

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

СЛОБОДЯНЮК ЮЛІЯ ОЛЕГІВНА

УДК 621.778.01

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

05.03.05 – процеси та машини обробки тиском

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2019

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Грушко Олександр Володимирович,
Вінницький національний технічний університет,
професор кафедри опору матеріалів та прикладної
механіки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Матвійчук Віктор Андрійович,
Вінницький національний аграрний університет,
завідувач кафедри електроенергетики, електротехніки та
електромеханіки;

кандидат технічних наук, доцент
Тітов Андрій Вячеславович,
Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
доцент кафедри прикладної гідроаеромеханіки та
механотроніки.

Захист відбудеться «12» грудня 2019 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.03 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021 м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ГНК.

Автореферат розісланий «11» листопада 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

С.І. Сухоруков

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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 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 виклю-

ченням 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 завдання 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 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 градувального 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 багатоступінчастого 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-й Міжнародній науково-технічній конференції «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії» (м. Харків, 2015р.); XIX-й 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-й Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2019» (м. Вінниця, 2019р.). Дисертаційна робота в повному обсязі доповідалась на розширених 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. Се-

ред 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність роботи, наведена загальна характеристика, сформульована мета і задачі дослідження, виділені предмет і об'єкт дослідження, вказані наукова новизна і практична цінність роботи, їх апробація, впровадження і особистий внесок здобувача.

У першому розділі розглянуто сучасні підходи щодо проектування процесу волочіння зварювального дроту. Процес волочіння дроту досліджували вчені Битков В.В., Гурьянов Г.Н., Должанський А.М., Драгобецький В.В., Ерманок М.З., Коковіхін Ю.І., Колгоморов Г.Л., Красильников Л.А., Перлін І.Л., Огінський Й. К., Огородніков В.А., Харитонов В.А., Шаповал О.О., Cetinarşlan C.S. та інші.

При проектуванні чи удосконаленні технології виробництва дроту потрібно враховувати вимоги стандартів, 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 (на сьогодні чинним в Україні), у США, Китаї та у країнах Тихоокеанського простору згідно американського стандарту AWS A5.18:2005. В результаті виявлено та проаналізовано основні чинники, які впливають та формують показники якості обмідненого дроту, що можна умовно поділити на три групи: показники якості сировини, показники якості, що нормуються при виробництві дроту, показники якості, що нормуються при виробництві дроту (рис.1)

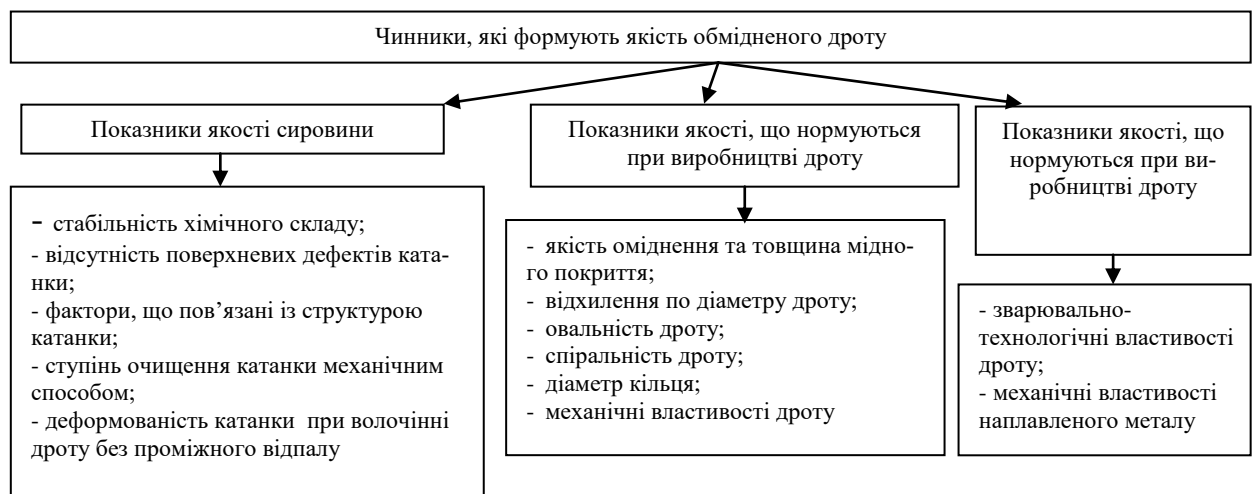


Рисунок 1 – Класифікація чинників, які формують якість обмідненого дроту

Сучасна технологія виробництва маловуглецевого дроту не передбачає операції проміжного відпалу, що дозволяє скоротити процес виробництва та збільшити його продуктивність. В зв'язку з цим пред'являються чіткі вимоги до катанки та виникає гостра необхідність у максимальному використанні пластичності матеріалів G3Si1 та Св-08Г2С з метою розробки раціональної технології виробництва дроту даних марок.

Коли постає задача оптимізувати процес волочіння, в першу чергу технологи звертають увагу на принцип побудови існуючого маршруту. Існує безліч підходів щодо побудови маршруту волочіння, зокрема великого поширення набули принципи побудови маршрутів з використанням середньої витяжки за кожен прохід. Для зручності розрахунку таких маршрутів побудовані номограми, які описані у роботах Коковіхіна Ю.І., Красильникова Л.А., Перліна І.Л. 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 Харитонова В.А. і Столярова А.Ю. пропонують розрахунок маршрутів волочіння на основі критерію руйнування Кокрафта-Латама, але очевидним його недоліком є наявність всього однієї константи матеріалу, яка визначає пластичність, що, очевидно, не достатньо для коректної оцінки деформовності при значних пластичних деформаціях.

При розробці маршруту волочіння необхідно також враховувати вплив основних показників процесу на механічні властивості готового дроту, а саме: величини обтиснення, кількості переходів, швидкості волочіння, кута волоки та коефіцієнта тертя. Цьому присвячені роботи вчених Головизин С.М., Adamczyk J., Cetinarşlan C.S., Fabík R. та Jokovic Ž. Проте детальної інформації про прогнозування механічних властивостей готового дроту на основі механічних властивостей сировини інформації не вказано.

Значно скорочують продуктивність виробництва дроту обриви катанки в процесі волочіння. Причиною такого явища може бути відмінність мікроструктури зазначених ділянок, що вказано у роботах Баришнікова М.П., Савенка А.Н., Должанського А.М. Однак вплив мікроструктури дроту та його механічних властивостей на зварювально-технологічні властивості інформації не відображено.

