

Полутренко М.С. Композиционные биостойкие изоляционные материалы для противокоррозионной защиты подземных трубопроводов

Разработаны рецептуры модифицированных праймеров и битумно-полимерных мастик ингибиторами коррозии различных классов органических соединений и изучены их свойства. Установлено влияние природы ингибитора на гидрофобность базовой мастики и композиций модифицированных мастик в дистиллированной и морской воде. Определена бактерицидная активность исследуемых ингибиторов коррозии из класса ароматических аминов и четвертичных аммонийных солей. С участием данных ингибиторов получены образцы модифицированных мастик и исследована их микробная устойчивость согласно ДСТУ 3999-2000. Получены защитные композиционные изоляционные покрытия, устойчивые к разрушительному воздействию коррозионно опасных микроорганизмов, что приведет к повышению противокоррозионной и микробиологической защиты подземных трубопроводов.

Ключевые слова: коррозия, трубопроводы, композиционные материалы, ингибитор.

Polutrenko M.S. Biostability Composite Insulation for Materially Corrosion Protection of Underground Pipelines

The compounding of modified primers and bitumen-polymer mastic corrosion inhibitors of different classes of organic compounds and their properties were studied. The influence of the nature of the inhibitor on the hydrophobicity of the base compositions of modified mastic and mastic in distilled water and sea water. Bactericidal activity study identified corrosion inhibitors from the class of aromatic amines and quaternary ammonium salts. With samples of modified mastic inhibitors involving data are received and their microbial stability according to DSTU 3999-2000 is investigated. Composite insulating protective coating resistant to the ravages of corrosive of dangerous microorganisms that lead to increased corrosion and microbiological protection of underground pipelines is obtained.

Keywords: corrosion, pipelines, composites inhibitor, protection.

УДК 621.791.052

ОЦІНЮВАННЯ СПОСОБІВ ЗВАРЮВАННЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ ОТ4

В.М. Палаш¹, А.Р. Дзюбик², Р.В. Палаш³, І.Б. Назар⁴

Досліджено вплив різних способів аргонодугового зварювання вольфрамовим електродом: у неперервному режимі у контрольованій атмосфері; у неперервному режимі із місцевим струменевим захистом; імпульсно-дугове із місцевим струменевим захистом; із електромагнітним коливанням дуги за струменевого захисту аргоном; а також електронно-променевого зварювання на насичення зварних з'єднань сплаву ОТ4 воднем, їх мікроструктуру та стійкість до крихкого руйнування. Методом заміру локальної ТЕРС у зварних з'єднаннях виявлено три ділянки, збагачені воднем, що негативно впливає на їх тріщиностійкість.

Ключові слова: титановий сплав, водень, способи зварювання, зварний шов, зона термічного впливу, мікроструктура сплаву.

Вступ. Основні переваги титанових сплавів перед іншими конструкційними матеріалами полягають головним чином у високій питомій міцності і

жароміцності за температури до 600 °С, а також у високій корозійній тривкості у більшості агресивних середовищ. Тому зварні конструкції зі сплавів титану набули широкого застосування у різних галузях техніки. Сплав ОТ4 належить до псевдо α -сплавів з невеликою кількістю β -фази. Він має досить високу міцність не тільки за низької, але короткочасно і за температури до 750 °С [1]. Негативно впливає на властивості зварних з'єднань низька теплопровідність сплавів титану, що спричиняє істотний перегрів металу колошовної зони з утворенням досить крупнозернистої мікроструктури та виникнення значних залишкових напружень, що сприяє сповільненому руйнуванню під час експлуатації конструкцій. Відомо, що водень, який знаходиться у сплавах титану в атомарному стані, може істотно знижувати величину критичних напружень, що викликають таке руйнування зварних з'єднань [2]. Шкідливий вплив водню на властивості титану і його сплавів посилюється його перерозподілом у колошовній зоні під час зварювання, що спричиняє зростання його локальних концентрацій та внутрішніх напружень у певних ділянках з'єднання. Через це проблема дослідження розподілу водню у зварних з'єднаннях титанових сплавів є актуальною.

