

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертацію Слободянюк Юлії Олегівни
**«Підвищення ефективності волочіння зварювального дроту з
маловуглецевих сталей на основі теорії деформовності»**,
подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за
спеціальністю 05.03.05. – Процеси та машини обробки тиском

Оцінка структури, змісту та завершеності дисертації

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

Структура роботи та розбиття по розділах відповідає в цілому необхідним умовам і не викликає заперечень.

У першому розділі розглянуто сучасні підходи щодо проектування процесу волочіння зварювального дроту. Відзначені вітчизняні дослідники, які зробили суттєвий внесок в розвиток процесу волочіння дроту.

В розділі акцентовано, що при проектуванні чи удосконаленні технології виробництва дроту необхідно враховувати вимоги стандартів до якості обмідненого зварювального дроту. До таких основних стандартів відносяться ГОСТ 2246-70, ISO 14341:2009 та AWS A5.18:2005. В результаті дослідження виявлені та проаналізовані основні чинники, що впливають та формують показники якості обмідненого дроту, які в роботі умовно поділені на три групи: показники якості сировини, технічні та геометричні показники якості дроту, що нормуються при його виробництві, технологічні показники якості, що нормуються при виробництві дроту.

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

При оптимізації процесу волочіння, в першу чергу технологи звертають увагу на принцип побудови технологічного маршруту. Існує безліч підходів щодо побудови маршруту волочіння, зокрема великого поширення набули принципи побудови маршрутів з використанням середньої витяжки за кожен прохід. Недоліками таких принципів побудови маршруту є нераціональне використання потужності виробничого обладнання, відсутність врахування механічних характеристик матеріалу, що є дуже важливим питанням при встановлених вимогах до механічних властивостей готового дроту.

При розробці маршруту волочіння необхідно враховувати вплив основних показників процесу на механічні властивості готового дроту, а саме: величини обтиснення, кількості переходів, швидкості волочіння, кута волоки та коефіцієнта тертя. Проте обґрунтовані підходи щодо прогнозування механічних властивостей готового дроту на основі механічних властивостей сировини на сьогодні відсутні. Не відображений також в наявних дослідженнях вплив мікроструктури дроту та його механічних властивостей на зварювально-технологічні характеристики.

Рядом дослідників вивчалось питання оцінки деформовності при волочінні із використанням феноменологічної теорії деформовності. Проте представлені ними методи отримання шляхів деформування не дають можливості, з необхідною для практики точністю, визначити граничні технологічні параметри процесу багатоступінчастого волочіння маловуглецевого зварювального дроту. Крім того, використання критеріїв деформовності вимагає дослідження діаграми пластичності матеріалу дроту, яку для умов плоского напруженого стану можна отримати шляхом випробування відповідних зразків на розтяг, стиск та кручення.

На підставі аналітичного огляду були поставлені мета і задачі дослідження.

Другий розділ присвячений обґрунтуванню вибору напряму та методів дослідження.

Сформовано карту матеріалів G3Si1 та Св-08Г2С в стані постачання, до якої були включені наступні функції: крива течії, стандартні механічні характеристики, діаграма пластичності, крива Баушингера та градувальний графік твердість-напруження-деформації.

Криві течії були отримані за допомогою випробувань на розтяг та апроксимовані за допомогою функцій. У відповідних таблицях наведено значення коефіцієнтів апроксимації за функціями 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'язано з умовами виготовлення напівфабрикату. Хімічний склад в межах, визначених стандартами, чинить незначний вплив на механічні характеристики катанки.

Для побудови діаграми пластичності були проведені випробування на розтяг, стиск та кручення відповідних зразків. За результатами проведених

випробувань здійснено розрахунок необхідних даних та побудовані діаграми пластичності

Процес волочіння має ознаки немонотонного – матеріал в осередку деформації із зони стиску переходить в зону розтягу. Для врахування ефекту не монотонності була побудована крива Баушингера. При цьому були проведені випробування зразків матеріалів сталей G3Si1 та Св-08Г2С на розтяг з наступним стиском в напрямку, протилежному розтягу.

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; мікро-твердоміри 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 рентгенівського спектрометра з дисперсією по енергії рентгенівських квантів (модель INCA Energy-350 фірми Oxford Instruments (Великобританія)). Характерною особливістю мікрорентгеноспектрального аналізу є локальність, а максимальна область збудження становить 1 мкм.

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

В результаті аналізу було виявлено, що мікроструктура ряду зразків є дисперсною ферито-карбідною сумішшю, причому карбіди рівномірно розташовані по всьому полю зору шліфа. Мікроструктура решти досліджуваних зразків 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 $\times 2000$). Встановлено, що для зразка, який має у своїй мікроструктурі зкоагульовані карбіди, характерна наявність пор, а у мікроструктурі інших зразків пор немає. Очевидно, пори зумовлені газовою природою. Тому було проведено додаткові дослідження для даних зразків на газовий аналіз (кисень, водень, азот). В результаті встановлено, що значення кисню і водню у випробуваних зразків близькі, значення азоту значно відрізняються. Підвищений вміст азоту в зразку із нестабільним горінням дуги свідчить, що виявлена пористість обумовлена саме цим газом.

