

ГІРНИЧІ МАШИНИ ТА ОБЛАДНАННЯ

УДК 621.791.16

ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ГНУЧКИХ ПОЛІМЕРНИХ ТРУБ З КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

М. П. Нестеренко, канд. техн. наук (Інститут ім. Є. О. Патона НАН України), І. К. Сенченков, докт. техн. наук (Інститут механіки НАН України), З. П. Луговий, асп. (Інститут ім. Є. О. Патона НАН України)

Рассмотрены особенности технологии получения неразъемных соединений гибких полимерных вентиляционных труб с помощью ультразвуковой сварки, предложена математическая модель процесса, даны сопоставления прочностных характеристик швов, полученных с помощью инфракрасной и ультразвуковой сварки.

Для подавання повітря у віддалені тупикові виробки і штольні широко застосовуються гнучкі вентиляційні труби з полімерних і комбінованих матеріалів діаметром 500, 600 і 800 мм з довжиною ланок 10 або 20 м. Вони виготовляються шляхом зшиття стрічкових заготовок рядковим швом, що часто не відповідає технічним вимогам експлуатації внаслідок низьких міцнісних характеристик рядкового шва і значних втрат повітря. За даними досліджень фактичний коефіцієнт втрат повітря залежно від довжини трубопроводу становить 1,04... 1,54 в інтервалі довжин 50... 1000 м [1].

З метою зменшення втрат повітря і покращення експлуатаційних характеристик в ІЕЗ ім. Є. О. Патона ведуться роботи по створенню технології і обладнання для виготовлення гнучких шахтних вентиляційних труб (ГШВТ) зі зварними поздовжніми швами. Як матеріали ГШВТ використовуються штучні шкіри таких типів: павінол трубний, вінілісшкіра тканина трубна, вінілісшкіра нетканина трубна полегшена. Полімерні покриття всіх шкір однакові – пластифікований полівінілхлорид, а основи різні: «чеффер» бавовняно-паперовий, бавовняно-лавсановий і лавсановий. Найбільш економічним з названих матеріалів є вінілісшкіра нетканина трубна, яка до того ж має вищі міцнісні характеристики і меншу масу. До її недоліків слід віднести невисокі адгезійні властивості при з'єднанні полівінілхлоридного покриття з лавсановою основою.

ГШВТ являє собою рукав з одним або кількома, залежно від діаметра труби, поздовжніми напустковими швами, які зазнають під час експлуатації зсувних навантажень, величина яких, згідно з технічними вимогами, повинна бути не менша 1300 Н/50 мм при міцності основного матеріалу (2000±70) Н/50 мм.

Відомо [2], що нероз'ємні з'єднання штучних шкір можна отримати шляхом зварювання – за допомогою нагрітого інструмента, ІЧ-випромінювання або ультразвуку. Експерименти показали, що при зварюванні нагрітим інструментом із зони з'єднання видаляється полівінілхлоридне покриття, різко зменшується його товщина, виникають області деструкції полімеру, порушується міцність шва по його довжині. При зварюванні ІЧ-випромінюванням (довжина хвилі 3 мкм) у зварному з'єднанні спостерігались зони непровару та пропалювання, викликані неоднаковими коефіцієнтами поглинання матеріалу по довжині шва, неконтрольованою зміною базової відстані відстані від джерела випромінювання, а також іншими дестабілізуючими факторами: наявністю конвективних потоків, стрибками напруги, що живить натяжний механізм, різнотовщинністю покриття тощо. Таким чином, незважаючи на деякі переваги зварювання нагрітим інструментом та ІЧ-випромінюванням (простота, відносно мала метало- і енергоємність, дешевизна), ці способи не задовольняють вимогам до зварного з'єднання – рівномірність і герметичність шва по всій його довжині.

Більш ефективним способом отримання напуктових швів ГШВТ виявилось ультразвукове зварювання (УЗЗ), до переваг якого, в першу чергу, належать локальність нагріву, висока швидкість утворення з'єднання і можливість часткової або повної автоматизації процесу зварювання [3]. Дослідження проводились на модернізованій установці типу МТУ-1,5 (механічна частина). Як джерело енергії використовувався ультразвуковий генератор з вихідною потужністю 1,4 кВт і робочою частотою 20 кГц. Електроакустичний перетворювач був складений на базі п'єзокераміки типу PZT-4, а робочим інструментом служили хвилеводи із сплаву титану ОТ-4 шириною 10, 15, 20, 25 і 30 мм. Використання змінного трансформатора пружних коливань (бустера) дозволяло варіювати амплітуду коливань хвилеводу в межах 10... 40 мкм. Для контролю і реєстрації основних параметрів режиму зварювання використовувались такі прилади: ємнісний датчик вимірювання амплітуди коливань типу ММ0004 фірми "Брюль і К'єр" (Данія); ватметр типу А 410; частотомір типу 314 (Німеччина); датчик вимірювання зварного зусилля типу МП-22518. Для вимірювання усадки шва використовувався диференційно-трансформаторний датчик лінійних переміщень, а температура в зоні зварювання контролювалась хромель-копелевою термопарою діаметром 0,1 мм. Запис усіх величин, їх перших і других похідних за часом здійснювався на багатоканальному світло-променевому осцилографі НОЗЗА [4].