Матеріали і методи. У роботі досліджено вплив різних способів зварювання сплаву ОТ4 на газонасичення зварних з'єднань воднем, їх мікроструктуру та стійкість до крихкого руйнування. Для порівняння вибрано такі способи аргонодугового зварювання вольфрамовим електродом: у неперервному режимі у контрольованій атмосфері; у неперервному режимі із місцевим струменевим захистом; імпульсно-дугове із місцевим струменевим захистом; із електромагнітним коливанням дуги за струменевого захисту аргоном; електронно-променевого аргонодугового зварювання здійснено на установці УКСМ-2, а також на установці, змонтованій на базі головки АБС. Як джерело живлення використано випрямляч ВСВУ-315. Зварювання із електромагнітними коливаннями дуги реалізовано шляхом накладання на дугу зовнішнього поперечного магнітного поля, що створювалось спеціальною приставкою, змонтованою на зварювальній головці. Електронно-променевого зварювання здійснено на установці ЕЛУ-1¹.

Для зварювання використано аргон марки "А", вологість якого контролювали вологоміром "Байкал-3". Усі дослідження виконано на листовому товщиною 2 мм титановому сплаві ОТ4, із вмістом 3,7 % Al і 1,6 % Mn. Перед зварюванням поверхню зразків зачищали шабером, а потім знежирювали бензином і спиртом. Під час зварювання відбувалось наскрізне проплавлення листових зразків на режимах, що забезпечували добре формування швів за швидкості зварювання 21 м/год.: $I_{зв}=155...165$ А; $U_{дв}=10...11$ В. За імпульсно-дугового зварювання співвідношення часу паузи до часу імпульсу змінювалось від 1 до 3. Вміст водню у зварних з'єднаннях визначено методом відновлювального плавлення у потоці газу-носія на спеціальній установці РН-2. Зварювання із електромагнітними коливаннями дуги здійснено за частоти реверсування зовнішнього поперечного магнітного поля 3 Гц. Механічні властивості зварних з'єднань як під час короткочасних, так і статичних випробуваннях оцінювали згинанням зразків із втомною тріщиною. З метою підвищення жорсткості нап-

¹ проф. В.М. Палаш, канд. техн. наук – НУ "Львівська політехніка";

² доц. А.Р. Дзюбик, канд. техн. наук – НУ "Львівська політехніка";

³ доц. Р.В. Палаш, канд. техн. наук – НУ "Львівська політехніка";

⁴ доц. І.Б. Назар, канд. техн. наук – НУ "Львівська політехніка"

¹ Зварювання зразків здійснювалося за участі канд. техн. наук Ю.А. Шалімова та інж. А.Д. Левицької.

руженого стану випробовування на загин проведено і за низької температури (-196 °C) у спеціальному пристрої на установці ИМАШ при навантаженні зразків триточковим згинанням зі швидкістю 1 мм/хв. Як порівняльний показник за тривалих випробовувань використано максимальне напруження (σ_{\max}) у мінімальному перерізі, яке зразки витримували протягом 100 год.

Результати дослідження. На вміст водню у різних зонах зварного з'єднання умови зварювання мають помітний вплив. Як видно з даних, наведених у табл., його вміст у шві при всіх способах менший, ніж у ЗТВ й основному металі. Цей факт можна пояснити, по-перше, частковою дегазацією водню із зварувальної ванни, а по-друге, його дифузійним переміщенням у колошовну зону. Тільки у разі недостатніх витрат аргону (3 л/хв) його вміст у шві більший, ніж в основному металі. Вважається, що ступінь відкачування у камері із контрольованою атмосферою не впливає на вміст водню у шві. Із наведених результатів також видно, що зварювання із електромагнітним колюванням дуги, а також імпульсно-дугове забезпечують кращі умови для дегазації водню із ванни порівняно з аргонодуговим зварюванням стаціонарною дугою.