Встановлено, що 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 малоімовірним. Врахування даного факту дозволить скорегувати план

виробництва дроту різних діаметрів, уникнути простоїв обладнання, що пов'язані із обривами дроту в процесі волочіння, а також зменшити час на технологічну підготовку.

Четвертий розділ присвячений аналізу розподілу деформацій по перерізу, висвітленню особливостей шляхів деформування, а також проведенню оцінки деформовності матеріалу 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.

Для оцінки деформовності в процесі волочіння побудовано шляхи деформування в небезпечній зоні, яка знаходиться на осі дроту (підтверджується експериментально для різних умов волочіння). Побудовано також шляхи деформування як функції зміни величини накопиченої інтенсивності деформацій від показника $e_i(\chi)$ та параметра Надаї-Лоде $e_i(\mu_\sigma)$. Оскільки небезпечна область припадає на вісь дроту, то графіки побудовано саме для цієї зони заготовки. Характерною особливістю цих графіків виявилася їх практично лінійна залежність та незмінність в ході процесу багатоступінчастого волочіння.

Обґрунтовано критерій деформовності дроту в процесі багатоступінчастого волочіння. Приведені результати, які дає оцінка використаного ресурсу пластичності, із врахуванням властивості адитивності використаного ресурсу пластичності $\psi = \sum \psi_i$. Як видно з розрахунків, оцінку деформовності слід виконувати із врахуванням третього інваріанта тензора напружень, в іншому випадку похибка може сягати значних величин. Також зауважено, що зміна режимів волочіння чи матеріалу тягне за собою необхідність щоразу здійснювати доволі трудомістке та незручне в умовах виробництва моделювання процесу та обробку даних, а також ретельне вивчення діаграми пластичності для конкретного оброблюваного волочінням матеріалу.

Методика здійснення вхідного контролю для виробництва дроту з маловуглецевих сталей дозволяє прогнозувати механічні характеристики готового дроту, уникнути таких видів браку, як невідповідність вимогам нормативної документації механічних властивостей дроту та пов'язаних з цим наслідків, зменшити час на технологічну підготовку, а також уникнути простоїв обладнання (що пов'язані з обривами дроту в процесі волочіння).

Вхідний контроль механічних властивостей катанки є необхідною умовою прогнозування окремих показників якості продукції (границі міцності, текучості, відносного видовження після розриву, твердості) і запобігання обривам дроту діаметрів 0,8 та 1,0 мм на етапі фінішного волочіння, що суттєво впливає в цілому на ефективність виробництва.

У кожному розділі наведено висновки, а загальні висновки досить повно підводять підсумок всієї роботи.

Актуальність теми дисертації

Виготовити дріт із необхідним характеристиками, без операції проміжного відпалу, часто є неможливим через небезпеку його руйнування. У зв'язку з цим постають підвищені вимоги до пластичності матеріалу катанки. Тому раціональне проектування технологічного процесу волочіння дроту без операції проміжного відпалу є актуальним питанням, вирішення якого дозволяє суттєво скорочувати процес виробництва та збільшувати продуктивність. У відповідності зі сказаним, постає необхідність у максимальному використанні пластичності матеріалів маловуглецевих сталей при розробці раціональної технології виробництва зварювального дроту. Для забезпечення ефективності процесу волочіння та виготовлення зварювального дроту належної якості, необхідним постає проведення відповідних розрахунків, які не можливо здійснити без знання відомостей про карту матеріалу.

Наразі відсутня інформація про вдалі спроби теоретичної систематизації процесів волочіння за механічними властивостями металів, тому доцільно будувати математичні моделі за феноменологічним принципом із врахуванням ефекту зміцнення окремих марок матеріалу при багатоперехідному волочінні. Проектування виробництва зварювального дроту із уникненням його розривів при багатоступінчастому волочінні, з використанням феноменологічних зв'язків між коефіцієнтом витягування та параметрами кривої зміцнення маловуглецевих сталей, дозволить зменшити ризики виготовлення неякісної продукції.

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

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами

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.

Ступінь обґрунтованості і достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій

Найбільш важливі наукові положення та результати роботи викладені в загальних висновках дисертації.

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.

Отримані рішення успішно пройшли дослідну перевірку, для чого автор виконував власні експериментальні дослідження. Це дозволяє вважати достовірними розроблені математичні моделі. Достовірність основних положень і методик підтверджена також прикладами промислового використання технологічних методик і результатів технічних розробок процесу волочіння зварювального дроту.

Новизна результатів дисертації

До наукових результатів, отриманих в ході досліджень за темою дисертації, можна віднести наступні:

- вперше експериментально-розрахунковим шляхом отримано закономірності, які надають 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 прогнозувати якість продукції;

- 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;

- отримав подальший розвиток метод оцінки деформовності в процесі волочіння, який на відміну від наявних полягає у тому, що 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, в результаті чого здійснена оцінка деформовності металу дроту в процесі його багатоступінчастого волочіння;

- 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.

