

Тема 14. ВО- кабелі та квантові підсилювачі.

Лекція 14.

Кабелі та волоконно-оптичні підсилювачі. Дві головні конструкції сучасних волоконно-оптичних кабелів.

Реферат- Підсилення світла за допомогою ербієвих ВО-підсилювачів.

Конструкція світловодного кабелю. Волоконні світловоди не дуже відрізняються від звичайного мідного або сталюого дроту. По своїм механічним властивостям вони відрізняються лише у одному. Складний світловод залишається повністю пружним лише при збільшенні довжини до декількох процентів а практично не має плинності. Це означає, що скручування світловоду у процесі виготовлення кабелю може порушити однорідність укладки. Більше того, оскільки світловоди достатньо тонкі, то потрібен ретельний контроль їх напруження, тому що інакше джгут буде ослабленим та неоднорідним.

Основні критерії ефективності формування кабелю:

- а) реалізація структури кабелю, яка відповідає розрахунковим механічним характеристикам;
- б) перетворення бокового тиску у сили, що слабо змінюються у просторі, щоби мінімізувати можливі мікро вигини;
- в) забезпечення малих залишкових поздовжніх напружень, для зменшення імовірності втомного зруйнування. Це вимагає застосування матеріалів з гладкою поверхнею та сумісними тепловими та механічними властивостями, а також ліквідування взаємних пересічень світловодів та прокладок.

Експлуатаційні вимоги. Номенклатура світловодних кабелів є вельми широкою, починаючи від легких високоміцних кабелів до повністю армованих (броньованих) кабелів. Прикладами можуть бути кабелі для наведення зброї та броньовані підводні кабелі, які вкладаються на невеликій глибині. Для кабелів, до яких пред'являють дуже жорсткі вимоги по відношенню до розмірів та міцності під навантаженням, можуть бути потрібні особливі світловоди із надвисокою міцністю та стійкістю до мікровигинів.

Ідеальний зміцнюючий елемент для світловодного кабелю повинен мати такі ж характеристики видовження, як і світловод. Отже, в якості зміцнювальних елементів можна використовувати технічне скловолокно. В інших випадках зручно застосовувати

матеріали з великим модулем Юнга, наприклад сталь з високим опором розриву та кевлар. Вони спроможні витримувати видовження на 2...3%. Іноді є доцільним застосовувати вуглецеві волокна, хоча їх обмежене видовження може стати причиною пошкодження кабелю при великих ударних навантаженнях, що спроможні викликати значне видовження. Використання матеріалів з великим модулем Юнга та видовженням в якості зміцнюючих елементів пояснюється бажанням створити кабель з мінімальним поперечним перерізом. Якщо повний розмір кабелю не критичний, то відповідно розширюється вибір.

Конструкція світловодного кабелю може передбачати щільну або вільну укладку світловодів. У першому випадку отримується стабільна структура, яку можна зробити газо-непроникною, оді як другий забезпечує відсутність мікровигинів або їх мале число. але при цьому структура має менш передбачені динамічні характеристики. Застосування зовнішнього металевго екрану або підвищеного внутрішнього тиску може зменшити швидкість проникнення вологи у світловоди і тим самим послабити ефекти втоми. Деякі конструктивні особливості наведені у таблиці 1.

Таблиця 1.

Конструктивні особливості світловодних кабелів

Без металевих частин	Армуючий елемент: кевлар скловолокно еластомер Захист від вологи: немає Захист від гризунів: немає
З металевими частинами	Армуючий елемент: сталь Захист від вологи: алюмінієва стрічка Захист від гризунів: сталевна стрічка
Конструкція	Щільна: стабільна конфігурація однорідний матеріал світловод з великою NA Вільна: нестабільна конфігурація прониклива для газу армована: великий поперечний переріз

Зміцнювальні елементи. Велика границя міцності на розрив особливо важлива для довгих кабелів (наприклад, для кабелів, що укладають в каналах), оскільки натяг, який потрібен при прокладці кабелю, постійно зростає в ході протяжки і є функцією коефіцієнта тертя між оболонкою кабелю та поверхнями, що стикаються з нею. В прямих каналах натяг збільшується пропорційно довжині, але у вигинах каналів з'являється його додаткове експоненціальне збільшення, яке може суттєво збільшити натяг при прокладці. Показник якості, що характеризує механічні властивості при розтягу, задається відношенням натягу при стандартній деформації до ваги на одиницю довжини і досяжною границею міцності на розрив на одиницю площі поперечного перерізу; від однаково може бути застосований як до окремих елементів так і до готового кабелю. Тому зміцнювальний елемент повинен мати: а) великий модуль Юнга; б) деформаційну міцність при видовженні, що перевищує максимальну розрахункову деформацію кабелю; в) малу вагу на одиницю довжини; г) гнучкість, щоби мінімізувати обмеження на можливість вигинати кабель.