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 (Грушко О. В.). Для побудови кривих течій зварювальної катанки використовують діаграми розтягу, які отримані за допомогою випробувань на розтяг. Вибір апроксимуючої функції диктується реологічними особливостями матеріалу, зручністю практичного використання 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

$$\sigma_i = Ae_i^n, \quad (1)$$

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

Трипараметрична функція Г. Свіфта має дещо вищу точність, ніж (1) за рахунок наявності деформаційного параметра e_0

$$\sigma_i = A_2 (e_0 + e_i)^{n_2}, \quad (2)$$

аналогічною до (2) є залежність П. Людвіга

$$\sigma_i = B + A_1 e_i^{n_1}, \quad (3)$$

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

Зауважимо, що моделі (1)–(3) є ядром побудови низки моделей матеріалів, що мають властивість до анізотропного зміцнення (із використанням кривої Баушингера) для коректного моделювання процесу волочіння МСЕ.

Як показано в низці робіт (Алієва Л.І., Грушко О.В., Огородніков В.А., Сивак Р.І., Михалевич В.М., Матвійчук В.А. та ін.) 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.

$$\psi = \int_0^{e_u^*} \left(1 + 0,2 \operatorname{arctg} \left(\frac{d\eta}{de_u} + \frac{d\chi}{de_u} \right) \right) \frac{e_u^{0,2 \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_u}}}{[e_p(\eta, \chi)]^{1+0,2 \operatorname{arctg} \left(\frac{d\eta}{de_u} + \frac{d\chi}{de_u} \right)}} de_u \leq 1. \quad (4)$$

Не зважаючи на те, що в роботах Колмогорова В.Л., Огороднікова В.А., Співака О.Ю. досліджувались питання оцінки деформовності при волочінні із використанням феноменологічної теорії деформовності, представлені методи отримання шляхів деформування не дають можливості з необхідною для практики точністю визначити граничні технологічні параметри процесу багатоступінчастого волочіння маловуглецевого зварювального дроту.

Використання критеріїв деформовності вимагає дослідження діаграми пластичності матеріалу, яку для умов плоского напруженого стану можна отримати шляхом випробування відповідних зразків на розтяг, стиск та кручення. Апроксимація діаграми пластичності матеріалів в області зміни показника напруженого стану $-3 \leq \eta \leq 0$ за Г.Д. Делем має вигляд:

$$e_p = \frac{e_{p-1} e_{p0} \exp(-\eta)}{e_{p-1} + \eta [e_{p-1} - 2,72 e_{p0}]}, \quad (5)$$

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

Апроксимація за В.А. Огородніковим має вигляд:

$$e_p = e_{p0} \exp(-\lambda_{1,2} \eta), \quad (6)$$

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

η – показник напруженого стану:

$$\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i} \quad (7)$$

На підставі аналітичного огляду поставлені мета і задачі дослідження.

У другому розділі обґрунтовано вибір напрямку та методів дослідження.

Сформовано карту матеріалів G3Si1 та Св-08Г2С в стані постачання до якого було включено наступні функції: криву течії, стандартні механічні характеристики, діаграму пластичності, криву Баушингера та градувальник графік твердість-напруження-деформації.

Для побудови кривих течій було відібрано по п'ять зразків різних партій та постачальників для кожної марки матеріалу. Криві течій було отримано за допомогою випробувань на розтяг та апроксимовано за допомогою функцій (1)–(3). Зокрема, на рис. 2 представлено криві течії для катанки з сталей G3Si1 та Св-08Г2С, що апроксимовані за залежністю (1). Номери кривих на рисунку 2 відповідають номерам зразків, зазначених в таблиці 1.

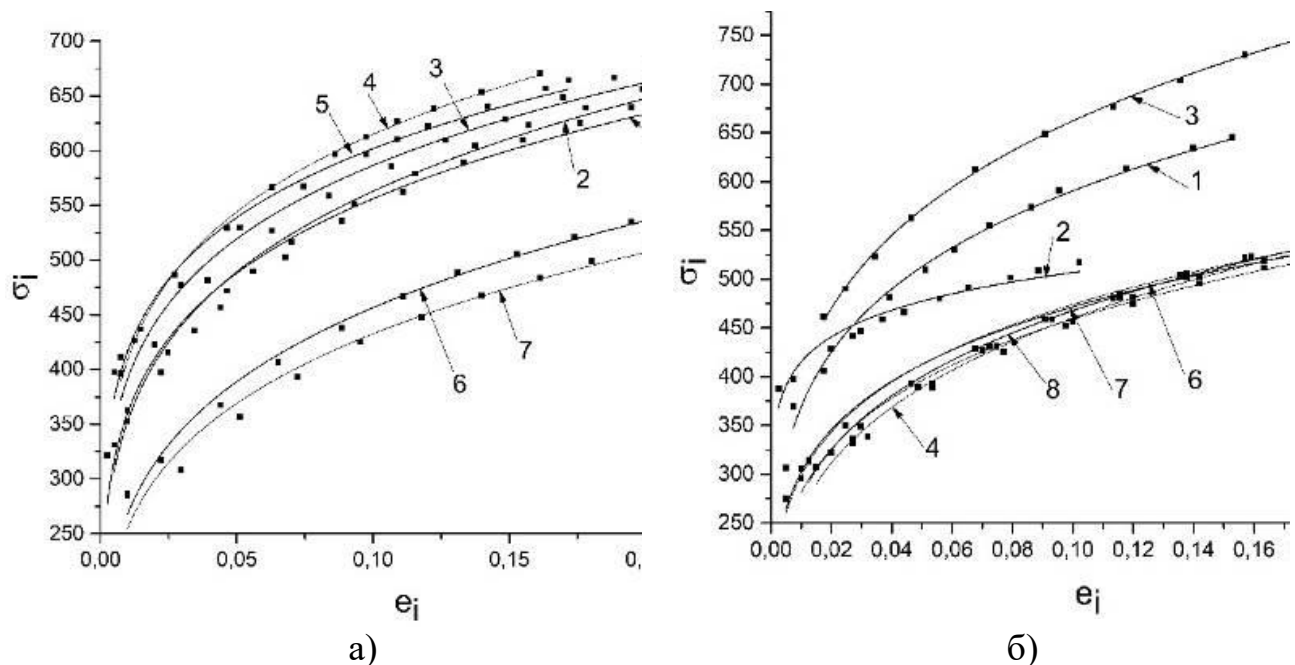


Рисунок 2 – Криві течії апроксимовані за (1) показані суцільною лінією (σ_i вимірюється в МПа): а) G3Si1; б) Св-08Г2С

У таблицях 1 та 2 наведено значення коефіцієнтів апроксимації за функціями (1), (2) та (3) та скорегованого коефіцієнта детермінації R_{adj}^2 .

