

УДК 532

## **ПРОЦЕС ФОРМУВАННЯ ВОЛОКОННИХ СВІТЛОВОДІВ ЯК ОБ'ЄКТ ВИВЧЕННЯ**

**О.П. Зінькевич**, кандидат фізико-математичних наук

**О.М. Нецадим**, кандидат фізико-математичних наук

**В.М. Сафонов**, кандидат фізико-математичних наук

В статті розглядається процес формування волоконних світловодів та вплив нестабільності зовнішніх умов на експлуатаційні характеристики готової продукції. Вивчаються основні методи витягування волоконних світловодів, та підхід до побудови реологічних моделей зон формування.

**Волоконні світловоди, область прядомісті, гідродинамічна стійкість, вільна поверхня, реологічна модель, зони формування, розрив, розпад на каплі, методи витягування.**

**Мета дослідження:** Експлуатаційні характеристики готової продукції в повній мірі залежать від ефективного функціонування автоматичних систем управління технологічних процесів витяжки волоконних світловодів (ВС). Для оперативного управління процесом необхідно знати стаціонарний процес формування, а також відгук процесу на нестабільність зовнішніх умов формування; необхідно знати ті значення управляючих параметрів, які сприяють отриманню продукції необхідної якості. Зробити це можна на основі побудови адекватної математичної моделі витягування ВС.

**Матеріали та методика досліджень.** Розглянута мета дослідження, аналіз процесу формування. Зроблено висновки.

### ***1. Умови формування волоконних світловодів.***

Нестабільність зовнішніх умов формування може призвести до втрати гідродинамічної стійкості процесу формування ВС або до обривання скломаси, що витягується. Зрештою це призводить до коливань геометричних параметрів

готової продукції, що відбивається на експлуатаційних характеристиках світловодів.

Зовнішні умови формування це: швидкість подачі заготовки в піч; швидкість витягування; температура зовнішнього середовища; температура печі; коефіцієнт тепловіддачі; неоднорідність геометричних розмірів заготовки по її довжині.

Обривність ВС визначається обмеженою прядомістю скломаси: рідині властива прядомість за даних умов формування, якщо стійке розтягнення струменю, що встановилося, відбувається без розриву з будь-якої причини. Обривність ВС проявляється у вигляді крихкого розриву, коли розтягуюча напруга сягає певної межі міцності на розрив; і у вигляді розпаду на краплі, коли відношення величини поверхневого натягу до в'язкості рідини досягає певної критичної величини. Зростання поверхневого натягу пов'язане з так званими «капілярними хвилями» на вільній поверхні рідини – явищем, яке вперше дослідив Релей [6].

Рух рідини вважають гідродинамічно стійким, якщо малі збурення, що діють на систему, досягають певного рівноважного стану або зменшуються до нуля, а не збільшуються з часом. Якщо цього немає, то протікання струменю втрачає гідродинамічну стійкість, що спричинює коливання геометричних параметрів готової продукції і може призвести до повної зупинки технологічного процесу формування ВС. Тому необхідно виокремлювати області стійкого і нестійкого формування ВС у просторі (на площині) зміни зовнішніх умов витягування ВС, а також область прядомісті.

Область стійкості не завжди співпадає з областю прядомісті. Область прядомісті включає ту частину області гідродинамічної стійкості, в якій не може виникнути крихкий розрив, і ту частину області гідродинамічної нестійкості, в якій зростання капілярних хвиль на вільній поверхні рідкого струменю ще не призводить до розпаду на краплі. Умови «перебування» в області стійкого формування не є достатнім, оскільки може статися крихкий розрив, що діє незалежно від гідродинамічної стійкості. Крім того, процес може

мати гідродинамічну стійкість, але при цьому стихаючі після дії коливання можуть мати занадто великі амплітуду і час стихання. Звідси випливає, що, по-перше, необхідні такі зусилля розтягування, які не можуть призвести до крихкого розриву. По-друге, необхідно знати динамічні реакції процесу на можливі збурливі дії технологічних параметрів, стаціонарні значення яких відносяться до стійкого перебігу процесу, або ж чуттєвість процесу до збурливих дій, що забезпечує ефективне управління процесом. Зрештою, необхідно знайти ті значення управляючих параметрів, які сприяють отриманню на виході сталого процесу продукції необхідної якості. Зробити це можна на основі побудови математичної моделі, що адекватно і якомога глибше описує сталий процес формування ВС.

## ***2. Методи витягування волоконних світловодів.***

Існуючі методи отримання ВС можна розподілити на дві групи: методи витягування із заготовок та із розплавленого скла.

Виготовлення тонкого волоконного світловода за допомогою методів, що відносяться до першої групи, виконується витягуванням із масивної скляної циліндричної заготовки (суцільної чи трубчатої), розігрітої з одного кінця до температури плавлення. З допомогою падаючого механізму заготовка повільно опускається в піч, а барабан витягує з неї волокно і намотує його. Як нагрівачі використовуються графітові та цирконієві індукційні печі, графітові електropечі опору, киснево-водневі горілки.