До інших специфічних властивостей, які можуть виявитися суттєвими, відносяться тертя між сусідніми компонентами, а також стабільність усіх параметрів в певному інтервалі температур, включаючи температури, які зустрічаються в процесі виробництва кабелю.

Високо модульним матеріалам у твердому стані присутня жорсткість, але їх еластичність можна збільшити, якщо застосувати джгути або пучки з елементів з меншим поперечним перерізом, переважно з зовнішнім покриттям з екструдированого полімеру, спіралью намотаної стрічки або обпліткою. Таке покриття особливо необхідне, коли зміцнювальний елемент контактує із світловодами, що мають покриття, оскільки для ліквідації оптичних втрат із-за вигинів, які звичайно зустрічаються у світловодах, що перебувають під локальними механічними напруженнями, потрібна еластична або гладка контактна поверхня.

Основними матеріалами, що використовують для виготовлення зміцнювальних елементів, завдяки їх великому модулю Юнга, є сталевий дріт, полімерні моноволокна, пучки текстильних волокон, скляні та вуглецеві волокна. Нижче будуть обговорені деякі основні властивості цих матеріалів.

Сталевий дріт. Такий дріт широко застосовувався для армірування та поздовжнього зміцнення звичайних кабелів. Існують різні сорти дроту з границею міцності на розрив від 540 до майже 3100 МПа. У всіх у них однаковий модуль Юнга ($19.3 \cdot 10^4$ МПа) і вибір дроту визначається бажанням високої деформаційної міцності при видовженні, порівняним з видовженням світловодів. Основним недоліком сталі є велика питома вага, що призводить до збільшення ваги готового кабелю.

Полімерні моноволокна. Існують спеціальні оброблені поліефірні волокна, що поєднують великий модуль пружності (до $1.6 \cdot 10^4$ МПа) з гладкою циліндричною поверхнею та стабільністю розмірів при підвищених температурах. Зміцнюючі елементи цього типу представляють особливий інтерес там, де потрібно перш за все мала вага кабелю або відсутність в ньому металів, але в технічному відношенні вони уступають сталі в тих кабелях, що потрібно укласти в довгих каналах (від 500 до 1000м).

Текстильні волокна. Промислові волокна звичайно представляють собою пучки з множини волокон малого діаметру у вигляді скручених або паралельних структур. Типовими представниками таких волокон, що застосовують у стандартних кабелях є поліаміди (найлон) і поліетилентерефталат (терилен, дакрон і т.п.), причому модуль пружності у окремих волокон може досягати $1.5 \cdot 10^4$ МПа. Внаслідок великої кількості окремих волокон у пучці вони мають еластичність в поперечному напрямку і годні в якості наповнювачів і зв'язуючих для кабелів, а також для покращення механічних властивостей світловодних кабелів при розтягу, але вони займають великий об'єм у порівнянні з моноволокнами еквівалентної міцності. Виняткове місце в цій категорії належить кевлару, який широко застосовується в оптичних кабелях. Окремі волокна з цього матеріалу мають надзвичайно велике значення модуля пружності (для органічних матеріалів) – до $13 \cdot 10^4$ МПа, що разом з малою питомою вагою (1.45 г/см^3) забезпечують ефективне відношення міцності до ваги. Промислові типи кевлару, що йдуть для армірування кабелю, представляють собою композити з великого числа одиночних волокон, які з'єднуються разом скручуванням, плетінням і т.п. і/або смолою; джгути зберігають більше значення модуля пружності, що присутнє одиночним волокнам.

Скляні волокна. При деяких застосуваннях світловоди можуть витримати достатньо великий натяг, але, якщо потрібна більш висока

міцність, то можна використовувати додаткові неактивні волокна по аналогії з текстильними волокнами. Вони мають великий модуль пружності, звичайно $\sim 9 \cdot 10^4$ МПа.