Табл. Вплив способу зварювання на механічні властивості металу

Спосіб зварювання та характеристика режиму	Водень, % мас.		Кут загину, град.		σ_{\max} , МПа
	Шов	ЗТВ	20°C	-196°C	
Аргонодугове зварювання, стаціонарна дуга, місцевий (струменевий захист), витрати Ar – 9 л/хв	0,0025	0,0037	49	36	12,0
Аргонодугове зварювання, стаціонарна дуга, місцевий (струменевий захист), витрати Ar – 3 л/хв	0,0048	0,0060	43	14	10,7
Зварювання у контрольованій атмосфері, $P_{\text{за-}} = 50$ Па, вологість -56 °C	0,0019	0,0023	54	30	13,8
Зварювання в контрольованій атмосфері, $P_{\text{за-}} = 100$ Па, вологість -40 °C	0,0019	0,0025	53	28	13,5
Зварювання з електромагнітним колюванням дуги	0,0019	0,0028	51	32	12,5
Імпульсно-дугове зварювання, час паузи 0,36 с час імпульсу 0,12 с	0,0018	0,0027	52	28	13,0
Електронно-променево зварювання	0,0020	0,0027	55	38	13,5
Основний метал	0,0028		54	32	14

Результати випробовування на загин свідчать про неістотний вплив способів зварювання на пластичність металу швів. Тільки за недостатнього захисту аргонотом кут загибу менший, ніж в інших випадках зварювання, що може спричинитись більшим вмістом у ньому водню. Найвищі показники тріщиностійкості зразків із попередньо наведеною тріщиною у зоні сплавлення відповідають способам зварювання у контрольованій атмосфері та електронно-променевому.

Наявність поліморфного перетворення у титані зумовлює певні зміни фазового і структурного станів під час зварювання. Структура основного металу надзвичайно дрібнозерниста і являє собою α -фазу з невеликою кількістю (менше 5 %) β -фази. За природою це тверді розчини Al і Mn у гексагональній щільно упакованій та об'ємноцентрованій ґратці відповідно. Твердість на поверхні листів становить у середньому 280 HV. Відомо, що структуроутворення у зоні термічного впливу (ЗТВ) визначається термічним циклом зварювання, насамперед максимальною температурою нагрівання та швидкістю охолодження

в інтервалі фазового β - α перетворення. У всіх досліджуваних зразках зварних з'єднань у ЗТВ можна виділити три характерних ділянки: рекристалізації, фазової перекристалізації та колошовну (рис. 1). Ділянка рекристалізації знаходиться у низькотемпературній частині ЗТВ і безпосередньо контактує з основним металом. Протяжність цієї ділянки невелика і не перевищує 0,1 мм.

Для всіх досліджуваних способів і режимів зварювання характер мікроструктури у двох основних ділянках ЗТВ – фазової перекристалізації та колошовної, принципово однакова – суміш α і α' -фаз. Фаза α' має аналогічну як і α -гексагональну кристалічну будову, але з більшим вмістом Mn. Вона має характерну голчасту структуру мартенситного типу.