Для розрахунку технологічних параметрів процесу використовувалась математична модель, побудована на співвідношеннях зв'язаної задачі термов'язкопружності [5]. Для окремого випадку ультразвукових гармонійних коливань модель описується такою системою рівнянь:

квазістаціонарних коливань

$$\bar{\sigma}_{,ij} + \rho\omega^2\bar{u}_i = 0, \quad (1)$$

де $i, j = 1, 2, 3$;

теплопровідності

$$\rho c \dot{\theta} = (\lambda \theta, i) + \bar{D}' ; \quad (2)$$

визначальне рівняння

$$\ddot{\sigma}_{ij} = \tilde{K} \tilde{\epsilon}_{ik} \delta_{ij} + 2\tilde{\sigma}(\tilde{\epsilon}_{ij} - \frac{1}{3} \tilde{\epsilon}_{kk} \tilde{\delta}_{ij}) . \quad (3)$$

Початкові умови для температури

$$\theta(x_i, 0) = \theta_0 \quad (4)$$

і граничні умови, які відповідають гладкому спираючому тілу (прийнято, що тертя між тілом і опорою, а також тілом і хвилеводом відсутнє) і збудженню коливаний тіла в режимі заданої амплітуди зміщення торця хвилеводу \tilde{u}_0 .

Тут $\tilde{u}_i, \tilde{\epsilon}_{ij}, \tilde{\sigma}_{ij}$ – декартові компоненти комплексних амплітуд відповідно вектора переміщень, тензорів деформації і напруження; $\tilde{u}_i = u'_i + \sqrt{-1} u''_i \dots$; t – температура; ρ, λ і C – відповідно щільність, коефіцієнт теплопровідності і питома теплоємність ($\rho = \rho(\theta), \lambda = \lambda(\theta), C = C(\theta)$), \tilde{G}, \tilde{K} – модулі зсуву і об'ємного стиснення ($\tilde{G} = G'(\omega, \theta) + iG''(\omega\theta), \tilde{K} = K'(\omega, \theta) + iK''(\omega\theta)$); ω – частота навантаження; θ_0 – температура навколишнього середовища, яка дорівнює початковій температурі тіла; \bar{D}' – дисипативна функція, яка дорівнює середній (за період коливаний) механічній потужності; символи i та (\cdot) означають частинне диференціювання за координатами і часом.:

$$\bar{D}' = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} dt = \frac{\omega}{2} [\sigma'_{ij} \epsilon'_{ij} - \sigma''_{ij} \epsilon''_{ij}] ; \quad (5)$$

Поставлена задача розв'язувалась методом скінченних елементів в межах схеми покрокового інтегрування з використанням явної схеми для розв'язання рівняння (2). При цьому через певну кількість кроків по часові уточнювались механічні характеристики матеріалу і розв'язувались рівняння руху, а потім визначалась дисипативна функція і операція знову повторювалась. Процес інтегрування закінчувався при досягненні деякої заданої температури.

Для обґрунтування достовірності розрахункової моделі проводились зіставлення теоретичних та експериментальних результатів на прикладі УЗЗ штучних шкір (рис. 1). Суцільні криві 1 і 2 показують розрахункові зміни температури в зоні зварювання відповідно для значень амплітуд зміщення торця хвилеводу A і тиску P : $A = 15$ мкм, $P = 3,5$ МПа і $A = 4,5$ мкм, $P = 4,5$ МПа. Експериментальні дані показані кружечками.

Відомо, що температура в зоні зварювання є одним з найважливіших параметрів, які визначають якість зварного з'єднання. Для дослідження цієї закономірності проводився аналіз структури зварних з'єднань методами світлової та електронної мікроскопії.

