACT_2D_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#     cid                                                               title
        1111-17
$#    sids      sidm     sfact      freq        fs        fd        dc     membs
        17        11       1.0        50       0.1      0.08       0.0         6
$#  tbirth    tdeath       sos       som       nds       ndm       cof      init
      0.01     0.011       1.0       1.0         0         0         0         0
*SET_PART_LIST
$#     sid       da1       da2       da3       da4    solver
        11       0.0       0.0       0.0       0.0MECH
$#    pid1      pid2      pid3      pid4      pid5      pid6      pid7      pid8
        11         0         0         0         0         0         0         0
*CONTACT_2D_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#     cid                                                               title
        1212-17
$#    sids      sidm     sfact      freq        fs        fd        dc     membs
        17        12       1.0        50       0.1      0.08       0.0         6
$#  tbirth    tdeath       sos       som       nds       ndm       cof      init
     0.011     0.012       1.0       1.0         0         0         0         0
*SET_PART_LIST
$#     sid       da1       da2       da3       da4    solver
        12       0.0       0.0       0.0       0.0MECH
$#    pid1      pid2      pid3      pid4      pid5      pid6      pid7      pid8
```

```
        12         0         0         0         0         0         0         0
*CONTACT_2D_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#     cid                                                             title
        1313-17
$#    sids      sidm     sfact      freq        fs        fd        dc     membs
        17        13       1.0        50       0.1      0.08       0.0         6
$#  tbirth    tdeath       sos       som       nds       ndm       cof      init
     0.012     0.013       1.0       1.0         0         0         0         0
*SET_PART_LIST
$#     sid       da1       da2       da3       da4    solver
        13       0.0       0.0       0.0       0.0MECH
$#    pid1      pid2      pid3      pid4      pid5      pid6      pid7      pid8
        13         0         0         0         0         0         0         0
*CONTACT_2D_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#     cid                                                             title
        1414-17
$#    sids      sidm     sfact      freq        fs        fd        dc     membs
        17        14       1.0        50       0.1      0.08       0.0         6
$#  tbirth    tdeath       sos       som       nds       ndm       cof      init
     0.013     0.014       1.0       1.0         0         0         0         0
*SET_PART_LIST
$#     sid       da1       da2       da3       da4    solver
        14       0.0       0.0       0.0       0.0MECH
$#    pid1      pid2      pid3      pid4      pid5      pid6      pid7      pid8
        14         0         0         0         0         0         0         0
*CONTACT_2D_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#     cid                                                             title
        1515-17
$#    sids      sidm     sfact      freq        fs        fd        dc     membs
        17        15       1.0        50       0.1      0.08       0.0         6
$#  tbirth    tdeath       sos       som       nds       ndm       cof      init
     0.014     0.015       1.0       1.0         0         0         0         0
*SET_PART_LIST
$#     sid       da1       da2       da3       da4    solver
        15       0.0       0.0       0.0       0.0MECH
$#    pid1      pid2      pid3      pid4      pid5      pid6      pid7      pid8
        15         0         0         0         0         0         0         0
*CONTACT_2D_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#     cid                                                             title
        1616-17
$#    sids      sidm     sfact      freq        fs        fd        dc     membs
        17        16       1.0        50       0.1      0.08       0.0         6
$#  tbirth    tdeath       sos       som       nds       ndm       cof      init
     0.015     0.016       1.0       1.0         0         0         0         0
*SET_PART_LIST
$#     sid       da1       da2       da3       da4    solver
        16       0.0       0.0       0.0       0.0MECH
$#    pid1      pid2      pid3      pid4      pid5      pid6      pid7      pid8
        16         0         0         0         0         0         0         0
*PART
$#                                                                      title
Part          1 for Mat         1 and Elem Type         1
$#     pid     secid       mid     eosid      hgid      grav    adpopt      tmid
         1         1         1         0         1         0         0         0
*SECTION_SHELL
$#   secid    elform      shrf       nip     propt   qr/irid     icomp     setyp
```

```
         1        14       1.0         1       1.0         0         0         1
$#      t1        t2        t3        t4      nloc     marea      idof    edgset