Вуглецеві волокна. Вони успішно застосовувалися в жорстких та напівжорстких полімерних або металічних композитах; одиночні волокна мають модуль пружності до $20 \cdot 10^4$ МПа. Основні властивості розглянутих вище матеріалів приведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Властивості матеріалів арміруючих елементів

Матеріал	Питома вага, г/см ³	Модуль Юнга, 10^4 МПа	Границя міцності на розрив, 10^2 МПа	Деформація при розриві, %	Нормоване відношення модуля Юнга до ваги
Стальний дріт	7.86	19.3	5...30	25...2	1.0
Поліефірне моноволокно	1.38	1.4...1.6	7...9	15...6	0.3
Нейлонова нитка	1.14	0.4...0.8	5...7	50...20	0.3
Териленова нитка	1.38	1.2...1.5	5...7	30...15	0.3
Волокно з кевлару-49	1.45	13	30	2	3.5
Волокно з кевлару-29	1.44	6	30	4	1.6
Волокно з силікатного скла	2.48	9	30	3	1.4

Компонування світловодів. Поперечні деформації, взаємодія мод та оптичні втрати у світловодах з покриттям можуть бути викликані на диво малими зовнішніми силами. Тиск на окремий світло у кабелі майже напевно впливає на оптичні втрати. Найменші значення втрат майже незмінно досягаються при надзвичайно слабкій взаємодії мод і після ретельного запобігання (ліквідації) впливу зовнішніх сил на світловоди. Підтримка таких низьких значень втрат в кабелі може потребувати більш якісних світловодів, і що більш суттєво, забезпечуючи оптимальний захист від зовнішніх сил.

Пружні деформації. Розглянемо просту модель світловоду, який є прижатим до пружної плоскої поверхні, що злегка шорстка (**Рис. 1**). Тиск зверху є рівномірним, але внаслідок шорсткості контактні сили між світловодом та поверхнею не будуть рівномірними. Світловод буде злегка вигинатися, що викличе появу сили $f(z)$ на одиниці довжини. Згідно теорії тонкої пружної балки, поперечне зміщення $x(z)$ вісі світловоду зв'язано з $f(z)$ співвідношенням $d^4x/dz^4 = f(z)/H$, де $H = EI$ - вигинна жорсткість; E - модуль Юнга та I - момент інерції. Для світловоду з круглим поперечним перерізом $I = (\pi/4)a_1^4$, де a_1 - радіус світловоду.

Сила викликає не тільки вигин, але й деформацію $u(z)$ поверхні. Якщо $f(z)$ не дуже сильно змінюється вздовж z , то $u(z)$ є лінійною функцією прикладеної сили. ЦЕ служить основою аналізу та порівняння чотирьох різних покриттів для світловодів. Перше виготовляють цілком з м'якого пластику, друге з твердого пластику, а третє та четверте – гібридні структури. Вважаємо, що типовий м'який матеріал має модуль пружності $9.8 \cdot 10^6$ Па, а типовий твердий матеріал - $9.8 \cdot 10^8$ Па. На **рис. 2** побудована залежність збиткових втрат від радіусу зовнішньої оболонки a_2 , яка розрахована для кожної структури в припущенні, що середній поперечний тиск дорівнює $9.8 \cdot 10^2$ Па. Тиск безсумнівно визначає вибір між м'яким або твердим матеріалом, якщо оболонку потрібно зробити тільки з одного матеріалу. Зменшення втрат із збільшенням радіусу оболонки з твердого матеріалу пояснюється збільшенням жорсткості. Відповідно збільшення, що забезпечується м'якою оболонкою нехтовно мале. В останніх двох стовпчиках таблиці 3 вказана жорсткість кожної оболонки.

Таблиця 3

Характеристики деяких типів захисних оболонок світловодів

Оболонка	Модуль пружності, 10^6 Па	Внутрішній радіус, мм	Зовнішній радіус, мм	Жорсткість (D), 10^6 Па	Вигин на жорсткість (H), 10^6 Па
м'яка	9.8	0.06	a_2	9.8	0.0698
тверда	980	0.06	a_2	980	$0.0698 + 76.8 a_2^4$
Внутрішня	980	0.06	$a_2 - 0.02$	9.8	$0.0698 + 76.8 (a_2 -$

Зовнішня м'яка	9.8	$a_2 - 0.02$	a_2	9.8	$0.002)^4$
Внутрішня м'яка	9.8	0.06	$a_2 - 0.04$	9.8	0.0698
Зовнішня тверда	980	$a_2 - 0.04$	a_2	$9.8 + 0.00627/a_2^3$	$76.8 a_2^4 - 76.8 (a_2 - 0.004)^4$