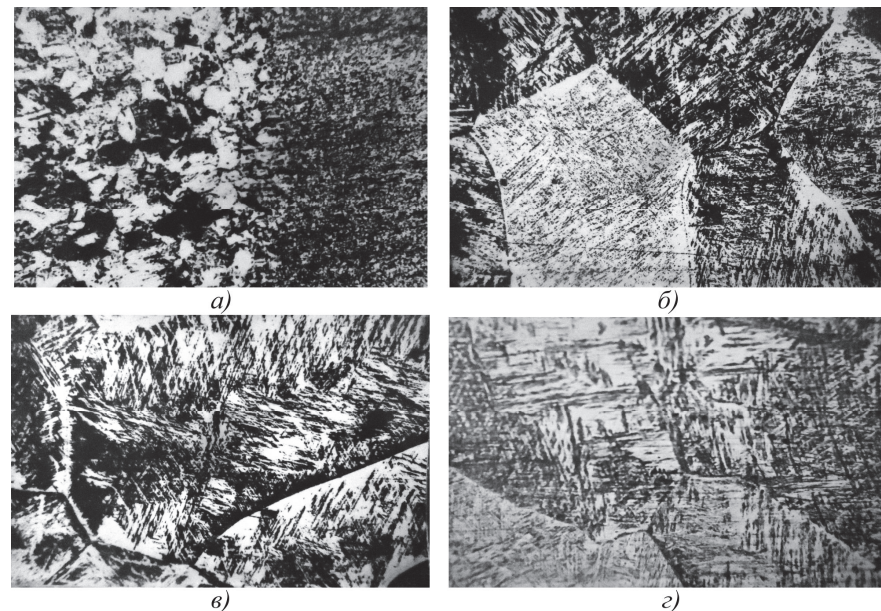


Рис. 1. Мікроструктура зварного з'єднання титанового сплаву OT4 ($\times 100$): а) основний метал та ділянка рекристалізації; б) колошовна зона; в), г) зварний шов

Величина зерен цих фаз помітно зростає з наближенням до зони сплавлення, а кількість α' -фази при цьому дещо збільшується. Розмір ЗТВ, а також ступінь укрупнення мікроструктури в ній визначаються режимом зварювання, зокрема величиною погонної енергії. Так, під час імпульсно-дугового зварювання зі збільшенням співвідношення тривалостей паузи до імпульсу від 1 до 3 розміри ЗТВ зменшуються приблизно вдвічі. Треба зазначити, що цей метод зварювання забезпечує отримання найменших розмірів ЗТВ порівняно з іншими методами. Так, за швидкості зварювання 21 м/год вона має протяжність, залежно від жорсткості імпульсів, 1...2 мм, тоді як під час безперервного аргонодугового W-електродом – 3...5 мм. Величина зерен у колошовній зоні також найменша за імпульсно-дугового зварювання у разі підвищеної жорсткості імпульсів.

Режим зварювання впливає певним чином і на будову мартенситної α -фази. Збільшення швидкості охолодження, яке наявне за зменшення погонної енергії, сприяє подрібненню голчастої будови. Мікротвердість структурних складових елементів, що визначалась за навантаження 50 г на приладі ПМТ-3, становила у середньому 220 та 240 кгс/мм² α і α' -фаз відповідно.

Мікроструктура зварних швів за всіх досліджуваних методів і режимів зварювання, як і у випадку ЗТВ, є сумішшю α і α' -фаз. Проте величина зерен первинної структури та кількісне співвідношення фаз, а також ступінь дисперсності мартенситної α -фази певною мірою залежать як від методу, так і від режиму зварювання. Вплив цих факторів на структуру проявляється через швидкість охолодження у процесі первинної кристалізації та за температури перетворення β -фази у низькотемпературні α і α' -фази, а також через силовий вплив на зварювальну ванну. Водночас характер первинної структури впливає і на наступні перетворення під час охолодження у твердому стані. Зокрема, ступінь дисперсності голчастої α -фази підвищується у разі зменшення величини зерен високотемпературної β -фази. Зниження величини погонної енергії, за інших рівних умов, сприяє подрібненню литої структури зварних швів та підвищенню ступеня дисперсності низькотемпературних α і α' -фаз. Спостерігається при цьому і деяке збільшення вмісту α' -фази. Аналогічний вплив погонної енергії відзначено у роботі [4] під час зварювання сплаву ОТ4-1.

Певним чином впливає і частота зовнішнього поперечного магнітного поля. За її збільшення від 2,0 до 14,8 Гц відбувається подрібнення як первинної, так і кінцевої мікроструктури зварних швів. Позитивний вплив зовнішнього магнітного поля за частот реверсування 4...20 Гц на розмір зерен α -фази. зокрема її мартенситних голок, відзначається також у роботі [3]. Дослідження впливу способу газового захисту під час зварювання на структуру зварних з'єднань не виявило певних закономірностей. Тільки за явно недостатнього вмісту аргону на поверхні швів утворюється шар, насичений газами, у якому виникли тріщини, як гарячі кристалізаційні, так і холодні.