Найбільш поширеним способом витягування із розплавленого скла є спосіб двох тиглів. Його суть полягає в наступному. Два тиглі – внутрішній та зовнішній – розташовуються таким способом, що мають загальну вісь. При цьому сопло внутрішнього тиглю розташовано на певній відстані від нижнього зрізу зовнішнього тиглю. Внутрішній тигель заповнюється розплавленим склом, що має формувати серцевину світловода, скло зовнішнього тиглю утворює потім скло оболонки. Зазвичай використовується два скла, в яких відбувається взаємна дифузія.

Експлуатаційні характеристики ВС, наприклад, втрати на проходження, смуга пропускання, міцність значною мірою залежить від процесу витягування і покриття волокон. Цей процес слід розглядати як єдину операцію, що складається із низки окремих етапів, кожний з яких повинен надавати виробу необхідних якостей. Волокно з потрібними характеристиками можна отримати тільки при умові успішного проведення і контролю усіх етапів технологічного процесу. В їх число входить нагрівання заготовки, витягування скломаси, контроль і підтримка необхідної товщини покриття, концентричності і намотка готової продукції.

Метод витягування з заготовки доцільно використовувати для виробництва порівняно невеликих партій виробів з різними геометричними параметрами, а метод виговлення із розплавленого скла, є більш продуктивним, але менш гнучким, переважаючий при виробництві великих промислових партій однотипних виробів.

### ***3. Реологічні моделі.***

Процес формування має дві основні стадії: формотворення і фіксації форми [1,3]. Тут необхідно розглядати дві сторони протікання процесу формування – механічну (процес деформування скломаси) і теплотехнічну (процес нагрівання і охолодження скла). Якщо точкою відліку вважати початок плавлення скла заготовки, то весь процес формування можна умовно розбити на чотири зони: зону формування; зону власне витягування; зону завершення процесу; зону приймання готового скловолокна. Кожній зоні відповідають характерні особливості протікання двох названих сторін протікання процесу формування.

Кожна із названих чотирьох зон характеризується своїм видом залежності між напругою  $\tau$  й спричиненими нею деформаціями  $\Delta$ , а також швидкостями деформацій. Встановлення характеру таких залежностей  $\tau = \tau(\Delta)$ , які ще називають конститутивними рівняннями, є завданням реології. Для повного розуміння процесу формування необхідно знати реологічну поведінку волокна, що витягується, в кожній з чотирьох зон.

Проте це неможливо за нинішнього стану наших знань: до цього часу не існує надійної, достеменно точної загальної теорії або вичерпних експериментальних даних для такого широкого діапазону зовнішніх умов. І, як результат, доводиться обмежуватися застосуванням простих реологічних моделей і прийнятних емпіричних співвідношень.

Всі існуючі реологічні моделі можна поділити на два класи в залежності від того, чи вкладаються ці моделі в рамки класичної лінійної теорії, що розглядає лише нескінченно малі і нескінченно повільні деформації і так звані явища першого порядку, або при побудові цих моделей беруться до уваги скінченність деформацій та їх швидкостей, а також явища вищих порядків [4].

Рейнером [2] запропоновано проводити систематизацію моделей в рамках класичної теорії, опираючись на основні моделі суцільного середовища: пружне тіло Гука, що є ідеально пружним тілом і розглядається в класичній теорії пружності; в'язка рідина Ньютона, що є «простою» в'язкою рідиною і розглядається класичною гідродинамікою; пластичне тіло Сен-Венана – тверде тіло, якому властива межа протікання, при напрузі нижче якої воно деформується пружно і пластично тече при постійній напрузі, що дорівнює межі протікання. Тіло Сен-Венана вивчає ідеальна пластичність. Решту «реологічних тіл» можна розглядати як комбінації цих трьох основних тіл.

Кожній із названих моделей можна дати механічну трактовку, на основі якої будується механічна модель. Складаючи послідовні, паралельні або змішані поєднання цих моделей, можна отримати нові моделі, які описують поведінку найрізноманітніших реальних матеріалів. Так, послідовне поєднання моделей Ньютона і Гука створює відому модель Максвелла.

Відомо, що модуль пружності зсуву лише незначною мірою залежить від температури, трохи знижуючись з її підвищенням внаслідок збільшення міжмолекулярних відстаней, тобто ослаблення сил зчеплення. В'язкість же, а разом з нею період релаксації, досить різко знижується з підвищення температури, так як з підвищенням інтенсивності теплового руху полегшується рухомість – вірогідність переходу від одного тимчасового стану рівноваги до

іншого. Як приклад може слугувати звичайне скло, яке можна вважати досить в'язкою рідиною. В'язкість скла, наприклад віконного, при звичайних температурах настільки велика (вона складає мільярди мільйонів пуаз), що її не можливо визначити. Тому скло веде себе як ідеально пружні тіла аж до розриву. Лише при значному підвищенні температури (вищою за так звану температуру розм'якшення) в'язкість скла настільки знижується, що стає вимірною, і скло поводить себе за таких температур як звичайна високов'язка рідина.

