Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України

Харківський національний університет радіоелектроніки

ПОНОМАРЬОВА ГАННА ВІКТОРІВНА

УДК 621.317.082.5

КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ В АВТОМАТИЗОВАНІЙ СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ ВИТЯГУВАННЯМ МІКРОСТРУКТУРОВАНИХ ОПТИЧНИХ ВОЛОКОН

05.13.07 – автоматизація процесів керування

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2011

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
Филипенко Олександр Іванович,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
декан факультету електронних апаратів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Кулік Анатолій Степанович,
Національний аерокосмічний університет
ім. М.Є.Жуковського "ХАІ" (м. Харків),
завідувач кафедри систем керування літальними апаратами

доктор технічних наук, доцент
Бондаренко Олег Володимирович,
Одеська національна академія зв'язку,
завідувач кафедри волоконно-оптичних ліній зв'язку

Захист відбудеться "_____" _________ 2011 р. о _____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.08 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки, за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

Автореферат розісланий: "_____" ___________ 2011 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради І.П. Плісс

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасні дослідження в галузі удосконалення експлуатаційних властивостей оптичних волокон призвели до створення нових типів оптичних волокон. Саме до таких волокон відносяться мікроструктуровані оптичні волокна (МОВ), хвилевідні області яких утворені наборами мікроскопічних (в більшості випадків повітряних) каналів в діелектричному середовищі. Унікальні експлуатаційні властивості цих волокон забезпечуються спрямованим вибором структури перерізу та його геометричних параметрів. Технологія виготовлення МОВ знаходиться на стадії доопрацювання та вдосконалення, в її основі полягають традиційні технології виготовлення стандартних оптичних волокон методом витягування із кварцової заготовки. Структура та геометричні параметри мікроструктурованої оболонки волокна жорстко залежать від технологічного процесу витягування. З однієї заготовки можна отримати МОВ з різними оптико-геометричними параметрами. Приймаючи до уваги залежність експлуатаційних характеристик й оптичних властивостей МОВ від геометрії перерізу, технологія їх виготовлення вимагає удосконалення методів контролю та автоматизованого керування. Основними технологічними параметрами, що визначають перебіг процесу витягування МОВ із заготовок є: температура заготовки, температура в зоні формоутворення, робочий перепад тиску при витягуванні, швидкість подачі заготовки, швидкість витягування, швидкість охолодження волокна, характеристики витягнутого МОВ, властивості використовуваної сировини, властивості і термодинамічні параметри робочих середовищ та ін.

До теперішнього часу контроль параметрів витягнутого МОВ обмежується автоматизованим контролем зовнішнього діаметру. Керування процесом витягування здійснюється лише за критерієм стабілізації зовнішнього діаметру витягнутого волокна у встановлених межах. Однак виявлено, що при постійному значенні зовнішнього діаметру, внутрішня структура МОВ може мати дефекти. У разі витягування мікроструктурованого оптичного волокна вважається за необхідне проводити контроль його оптико-геометричних параметрів, які характеризують зміну структури перерізу МОВ впродовж неперервного процесу витягування.

Саме розробка методу і технологічного устаткування автоматизованого контролю оптико-геометричних параметрів мікроструктурованих оптичних волокон безпосередньо після зони формоутворення і використання їх результатів для керування процесом витягування дозволить істотно підвищити їх параметри якості.

Отже контроль технологічних параметрів в автоматизованій системі керування виготовленням МОВ є актуальною задачею, яка залишається не вирішеною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках держбюджетних НДР «Теоретичні основи створення перспективних компонентів та нових технологій їх виробництва для широкого класу волоконно-оптичних систем» (№ДР0105U002739), НДР «Конструкторсько-технологічні основи створення перспективних компонентів мікроелектромеханічних

систем та технології їх виробництва» (№ДР0108U002216); НДР «Теоретичні основи мікроелектромеханічних систем, проектування та технології їх виробництва для гнучких інтегрованих систем» (№ДР0110U002594), що виконувались згідно наказів Міністерства освіти і науки України за результатами конкурсного відбору проектів наукових досліджень. В межах зазначених тем здобувачкою як виконавцем розроблені моделі структури МОВ у різних стадіях досліджуваного процесу, метод оцінки параметрів формоутворення МОВ в процесі витягування.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення якості керування процесом витягування мікроструктурованих оптичних волокон на основі нового методу контролю внутрішньої структури волокон як складової частини автоматизованої системи керування технологічним процесом.

Досягнення поставленої мети здійснюється шляхом вирішення таких основних задач:

– дослідження технологічного процесу витягування МОВ як об'єкта автоматизованого керування, дослідження існуючих систем керування технологічним процесом (ТП), визначення основних технологічних параметрів, що впливають на оптико-геометричні параметри волокна;

– аналіз оптико-геометричних параметрів МОВ та їх зв’язок з експлуатаційними характеристиками волокон;

– розробка нового підходу до керування параметрами ТП витягування МОВ та побудова моделі ТП витягування МОВ засобами ідентифікації систем;

– обґрунтування та удосконалення методу контролю технологічних параметрів процесу витягування МОВ, що дозволить визначати структурні зміни протягом усього безперервного ТП безпосередньо після зони формоутворення;

– розробка модулю автоматизованого контролю оптико-геометричних параметрів МОВ;

– розробка методу оцінки параметрів неперервного формоутворення мікроструктурованих оптичних волокон в процесі витягування, для кількісної та якісної оцінки стану структури МОВ;

– проведення комп’ютерної та апаратної емуляції процесу контролю структури МОВ.

Об'єкт дослідження – процеси керування виготовленням мікроструктурованих оптичних волокон.

Предмет дослідження – методи контролю технологічних параметрів в автоматизованій системі керування витягуванням мікроструктурованих оптичних волокон.

Методи дослідження. При вирішенні задач роботи застосовувались методи теорії системного аналізу і теорії автоматичного керування, що дозволили дослідити технологічний процес як систему; оптичні телевізійні методи сприйняття зображення і оптичних полів, що використані при удосконаленні системи контролю технологічних параметрів витягування мікроструктурованих оптичних волокон; методи математичної статистики, кореляційний та регресійний аналізи, які використані при розробці методу оцінки параметрів формоутворення структури

волокна; методи параметричної ідентифікації, що дозволили визначити математичну модель технологічного процесу витягування мікроструктурованих оптичних волокон як об'єкта керування; методи експериментального моделювання, що дозволили підтвердити ефективність теоретичних положень.

Наукова новизна одержаних результатів. Теоретичні та експериментальні дослідження, наведені в дисертаційній роботі, дозволили вирішити важливе наукове завдання удосконалення процесу керування та автоматизації контролю технологічних параметрів у виробництві мікроструктурованих оптичних волокон. До нових, одержаних особисто автором, належать такі результати:

1) вперше розроблено метод оцінки параметрів неперервного формоутворення мікроструктурованих оптичних волокон в процесі витягування, який базується на зоновому аналізі динаміки змін коефіцієнтів кореляції і інтегральних показників оптичної інтенсивності зображення перерізу, що дозволяє виявити просторову локалізацію дефектів структури та дати їх кількісну оцінку;

2) удосконалено підхід до керування процесом витягування мікроструктурованих оптичних волокон, який на відміну від існуючих базується на результатах поздовжнього оптичного контролю внутрішньої структури мікроструктурованих оптичних волокон, що дозволяє побудувати систему керування процесом формоутворення мікроструктурованих оптичних волокон з урахуванням структури перерізу та допусків на її геометричні параметри;

3) отримав подальший розвиток оптичний неруйнівний метод контролю перерізу мікроструктурованого оптичного волокна, в якому на відміну від існуючих для оцінювання параметрів показника профілю заломлення запропоновано інтегральний показник інтенсивності оптичного поля, що забезпечує можливість виявити дефектні деформаційні зміни і удосконалити процес керування технологічними параметрами.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблена загальна структура модулю автоматизованого контролю технологічних параметрів процесу витягування МОВ, реалізовано компоненти модулю для оцінки параметрів неперервного формоутворення мікроструктурованих оптичних волокон. Проведена параметрична ідентифікація моделі технологічного процесу витягування МОВ, як об'єкту автоматизації, за каналом регулювання температурою витягування на підставі запропонованого інтегрального показника інтенсивності оптичного поля. На основі математичної моделі ТП витягування та розробленого методу оцінки параметрів неперервного формоутворення МОВ розроблені алгоритмічне, програмне та технічне забезпечення автоматизованого модулю контролю технологічних параметрів процесу витягування МОВ, як складової системи керування ТП. Розроблений математичний метод оцінки параметрів формоутворення МОВ в процесі витягування експериментально досліджений та його показники підтверджені результатами відповідних вимірювань на атестованому технічному обладнані.