Аналіз результатів засвідчив, що характер мікроструктури зварних з'єднань, отриманих різними методами зварювання, принципово аналогічний – це суміш α і α' -фаз. Враховуючи величину зерен цих фаз, як у зварних швах, так і в зоні термічного впливу, а також формування поверхні швів і розмір крупнозернистої колошовної зони, можна стверджувати, що за однаковою погонною енергією, більш дрібнозерниста структура зварних з'єднань має місце при імпульсно-дуговому зварюванні. Досліджено розподіл водню у зварних з'єднаннях титанового сплаву ОТ4 за допомогою методу локальної контактної терс (ЛКТЕРС).

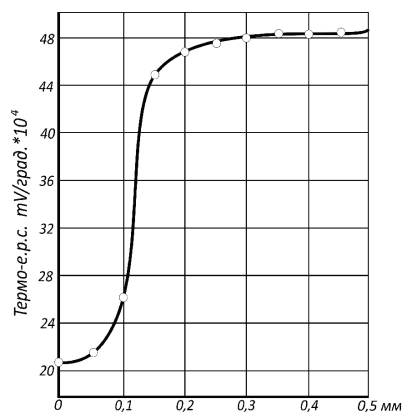


Рис. 2. Розподіл ЛКТЕРС за товщиною наводненого зразка

Спочатку проводили дослідження з метою визначення чутливості виявлення водню цим методом. З цієї метою листові зразки зі сплаву ОТ4 товщиною 2 мм наводнювали шляхом їх витримання у 10 %-му розчині соляної кислоти за 85 °С впродовж 50 год. Після цього за товщиною пластини на мікрошліфах здійснювали замірювання величини ЛКТЕРС (рис. 2).

Характер її розподілу дає змогу стверджувати, що наводнення зразків відбулось на глибину до 0,3 мм. Товщина гідридного шару при цьому становить приблизно 0,15 мм, що підтверджено металографічним та рентгеноструктурним аналізами, а також заміром мікротвердості. Між гідридним шаром і основним не наводненим металом знаходиться шар твердого розчину водню у α -фазі з поступовим зменшенням його концентрації при наближенні до основного металу. Отже, метод ЛКТЕРС дає змогу досліджувати наявність і характер розподілу водню у зварних з'єднаннях титану та його сплавів. Заміри терс здійснювали на мікрошліфах, виготовлених із зразків, вирізаних поперек зварних з'єднань. Виявлено три ділянки її зниження. Перша ділянка протяжністю приблизно 0,3 мм знаходиться поблизу зони сплавлення. Друга ділянка зниження ТЕРС знаходиться у ЗТВ на віддалі близько 1 мм від основного металу. Протяжність її також, як і першої, приблизно 0,3 мм. Третя ділянка протяжністю 0,35 мм розміщена в основному металі на віддалі приблизно 4,5 мм від зони сплавлення.

Дискусія. Утворення першої ділянки сегрегації водню можна пояснити термо- та міжфазною дифузією у зоні сплавлення, спрямованої зі зварювальної ванни у тверду колошовну зону. Друга ділянка з підвищеним вмістом водню знаходиться у зоні термічного впливу, що нагрівалась до температур 900...1000 °С. Її виникнення зумовлюється одночасною дією двох протилежно спрямованих рухів водню – термодифузійного у напрямку зниження температури і міжфазного – із α -фази у високотемпературну β -фазу. Третя ділянка із підвищеним вмістом водню, що знаходиться в основному металі і відповідає його нагріванню до 300...400 °С, з одного боку, зумовлена термодифузією водню у α -фазі у напрямку зниження температури, а з іншого, різким падінням його розчинності у ній за температури нижчої за 300 °С.