Третя структура має тверду оболонку, яка покрита м'яким зовнішнім шаром. Товщина цього шару вибрана рівною 20 мкм, щоби запобігти можливій деформації, що перевищує його границю пружності. Четверта структура має тверду оболонку, що оточує м'який матеріал. Товщина цієї оболонки повинна бути $\approx 0.02a_2$. Таке оптимальне значення є результатом збільшення жорсткості з ростом товщини оболонки. Дві пари значень D та H , які вказані в таблиці 3 для четвертої конфігурації, відносяться до двох структур, що незалежно деформуються (оболонка та світловод). Перевага м'якої оболонки перед твердою, о якій можна судити по **рис 2**, надто незначна, що його можна було приймати до уваги. Цих же результатів легко досягнути за рахунок деякого збільшення ваги та вартості світловоду. Але значно більш досконалий захист волокна гібридними структурами у порівнянні з простими оболонками заслуговує уваги. Оболонка діаметром 0.5...0.6 мм у прикладі, що розглядається, дозволяє практично повністю виключити втрати із-за деформації. Щоби реалізувати аналогічне зменшення втрат за допомогою тільки твердої оболонки, потрібно було б по крайній мірі вдвічі збільшити її діаметр.

Збиткові втрати, що розраховані для структури з твердою оболонкою, зникають, коли модуль пружності внутрішньої оболонки знижується до нуля. Це означає, що жорстка оболонка, яка вільно оточує волокно без якого-небудь проміжного матеріалу між ними, забезпечує ідеальний захист. Безумовно це було б дійсно так, якщо би в структурі діяли тільки зовнішні поперечні сили, що породжуються оболонкою; на практиці існують інші сили, які тут не розглядаються; наприклад, які притискають волокно до стінки внутрішньої оболонки на вигині кабелю. Таки сили можуть визначати величину втрат із-за деформації волокна з вільно охоплюючою оболонкою.

Конструкція кабелів. Тепер ми маємо достатньо інформації, щоби визначити основні особливості конструкції реального кабелю:

а) зміцнюючий елемент повинен забезпечувати можливість сильного натягу кабелю при малій деформації (від 0.5 до 1.0%) і при цьому мати достатню еластичність, щоби кабель можна було вигинати з малим радіусом;

б) світловоди, що мають велику внутрішню міцність і покриті полімером, розташовані у кабелі так, що їх деформація при вигині або розтяженні залишаються в межах, що задаються для кабелю;

в) кабель містить інші компоненти для захисту світловодів, що покриті полімером, від мікровигинів та впливу оточуючого середовища, які можуть порушити оптичні характеристики світловодів.

В ідеальному випадку любий з перших двох компонентів повинен розташовуватися вздовж нейтральної осі кабелю, щоби забезпечити максимальну гнучкість при мінімальній поздовжній деформації. Отже можливі два варіанти конструкції, коли один компонент оточує інший. Обидві системи мають свої переваги. Зміцнювальний елемент, при встановленні в центрі, дає максимальну гнучкість, але при розміщенні його навкруг волокон він може захистити їх від радіальних тискових сил. Обидві конструкції показані на **рис. 3**, окрім цього було також розроблено декілька інших варіантів конструкцій.

На **рис. 4** показані деякі конструкції кабелів. Механічна міцність цих кабелів така, що вони на руйнуються у процесі виготовлення і при прокладці запобігають спотворення характеристик пропускання світловодів. Крім цього, ці конструкції зменшують напруження або деформацію світловодів що обумовлені вигином, натягом та боковим тиском.

Висока ударна міцність досягається двома основними способами: укладкою світловодів на тверду поверхню та розміщенням серцевини кабелю у товсту полімерну оболонку. Типові конструкції показані на **рис. 5**.

Вплив мікро вигинів в кабелі більш докладно ілюструється наступним прикладом. Щоби визначити вплив мікровигинів та різниці у показниках заломлення, було виготовлено кабель із світловодів з ступінчастим профілем показника заломлення, що мали наступні параметри:

Діаметр серцевини	60 мкм
Товщина оболонки	15 мкм
Діаметр світловоду	150 мкм
Діаметр світловодів з покриттям	1.0 мм

Поперечний переріз кабелю показано на **рис. 6**. В кабелі були використані світловоди з подвійним та потрійним покриттям (**рис. 7**). На **рис. 8** побудована залежність додаткових втрат, що обумовлені скручуванням світловодів в кабелі, від різниці показників заломлення Δn . Видно, що для збереження початкового рівня втрат у світловодах з подвійною оболонкою Δn повинно перевищувати 0.85%, тоді як у випадку потрійної оболонки втрати зростають незначне, навіть, якщо $\Delta n \approx 0.7\%$.