Результати розробок та досліджень використані для створення диспергуючого елементу фотоколориметру КФК-3 в Державній установі «Інститут загальної та невідкладної хірургії АМН України», що дозволило збільшити діапазон спектральної області пристрою на 15%, знизити помилку вимірювань на 5% при визначенні різних біохімічних показників (акт від 10.04.2011 р.), в науково-дослідних роботах Харківського національного університету радіоелектроніки (акт від 04.03.2011 р.), а також при підготовці навчальних курсів, що читаються студентам спеціальності «Технології та засоби телекомунікацій» Харківського національного університету радіоелектроніки (акт від 04.03.2011 р.).

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати дисертаційної роботи одержані автором самостійно. У публікаціях, написаних у співавторстві, авторці належать: [1] – математичний метод оцінки параметрів формоутворення МОВ в процесі витягування; [2] – запропоновано новий підхід до керування процесом витягування МОВ; [3] – удосконалено оптичний неруйнівний метод контролю перерізу МОВ, запропоновано для оцінювання параметрів показника профілю заломлення використовувати інтегральний показник інтенсивності оптичного поля [4] – запропоновано низку оптико-геометричних параметрів МОВ та допуски на їх розміри, що необхідно забезпечувати при автоматизованому керуванні процесом витягування; [5] – проведено аналіз, вибір та обґрунтування технічного забезпечення методу контролю конструктивно-технологічних параметрів МОВ; [6] – аналіз методів відновлення зображення при оптичному контролі МОВ; [7] – аналіз фізико-хімічних процесів при формоутворенні оптичного волокна, що забезпечує певні оптичні властивості; [8] – розроблено вимоги до методу контролю конструктивно-технологічних параметрів МОВ та до технічного забезпечення; [9] – аналіз технологічного процесу витягування МОВ та обґрунтування створення удосконаленої автоматизованої системи керування ТП; [10] – запропоновано критерії та обмеження для математичного забезпечення АСК ТП витягування, результати експериментальних досліджень; [11] – розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення модулю автоматизованого контролю геометричних параметрів МОВ; [12] – результати досліджень впливу конструктивно-технологічних параметрів на властивості компонентів на базі мікроструктурованих оптичних волокон.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на 1-й Міжнародній конференції «Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития» МФР–2008 (Харків, 2008 р.), 2-й Міжнародній науковій конференції «Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития» (Харків, 2009 р.), IV Всеросійській науковій конференції «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB» (Астрахань, 2009 р.), 12-му міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка і молодь в XXI ст.» (Харків, 2008 р.), 13-му міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка і молодь в XXI ст.» (Харків, 2009 р.), 6-й Міжнародній молодіжній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми

радіотехніки і телекомунікацій РТ-2010» (Севастополь, 2010 р.), 10th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (Севастополь, 2010 р.).

Публікації. Результати наукових досліджень викладено в 14 друкованих працях: 7 статей у наукових фахових виданнях України, 7 тезах доповідей і збірках праць наукових міжнародних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, що містять основні результати, додатків і списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації складає 210 сторінок, що включає 68 рисунків (на 34 сторінках), 15 таблиць (на 5 сторінках), 13 додатків (на 54 сторінках) та список використаних джерел складає 100 найменувань (на 10 сторінках).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі досліджень, наукову новизну і практичне значення одержаних результатів. Наведено відомості про впровадження результатів роботи, апробацію, особистий внесок здобувачки та публікації.

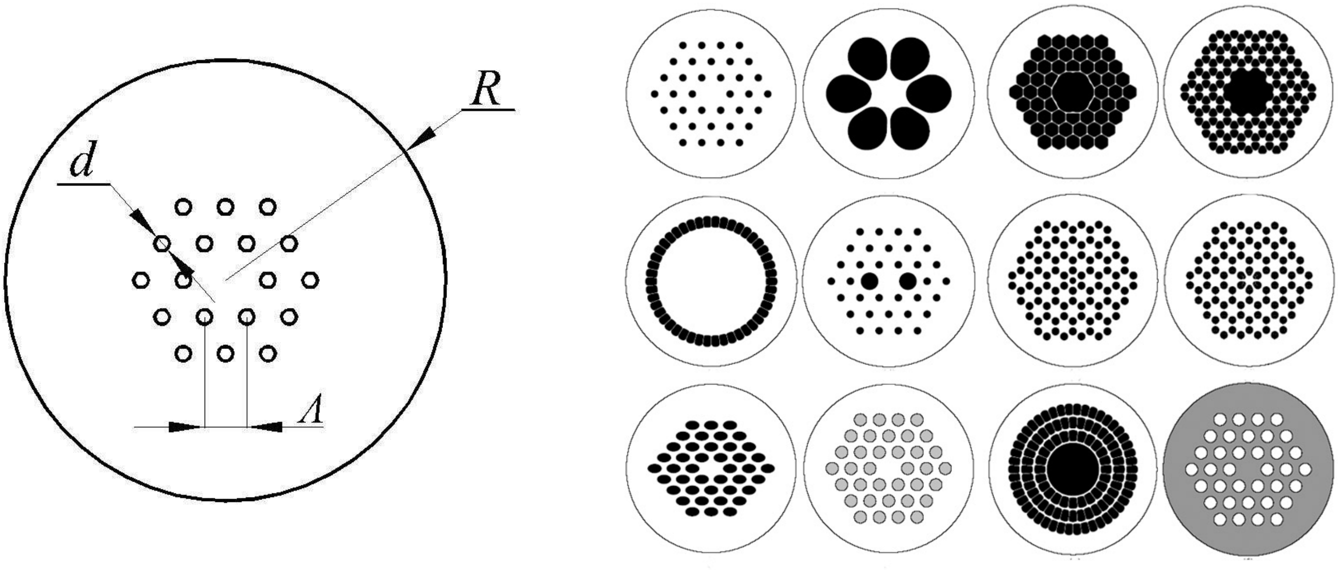
У **першому розділі** проаналізовано стан проблеми контролю технологічних параметрів процесу витягування МОВ в автоматизованій системі керування ТП і розглянуто існуючі підходи до їх вирішення. Проведений аналіз оптико-геометричних параметрів мікроструктурованих оптичних волокон та вплив цих параметрів на їх експлуатаційні. Визначено, що втрати, які викликані невідповідністю геометричних параметрів капілярної структури волокна, а саме флуктуаціями їх діаметру та нерегулярністю розташування, складають не менше 0,27 дБ/км (47% від загальної величини втрат). Ці втрати властиві лише цьому типу волокон, що пов'язано з недосконалістю методів контролю в системі керування процесом виготовлення.

В результаті проведеного аналізу визначена низка геометричних параметрів структури перерізу МОВ та допуски на ці параметри, дотримання яких необхідно для отримання МОВ з заданими оптичними характеристиками: діаметр повітряних отворів d; міжцентрова відстань між сусідніми отворами (крок) Λ; кількість концентричних періодичних шарів в оболонці N; просторове розташування отворів.

Схематичне зображення поперечного перерізу МОВ з гексагональною структурою отворів наведено на рис.1 (а).