Криві течії (а також 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.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнтів апроксимації для матеріалу G3Si1

№ зразка/ № кривої	Функція (1)			Функція (2)				Функція (3)			
	A, МПа	n	R_{adj}^2	A ₂ , МПа	e ₀	n ₂	R_{adj}^2	B, МПа	A ₁ , МПа	n ₁	R_{adj}^2
1	858	0,188	0,974	967	-0,011	0,258	0,999	257	798	0,442	0,997
2	897	0,202	0,988	981	-0,009	0,254	0,999	232	817	0,399	0,999
3	878	0,175	0,964	1021	-0,028	0,279	0,995	343	792	0,535	0,993
4	924	0,177	0,998	953	-0,003	0,193	0,999	163	816	0,257	0,999
5	869	0,159	0,983	963	-0,012	0,217	0,999	306	736	0,403	0,998
6	778	0,231	0,992	840	-0,011	0,283	0,999	170	713	0,405	0,998
7	733	0,229	0,972	838	-0,023	0,326	0,993	214	696	0,523	0,99

Таблиця 2 – Значення коефіцієнтів апроксимації для матеріалу Св-08Г2С

№ зразка/ № кривої	Функція (1)			Функція (2)				Функція (3)			
	A, МПа	n	R_{adj}^2	A ₂ , МПа	e ₀	n ₂	R_{adj}^2	B, МПа	A ₁ , МПа	n ₁	R_{adj}^2
1	944	0,204	0,989	1020	-0,008	0,245	0,996	214	861	0,360	0,995
2	619	0,087	0,946	724	-0,015	0,155	0,998	357	495	0,487	0,996
3	1081	0,213	0,999	1097	-0,003	0,223	0,999	99	1010	0,254	0,999
4	804	0,242	0,992	862	-0,014	0,293	0,997	170	727	0,407	0,996
5	749	0,213	0,994	802	-0,01	0,257	0,999	174	667	0,377	0,999
6	753	0,201	0,989	827	-0,009	0,256	0,999	196	691	0,404	0,999
7	736	0,193	0,951	906	-0,029	0,328	0,993	261	771	0,587	0,989
8	787	0,226	0,989	858	-0,015	0,286	0,994	198	708	0,428	0,992

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. Тому, при проектуванні процесу волочіння, його моделюванні варто користуватись саме кривими в стані відпалу.

Для побудови діаграми пластичності були проведені випробування на розтяг, стиск та кручення відповідних зразків. За результатами проведених випробувань здійснено розрахунок необхідних даних для побудови діаграми пластичності, які наведено у таблиці 3

Таблиця 3 – Значення експериментальних даних для побудови діаграми пластичності

Марка матеріалу	Значення граничних деформацій			Коефіцієнти чутливості	
	e _p (η = -1)	e _p (η = 0)	e _p (η = 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

Для сталі G3Si1 функція (5) набуде вигляду:

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

Для Св-08Г2С –

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

Також діаграму пластичності було апроксимовано за функцією (6). Розраховані коефіцієнти чутливості $\lambda_{1,2}$ наведено у таблиці 3.

На рис. 3 наведено побудовану діаграму пластичності для сталей G3Si1 та Св-08Г2С. Так, пластичність сталей G3Si1 та Св-08Г2С добре описується функціями (4) та (5) у від'ємній області показника напруженого стану η . У додатній області показника η при розрахунку за загальновідомою формулою П. Бріджмена при розтягу спостерігається суттєве збільшення пластичності від η . Тобто функція, що описує пластичність при даних значеннях ϵ немонотонною, що в свою чергу несе за собою невизначеність при апроксимації за формулою П. Бріджмена. Діаграма пластичності сталі G3Si1 свідчить про те, що катанка має значно кращу здатність до переробки, ніж матеріал Св-08Г2С – це підтверджується виробничим досвідом.

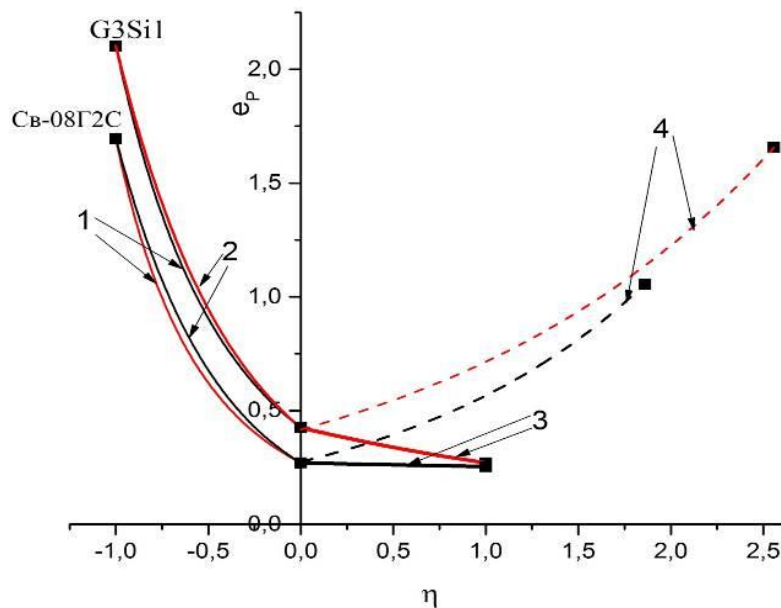


Рисунок 3 – Діаграми пластичності сталей G3Si1 та Св-08Г2С:
1 – апроксимація за (5), 2,3 – за (6)

Оскільки 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.

Для побудови кривої Баушингера були проведені випробування зразків матеріалів сталей G3Si1 та Св-08Г2С на розтяг, де зразки катанки розтягували до різних значень ϵ_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:

$$\beta(e_i) = \beta_0 + (1 - \beta_0) \cdot \exp[-k \cdot e_i^2], \quad (8)$$

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

Графік залежності коефіцієнта Баушингера від попередньої пластичної деформації наведено на рис. 4.