       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0         0
*MAT_RIGID
$#     mid        ro         e        pr         n    couple         m     alias
         18.00000E-8  200000.0       0.3       0.0       0.0       0.0
$#     cmo      con1      con2
       1.0         6         7
$#lco or a1        a2        a3        v1        v2        v3
       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
*HOURGLASS
$#    hgid       ihq        qm       ibq        q1        q2    qb/vdc        qw
         1         0       0.1         0       1.5      0.06       0.0       0.0
*PART
$#                                                                         title
Part          2 for Mat         2 and Elem Type         1
$#     pid     secid       mid     eosid      hgid      grav    adpopt      tmid
         2         1         2         0         2         0         0         0
*MAT_RIGID
$#     mid        ro         e        pr         n    couple         m     alias
         28.00000E-8  200000.0       0.3       0.0       0.0       0.0
$#     cmo      con1      con2
       1.0         6         7
$#lco or a1        a2        a3        v1        v2        v3
       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
*HOURGLASS
$#    hgid       ihq        qm       ibq        q1        q2    qb/vdc        qw
         2         0       0.1         0       1.5      0.06       0.0       0.0
*PART
$#                                                                         title
Part          3 for Mat         3 and Elem Type         1
$#     pid     secid       mid     eosid      hgid      grav    adpopt      tmid
         3         1         3         0         3         0         0         0
*MAT_RIGID
$#     mid        ro         e        pr         n    couple         m     alias
         38.00000E-8  200000.0       0.3       0.0       0.0       0.0
$#     cmo      con1      con2
       1.0         6         7
$#lco or a1        a2        a3        v1        v2        v3
       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
*HOURGLASS
$#    hgid       ihq        qm       ibq        q1        q2    qb/vdc        qw
         3         0       0.1         0       1.5      0.06       0.0       0.0
*PART
$#                                                                         title
Part          4 for Mat         4 and Elem Type         1
$#     pid     secid       mid     eosid      hgid      grav    adpopt      tmid
         4         1         4         0         4         0         0         0
*MAT_RIGID
$#     mid        ro         e        pr         n    couple         m     alias
         48.00000E-8  200000.0       0.3       0.0       0.0       0.0
$#     cmo      con1      con2
       1.0         6         7
$#lco or a1        a2        a3        v1        v2        v3
       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
*HOURGLASS
```

```
$#    hgid       ihq        qm       ibq        q1        q2    qb/vdc        qw
         4         0       0.1         0       1.5      0.06       0.0       0.0
*PART
$#                                                                          title
Part          5 for Mat         5 and Elem Type         1
$#     pid     secid       mid     eosid      hgid      grav    adpopt      tmid
         5         1         5         0         5         0         0         0
*MAT_RIGID
$#     mid        ro         e        pr         n    couple         m     alias
        58.00000E-8  200000.0       0.3       0.0       0.0       0.0
$#     cmo      con1      con2
       1.0         6         7
$#lco or a1        a2        a3        v1        v2        v3
       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
*HOURGLASS
$#    hgid       ihq        qm       ibq        q1        q2    qb/vdc        qw
         5         0       0.1         0       1.5      0.06       0.0       0.0
*PART
$#                                                                          title
Part          6 for Mat         6 and Elem Type         1
$#     pid     secid       mid     eosid      hgid      grav    adpopt      tmid
         6         1         6         0         6         0         0         0
*MAT_RIGID
$#     mid        ro         e        pr         n    couple         m     alias
        68.00000E-8  200000.0       0.3       0.0       0.0       0.0
$#     cmo      con1      con2
       1.0         6         7
$#lco or a1        a2        a3        v1        v2        v3
       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
*HOURGLASS
$#    hgid       ihq        qm       ibq        q1        q2    qb/vdc        qw
         6         0       0.1         0       1.5      0.06       0.0       0.0
*PART
$#                                                                          title
Part          7 for Mat         7 and Elem Type         1
$#     pid     secid       mid     eosid      hgid      grav    adpopt      tmid
         7         1         7         0         7         0         0         0
*MAT_RIGID
$#     mid        ro         e        pr         n    couple         m     alias
        78.00000E-8  200000.0       0.3       0.0       0.0       0.0