При проектуванні даних волокон для отримання унікальних експлуатаційних характеристик змінюють також загальну структуру перерізу. Варіанти різноманіття структур МОВ наведені на рис.1 (б), де кожна зі структур забезпечує властиві лише їй оптичні параметри.

Зазначені особливості впливають як на складність самого технологічного процесу виготовлення, так і на складність контролю таких складних структур.



а) б)

Рис.1. Загальний вигляд перерізу волокна з 2 шарами отворів навколо кварцової серцевини (а) та геометричних моделей варіантів структур МОВ (б)

Аналіз технологічного процесу виготовлення мікроструктурованих оптичних волокон показав, що значні флуктуації геометричних параметрів структури перерізу МОВ пов’язані з процесом витягування МОВ із заготовки. Встановлені основні чинники цих флуктуацій та визначені технологічні параметри ТП витягування МОВ, які дозволяють керувати процесом формоутворення волокна.

Проведений аналіз впливу технологічних параметрів процесу на оптико-геометричні параметри МОВ дозволив сформулювати основні задачі наукового дослідження, викладені в дисертаційній роботі.

У **другому розділі** удосконалено підхід до керування процесом витягування мікроструктурованих оптичних волокон, що базується на результатах поздовжнього оптичного контролю внутрішньої структури волокна.

При розробці заходів щодо автоматизованого контролю технологічних параметрів МОВ запропоновано використовувати комплексний підхід, що дозволяє розкрити цілісність системи, враховувати внутрішні і зовнішні зв'язки, узгодженість рішень, як для окремих елементів, так і для системи в цілому; передбачити можливість розвитку і адаптації.

Розроблена загальна структура автоматизованої системи керування параметрами ТП витягування, що побудована за принципом децентралізованої системи керування, до складу якої входить розроблений модуль контролю технологічних параметрів МОВ (рис.2).

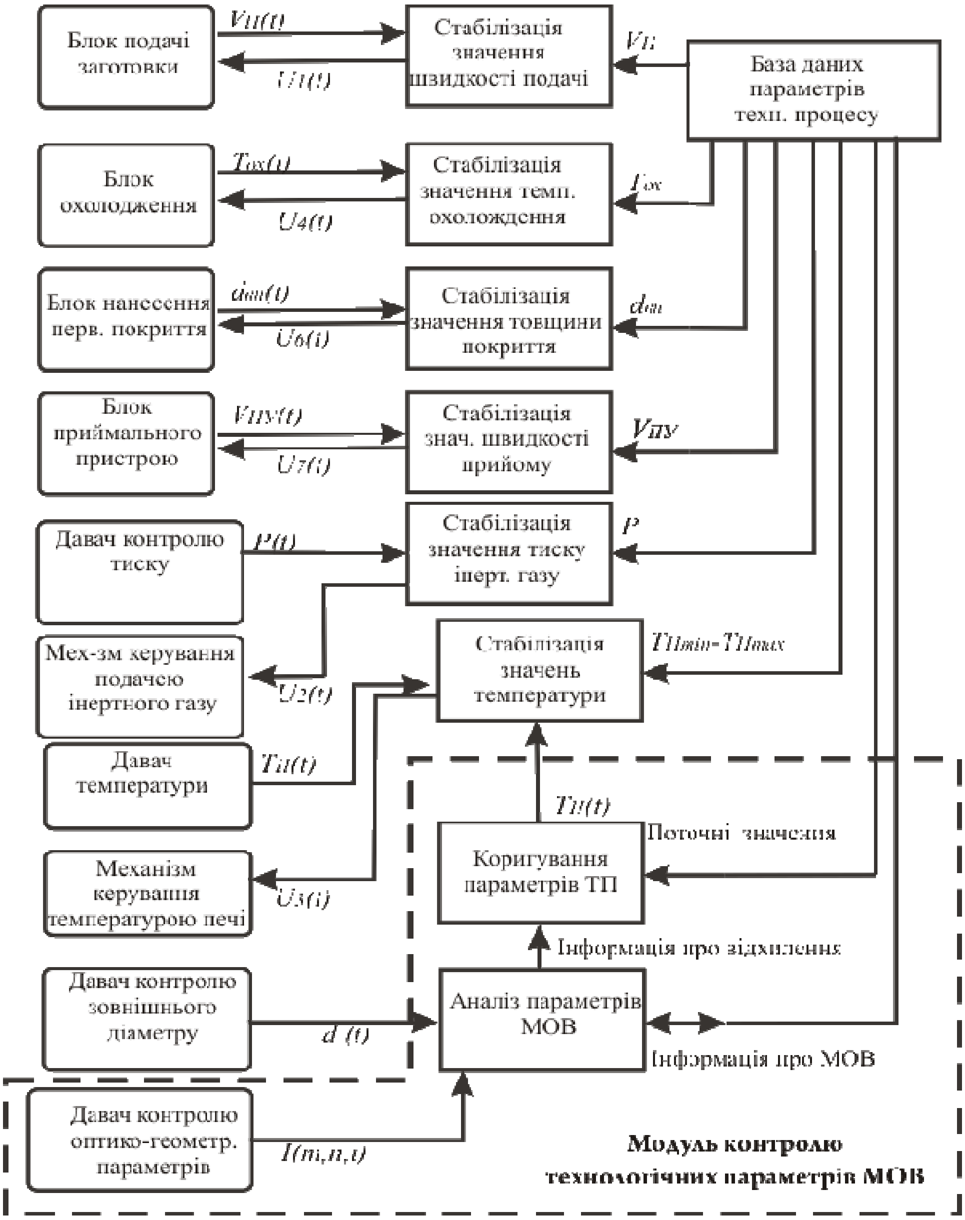


Рис. 2. Структурна схема взаємодії елементів системи керування з об'єктом керування

При розробці модулю контролю вирішувалася проблема узгодження всіх елементів системи: формування мети системи, визначення функціональної структури, інформаційного, математичного, алгоритмічного, програмного і технічного забезпечення, які у свою чергу визначаються складом і функціями технологічного об'єкту керування.

Освітлювальну систему пропонується побудувати на базі методу світлого поля. Це дозволяє в структурі об'єкту дослідження розрізнити ділянки, які відрізняються показником заломлення. В роботі обґрунтований вибір метода фокусування, наведено математичні співвідношення для аналізу профілю показника заломлення волокна в процесі витягування. Технічне забезпечення модуля контролю побудовано за таким принципом: освітлювальна система модулю забезпечує подачу

паралельного некогерентного світлового пучка постійної інтенсивності на волокно під прямим кутом до осі, а волокно в цьому випадку грає роль градієнтної лінзи. Промінь, що входить у волокно на відстані l від оптичної осі, заломлюється і виходить з лінзи під кутом, що відрізняється від кута входу.

У площині зображення лінзи (в зоні системи реєстрації поля) зондуючий промінь попадає в точку на відстані $I=I(l)$ від оптичної осі.

Зв'язок показника заломлення Δn та координати $I(l)$ може бути оцінений із співвідношення

$$n(r) - n_1 = \frac{1}{\pi L} \int_r^{\infty} \frac{l - I(l)}{\sqrt{l^2 - r^2}} dl, \qquad (1)$$

де $n(r) - n_1$ – різниця профілю показників заломлення волокна та зовнішнього середовища, $I(l)$ – інтенсивність оптичного поля в площині зображення, l – відстань променю від оптичної осі, L – відстань від оптичної осі до площини реєстрації, r – радіус волокна.

За умови використання цього методу у площині зображення реєструється інтенсивність оптичного поля (рис. 3), яка пов'язана з профілем показника заломлення співвідношенням (1).