Значення β_0 та k для G3Si1 склали $\beta_0 = 0,164$; $k = 2046$; для Св-08Г2С – $\beta_0 = 0,143$; $k = 2122$.

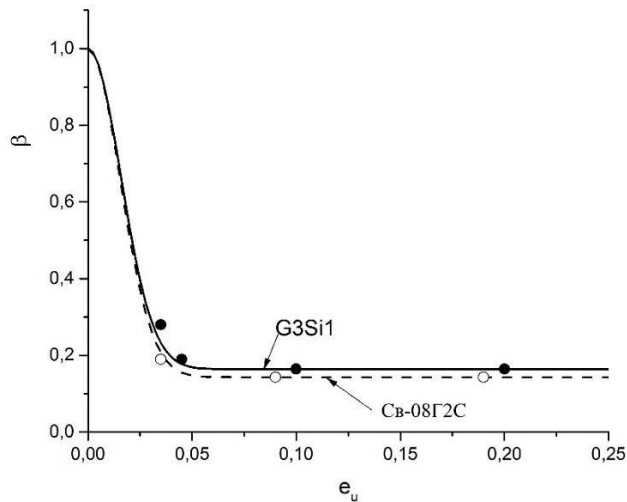


Рисунок 4 – Графік залежності коефіцієнта Баушингера від попередньої пластичної деформації

Оцінка технологічної спадковості для процесу волочіння може бути здійснена за твердістю дроту після технологічної переробки. На рис.5 наведено градувальний графік твердість (HV)–напруження (σ_i)–деформації (e_i), що дає змогу оцінити твердість дроту після його волочіння, що є важливим при прогнозуванні якості продукції.

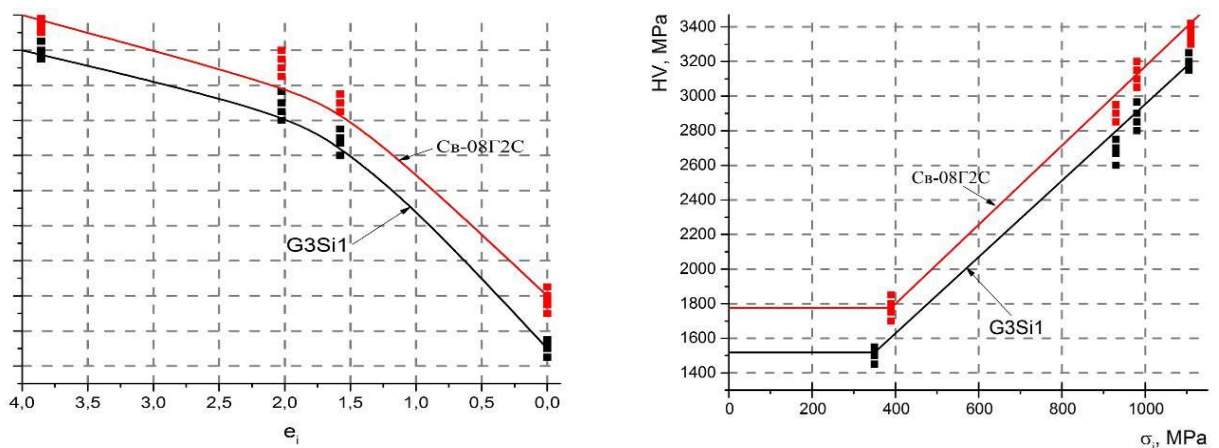


Рисунок 5 – Градувальний графік матеріалу G3Si1 твердість (HV)–напруження (σ_i)–деформації (e_i)

Експерименти проводилися на випробувальному устаткуванні: машина розривна для статичних випробувань Р5М; гідравлічний прес ПММ-125; машина випробувальна типу МК-50; спектрометр оптично-емісійного типу SpectroMAXx; мікротвердомірі М-400 фірми LECO.

Експериментальні 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 рентгівського спектрометра з дисперсією по енергії рентгівських 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.д

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

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 4. Зразок №5 (для порівняння) взято з дроту китайського виробника, який має попит на ринку зварювальних матеріалів та добрі зварювально-технологічні властивості.

Таблиця 4 – 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

В результаті проведеного аналізу було виявлено, що мікроструктура зразків 1, 3 та 5 є дисперсною ферито-карбідною сумішшю, при чому карбіди рівномірно розташовані по всьому полю зору шліфа. Мікроструктура зразків 2 та 4 є також ферито-карбідною сумішшю проте тут спостерігаються зкоагульовані карбіди у вигляді темних ділянок мікроструктури. З метою виявлення відмінностей в мікроструктурі зразків були проведені додаткові дослідження методами електронної мікроскопії (при збільшенні $\times 2000$). На рис. 6 представлені результати мікроскопічних досліджень. Звідси випливає, що для зразка 2, який має у своїй мікроструктурі зкоагульовані карбіди характерна наявність пор, які представлені на рис. 6а чорними плямами, а й найбільші відзначені стрілками, а у мікроструктурі зразка 5 (рис. 6б) пор немає. Ймовірно пори зумовлені газовою природою. Тому було проведено додаткові дослідження для даних зразків на газовий аналіз (кисень, водень, азот). В результаті