Способи та режими зварювання впливають на основні параметри локальних ділянок зниження ТЕРС – їх місцезнаходження, протяжність, величину її максимального зниження. З підвищенням жорсткості режимів протяжність ділянок та величина максимального зниження ТЕРС дещо зменшуються. На третю ділянку режим зварювання впливає найменше. Протяжність її знаходиться у межах 0,15...0,30 мм. На місце знаходження цієї ділянки, визначене за віддаллю від зони сплавлення у напрямку основного металу, істотно впливає режим зварювання. Зі зменшенням погонної енергії ця віддаль помітно скорочується. Розміри другої ділянки, що знаходиться у ЗТВ, дещо більша, ніж третьої. Протяжність першої, найбільш високотемпературної, ділянки визначається режимом зварювання та знаходиться у межах 0,1...0,4 мм.

Отже, дослідження розподілу величини ТЕРС за перерізом зварних з'єднань дало змогу виявити, що за всіх способів і режимів зварювання сплаву ОТ4 утворюються локальні ділянки, збагачені воднем, що можуть негативно впливати на властивості зварних з'єднань.

Висновки. Проведені дослідження показали, що способи і режим зварювання певним чином впливають на мікроструктуру, вміст водню та властивості зварних з'єднань сплаву OT4. За принципово аналогічного характеру мікроструктури зварних з'єднань, – це суміш α і α' -фази, більш дрібнозерниста структура зварних з'єднань наявна під час імпульсно-дугового зварювання. Дослідження розподілу величини ТЕРС за перерізом зварних з'єднань дало змогу виявити, що за всіх способів і режимів зварювання утворюються локальні ділянки, збагачені воднем. З підвищенням жорсткості режимів протяжність цих ділянок та величина максимального зниження ТЕРС, а цим самим і вміст водню в них, дещо зменшуються. Зварювання із електромагнітним коливанням дуги, а також імпульсно-дугове забезпечують кращі умови для дегазації водню із ванни, порівняно із аргонодуговим зварюванням стаціонарною дугою. Найвищі показники статичної тріщиностійкості зразків із попередньо наведеною тріщиною відповідають способам зварювання у контрольованій атмосфері та електронно-променевому.

Література

1. Колачев Б.А. Механические свойства титана и его сплавов / Б.А. Колачев, В.А. Ливанов, А.А. Буханов. – М.: Изд-во "Металлургия", 1974. – 476 с.
2. Моисеев В.Н. Сварные соединения титановых сплавов / В.Н. Моисеев, Ф.Р. Куликов, Ю.Г. Кирилов, В.Л. Шолохова, Ю.В. Васькин. – М.: Изд-во "Металлургия", 1979. – 248 с.
3. Білоус В.Ю. Управління формуванням шва при зварюванні сплавів титану у вузький зазор вольфрамовим електродом з магнітокерованою дугою: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / В.Ю. Білоус; ІЕЗ ім. С.О. Патона. – К., 2008. – 20 с.
4. Зайчук Н.П. Структурний стан корпусу вентилятора сплаву OT4-1 / Н.П. Зайчук, П.П. Савчук, Н.Ю. Імбирович, Д.Ю. Шух // Наукові нотатки: Міжвузівський зб. – Луцьк, 2013. – Вип. 40. – С. 96-101.

Надійшла до редакції 16.05.2016 р.

Палаш В.М., Дзюбык А.Р., Палаш Р.В., Назар І.Б. Оценка способов сварки титанового сплава OT4

Исследовано влияние различных способов аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом: в непрерывном режиме в контролируемой атмосфере; в непрерывном режиме с местной потоковой защитой; импульсно-дуговая с местной поточной защитой; с электромагнитными колебаниями дуги при поточной защите аргоном; а также электронно-лучевая сварка на насыщение сварных соединений сплава OT4 водородом, их микроструктуру и стойкость к хрупкому разрушению. Методом замера локальной ТЭДС в сварных соединениях выявлены три участка, насыщенные водородом, что негативно влияет на их трещиностойчивость.

Ключевые слова: титановый сплав, водород, способа сварки, сварной шов, зона термического влияния, микроструктура сплава.