$#     cmo      con1      con2
       1.0         6         7
$#lco or a1        a2        a3        v1        v2        v3
       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
*HOURGLASS
$#    hgid       ihq        qm       ibq        q1        q2    qb/vdc        qw
         7         0       0.1         0       1.5      0.06       0.0       0.0
*PART
$#                                                                          title
Part          8 for Mat         8 and Elem Type         1
$#     pid     secid       mid     eosid      hgid      grav    adpopt      tmid
         8         1         8         0         8         0         0         0
*MAT_RIGID
$#     mid        ro         e        pr         n    couple         m     alias
        88.00000E-8  200000.0       0.3       0.0       0.0       0.0
$#     cmo      con1      con2
```

```
       1.0         6         7
$#lco or a1        a2        a3        v1        v2        v3
       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
*HOURGLASS
$#    hgid       ihq        qm       ibq        q1        q2    qb/vdc        qw
         8         0       0.1         0       1.5      0.06       0.0       0.0
*PART
$#                                                                         title
Part          9 for Mat         9 and Elem Type         1
$#     pid     secid       mid     eosid      hgid      grav    adpopt      tmid
         9         1         9         0         9         0         0         0
*MAT_RIGID
$#     mid        ro         e        pr         n    couple         m     alias
         98.00000E-8  200000.0       0.3       0.0       0.0       0.0
$#     cmo      con1      con2
       1.0         6         7
$#lco or a1        a2        a3        v1        v2        v3
       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
*HOURGLASS
$#    hgid       ihq        qm       ibq        q1        q2    qb/vdc        qw
         9         0       0.1         0       1.5      0.06       0.0       0.0
*PART
$#                                                                         title
Part         10 for Mat        10 and Elem Type         1
$#     pid     secid       mid     eosid      hgid      grav    adpopt      tmid
        10         1        10         0        10         0         0         0
*MAT_RIGID
$#     mid        ro         e        pr         n    couple         m     alias
        108.00000E-8  200000.0       0.3       0.0       0.0       0.0
$#     cmo      con1      con2
       1.0         6         7
$#lco or a1        a2        a3        v1        v2        v3
       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
*HOURGLASS
$#    hgid       ihq        qm       ibq        q1        q2    qb/vdc        qw
        10         0       0.1         0       1.5      0.06       0.0       0.0
*PART
$#                                                                         title
Part         11 for Mat        11 and Elem Type         1
$#     pid     secid       mid     eosid      hgid      grav    adpopt      tmid
        11         1        11         0        11         0         0         0
*MAT_RIGID
$#     mid        ro         e        pr         n    couple         m     alias
        118.00000E-8  200000.0       0.3       0.0       0.0       0.0
$#     cmo      con1      con2
       1.0         6         7
$#lco or a1        a2        a3        v1        v2        v3
       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
*HOURGLASS
$#    hgid       ihq        qm       ibq        q1        q2    qb/vdc        qw
        11         0       0.1         0       1.5      0.06       0.0       0.0
*PART
$#                                                                         title
Part         12 for Mat        12 and Elem Type         1
$#     pid     secid       mid     eosid      hgid      grav    adpopt      tmid
        12         1        12         0        12         0         0         0
```

```
*MAT_RIGID
$#     mid        ro         e        pr         n    couple         m     alias
        128.00000E-8  200000.0       0.3       0.0       0.0       0.0
$#     cmo      con1      con2
       1.0         6         7
$#lco or a1        a2        a3        v1        v2        v3
       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
*HOURGLASS
$#    hgid       ihq        qm       ibq        q1        q2    qb/vdc        qw
        12         0       0.1         0       1.5      0.06       0.0       0.0
*PART
$#                                                                         title
Part         13 for Mat        13 and Elem Type         1
$#     pid     secid       mid     eosid      hgid      grav    adpopt      tmid
        13         1        13         0        13         0         0         0
*MAT_RIGID
$#     mid        ro         e        pr         n    couple         m     alias
        138.00000E-8  200000.0       0.3       0.0       0.0       0.0
$#     cmo      con1      con2
       1.0         6         7
$#lco or a1        a2        a3        v1        v2        v3
       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
*HOURGLASS