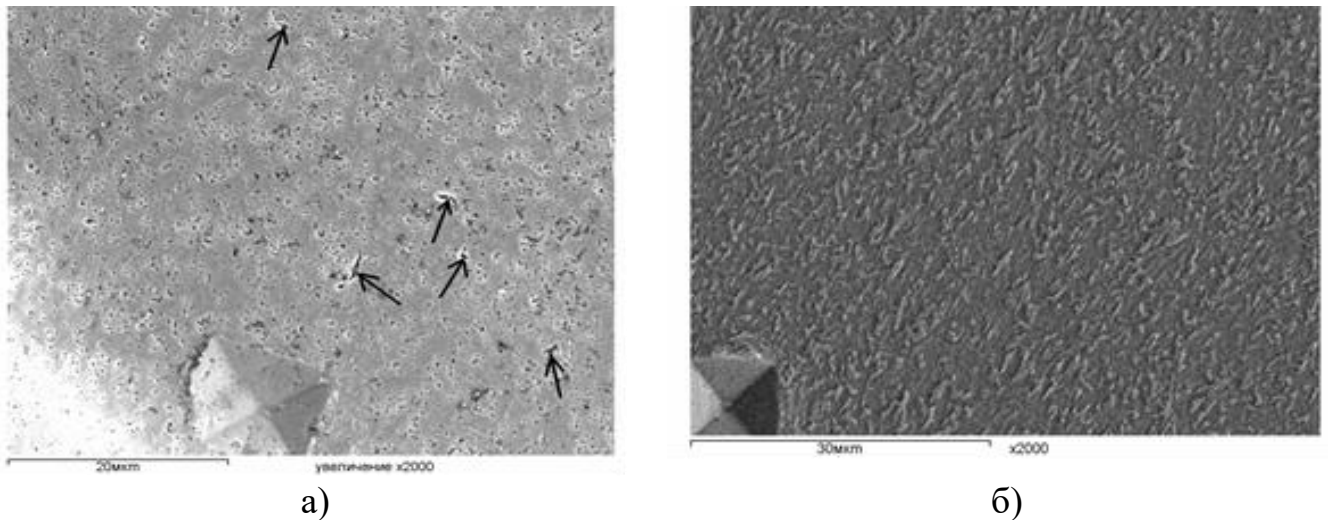


Рисунок 6 – Мікроскопічний аналіз зварювального дроту $\times 2000$:
а) зразок 2, б) зразок 5

даних досліджень було виявлено, що значення кисню і водню у випробуваних зразків близькі, значення азоту значно відрізняються (зразок 2 – 0,0107%; зразок 5 – 0,0050%). Підвищений вміст азоту в зразку із нестабільним горінням дуги свідчить, що виявлена пористість обумовлена саме цим газом.

З метою з'ясування механічних властивостей катанки плавок 21181 та 260399 було проведено випробування на розтяг для побудови кривих течій, які були апроксимовані за степенною функцією П. Людвіга. 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 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. Це доцільно враховувати при розробці вхідного контролю катанки, зокрема, якщо в результаті випробувань на розтяг бухт катанки коефіцієнт зміцнення n менше за 0,18, то з даної бухти катанки виготовлення дроту належної якості діаметром 0,8 мм. є малоймовірним. Врахування даного факту дозволить скорегувати план виробництва дроту різних діаметрів, уникнути простоїв обладнання, що пов'язані з обривами дроту в процесі волочіння, а також зменшити час на технологічну підготовку.

У четвертому розділі виконано аналіз розподілу деформацій по перерізу, особливостей шляхів деформування, а також здійснено оцінку деформовності дроту. Отримана феноменологічна модель зміцнення маловуглецевих сталей в процесі їх багатоступінчатого волочіння.

Моделювання МСЕ типового процесу волочіння маловуглецевого дроту було здійснено за допомогою програми LS-DYNA із врахуванням реальної карти матеріалу G3Si1 (рис.7)

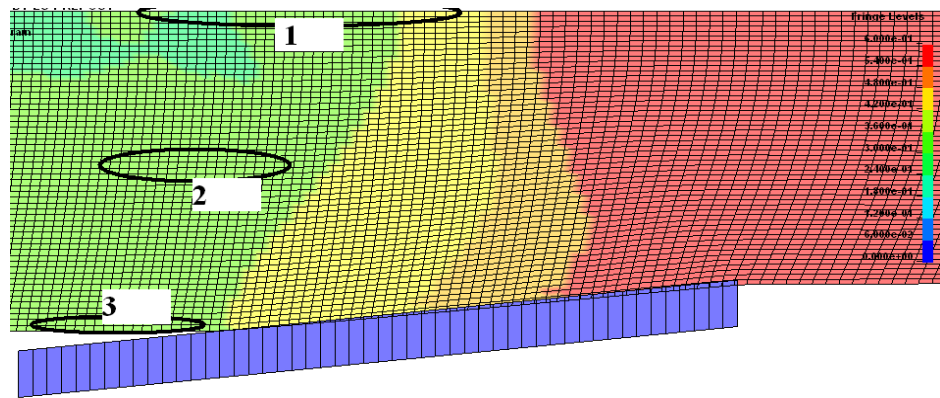


Рисунок 7 – Моделювання волочіння МСЕ (прохід через другу волоку, розподіл накопиченої інтенсивності деформацій). Характерні зони, для яких вивчались шляхи деформування

Для оцінки деформовності в процесі волочіння побудовано 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. 8).

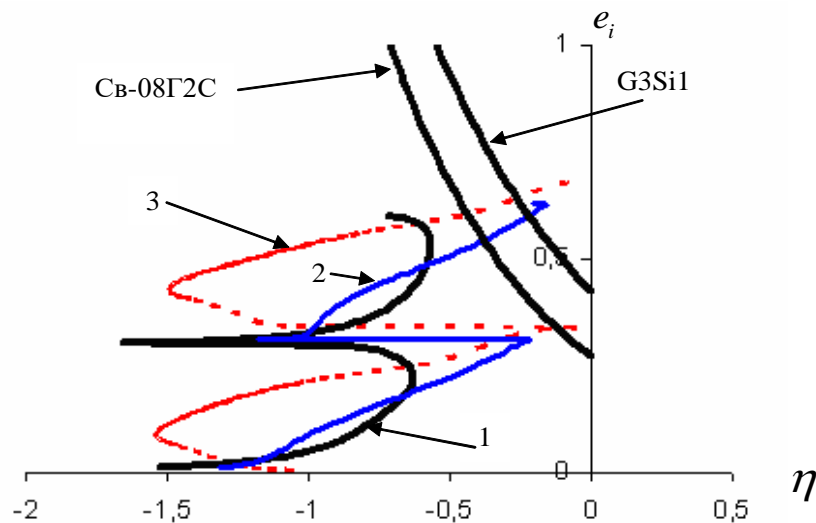


Рисунок 8 – Шляхи деформування в зонах 1–3 (див. рис. 8) для 2-х перших переходів волочіння та діаграми пластичності матеріалу дроту марок G3Si1 та Св-08Г2С

Побудовано також шляхи деформування як функції зміни величини накопиченої інтенсивності деформацій від показника $e_i(\chi)$ та параметра Надаї-Лоде $e_i(\mu_\sigma)$ (рис. 9). 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.