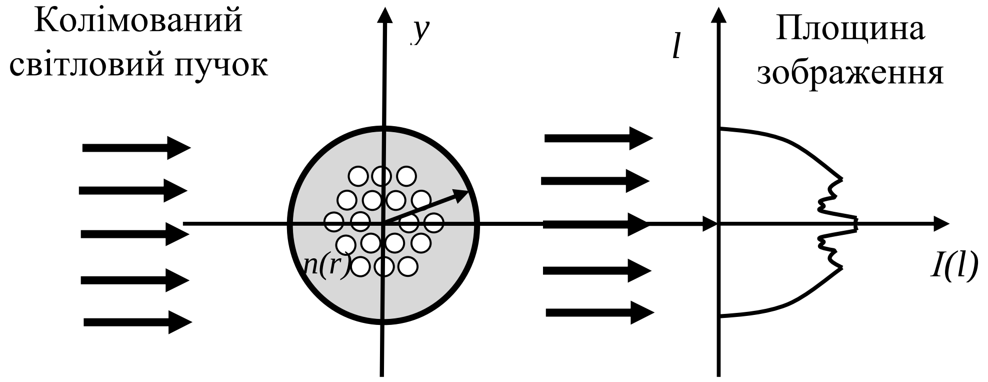


Рис. 3. Схема реєстрації розподілу профілю показника заломлення

Для оцінювання параметрів показника профілю заломлення запропоновано інтегральний показник інтенсивності оптичного поля

$$J_m = \{X_1, X_2, ..., X_{Nr}\},$$

де X_{Nr} – момент першого порядку інтенсивності оптичного поля у локальній зоні перерізу МОВ, Nr – кількість зон, яка залежить від структури МОВ.

Удосконалена модель ТП витягування МОВ за рахунок введення до множини вихідних параметрів $Y(t)$ нової інформаційної складової $I(m,n,t)$

$$Y(t) = \{V_П(t), P(t), T_П(t), T_{Ok}(t), d(t), I(m,n,t), d_{ов}(t), V_B(t)\},$$

де $V_П(t)$ – швидкість подачі заготовки; $P(t)$– тиск інертного газу в отворах структури; $T_П(t)$ – температура в печі; $T_{Ox}(t)$ – температура охолоджуваної

системи; $d(t)$– зовнішній діаметр волокна; $I(m,n,t)$ – масив розподілу інтенсивності оптичного поля; $d_{ов}(t)$– зовнішній діаметр волокна після нанесення первинного покриття; $V_B(t)$– швидкість обертання шпилястої лебідки.

Проведений апріорний аналіз переліку вхідних змінних з метою включення у склад моделі пріоритетних, найбільш впливовіших на вихідну змінну. Враховуючи особливості процесу витягування МОВ, у якості регулюючого параметру обрана $T_П(t)$. За рахунок зміни $T_П(t)$виконується формотворення МОВ. Швидкість подачі заготовки є постійною. Проводилося вимірювання інтегрального показника $I(m,n,t)$ у перерізі МОВ. Аналіз послідовних спостережень температури формуючого елементу та інтегрального показника інтенсивності оптичного поля дозволив провести параметричну ідентифікацію моделі. За базову структуру моделі обрана модель типу

$$y(k) = G(z)u(k) + H(z)e(k),$$

де $e(k)$ – випадкова складова типу «білий шум»; $u(k)$ – вхідний сигнал; $G(z)$ – передатна функція від u до y; $H(z)$ – передатна функція від e до y.

Проведена параметрична ідентифікація множини лінійних моделей (ARX,ARMAX, «вхід-вихід»). Оцінка якості параметричної моделі виконувалася за допомогою коефіцієнту кореляції передбачених значень вихідної величини та спостереженими. Обрана модель «вхід-вихід» з максимальним коефіцієнтом кореляції (88,7%) з параметрами

$$y(k) = [B(z)/F(z)]u(k) + e(k),$$

$$B(z) = 0{,}001767z^{-1} + 0{,}002959z^{-2} + 0{,}06609z^{-3} + 0{,}0317z^{-4},$$

$$F(z) = 1 - 1{,}355z^{-1} + 0{,}4043z^{-2} + 0{,}1322z^{-3} - 0{,}0769z^{-4}.$$

Таким чином, передатна функція дискретної та неперервної системи відповідно мають вигляд

$$W(z) = \frac{0{,}0317z^{-4} + 0{,}066z^{-3} + 0{,}002959z^{-2} + 0{,}00176z^{-1}}{0{,}0769z^{-4} + 0{,}1322z^{-3} + 0{,}505z^{-2} - 1{,}355z^{-1} - 1};$$

$$W(s) = \frac{1{,}173s^4 - 8{,}491s^3 + 1538s^2 - 3913s + 5{,}34 \cdot 10^5}{s^5 + 45{,}15s^4 + 2363s^3 + 3681s^2 + 27040s + 5{,}45 \cdot 10^5},$$

де s – оператор Лапласу.

Проведений аналіз побудованої моделі технологічного процесу дозволив визначити стійкість системи та основні статичні та динамічні характеристики об’єкта: час регулювання – 1,07 с; перерегулювання – 0 %; статичний коефіцієнт передачі об’єкту – 0,97; запас стійкості за амплітудою – 12,2 дБ.

Введення нової інформаційної складової та ідентифікація моделі, що пов’язує цю складову з технологічними параметрами, дозволяє удосконалити автоматизовану систему керування технологічним процесом витягування МОВ та забезпечити неперервний контроль структури волокна впродовж всього процесу.

У **третьому розділі** вперше розроблено метод оцінки параметрів неперервного формоутворення МОВ в процесі витягування, який дозволяє визначати вид дефекту, просторову локалізацію та його кількісну оцінку. Результати комп'ютерного моделювання процесів утворення дефектів структури дозволили проаналізувати ефективність методу оцінки.

Постановка завдання автоматизованого контролю технологічних параметрів процесу витягування МОВ обумовлена гострою необхідністю набуття геометричних параметрів структури МОВ в межах допустимих значень впродовж всього неперервного технологічного процесу витягування волокна за допомогою автоматизованого керування параметрами ТП.

Реалізація завдання автоматичного аналізу і ухвалення рішення про відповідність геометричної структури поточного перерізу волокна еталонній запропоновано виконувати оптичним методом контролю, що набув подальшого розвитку, в основі якого лежить аналіз інтегральних і локальних особливостей розподілу інтенсивності оптичного поля $I(m,n)$ структури. Розподіл інтенсивності оптичного поля перерізу волокна технічними засобами перетворюється в сукупність електричних сигналів, далі піддається дискретизації з квантуванням значення яскравості поля.

Отже, при реєстрації КМОН-матрицею до подальшої математичної обробки надходить дискретний масив графічних даних

$$I(m,n) = \begin{vmatrix} i_{11} & i_{12} & i_{13} & \cdots & i_{1n} \\ i_{21} & i_{22} & \cdots & \cdots & \cdots \\ i_{31} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ i_{m1} & \cdots & \cdots & \cdots & i_{mn} \end{vmatrix},$$

де i_{mn} – значення інтенсивності оптичного поля у відповідній точці зображення (в разі півтонового зображення $0 \le i_{mn} \le 255$), кожен ряд характеризує окремий переріз волокна.

Інформація про оптичне поле у рамках перерізу подається вектором розподілу інтенсивності оптичного поля

$$I(n) = \{i_1, i_2, ..., i_n\};$$

де i_n – нормоване значення інтенсивності оптичного поля відповідного елементу вектора, набуває значення з фіксованого діапазону $i_n \in R$, $i_n \in [0,1]$.

Таким чином, впродовж всього процесу витягування заготівки формується множина $N' = \{ I_1 , I_2 ,..., I_k \}$, де k – кількість перерізів.

В технологічному процесі виготовлення МОВ за еталонний розподіл інтенсивності $I_E(n)$ можливо використовувати інформацію про розподіл інтенсивності в межах перерізу заготовки, який отриманий із застосуванням запропонованого методу контролю.

За допомогою комп'ютерного моделювання різних структур МОВ, проведена

комп'ютерна емуляція процесу контролю технологічних параметрів МОВ, розглянуто характер змін цих показників при утворенні двох ймовірних дефектів (рис.4).