$#    hgid       ihq        qm       ibq        q1        q2    qb/vdc        qw
        13         0       0.1         0       1.5      0.06       0.0       0.0
*PART
$#                                                                         title
Part         14 for Mat        14 and Elem Type         1
$#     pid     secid       mid     eosid      hgid      grav    adpopt      tmid
        14         1        14         0        14         0         0         0
*MAT_RIGID
$#     mid        ro         e        pr         n    couple         m     alias
        148.00000E-8  200000.0       0.3       0.0       0.0       0.0
$#     cmo      con1      con2
       1.0         6         7
$#lco or a1        a2        a3        v1        v2        v3
       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
*HOURGLASS
$#    hgid       ihq        qm       ibq        q1        q2    qb/vdc        qw
        14         0       0.1         0       1.5      0.06       0.0       0.0
*PART
$#                                                                         title
Part         15 for Mat        15 and Elem Type         1
$#     pid     secid       mid     eosid      hgid      grav    adpopt      tmid
        15         1        15         0        15         0         0         0
*MAT_RIGID
$#     mid        ro         e        pr         n    couple         m     alias
        158.00000E-8  200000.0       0.3       0.0       0.0       0.0
$#     cmo      con1      con2
       1.0         6         7
$#lco or a1        a2        a3        v1        v2        v3
       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
*HOURGLASS
$#    hgid       ihq        qm       ibq        q1        q2    qb/vdc        qw
        15         0       0.1         0       1.5      0.06       0.0       0.0
*PART
```

```
$#                                                                         title
Part         16 for Mat        16 and Elem Type         1
$#     pid     secid       mid     eosid      hgid      grav    adpopt      tmid
        16         1        16         0        16         0         0         0
*MAT_RIGID
$#     mid        ro         e        pr         n    couple         m     alias
       168.00000E-8  200000.0       0.3       0.0       0.0       0.0
$#     cmo      con1      con2
       1.0         6         7
$#lco or a1        a2        a3        v1        v2        v3
       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
*HOURGLASS
$#    hgid       ihq        qm       ibq        q1        q2    qb/vdc        qw
        16         0       0.1         0       1.5      0.06       0.0       0.0
*PART
$#                                                                         title
Part         17 for Mat        17 and Elem Type         1
$#     pid     secid       mid     eosid      hgid      grav    adpopt      tmid
        17         1        17         0        17         0         0         0
*MAT_POWER_LAW_PLASTICITY
$#     mid        ro         e        pr         k         n       src       srp
       178.00000E-8  200000.0       0.3     900.0       0.2       0.0       0.0
$#    sigy        vp      epsf
       0.0       0.0       0.0
*HOURGLASS
$#    hgid       ihq        qm       ibq        q1        q2    qb/vdc        qw
        17         0       0.1         0       1.5      0.06       0.0       0.0
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$                                  RIGID BOUNDRIES                          $
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
*DEFINE_CURVE
$#    lcid      sidr       sfa       sfo      offa      offo    dattyp     lcint
         1         0       1.0       1.0       0.0       0.0         0         0
$#               a1                  o1
             0.015                 0.0
           0.01501            -20000.0
             0.016            -20000.0
*DEFINE_CURVE
$#    lcid      sidr       sfa       sfo      offa      offo    dattyp     lcint
         2         0       1.0       1.0       0.0       0.0         0         0
$#               a1                  o1
             0.014                 0.0
           0.01401            -20000.0
             0.015            -20000.0
*DEFINE_CURVE
$#    lcid      sidr       sfa       sfo      offa      offo    dattyp     lcint
         3         0       1.0       1.0       0.0       0.0         0         0
$#               a1                  o1
             0.013                 0.0
           0.01301            -20000.0
             0.014            -20000.0
*DEFINE_CURVE
$#    lcid      sidr       sfa       sfo      offa      offo    dattyp     lcint
         4         0       1.0       1.0       0.0       0.0         0         0
$#               a1                  o1
```

```
             0.012               0.0
           0.01201            -20000.0
             0.013            -20000.0
*DEFINE_CURVE
$#    lcid      sidr       sfa       sfo      offa      offo    dattyp     lcint
         5         0       1.0       1.0       0.0       0.0         0         0
$#              a1                 o1
             0.011               0.0
           0.01101            -20000.0
             0.012            -20000.0