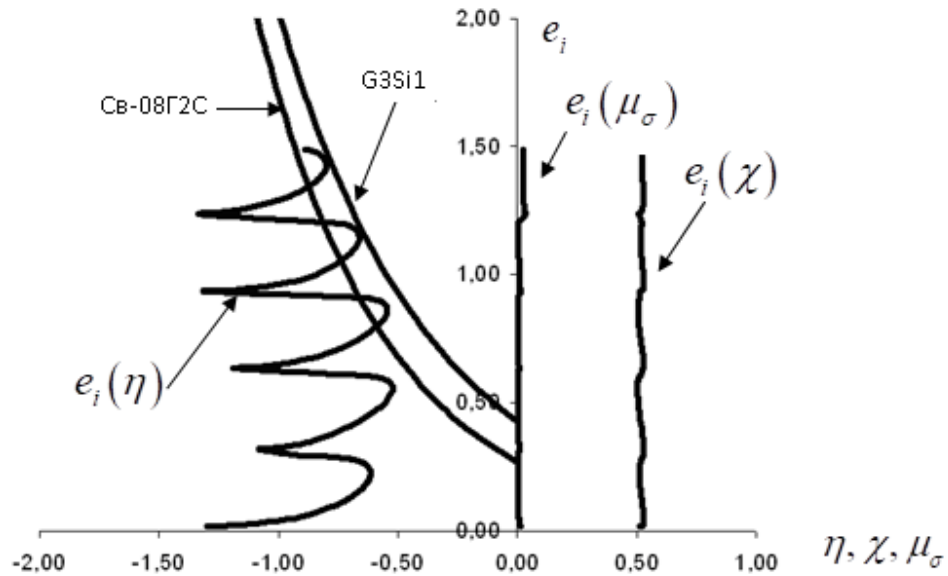


Рисунок 9 – Шляхи деформування частинок матеріалу в небезпечній області (на вісі) (перші 5 переходів) та діаграми пластичності матеріалів

Отже, оцінку деформовності дроту в процесі багатоступінчастого волочіння необхідно здійснювати за критерієм (4).

У відповідності до методики врахування третього інваріанту тензора напружень при оцінці деформовності (В.А. Огородніков), запишемо функцію, яка буде її визначати у вигляді

$$\eta_{\chi}(e_i) = \eta(e_i) \left[1 + (A \cdot \eta^2(e_i) + B \cdot \eta(e_i) + C) \chi \right], \quad (9)$$

або при $\chi = 0,5$

$$\eta_{\chi}(e_i) = \eta(e_i) \left[1 + 0,5(A \cdot \eta^2(e_i) + B \cdot \eta(e_i) + C) \right] \quad (10)$$

У таблиці 5 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 5 – 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

Для отримання феноменологічної моделі зміцнення маловуглецевих сталей експериментальному дослідженню підлягали зразки дроту на різних етапах волочіння. В результаті експериментів встановлено, що криві течії як вихідного матеріалу катанки, так і дроту після волочіння, слідуєть двопараметричному степеневому закону зміцнення за П. Людвігом (1) із коефіцієнтом детермінації не меншим 0,95. Варто відзначити те, що після кожного переходу волочіння матеріал змінює свої поточні фізико-механічні властивості із збереженням здатності зміцнюватись за степеневим законом при подальшому розтягу дроту вздовж його вісі. Таким чином, поточний модуль A та показник зміцнення матеріалу n на певному етапі волочіння зіставили з різними коефіцієнтами витягування. Статистична обробка отриманих даних виявила характерні апроксимуючі функції параметрів A та n від коефіцієнта витягування $\ln \mu$.

Модуль зміцнення –

$$A = A_0 \cdot \exp(k \cdot \ln \mu), \quad (11)$$

де k – коефіцієнт апроксимації.

Показник зміцнення –

$$n = n_\infty + (n_0 - n_\infty) \cdot a^{\ln \mu}, \quad (12)$$

де n_∞, a – коефіцієнти апроксимації.

Фізичний зміст коефіцієнта a прослідковується з виразу

$$a = \frac{n_{\ln \mu=1} - n_\infty}{n_0 - n_\infty}, \quad (13)$$

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 (1) опису кривої зміцнення після кожного проходу через волоку набуде вигляду

$$\sigma_i = A_0 \cdot \exp(k \cdot \ln \mu) \cdot e_i^{n_\infty + (n_0 - n_\infty) \cdot a^{\ln \mu}}. \quad (14)$$

На рис. 11 наведено зміну коефіцієнта n (а) та коефіцієнта A (б) в залежності від інтегральної деформації витягування.

Значення розрахованих коефіцієнтів за формулою (11) наведено в таблиці 6 для кожної з досліджуваних марок маловуглецевих сталей. Фізичне обґрунтування збільшення A полягає в значному зростанні щільності дислокацій в процесі багатоступінчастого волочіння, які створюють відповідний опір подальшій пластичній формозміні.

Таблиця 6 – Значення коефіцієнтів моделі (11)

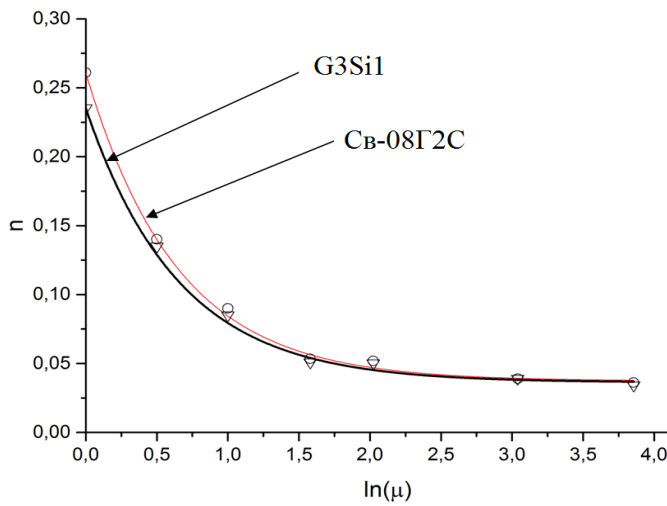
Матеріал	A_0 , МПа	k	R_{adj}^2
СВ08-Г2С	854±35	0,167±0,0144	0,973
G3Si1	836±34	0,167±0,0141	0,974