При витягуванні геометричні параметри повинні змінюватися пропорційно, тому використання розподілу інтенсивності перерізу заготовки МОВ у якості еталонного розподілу є обґрунтованим для розробленого методу контролю.

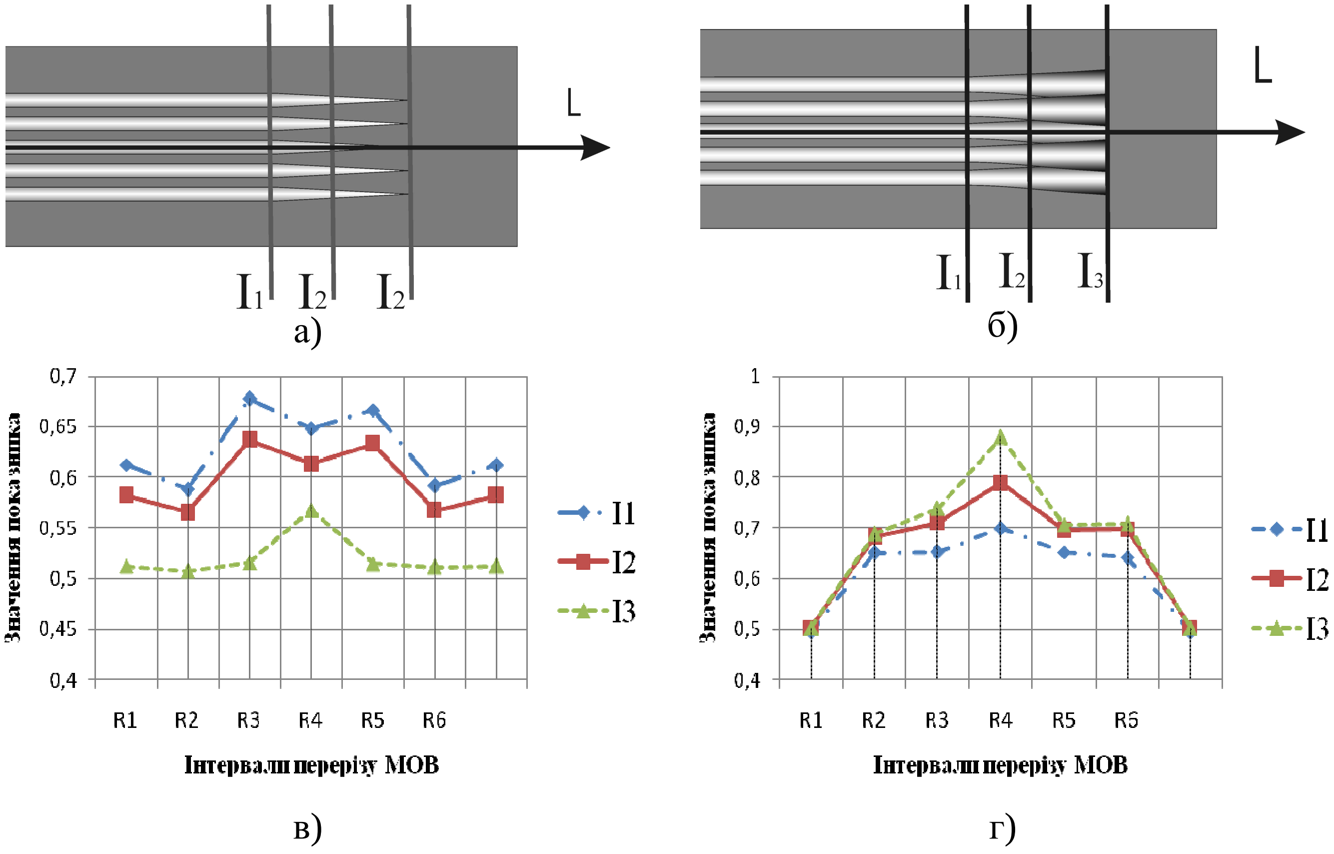


Рис. 4. Графічні моделі дефектів колапсу (а) та руйнування структури МОВ (б), значення показника у перерізах при колапсі (в) та руйнуванні структури (г)

З метою визначення зони дефекту необхідно виділяти і аналізувати інтегральні показники інтенсивності залежно від геометричних характеристик перерізу структури МОВ, створеної на етапі проектування і математичного моделювання оптичних властивостей. Враховуючи вищенаведене, запропоновано область значень розподілення X поділити на Nr інтервалів з урахуванням структури перерізу МОВ.

Оцінку поточного розподілу інтенсивності оптичного поля необхідно проводити в рамках кожного інтервалу, що забезпечить можливість виявлення локалізації дефекту.

Метод оцінки параметрів неперервного формоутворення мікроструктурованих оптичних волокон в процесі витягування реалізується у декілька етапів.

На першому етапі проводиться вибірка значень розподілу інтенсивності оптичного поля в перерізі волокна $I(n)$ розміром m через рівні інтервал часу t, оцінюється міра різниці кожного перерізу від еталонного за значенням парного

коефіцієнта кореляції. Отримавши значення коефіцієнту кореляції, можна дати якісно-кількісну оцінку тісноти зв'язку розподілу, який аналізується, з еталонним.

Якщо розрахований коефіцієнт знаходиться в межах допустимих значень, процес витягування вважається таким, що не підлягає коригуванню.

Процедуру встановлення кореляційної залежності проводиться в такій послідовності:

- розрахунок коефіцієнта парної кореляції (КПК) між сукупністю випадкових величин $I(n)$ і $I_E(n)$;

- його статистична оцінка (перевірка значимості за критерієм Ст'юдента).

На другому етапі з метою визначення характеру, міри і швидкості утворення дефекту проводиться регресійний аналіз інтегрального показника розподілення інтенсивності оптичного поля досліджуваної вибірки вздовж локальних зон.

Враховуючи, що аналізу підлягає відрізок витягнутого МОВ до 2 мм (в залежності від геометричних характеристик обраної КМОН-матриці), використовуючи метод кусково-лінійної апроксимації в рамках аналізованого відрізку, залежність значення інтегрального показника інтенсивності поля X_i від часу вважаємо лінійною, тоді коефіцієнти лінійної регресії b_0 та b_1 характеризують лінійний зсув інтегрального показника інтенсивності та ступінь дефекту відповідно.

Коефіцієнти b_1 і b_0 визначаються за допомогою методу найменших квадратів в межах досліджуваної довжини відрізку МОВ залежно від часу. Оцінку адекватності апроксимуючої моделі пропонується проводити за критерієм Фішера, який визначається як співвідношення дисперсії відтворності до залишкової дисперсії.

В якості критерію для оцінки параметрів структури МОВ запропоновано використовувати кортеж

$$\nu = \{r, \Delta b_1, b_0\}, \tag{2}$$

де r – спільний коефіцієнт парної кореляції між поточним розподілом і еталонним; Δb_0 – лінійний зсув значення інтегрального показника J_m; b_1 – швидкість утворення дефекту.

Введено обмеження для критерію (2) у вигляді системи нерівностей

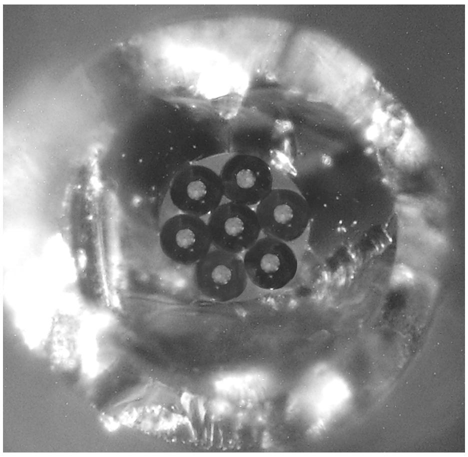
$$\begin{cases} r > r_{кр}, \Delta b_0 = 0 \pm \delta_1, b_1 = 0 \pm \delta_2; \\ r < r_{кр}, \Delta b_0 = 0 \pm \delta_1, b_1 = 0 \pm \delta_2; \\ r < r_{кр}, \Delta b_0 > 0 \pm \delta_1, b_1 > 0 \pm \delta_2; \\ r < r_{кр}, \Delta b_0 < 0 \pm \delta_1, b_1 > 0 \pm \delta_2, \end{cases} \tag{3}$$

де δ_1, δ_2 – допустимі відхилення Δb_0 та b_1 відповідно (довірчі інтервали); $r_{кр}$ – критичне значення коефіцієнту кореляції.