*DEFINE_CURVE
$#    lcid      sidr       sfa       sfo      offa      offo    dattyp     lcint
         6         0       1.0       1.0       0.0       0.0         0         0
$#              a1                 o1
              0.01               0.0
           0.01001            -20000.0
             0.011            -20000.0
*DEFINE_CURVE
$#    lcid      sidr       sfa       sfo      offa      offo    dattyp     lcint
         7         0       1.0       1.0       0.0       0.0         0         0
$#              a1                 o1
             0.009               0.0
           0.00901            -20000.0
              0.01            -20000.0
*DEFINE_CURVE
$#    lcid      sidr       sfa       sfo      offa      offo    dattyp     lcint
         8         0       1.0       1.0       0.0       0.0         0         0
$#              a1                 o1
             0.008               0.0
           0.00801            -20000.0
             0.009            -20000.0
*DEFINE_CURVE
$#    lcid      sidr       sfa       sfo      offa      offo    dattyp     lcint
         9         0       1.0       1.0       0.0       0.0         0         0
$#              a1                 o1
             0.007               0.0
           0.00701            -20000.0
             0.008            -20000.0
*DEFINE_CURVE
$#    lcid      sidr       sfa       sfo      offa      offo    dattyp     lcint
        10         0       1.0       1.0       0.0       0.0         0         0
$#              a1                 o1
             0.006               0.0
           0.00601            -20000.0
             0.007            -20000.0
*DEFINE_CURVE
$#    lcid      sidr       sfa       sfo      offa      offo    dattyp     lcint
        11         0       1.0       1.0       0.0       0.0         0         0
$#              a1                 o1
             0.005               0.0
           0.00501            -20000.0
             0.006            -20000.0
*DEFINE_CURVE
$#    lcid      sidr       sfa       sfo      offa      offo    dattyp     lcint
        12         0       1.0       1.0       0.0       0.0         0         0
$#              a1                 o1
```

```
              0.004                0.0
            0.00401            -20000.0
              0.005            -20000.0
*DEFINE_CURVE
$#    lcid      sidr       sfa       sfo      offa      offo    dattyp     lcint
        13         0       1.0       1.0       0.0       0.0         0         0
$#                a1                 o1
              0.003                0.0
            0.00301            -20000.0
              0.004            -20000.0
*DEFINE_CURVE
$#    lcid      sidr       sfa       sfo      offa      offo    dattyp     lcint
        14         0       1.0       1.0       0.0       0.0         0         0
$#                a1                 o1
              0.002                0.0
            0.00201            -20000.0
              0.003            -20000.0
*DEFINE_CURVE
$#    lcid      sidr       sfa       sfo      offa      offo    dattyp     lcint
        15         0       1.0       1.0       0.0       0.0         0         0
$#                a1                 o1
              0.001                0.0
            0.00101            -20000.0
              0.002            -20000.0
*DEFINE_CURVE
$#    lcid      sidr       sfa       sfo      offa      offo    dattyp     lcint
        16         0       1.0       1.0       0.0       0.0         0         0
$#                a1                 o1
               0.0                 0.0
   9.9999997474e-006            -20000.0
              0.001            -20000.0
$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$                                NODE DEFINITIONS                               $
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
*NODE
    3844 2.340000000E+00 5.000000000E+00 0.000000000E+00       0       0
    3845 3.865522000E+00 5.000000000E+00 0.000000000E+00       0       0
.............................
.............................
   20931 2.700000000E+00-5.000000000E-02 0.000000000E+00       0       0
$
$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$                             ELEMENT DEFINITIONS                               $
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
*ELEMENT_SHELL
    2801       1    3844    3945    3847    3845
    2802       1    3945    3944    3848    3847
.............................
.............................
   18725      17   20931    5806    5532    5808
$
```

```
$$$
```

Додаток В

Список публікацій здобувача за темою дисертації

[1] О. В. Грушко і Ю.О. Слободянюк, «Особливості формування показників якості обмідненого зварювального маловуглецевого дроту», *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії,* №47(1166), с. 25 – 28, 2015.

[2] О. В. Грушко, Ю.О. Слободянюк і Р.С. Ткаченко, «Криві течії катанки марок G3Si1 та Св-08Г2С», *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр.*, №1(42), с. 207 – 213, 2016.

[3] O. Grushko and Y. Slobodyanyuk, «Microstructure of low-carbon steel wire and its welding and fabrication properties», *Metallurgical and Mining Industry*, №11, pp. 44-50, 2016.