Значення розрахованих коефіцієнтів за формулою (12) наведено в таблиці 7

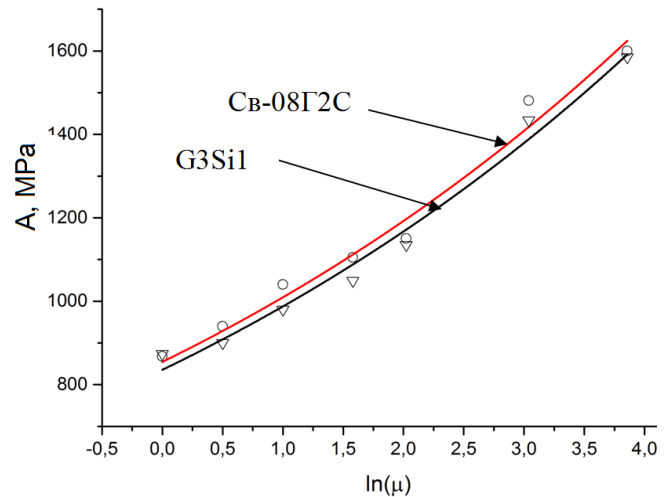
для кожної з досліджуваних марок маловуглецевих сталей. Отже, коефіцієнт n прямує асимптотично до певної константи n_∞ , яка близька до нуля, тобто матеріал набуває властивостей ідеально пластичного матеріалу.

Таблиця 7 – Значення коефіцієнтів моделі (12)

Матеріал	n_∞	n_0	a	R_{adj}^2
СВ08-Г2С	$0,0372 \pm 0,00345$	$0,260 \pm 0,00889$	$0,211 \pm 0,0386$	0,998
G3Si1	$0,0362 \pm 0,00369$	$0,234 \pm 0,00947$	$0,217 \pm 0,0452$	0,997



а)



б)

Рисунок 10 – Зміна коефіцієнта n (а) коефіцієнта A (б) в залежності від інтегральної деформації витягування

Представлення апроксимацій в вигляді (11) та (12) 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. 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.

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 таким видам 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).

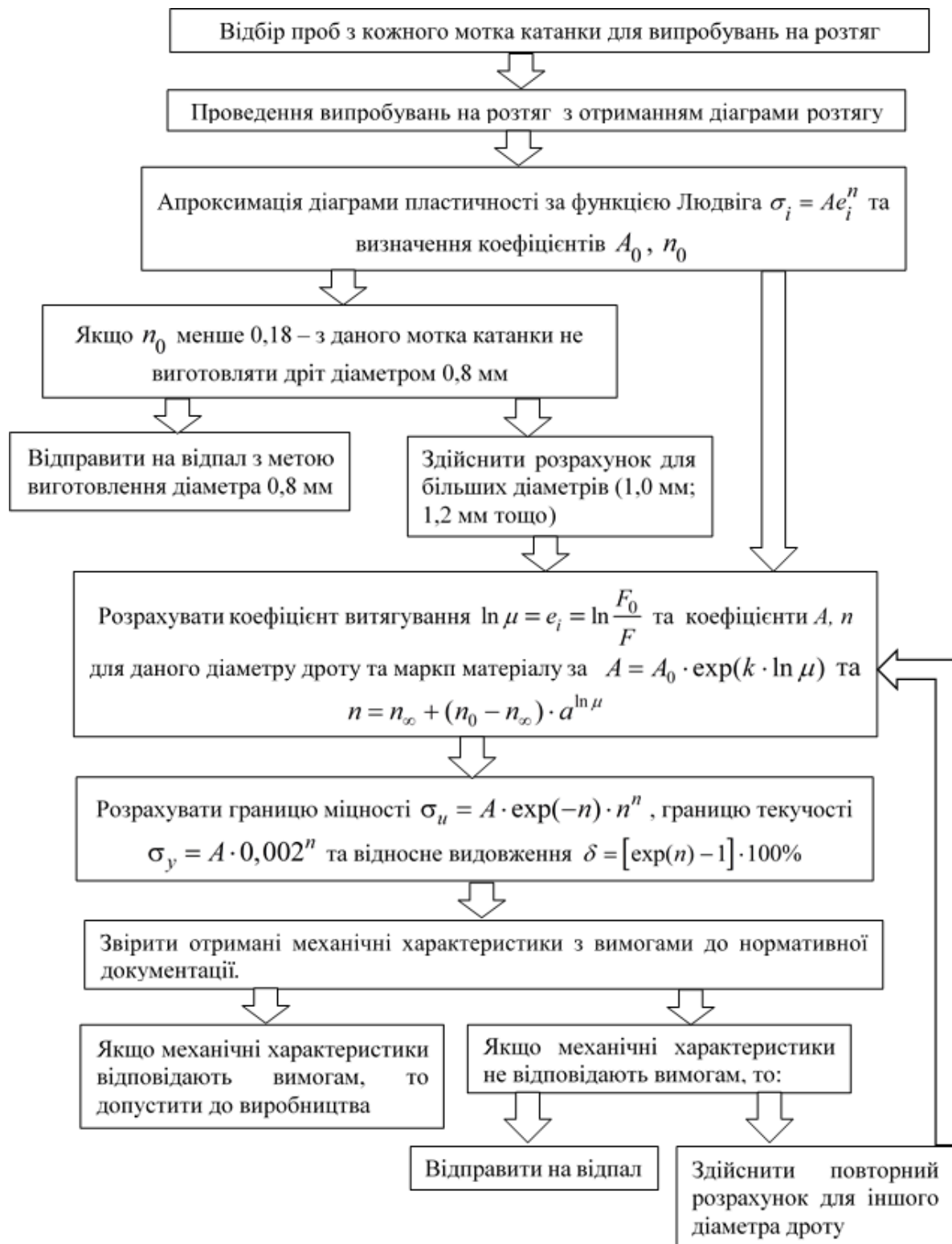


Рисунок 11 – Схема проведення вхідного контролю для виробництва дроту з маловуглецевих сталей

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 продукції до 10%, що пояснюється збільшенням витрат на електроенергію, заробітну платою працівників, з витратами матеріальних ресурсів на обслуговування дільниці відпалу тощо.

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. Градувальний 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 виро-

бник 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 Огородніковим 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 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 діаме-

трів 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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ 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] О. 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 сталевий 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 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 багатоступінчастого 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>

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.

Дисертація присвячена розв'язанню науковоприкладної проблеми 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. Сформовано карту матеріалів G3Si1 та Sv-08Г2С у стані постачання до якої було включені наступні функції: криву течії, стандартні механічні характеристики, діаграму пластичності, криву Баушингера та градувальник графік твердість-напруження-деформації. Встановлено взаємозв'язок мікроструктури зварювального дроту і його зварювально-технологічних властивостей та коефіцієнта зміцнення. Здійснено оцінку деформовності дроту маловуглецевих сталей в процесі його багатоступінчастого волочіння. Отримана феноменологічна модель зміцнення маловуглецевого зварювального дроту в процесі волочіння. Розроблено методику проведення вхідного контролю катанки для виробництва дроту з маловуглецевих сталей, що дозволяє за результатами випробувань на розтяг спрогнозувати механічні властивості готового 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.