На **рис. 9** приведена характеристика спектральних втрат кабелю, що містить один світловод. Втрати при передачі не змінюються після скручування кабелю.

Випробування кабелів. Оптичні характеристики кабелів оцінюють тими ж методами, що і для світловодів. Подібні вимірювання потрібно проводити тоді, коли кабель виявляється у фізичних умовах, що оговорені в вимогах до оточуючого середовища. Механічні випробування забезпечують безвідмовну роботу світловоду при дії на кабель напруження при різних значення температури та вологості. Ці випробування основані, як правило, на стандартних методиках, які використовують при виробництві мідних кабелів:

Механічні випробування: вимірювання міцності на розрив; випробування на вигин; випробування на кручення; випробування на ударні навантаження.

Випробування на дію оточуючого середовища: термоциклювання; випробування на вологостійкість; випробування на стійкість до грибкової **плесені**.

Випробування на безвідмовність роботи після ядерного опромінення: вимірювання викликаних опроміненням оптичних втрат після коротко часового опромінення; після довготривалого опромінення.

Механічні випробування. Кабелі випробуються на міцність, на розрив. кручення та удароміцність. Ці випробування складають частину більш широкої програми механічних випробувань.

а) Вимірювання границі міцності на розрив. Три зразки кабелю кожного типу, які мають стандартну довжину біля 61 см, випробують на розрив світловодів, при використанні навантаження 171.2 кг. Повний час до розриву, що достатнє для забезпечення потрібної міцності на розрив, складає від 26 до 30 с.

Навантаження зберігається на протязі 1 хв. і потім знімається на протязі часу від 19 до 28с.

б) випробування на вигин. Три зразки кожного типу випробують на протязі 2000 циклів, вигинаючи їх навкруг оправки з діаметром, що дорівнює п'ятикратному діаметру кабелю.

в) Випробування на кручення. Три зразки кожного типу, які мають стандартну довжину 10 см, закручують на протязі 2000 циклів на кут 360° .

г) Випробування на удароміцність. Його реалізують 200 разів сферичним ударником діаметром 1 см при падінні маси 5 кг з висоти 10 см.

Випробування на дію навколишнього середовища. Дія навколишнього середовища оцінюється шляхом термоциклювання, випробування на вологостійкість та стійкість до грибкової плесені.

а) Термоциклювання. один зразок кабелю кожного типу піддають термоциклюванню в інтервалі температур від -55 до $+85$ $^{\circ}\text{C}$.

б) Випробування на вологостійкість. Воно полягає в вимірюванні затухання після циклічної дії середовища з вологістю 98% при температурі 50 $^{\circ}\text{C}$.

в) випробування на стійкість до грибкової плесені.

Випробування на безвідмовність роботи після ядерного опромінення.

а) Короткий відрізок кабелю опромінюють гамма-променями з дозою $1.27 \cdot 10^5$ рад і нейтронами з густиною потоку $4.4 \cdot 10^{10}$ нейтронів/см² і контролюють затухання світловодів.

б) Вимірюють викликані опроміненням оптичні втрати після експонування на протязі 10 с (нейтронами та гамма-променями одночасно).

в) Вимірюють викликані опроміненням оптичні втрати після добової дії гамма-променів.

Результати випробувань:

а) *Затухання та дисперсія.* Процес виготовлення кабелю показує нехтовно малий негативний вплив на затухання та дисперсію світловоду в заданому інтервалі температур.

б) *Випробування на розтяг.* Кабель надійно витримує розтяжне навантаження. Неперервне навантаження в статичних умовах не призводить до зростання затухання.

в) *Випробування на удар.* Кабель надійно витримує 200 ударів при ударному навантаженні, що діє в одній точці кабелю.

г) *Випробування на дію навколишнього середовища.* Кабель цілком задовільно працює при екстремальних температурах, а також в умовах вібрації, в присутності вологи а також після деякої дози ядерного опромінення.

Рекомендована література: 3

3. Волоконно-оптическая связь. Приборы, схемы и системы. Под ред. М.Дж.Хауэса и Д.В.Моргана.-М.: «Радио и связь»., 1982.-272с.