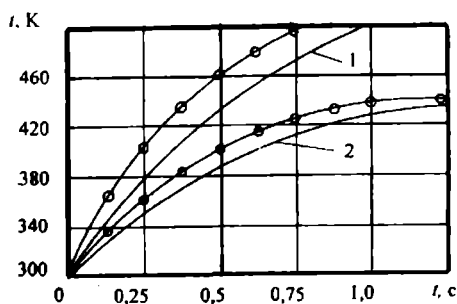


Рис. 1. Термічні цикли при УЗЗ штучних шкір

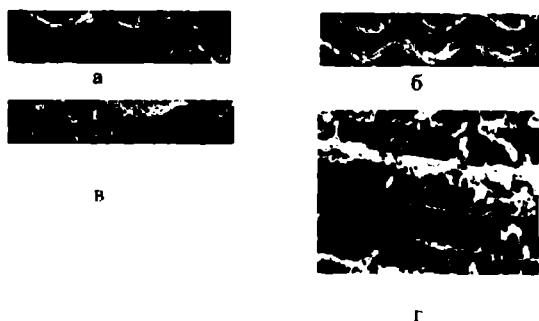


Рис. 2. Оптичні (а, б, в) та електронно-мікроскопічні (г) мікрофотографії зварних швів штучних шкір

На рис. 2 в збільшеному вигляді показано поперечні розрізи зварних швів. Видно, що в зоні сплавлення проходять інтенсивні реологічні і термічні процеси. Так, при температурі 120 °С в цих зонах відсутня термодеструкція покриття з ПВХ і пошкодження основи (рис. 2а). Однак міцність такого з'єднання досить низька. При температурі 200 °С (рис. 2в) спостерігається вихід волокон основи на поверхню шва, їх обрив і часткове вигорання зв'язуючого. Це призводить до зменшення міцнісних характеристик основного матеріалу і зварного з'єднання в цілому. Деталізацію інформації, отриманої методом світлової мікроскопії, було здійснено з допомогою сканувальної електронної мікроскопії. При цьому було виявлено, що відбувається відшарування покриття від ниток основи (рис. 2в), концентрація продуктів деструкції у вигляді частинок округлої форми вздовж волокон (рис. 2г). Якщо температура в зоні зварного з'єднання не перевищує 180 °С (рис. 2б), то в області шва не відбувається руйнування ниток основи і не спостерігаються процеси термодеструкції покриття. Тому вибір основних параметрів режиму процесу УЗЗ здійснювався таким чином, щоб температура, яка розвивається в зоні зварювання, не перевищувала 200 °С.

Зразки зварних швів випробовувались на зсув і роздирання на машині FP-10. Результати випробувань наведено в таблиці.

Міцність на зсув по утку зварних зразків вінілішкіри ткані трубної

Величина напуску кромки, мм	Міцність зварного шва на зсув Н/50 мм		Кількість зруйнованих зразків, %					
			Зсув по шву		Розрив по пришовній зоні		Розрив по основному матеріалу	
	ГЧ-зварювання	УЗЗ	ГЧ-зварювання	УЗЗ	ГЧ-зварювання	УЗЗ	ГЧ-зварювання	УЗЗ
10	1210±100	1400±100	100	50	-	50	-	-
15	-	1620±90	-	-	-	30	-	70
20	1700±80	1820±90	20	-	50	20	30	80
25	-	1840±80	-	-	-	10	-	90
30	1800±110	1840±80	-	-	60	5	40	95
40	1820±120	1840±90	-	-	54	-	46	-
50	1820±150	1840±100	-	-	53	-	47	-

Наведені дані свідчать про те, що УЗЗ дозволяє забезпечити таку міцність зварного з'єднання при величині напуску 20 мм, яка при ГЧ-зварюванні досягається при напуску 50 мм. Міцнісні характеристики зварного шва на зсув інколи навіть перевищують відповідні характеристики матеріалу ГШВТ, встановлені технічними вимогами, і при величині напуску більше 20 мм наближаються до міцнісних характеристик основного матеріалу. При цьому ГШВТ витримує тиск, в 40 разів більший за експлуатаційний. Необхідність отримання зварного шва, який має максимальну міцність, викликана тим, що в момент вмикання шахтних вентиляційних установок в трубі виникає ударна хвиля, яка в 5–10 разів може збільшувати навантаження на зварний шов.

1. Матюха В. В., Зельниченко А. Т. Оптимизация параметров нагрева при сварке гибких полимерных труб методом вычислительного эксперимента. Сб. науч. тр. / АН УССР – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1989. – 71 с.
2. Зайцев К. И., Мацюк Л. Н. Сварка пластмасс. – М.: Машиностроение, 1978. – 223 с.
3. Волков С. С., Черняк Б. Я. Сварка пластмасс ультразвуком. – М.: Химия, 1986. – 256 с.
4. Тарасенко О. В., Нестеренко Н. П., Потрохов А. В. Научно-технологический комплекс для УЗС полимеров // Электротехническая промышленность. Электросварка. – 1983. – № 1. – С. 19.
5. Корнаухов В. Г. Связанные задачи термовязкоупругости. – Киев: Наукова думка, 1982. – 260 с.
6. Колебания и разогрев вязкоупругого слоя, возбуждаемого прямоугольным волноводом / В. Г. Корнаухов, В. И. Козлов, И. К. Сенченков, О. П. Червинко // Прикл. механика. – 1986. – 22, № 2. – С. 86–90.