

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 високоєфективним 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 сталевих 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 технологічного 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 необхідними 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 градуовального 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. Градувальний графік твердість ( $HV$ )–напруження ( $\sigma_i$ )–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  $\chi$  та  $\mu_\sigma$  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 Огородніковим 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, пластичність, 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 hot 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( $\sigma_i$ ) –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  $\chi$  and  $\mu_\sigma$  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 sub-standard 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 «ХПИ». 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 сталеві 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. Огородніков та Ю.О. Слободянюк, «Деформовність маловуглецевого дроту в процесі його багатоступінчастого холодного 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 I 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 влас- тивості готового дроту.....	37
1.4.1 Вплив величини обтиснення та кількості переходів на ме- ханічні 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 катан- ки.....	47
1.9 Показники якості зварювального дроту.....	49
1.10 Висновки до розділу та постановка задач дослідження.....	55
РОЗДІЛ II МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ. МАТЕРІАЛИ ТА ОБЛАДНАННЯ. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПАСПОРТ МАТЕРІАЛІВ G3Si1 ТА СВ-08Г2С.....	57
2.1 Особливості технології виготовлення маловуглецевого зварюваль- ного 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 градувальний графік твердість-напруження-деформації катанки марок G3Si1 та Св-08Г2С.....	81
2.4	Висновки до розділу.....	83
РОЗДІЛ III 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 СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА ФЕНОМЕНОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ ЗМІ- ЦНЕННЯ 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 ПРО- цесі 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 сталевих 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 технологічного 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 необхідними 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 кожен 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 напрямку 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 градуовального 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 градуовального 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 науково-метричної 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.

## 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 сталеві 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. Огородніков та Ю.О. Слободянюк, «Деформовність маловуглецевого дроту в процесі його багатоступінчастого холодного 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: Металлургия, 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. Cetinarıslan 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 Çetinarıslan «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 волокни 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 волокни», *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 волокни на пластические характеристики проволоки», *Моделирование и развитие процессов ОМД*, №20, с. 97-105, 2014.

[48] V. Tittel, M. Zelenay, L. 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. Сулова, «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.: Metallurgia, 1983.

[69] А. В. Третьяков, Г. К. Трофимов и М. К. Гурьянова, *Механические свойства сталей и сплавов при пластическом 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. Огородніков, О. Ю. Співак та О. В. Грушко, *Деформація волочинням і фізико-механічні властивості тонких термопарних дрітв. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2014.*

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

[76] В. А. Матвійчук 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 торцево-му 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, характеризующих сварочно-технологические свойства проволоки при механизированной сварке в защитных газах», *Сварщик*, №1, С.16 – 22, 2015.

[89] А.Б. Сычков, А.Н. Завалицин 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. Завдоев, 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.