The dissertation is dedicated to solving the scientifically applied problem of increasing the efficiency of the drawing process of welding low carbon carbon by developing scientifically sound approaches to the rational implementation of production technology using the maximum material plasticity resource and forecasting the quality of the finished product.

A map of materials G3Si1 and Sv-08G2S was generated in the state of delivery, which included the following functions: flow curve, standard mechanical characteristics, plasticity diagram, Bauschinger curve, and a hard-tensile-strain-strain graph.

The relationship between the microstructure of the welding wire and its welding and technological properties and the coefficient of hardening are established. The deformability of low-carbon steel wires in the process of its multi-stage drawing has been evaluated.

The phenomenological model of strengthening of low carbon welding wire in the process of drawing was obtained. The technique of carrying out an input control of a rod for the production of low-carbon steel wire is developed, which allows to predict the mechanical properties of finished wire of different diameters by the results of tensile tests.

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

АННОТАЦИЯ

Слободянюк Ю. О. Повышение эффективности волочения сварочной проволоки из малоуглеродистых сталей на основе теории деформируемости. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.05 «Процессы и машины обработки давлением». – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2019.

Диссертация посвящена решению научно-прикладной проблеме повышения эффективности процесса волочения сварочной малоуглеродистой проволоки путем разработки научно обоснованных подходов к рациональной реализации технологии производства с использованием максимального ресурса пластичности материала и прогнозирования показателей качества готового продукта.

Сформирована карта материалов G3Si1 и Св-08Г2С в состоянии поставки, в которую включены следующие функции: кривые течения, стандартные механические характеристики, диаграмма пластичности, кривая Баушингера и градуировочный график твердость-напряжение-деформации. Кривые течения (также как и стандартные механические характеристики) сварочной катанки марок G3Si1 и Св-08Г2С различных партий поставки существенно отличаются, что связано прежде всего с условиями изготовления полуфабриката (с производителем). Химический состав в пределах, определенных стандартами, оказывает незначительное влияние на механические характеристики катанки. Диаграмма пластичности является необходимой функцией для оценки возможности формоизменения без разрушения по феноменологическими критериями деформируемости, причем пластичность стали G3Si1 значительно выше, чем Св-08Г2С, поэтому ее можно рекомендовать к использованию без промежуточных отжигов. Коэффициент Баушингера в области развитых деформаций исследованных материалов составил 0,14 ... 0,16. Градуировочный график твердость (HV) – напряжения (σ_i)– деформации (ϵ_i) позволяет оценить твердость проволоки после волочения.

Установлено, что сварочно-технологические свойства проволоки (стабильность горения дуги) зависит от показателей готовой продукции, которые нормируются согласно существующих стандартов, но и от однородности структуры катанки, которую использует производитель проволоки в процессе его изготовления. Повышенная пористость сварочной проволоки может быть вызвана наличием в ней газов (в частности, повышенного содержания азота - более 0,10% - 0,0107%) и вызывает

снижение твердости проволоки и как следствие нестабильное горение сварочной дуги. Если коэффициент упрочнения n материала катанки в состоянии поста-жение меньше 0,18, то это вызывает существенные снижения показателей качества готовой проволоки из-за нестабильности горения дуги, по крайней мере, для минимальных диаметров проволоки 0,8-1,0 мм.

Установлено, что исследования деформаций по сечению рационально осуществлять через представление их в относительных единицах, поскольку графики практически совпадают для различных переходов и диаметров заготовок. Коэффициент неравномерности деформаций практически не зависит от числа переходов и степени вытягивания и составляет 0,87. Пути деформирования в опасной области (на оси) характеризуются значительным изменением первой производной и кривизны соответствующих траекторий. Пути деформирования, построенные через показатели и имеют вид близок к константе, что значительно упрощает их учет при оценке деформируемости в процессе волочения.

Построена вычислительная схема, позволяющая учесть третий инвариант тензора напряжений в соответствии с критерием деформируемости по Огородникову В.А. и оценить влияние этого инварианта на деформируемость малоуглеродистой сварочной проволоки в процессе ее волочения в существующих на практике маршрутах волочения и осуществить в дальнейшем на этой основе оценку технологической наследственности в виде остаточной пластичности, твердости и т.п.

Полученная феноменологическая модель упрочнения малоуглеродистой сварочной проволоки (марок G3Si1 и Св-08Г2С) в процессе волочения устанавливает зависимость коэффициентов кривой упрочнения (по двухпараметрической функцией П. Людвига) от интегральной деформации вытягивания. Коэффициент деформационного упрочнения следует асимптотически к константе, что приближается к нулю, то есть материал проволоки с большими степенями вытягивания приобретает свойства идеально пластического материала. Модуль упрочнения имеет свойство к экспоненциальному росту. Модель можно использовать для соответствующих расчетов для реологически подобных (до исследованных) материалов, что значительно расширяет границы ее практического использования.

Разработана методика проведения входного контроля катанки для производства проволоки из малоуглеродистых сталей, что позволяет по результатам испытаний на растяжение рассчитать кривую течения, показатели прочности, пластичности проволоки на любом этапе волочения, а значит спрогнозировать механические свойства готовой проволоки различных диаметров. Если искомые показатели для определенного диаметра провода не будут отвечать требованиям стандартов, то необходимо провести операции, изменить исходные свойства металла (например, осуществить отжиг) или провести повторный расчет для другого диаметра.

Результаты работы внедрены на предприятии ЧАО «ПлазмаТек» (г. Винница), которые обеспечили рациональное планирование производства проволоки различных диаметров для каждой партии катанки и способствовали избежанию изготовления некачественной продукции, а также в учебный процесс ВНТУ.

Ключевые слова: волочение, сварочная проволока, технологический паспорт материала, деформируемость, феноменологическая модель, микроструктура, пластичность, показатели качества.

Підписано до друку 08.11.2019 р. Формат 29.7×42¼
Наклад 100 прим. Зам. № 2019-147.
Віддруковано в інформаційному редакційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 65-18-06
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК №3516 від 01.07.2009 р