[4] A.V. Grushko, V.V. Kukhar and Y.O. Slobodyanyuk, «Phenomenological model of low-carbon steels hardening during multistage drawing», *Solid State Phenomena,* Vol. 265, pp. 114-123, 2017.

[5] О.В. Грушко, О.В. Гуцалюк та Ю.О. Слободянюк «Спосіб відбору партій сталевої маловуглецевої катанки для волочіння дроту з прогнозованими механічними характеристиками», Пат.123757 Україна, МПК G01N 3/08, G01N 3/28 № u 2017 08508, Бюл. №5, заявл. 19.08.2017, опубл. 12.03.2018.

[6] О.В. Грушко і Ю.О. Слободянюк, «Механічні характеристики сталей G3SI1 та СВ-08Г2», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4, с. 103-109, 2018.

[7] О.В. Грушко, В.А. Огороднiков та Ю.О. Слободянюк, «Деформовність маловуглецевого дроту в процесі його багатоступінчастого холодного волочіння волочіння», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 103-110, 2019.

[8] О.В. Грушко та Ю.О. Слободянюк, «Підвищення ефективності технологічного процесу волочіння дроту з маловуглецевих сталей», на *1-ій Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2019»,* Вінниця, ВНТУ, 13 – 15 травня 2019, с. 80-81.

[9] О.В. Грушко та Ю.О. Слободянюк, «Особливості мікроструктури зварювального дроту марки G3Si1» на *Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта»,* Одеса – Київ, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 21 – 24 червня 2016, с. 75.

[10] О.В. Грушко та Ю.О. Слободянюк, «Зміцнення маловуглецевого зварювального дроту в процесі його багатоступінчатого волочіння» на *VIII-ій Міжнародній науково-технічній конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти»,* Київ – Херсон, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 29 травня – 02 червня 2017, с. 159-160.

[11] О.В. Грушко та Ю.О. Слободянюк, *«*Карти матеріалів G3Si1 та Св-08Г2С*»* на *IX-ій Міжнародній науково-технічній конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», Київ – Херсон, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,* 28 травня – 01 червня 2018, с. 255-256.

[12] О.В. Грушко та Ю.О. Слободянюк, «Побудова кривих течій для маловуглецевої зварювальної катанки» на *Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи (МТН-2016)»,* Вінниця, ВНТУ, 4 – 10 травня 2016. [Електронний ресурс]. Режим доступу:
http://conf.inmad.vntu.edu.ua/fm/index.php?page=materials&line=25&mat=285

[13] О.В. Грушко та Ю.О. Слободянюк, «Вплив мікроструктури маловуглецевого дроту на його зварювально-технічні властивості» на *Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи (МТН-2017)»,* Вінниця, ВНТУ, 12 – 17 червня 2017. [Електронний ресурс]. Режим доступу:
http://conf.inmad.vntu.edu.ua/fm/index.php?page=materials&line=34&mat=429

[14] О.В. Грушко та Ю.О. Слободянюк, «Формування показників якості обмідненого зварювального мало вуглецевого дроту в процесі його холодного волочіння» на *XLVIII-ій Науково-технічній конференція факультету машинобудування та транспорту,* Вінниця, ВНТУ, 02 – 11 березня 2016. [Електронний ресурс].

Режим доступу: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2016/paper/view/1319

[15] О.В. Грушко, Ю.О. Слободянюк та Р.С. Ткаченко, «Феноменологічна модель зміцнення маловуглецевих сталей в процесі їх багатоступінчатого волочіння» на *XLVI -ій Науково-технічній конференція факультету машинобудування та транспорту,* Вінниця, ВНТУ, 27 – 28 березня 2017. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2017/paper/view/2730.

[16] О.В. Грушко та Ю.О. Слободянюк «Діаграми пластичності маловуглецевих сталей типу G3Si1 та Св-08Г2С» на *XLVII -ій Науково-технічній конференція факультету машинобудування та транспорту,* Вінниця, ВНТУ, 21 – 23 березня 2018. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2018/paper/view/4796.

[17] О.В. Грушко та Ю.О. Слободянюк, «Мікроструктурний аналіз дроту з маловуглецевих зварювальних сталей» на *XLVIII-ій Науково-технічній конференція факультету машинобудування та транспорту,* Вінниця, ВНТУ, 22 березня 2019. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2019/paper/view/7942