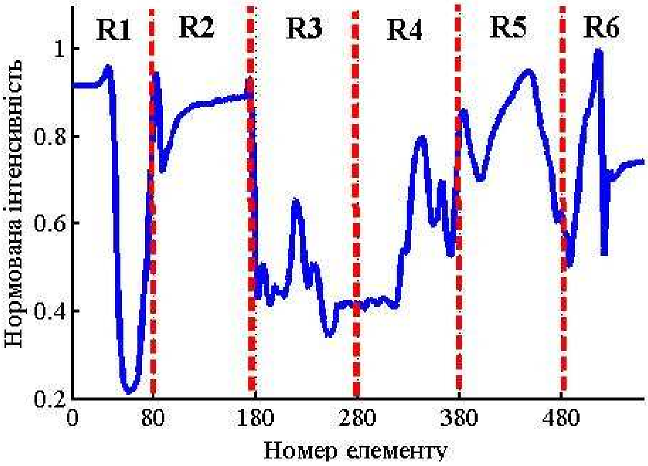
В (3) перша група обмежень відповідає нормальному ходу ТП – дефектів структури не виявлено; друга група нерівностей відповідає дефекту, пов’язаному з відхиленням значення кроку між отворами структури; третя група – дефекту руйнування структури отворів МОВ; остання група обмежень відповідає дефекту колапсу структури МОВ.

У **четвертому розділі** наведені результати експериментальної перевірки теоретичних положень, викладених у дисертації.

Матеріалом для експериментальних досліджень обрано відрізок мікроструктурованого оптичного волокна довжиною 100 мм із зовнішнім діаметром 130 мкм. Метод виготовлення заготовки є упаковка капілярів в необхідну структуру (рис.5). Структура досліджуваного волокна складається з одного шару повітряних отворів (6 отворів діаметром 4 мкм), розташованих навколо порожнистої серцевини діаметром 4 мкм з кроком 14 мкм.



а)



б)

Рис. 5. Мікрознімок торця МОВ (а) та еталонний розподіл інтенсивності оптичного поля в перерізі волокна (б)

Методика проведення досліджень полягала в проведенні апаратної емуляції процесу контролю технологічних параметрів МОВ та порівнянні результатів з вимірюванням геометричних параметрів відповідного зразку МОВ оптичним методом поперечного зондування перерізу волокна з використанням атестованого обладнання.

Експериментальна установка містила основні вузли оптичної системи, що реалізують аналогічні функції модулю автоматизованого контролю структури волокна телевізійним оптичним методом.

Окремі результати експерименту та аналіз отриманих даних представлені на рис. 6-8.

Статистична обробка результатів експериментальних досліджень дозволила визначити граничні допуски на відхилення розрахункових показників для параметрів δ_1, δ_2 та $r_{кр}$. Визначене критичне значення коефіцієнта кореляції, яке становить 0,97. Граничні допуски на параметри b_0 та b_1 для кожної зони незначно відрізняються: значення δ_1 знаходиться у діапазоні 0,05 – 0,1, δ_2 у діапазоні 0,12 – 0,56. Необхідно зазначити, що допуски на ці параметри залежать від самої структури перерізу та для кожного нового типу волокна необхідно перераховувати.

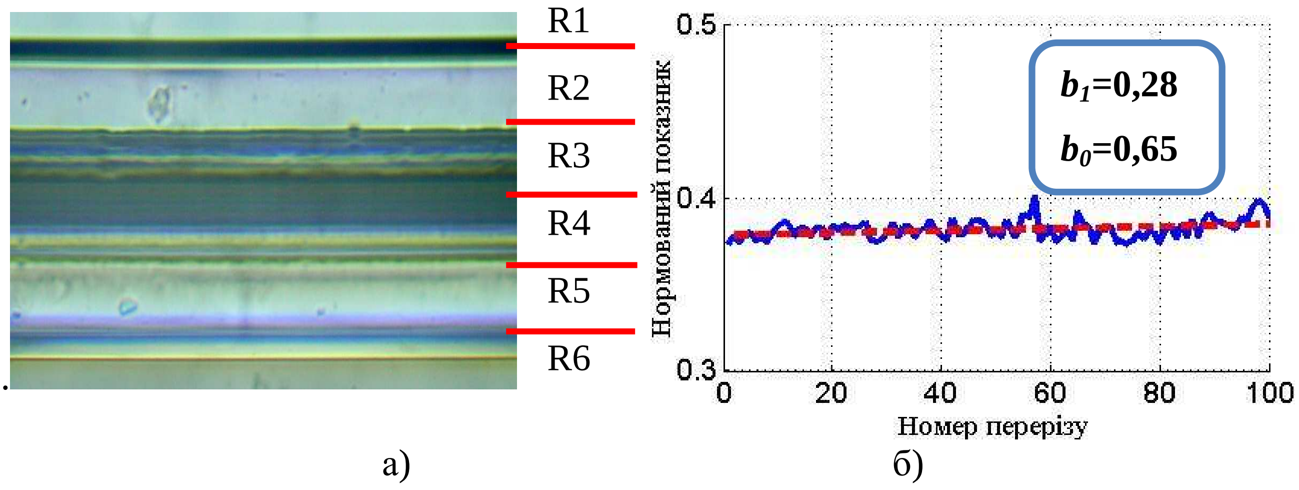


Рис.6. Результат контролю бездефектної ділянки МОВ (а); експериментальний розподіл інтегрального показника оптичного поля в інтервалі R5 та лінійна апроксимація (б)

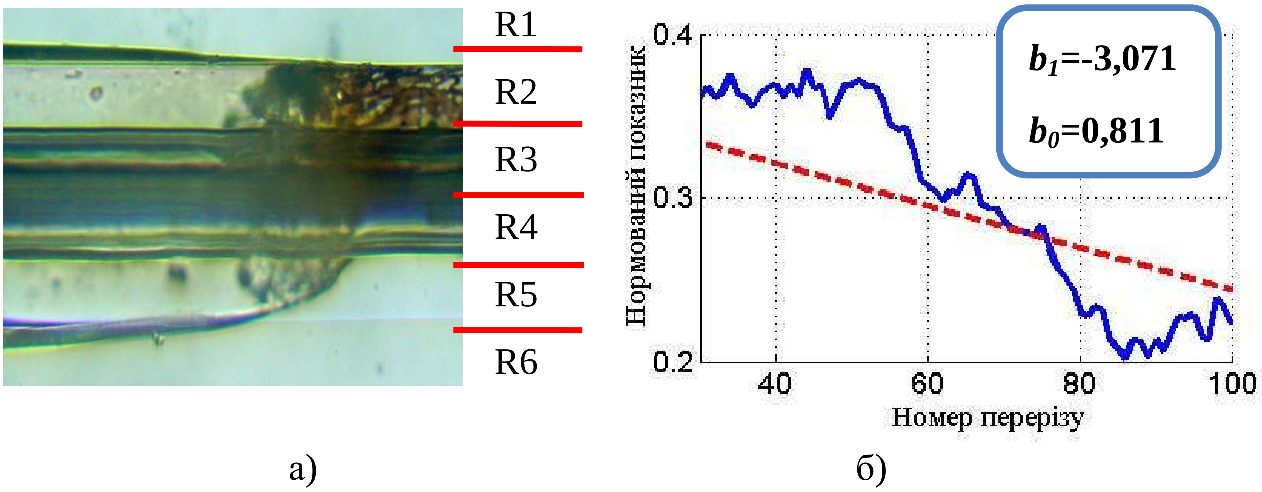


Рис.7. Результат контролю ділянки МОВ з руйнуванням структури (а); результати аналізу показника в інтервалі R2 (б)