Значимість роботи для науки і практики

Наукова і практична цінність притаманна в тій чи іншій мірі всім основним положенням та висновкам роботи.

Головне значення наукових результатів, отриманих здобувачем, полягає в тому, що обгрунтована і вирішена актуальна науково-технічна задача інтенсифікації процесу холодного багатоступінчастого волочіння зварювального дроту без руйнування та з гарантуванням необхідної якості на основі оцінки деформовності мало вуглецевих сталей .

Практичне значення мають наступні результати дослідження:

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

- 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;

- методика 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.

Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих роботах

Результати дисертації достатньо повно відображені 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. У статтях містяться всі необхідні складові частини, такі як: стан питання, формулювання мети роботи, наведення отриманих результатів та висновки по роботі.

Автореферат повністю відповідає змісту і основним положенням дисертації.

Апробація роботи

Результати роботи пройшли досить хорошу апробацію і були обговорені на Міжнародних, Всеукраїнських та загально університетських науково-технічних конференціях і форумах.

Зауваження по дисертації

1. На стор. 69 (і в подальшому) автор відзначає, що для випробування на стиск використовувалися циліндричні зразки діаметром 6,5 мм і висотою 12 мм. При цьому $h/d=1,85$. Проте при таких геометричних відношеннях, у випадку стиску, зразки втрачають стійкість, тому за чисельними рекомендаціями вказане відношення повинно бути у межах $h/d < 1,5$. Отже незрозуміло, як автор зумів уникнути втрати стійкості зразків при стиску?

2. В підрозділі 2.2.3 «Мікроструктурний аналіз» відзначено, що «Вимірювання твердості за Віккерсом проводили на мікротвердомірі М-400 при навантаженнях 100 г і 1 кг».

Але, по-перше, вимірювання мікротвердості не відноситься до мікроструктурного аналізу, а по-друге, не обґрунтовано, чим викликані такі значні розбіжності при навантаженні на індентор?

3. Підрозділ 2.3.1 «Криві течії катанки» .

Проте в таблицях 2.4 і 2.5 приведені параметри Δl і ψ , які не відносяться до кривої течії. При цьому Δl - це абсолютне видовження, а в таблиці воно приведене в %?

Якщо ж це відносне видовження, то не зрозуміло, чому розміри зразка становлять $l = 200$ мм, $d = 5,5$ мм, тобто $l / d = 36,4$, що не є стандартним відношенням. Тому очевидно, що отримане автором відносне видовження складно співставляти з довідковими даними.

4. В таблиці 2.5 границя міцності при виготовленні дроту діаметром 1-1,2 мм без відпалу знаходиться в межах 439-503 МПа. В той же час, на рис. 2.10 б для тієї ж марки металу інтенсивність напружень перевищує 750 МПа. Такі значення викликають запитання щодо обґрунтованості апроксимації і достовірності експериментальних точок, приведених на рис. 2.10б.

5. В дисертації не висвітлено, як при побудові діаграм пластичності враховувалися отримані значення пластичності при стиску (формування бочки, тобто не постійність показника напруженого стану) і при розтягу (утворення шийки значної кривизни, а значить поєднання руйнування відривом і зрізом та проявлення внаслідок цього немонотонної деформації) ?

Недоліки з оформлення роботи

6. В роботі зустрічається ряд неточностей і помилок:

- Не співпадає назва чинників, які формують якість обмідненого дроту на рис. 1 автореферату і рис. 1.14 дисертації. При цьому в авторефераті другий і третій чинники мають однакову назву;

- У висновках 3.5 пункт 7 відзначається, «...що твердість має розбіжності,

то це унеможливило виготовити дріт 0,8 мм...». Проте не відзначається, яка міра розбіжності є дієвою;

- В основних наукових положеннях, п.3 «...залежить від показників готової продукції, які нормуються згідно існуючих стандартів, а й від однорідності структури катанки...», очевидно ... залежить **не лише** від показників... і т.п.

Висновок

Зауваження, які зроблені при аналізі матеріалів дисертації, не визначально знижують загальну позитивну оцінку роботи.

Дисертація є завершеною науковою працею. В роботі отримані нові науково обґрунтовані теоретичні і експериментальні результати, які в сукупності є суттєвими для підвищення ефективності волочіння зварювального дроту з маловуглецевих сталей на основі теорії деформовності. Цим забезпечено вирішення важливого завдання розвитку наукової галузі «процеси та машини обробки тиском» в напрямку підвищення ефективності розробки і освоєння конкурентоспроможних промислових технологій. Дисертаційна робота грамотно написана та належним чином проілюстрована.

Обсяг і зміст дисертаційної роботи та її оформлення повністю відповідають чинним вимогам щодо порядку присудження наукових ступенів а також паспорту спеціальності 05.03.05 - Процеси та машини обробки тиском, а її автор **Слободянюк Юлія Олегівна** заслуговує на присудження їй наукового ступеня **кандидата технічних наук**.

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри
електроенергетики, електротехніки та електромеханіки,
Вінницький національний аграрний університет

В.А. Матвійчук

Особистий підпис
засвідчую

Начальник відділу
кадрів ВНАУ