Palash V.M., Dzyubuk A.R., Palash R.V., Nazar I.B. Evaluation of Welding Titanium Alloy OT4

The effect of different types of TIG welding on gas saturation of hydrogen in welding joints of alloy OT4 have been studied in this project. Their microstructure and resistance to brittle fracture in the following: continuous mode in a controlled atmosphere; continuous operation with the local jet protection; pulsed arc with the local jet protection; electromagnetic waves in the arc jet argon protection; and electron beam welding. Three areas, enriched with hydrogen in welded joints, have been discovered by the method of measuring local TERP. Areas rich in hydrogen are proved to negatively affect joint crack-resistance.

Keywords: titanium alloy, hydrogen, welding methods, weld, heat-affected zone, alloy's microstructure.

УДК 543.57

ТЕРМІЧНИЙ АНАЛІЗ ДЕРЕВИНИ ВЕРБИ *SALIX VIMINALIS*

В.І. Ялечко¹, В.В. Кочубей², Я.М. Гнатишин³, Ю.П. Павловський⁴

Методом комплексного термогравіметричного та диференційного термічного аналізу досліджено вплив віку швидкоростучої енергетичної верби *Salix viminalis* на її теплотворну здатність. Установлено, що трирічна верба має більшу теплотворну здатність порівняно із однорічною вербою. Про це свідчить поява більш значних екзотермічних ефектів на кривих ДТА, які супроводжують процеси полуменевого горіння та згорання карбонізованого залишку зразків. Збільшення ступеня подрібнення зразків сприяє зростанню ефективності їх горіння. Про це свідчить інтенсивніша втрата маси зразків на всіх стадіях термолізу та зростання екстремумів на кривих ДТА.

Ключові слова: термічний аналіз, енергетична верба, біопаливо, дериватограф, термограма.

Актуальність питання. Сьогодні біомаса є четвертим видом палива для вироблення енергії [1-5]. Одним із різновидів біомаси є швидкоростуча фітоса, якої нині приблизно є 20 видів (верба, тополя, міскантус, евкаліпт, тополя, сорго, топінамбур тощо). Особливо популярна та поширена в усьому світі "Вербова енергетика" [6]. Енергетична верба – це рослина, яку вивели вчені шляхом селекції. Вона невибаглива до якості ґрунтів, має теплотворну здатність схожу до вугілля, поглинає у 10-15 разів більше двоокису вуглецю, ніж дикі породи дерев. Вербова енергетика є виробництвом замкненого циклу. Плантація верби дає не тільки енергетичну деревину, але й корм для тваринницьких господарств, які, водночас, забезпечують плантації добривами, потрібними для підвищеної врожайності. Нині найбільші плантації верби є у Швеції, які становлять приблизно 18-20 тис. га, у Польщі – понад 6 тис. га. В Україні перші плантації енергетичної верби з'явилися у Волинській, Львівській, Івано-Франківській та Рівненській області.

Як біопаливо найчастіше використовують трирічну швидкоростучу вербу. Однак під час заготовки деревини поряд із пагонами трирічної трапляються пагони дво- та навіть однорічної деревини. Для підвищення ефективності горіння на виробництві найчастіше використовують деревину високого ступеня подрібнення. Однак під час перероблення біомаси ніколи не вдається досягти одного ступеня її подрібнення.

Мета роботи – методом комплексного термічного аналізу дослідити вплив віку та ступеня подрібнення швидкоростучої енергетичної верби *Salix viminalis* на її теплотворну здатність та ефективність перебігу процесів горіння.

Об'єкт та методи дослідження. Об'єктами досліджень були зразки верби *Salix viminalis* однорічної із розміром частинок $d < 0,08$ мм (зразок 1) та $d \approx 0,5$ мм (зразок 2); трирічної верби *Salix viminalis* із розміром частинок $d < 0,08$ мм (зразок 3) та $d \approx 0,5$ мм (зразок 4). Розмір частинок різного ступеня под-

¹ асист. В.І. Ялечко – НЛТУ України, м. Львів;

² доц. В.В. Кочубей, канд. хім. наук – НУ "Львівська політехніка";

³ доц. Я.М. Гнатишин, канд. техн. наук – НЛТУ України, м. Львів;

⁴ доц. Ю.П. Павловський, канд. хім. наук – НУ "Львівська політехніка"