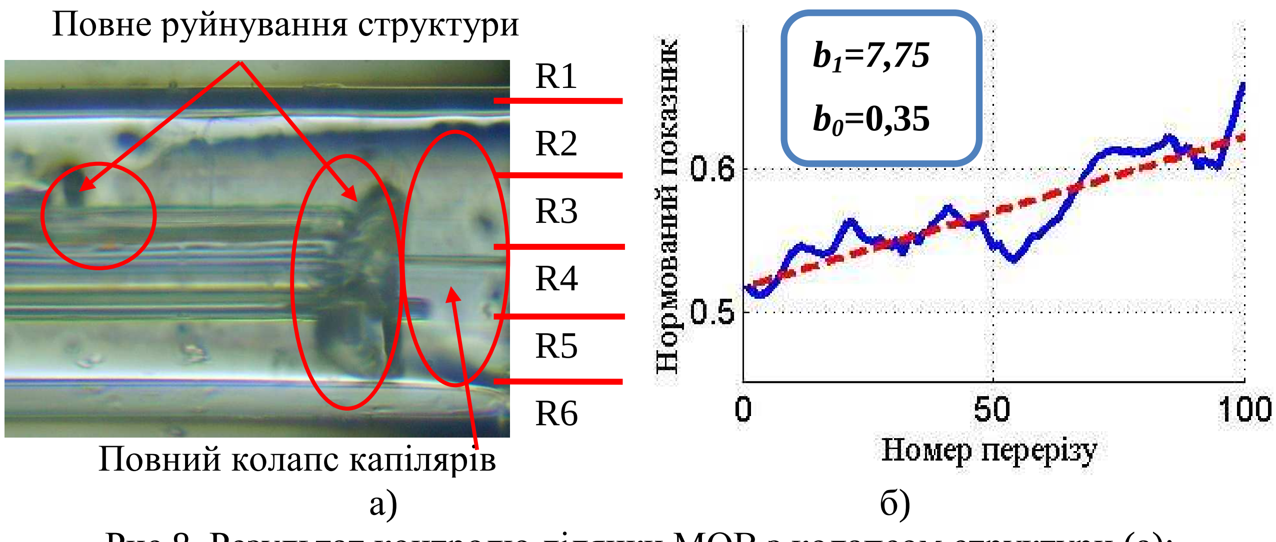


Рис.8. Результат контролю ділянки МОВ з колапсом структури (а); експериментальний розподіл інтегрального показника оптичного поля в інтервалі R3 та лінійна апроксимація (б)

Експериментальні дослідження показали достовірність результатів розробленого методу контролю технологічних параметрів МОВ.

У **додатках** представлено результати експериментальних досліджень розробленого методу, код програми, що реалізує математичний метод, акти про впровадження результатів дослідження в Інституті загальної та невідкладної хірургії АМН України (м. Харків), науково-дослідні роботи та навчальний процес Харківського національного університету радіоелектроніки.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі отримано результати, які у відповідності до мети дослідження, дозволяють підвищити якість керування процесом витягування мікроструктурованих оптичних волокон за рахунок нового методу контролю внутрішньої структури волокна. Дослідження, що були проведені, дозволили зробити такі висновки.

1. Визначено технологічні параметри процесу витягування мікроструктурованих оптичних волокон, що забезпечують задані експлуатаційні характеристики.

2. Запропоновано новий підхід до керування технологічним процесом витягування мікроструктурованих оптичних волокон, який базується на результатах поздовжнього оптичного контролю внутрішньої структури мікроструктурованих оптичних волокон та дозволяє побудувати систему керування процесом з урахуванням структури перерізу та допусків на її геометричні параметри.

3. Проведена параметрична ідентифікація моделі технологічного процесу витягування МОВ як об’єкта автоматизації, визначені основні статичні і динамічні характеристики.

4. Отримав подальший розвиток оптичний неруйнівний метод контролю перерізу МОВ, в якому для оцінювання параметрів показника профілю заломлення запропоновано використання інтегрального показника інтенсивності оптичного поля, що забезпечує можливість виявити дефектні деформаційні зміни і удосконалити систему керування.

5. Вперше розроблений метод оцінки параметрів неперервного формоутворення МОВ в процесі витягування, який базується на зоновому аналізі динаміки змін коефіцієнтів кореляції і інтегральних показників оптичної інтенсивності зображення перерізу та дозволяє виявити просторову локалізацію дефектів структури, дати їх кількісну оцінку.

6. На базі методу оцінки стану перерізу МОВ розроблені компоненти програмного та технічного забезпечення модулю автоматизованого контролю технологічних параметрів МОВ як складової частини автоматизованої системи керування технологічним процесом витягування МОВ

7. Проведено комп’ютерну та апаратну емуляцію процесу контролю структури МОВ в процесі витягування. Для підтримання заданих геометричних параметрів структури МОВ розраховані критичні значення параметрів запропонованого

критерію: $r_{кр} = 0{,}97$; δ_1 та δ_2 для зовнішнього шару отворів відповідно – 0,1 та 0,56; δ_1 та δ_2 для зони серцевини відповідно – 0,05 та 0,3. Результати емуляції підтверджені відповідними вимірами на атестованому технічному обладнанні.

8. Результати роботи використані для створення диспергуючого елементу фотоколориметру КФК-3 в ДУ «ІЗНХ АМНУ», що дозволило збільшити діапазон спектральної області пристрою на 15%, знизити помилку вимірювань на 5% при визначенні різних біохімічних показників, про що зазначено у відповідному акті впровадження.

10. Результати досліджень впроваджені в навчальний процес і науково-дослідну роботу ХНУРЕ, що підтверджується відповідними актами.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Филипенко, А. И. Контроль конструктивно-технологических параметров микроструктурированного волокна в АСУ ТП вытяжки волокна / А. И. Филипенко, А. В. Пономарева // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – №1/5 (43). – С. 17–20.

2. Филипенко, А. И. Информационное обеспечение АСУ технологическим процессом вытяжки микроструктурированного волокна / А. И. Филипенко, А. В. Пономарева // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – №6/3 (42). – С. 17–20.

3. Филипенко, О. І. Підвищення якісних параметрів мікроструктурованих оптичних волокон / О. І. Филипенко, Г. В. Пономарьова // Технология приборостроения: Научно-технический журнал. – 2009. – №2. – С. 49–53.

4. Филипенко, А. И. Современное состояние проблемы контроля конструктивно-геометрических параметров микроструктурированных оптических волокон / А. И. Филипенко, А. В. Пономарева // Радиотехника: Всеукр. Межвед. Науч.-техн. Сб. - 2008. – Вып.154. – С. 102–107.

5. Филипенко, А. И. Выбор метода контроля конструктивно-технологических параметров микроструктурированных волокон / А. И. Филипенко, А. В. Пономарева // Радиотехника: Всеукр. Межвед. Науч.-техн. Сб. – 2008. - Вып.155. – С.299-305.

6. Филипенко, А. И. Методы восстановления изображения при контроле микроструктурированного волокна оптическим отражательным методом / А. И. Филипенко, А. В. Пономарева // Радиотехника: Всеукр. Межвед. Науч.-техн. Сб. – 2009. – Вып.156. – С. 250–256.

7. Невлюдов, И. Ш. Исследование формирования скола волокна для минимизации оптических потер / И. Ш. Невлюдов, М. А. Омаров, Р. Ю. Аллахверанов, А. В. Ганшина (Пономарева) // НТЖ «Технология приборостроения». – 2004. – №2. – С. 38–42.

8. Филипенко, А. И. Контроль микроструктурированных волокон и компонентов на их основе : материалы 1-й Международной конференции «Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития» (МФР-2008) / А. И.

Филипенко, А. В. Пономарева // Сб.научных трудов. Том 3. – Харьков : АН ПРЭ, ХНУРЭ. – 2008. – С. 215–216.