З реологічної точки зору волокноутворюючі розплави можна поділити на три групи: 1) неорганічні матеріали (скло, метали); 2) лінійні поліконденсаційні полімери (поліефіри, поліаміди); 3) лінійні поліолефіни і вінілові полімери (поліетилен, поліпропілен, полівінілхлорид).

Скло і метали в розплавленому стані є ньютонівськими рідинами без помітних нелінійних чи пружних особливостей [5]. Розплави представників другої групи є помірно в'язкими рідинами (в'язкість при температурі екструзії порядку  $10^4$  пуаз) зі слабо вираженими ньютонівською і в'язко-пружною поведінкою і малим (зазвичай менше 1 с.) часом релаксації – явища поступового розсіювання пружної енергії, накопиченої в деформованому тілі, шляхом переходу її в тепло. Третю групу волокноутворюючих матеріалів складають в'язко-пружні рідини з великим часом релаксації, високими в'язкостями (не менше  $10^5$  пуаз в умовах екструзії) і з явно неньютонівською поведінкою.

Відповідно до відмічених особливостей поведінки волокноутворюючих матеріалів в розплавленому стані необхідно вибирати належну реологічну модель, що якнайкраще описує поведінку розплаву у відповідній зоні процесу формування.

**Основні результати:** Зроблено аналіз впливу зовнішніх умов формування (швидкість подачі заготовки в піч; швидкість витягування; температура зовнішнього середовища; температура печі; коефіцієнт тепловіддачі;

неоднорідність геометричних розмірів заготовки по її довжині) на параметри готової продукції.

Проаналізовано поняття областей гідродинамічної стійкості та прядомісті, їх взаємозв'язок та їхній вплив на характеристики готової продукції.

Зроблено аналіз стадій формування: формотворення і фіксації форми.

Проаналізовано характерні особливості протікання механічної і теплотехнічної сторін формування к кожній із зон процесу формування.

Проведена класифікація волокноутворюючих розплавів з реологічної точки зору.

**Висновки:** Нестабільність зовнішніх умов формування може привести до втрати гідродинамічної стійкості процесу витягування ВС.

Область гідродинамічної стійкості не завжди співпадає з областю прядомісті. Область прядомісті включає ту частину області гідродинамічної стійкості, в якій не може виникнути крихкий розрив, і ту частину області гідродинамічної нестійкості, в якій зростання капілярних хвиль на вільній поверхні рідкого струменю ще не призводить до розпаду на краплі.

Умови «перебування» в області стійкого формування не є достатнім, оскільки може статися крихкий розрив, що діє незалежно від гідродинамічної стійкості.

На кожній стадії формування необхідно розглядати дві сторони: механічну і теплотехнічну.

Не існує повної математичної моделі формування ВС в рамках класичної теорії.

Кожна із зон формування характеризується своїм видом залежності між напругою і спричиненими нею деформаціями.

Не існує загальної теорії для широкого діапазону зовнішніх умов.

Систематизацію реологічних моделей необхідно проводити в рамках класичної теорії опираючись на основні моделі суцільного середовища.

### Список літератури:

1. Ходаковский, М.Д. Производство стеклянных волокон и тканей / М.Д. Ходаковского и др. – М.: Химия, 1973. –311 с.
2. Рейнер, М. Реология: / М. Рейнер. Пер. с англ. Н.И. Малинина. – М.: Наука, 1965. –223 с.
3. Асланова, М.С. Стеклянные волокна / М.С. Асланова, Ю.И. Колесов, В.Е. Хасанов и др.: Под ред. Аслановой М.С. – М.: Химия, 1979. –256 с.
4. Glicksman, L.R. A prediction of the upper temperature limit for glass fiber spinning / L.R. Glicksman. – Glass Technology. – 1974. № 15. – P. 16–20.
5. Mottern, J.W. Spinning wipe from molten metal / J.W. Mottern, W.J. Privott. – AICHE Symposia Stria. – New York, – 1978.–74, № 180.–116 p.
6. Rayleigh, Lord. Oh the instability of a cylinder of viscous liquid under capillary force / Lord Rayleigh. – Philosophy Magazine. – 1892. – 34. – F.145 – 156.

В статье рассматривается процесс формирования волоконных световодов и влияние неустойчивости внешних условий на эксплуатационные характеристики готовой продукции. Изучаются основные методы вытягивания волоконных световодов, та подход к построению реологических моделей зон формирования.

This paper considers the process of forming fibers and the influence of instability of the external environment on the performance of the finished product. The basic methods of drawing of optical fibers, and the approach to the construction of rheological models of the formation zone are studied.

Волоконные световоды, область прядомости, гидродинамическая устойчивость, свободная поверхность, реологическая модель, зоны формирования, разрыв, распад на капли, методы вытягивания.

Fiber optic, cable area predmosti, hydrodynamic stability, free surface,rheologicat model, the zone of the formation, dissolution, disintegration into droplets, methods of stretching.