9. Филипенко, А. И. Управление технологическим процессом вытяжки микроструктурированного оптического волокна : сб. науч. тр. 2-й Международная научная конференция «Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития» / А. И. Филипенко, А. В. Пономарева. – Харьков : ХНУРЭ. – 2009. – С. 166–169.

10. Filipenko, A. I. Analysis of the dynamics shaping microstructured optical fiber during drawing process : 10th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling, September 12-14, 2010 / A. I. Filipenko, A.V. Ponomaryova. - Sebastopol, Crimea, Ukraine, – 2010. – С.139–142.

11. Филипенко, А. И. Использование MATLAB при автоматизации контроля геометрических параметров микроструктурированного оптического волокна : материалы IV Всероссийской научной конференции «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB» / А. И. Филипенко, А. В. Пономарева. – Астрахань. – 2009. – С. 212–217.

12. Филипенко А. И. Анализ влияния конструктивно-технологических параметров на свойства компонентов на основе микроструктурированных оптических волокон : Зб. матеріалів 12-го міжнародного молодіжного форуму «Радіоелектроніка і молодь в XXI ст.» / А. И. Филипенко, А. В. Пономарева. – Харків : ХНУРЕ. – 2008. – С. 224.

13. Пономарева, А. В. Разработка алгоритма цифровой обработки изображения торца микроструктурированного оптического волокна : Зб. матеріалів13-го міжнародного молодіжного форума «Радіоелектроніка і молодь в XXI ст.» – Харків : ХНУРЕ. – 2009. – С. 117.

14. Пономарева, А. В. Диагностика структуры сечения микроструктурированного оптического волокна в процессе вытяжки : Матеріали 6-тої Міжнародної молодіжної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми радіотехніки і телекомунікацій РТ-2010» 19-24 квітня 2010 р. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, – 2010. – С. 247.

АНОТАЦІЯ

Пономарьова Г.В. Контроль технологічних параметрів в автоматизованій системі керування витягуванням мікроструктурованих оптичних волокон. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2011.

Дисертацію присвячено розробці нового підходу до автоматизованого керування технологічним процесом витягування мікроструктурованих оптичних волокон за рахунок розробки нового методу контролю технологічних параметрів.

Розроблений підхід дозволяє підвищити якість керування процесом витягування мікроструктурованих оптичних волокон та побудувати систему керування з урахуванням структури перерізу та допусків на геометричні параметри мікроструктурованого волокна.

В роботі обґрунтовано використання оптичного неруйнівного методу контролю для аналізу змін внутрішньої структури мікроструктурованого волокна в процесі витягування. Розроблено метод оцінки параметрів формоутворення, який базується на зоновому аналізі динаміки змін коефіцієнтів кореляції і інтегральних показників оптичної інтенсивності зображення перерізу.

Отримані математичні вирази, що пов'язують запропонований інтегральний показник з керованим технологічним параметром.

Ефективність запропонованих методів експериментально підтверджена при проведенні комп'ютерної та апаратної емуляції процесу контролю.

Ключові слова: система керування, контроль, технологічний процес, мікроструктуроване оптичне волокно, витягування оптичного волокна, інтегральний показник оптичної інтенсивності.

АННОТАЦИЯ

Пономарева А.В. Контроль технологических параметров в автоматизированной системе управления вытяжкой микроструктурированых оптических волокон. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2011.

Диссертация посвящена разработке нового подхода к автоматизированному управления технологическим процессом вытяжки микроструктурированного оптического волокна за счет разработки нового метода контроля технологических параметров.

Разработанный подход позволяет повысить качество управления процессом вытягивания микроструктурированных оптических волокон, за счет обеспечения продольного оптического контроля внутренней структуры волокна. Такой подход позволяет построить систему управления процессом формообразования микроструктурованых оптических волокон с учетом структуры сечения и допусков на ее геометрические параметры.

В работе получил дальнейшее развитие оптический неразрушающий метод контроля микроструктурованих оптических волокон, в котором для оценивания параметров профиля показателя преломления волокна предложено использовать интегральный показатель интенсивности оптического поля в сечении. Интегральный показатель интенсивности оптического поля позволяет анализировать сечение микроструктурированного оптического волокна с учетом особенностей структуры и ее геометрических параметров.

Анализ возможных деформационных дефектов внутренней структуры микроструктурированного оптического волокна позволили разработать критерии для классификации вида возникающего в процессе вытягивания дефекта структуры и его количественной оценки.

Проведенная компьютерная эмуляция процесса контроля внутренней структуры дефектных участков волокна, с использованием предложенного метода, позволила установить количественную связь геометрических параметров структуры с предложенным интегральным показателем интенсивности.

Разработан метод оценки параметров формообразования микроструктурированых оптических волокон в процессе вытягивания. Метод реализуется в несколько этапов. Первый этап включает определение эталонного распределения интенсивности оптического поля в сечении контролируемой структуры волокна. Анализ коэффициента парной корреляции эталонного распределения с распределением интенсивности текущего сечения позволяет определить момент начала образования деформационных изменений внутренней структуры волокна. Третий этап построен на анализе динамики изменения интегральных показателей оптической интенсивности поля в локальных зонах сечения, которые связаны с особенностями геометрических параметров структуры.

В качестве эталонного распределения интенсивности оптического поля сечения МОВ предложено также использование результатов оптического контроля заготовки перед процессом вытягивания.

Получены математические выражения, связывающие предложенный интегральный показатель интенсивности оптического поля с управляемым технологическим параметром – температурой печи.

Проведен анализ ряда значений температурных параметров печи и соответствующих значений интегрального показателя интенсивности оптического поля, который позволил выполнить параметрическую идентификацию модели и определить показатели качества системы.

Эффективность предложенных методов экспериментально подтверждена при проведении аппаратной эмуляции процесса контроля опытного образца микроструктурированого оптического волокна. Эксперимент проведен на установке, которая реализует основные узлы оптической системы модуля автоматизированного контроля.

Для обеспечения заданных геометрических параметров структуры при вытягивании исследуемого образца (d=4 мкм, N=1, Λ=14 мкм, гексагональное расположение капиляров относительно полой сердцевины d=4 мкм) рассчитаны значения параметров предложенного критерия: $r_{кр} = 0{,}97$; для оболочки b_1 = 0,28, b_0 = 0,69, δ_1 и δ_2 соответственно – 0,1 и 0,56; для зоны сердцевины волокна b_1 = 0,17, b_0 = 0.38, δ_1 и δ_2 соответственно – 0,05 и 0,3.

Результаты контроля были подтверждены соответствующими измерениями геометрических параметров сечения микроструктурированного оптического волокна на аттестованном техническом оборудовании.

Ключевые слова: система управление, контроль, технологический процесс, микроструктурированое оптическое волокно, вытяжка оптического волокна, интегральный показатель оптической интенсивности.

ABSTRACT

Ponomaryova A.V. – Monitoring of process parameters in the microstructure fibers drawing automated control system. - Manuscript.

Thesis for candidate's degree in technical sciences by specialty 05.13.07 – automation of control processes. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2011.

The dissertation is devoted to the development the microstructure fiber drawing automated process control new approach by developing a new method of technological parameters monitoring.

The approach allows to improve the quality of microstructure optical fiber drawing process control and construct process control system based on the microstructure fiber cross section and geometric parameters limits.

The optical non-destructive monitoring method for the microstructure fiber cross section changes analysis in drawing process is proved in this work. The method for shaping parameters estimation is developed. The method is based on the analysis of correlation coefficients ofdynamic changes and integral parameters of the cross section optical intensity in the local areas.

The mathematical expressions connecting the proposed integral parameter with controlling technological parameter are obtained.

Effectiveness of proposed methods was confirmed experimentally by computer and hardware emulation of process monitoring.

Key words: control system, monitoring, technological process, microstructure optical fiber, drawing process, integral indicator of the optical intensity.