

# РОЗДІЛ 1. КОНСТРУКЦІЯ, ВИРОБНИЦТВО ТА РЕМОНТ ДВИГУНІВ І АВТОМОБІЛІВ

УДК 629.33:621.791.1

## УЛЬТРАЗВУКОВЕ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАСТМАС В АВТОМОБІЛЕБУДУВАННІ

*доктор технічних наук, професор Дмитриченко М.Ф.,  
старший викладач Кошелев В.Г.,  
кандидат технічних наук, професор, Шапошніков Б.В.,  
кандидат технічних наук, професор Корпач А.О.*

*Наведено особливості ультразвукового зварювання пластмас в автомобілебудуванні  
Features over of the ultrasonic welding of plastics are brought in motor industry*

**Вступ.** Використання полімерних матеріалів в автомобілебудуванні зростає великими темпами. Такий бурхливий розвиток виробництва пластмас обумовлений як економічними факторами, так і низкою цінних, а часом - унікальних властивостей цих матеріалів. Для виробництва та переробки пластмас потрібно менше витрат енергії, ніж для виробництва і переробки металів, питома вартість їх також нижче. Вони добре формуються, забарвлюються практично в будь-який колір, мають невелику щільність, високу хімічну стійкість, еластичність, низьку теплопровідність, хороші діелектричні та антифрикційні властивості. Тому, значна увага в автомобілебудуванні приділяється розробці нових технологічних процесів виготовлення деталей і складальних одиниць, а також удосконаленню відомих найбільш оптимальних процесів [1, 2].

Технологічний процес виготовлення, навіть, найпростіших виробів з пластмас, як правило, включає в себе операції з'єднання окремих елементів деталей або вузлів один з одним, тому що виготовлення у вигляді одного цілого складної деталі практично неможливо.

На цей час відомі три способи з'єднання (зварювання) термопластів: термічні, механічні і електромагнітні.

При механічних способах зварювання теплова енергія генерується всередині зварюваних деталей за рахунок перетворення механічної енергії, підведеної ззовні, в теплову. Це може бути механічна енергія тертя або вібротертя зварювальних поверхонь, що перетворюється в теплову, яка внаслідок малої теплопровідності пластмас локалізується в зварювальній зоні, механічна енергія пружних коливань (ультразвукове зварювання).

**Основна частина.** Основними характерними рисами ультразвукового зварювання пластмас є:

- можливість зварювання по поверхнях, забруднених різними продуктами;
- локальне виділення тепла в зоні зварювання, що виключає перегрівання пластмаси;
- можливість зварювання деяких пластмас на великому віддаленні від місця підведення енергії;
- можливість виконання з'єднання у важкодоступних місцях;
- можливість зварювання пластмас з вузьким інтервалом кристалізації;
- можливість з'єднання різнорідних полімерів;
- відсутність радіоперешкод і напруги на зварювальному інструменті.

Будь-які гармонійні хвилі в твердому середовищі характеризуються періодом  $T$ , або частотою коливань  $f$ , круговою частотою  $\omega = 2\pi f$ ; фазовою швидкістю  $c$ ; довжиною хвилі  $\lambda$ , що дорівнює  $\lambda = cT = c/f$ . Значення швидкості залежить від типу хвиль, що поширюються в середовищі. Якщо частинки середовища в процесі коливань переміщуються у напрямі розповсюдження хвилі, то коливання називаються подовжніми. Якщо ж переміщення частинок перпендикулярне напрямку розповсюдження хвилі, то коливання називаються поперечними. У рідинах і газах можуть розповсюджуватися тільки подовжні хвилі. У твердих тілах можуть розповсюджуватися обидва типи хвиль, а також згинальні, крутильні й поверхневі хвилі.

Фазова швидкість звуку для подовжньої хвилі в необмеженому твердому середовищі дорівнює

$$c_e = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{K+4/3G}{\rho}}, \quad (1)$$

де  $E$  - модуль Юнга;  $\nu$  - коефіцієнт Пуассона;  $\rho$  - густина середовища;  $K$  - модуль об'ємного стиснення;  $G$  - модуль зсуву.

Для тонких стрижнів, поперечні розміри яких набагато менші довжини хвилі, коли можна нехтувати поперечною деформацією ( $\nu = 0$ ), з (1) одержимо так звану стрижньову швидкість,  $c$ :

$$c = \sqrt{E / \rho} .$$

Для товстих стрижнів круглого перерізу, для яких  $0,15 < d / (2\lambda) < 0,7$ , користуються формулою

$$c' = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \left[ 1 - \nu^2 \pi^2 \left( \frac{d_m}{2\lambda} \right)^2 \right], \quad (2)$$

де  $d_m$  - максимальний діаметр стрижня.

При дії змінних сил в пружному середовищі виникають змінні зсуви, деформації і напруги, які будуть поширюватися в середовищі від точки прикладання сили. Кожному моменту часу відповідатиме певний розподіл зсувів, деформацій і напруг в пружному середовищі. Якщо цей розподіл переміщається, то пружна хвиля, що розповсюджується в стрижні, називається біжучою, інакше вона називається стоячою.

В ідеальному середовищі, в якому відсутнє внутрішнє тертя, біжуча хвиля, описується виразом:

$$u = A \sin(\omega t \pm kx), \quad (3)$$

де  $u$  - зсув уздовж осі  $x$  довільної точки в будь-який момент часу  $t$ ;  $A$  - амплітуда зсуву;  $k$  - хвильове число ( $k = 2\pi / \lambda = \omega / c$ ).

Диференціюючи (3) по  $t$  і по  $x$ , отримаємо вирази для коливальних швидкостей  $V$ , прискорень  $a$  і хвилі деформації  $\varepsilon$

$$V = \partial u / \partial t = A \omega \cos(\omega t \pm kx) = V_m \cos(\omega t \pm kx), \quad (4)$$

$$V = \partial^2 u / \partial t^2 = A \omega^2 \sin(\omega t \pm kx) = a_m \sin(\omega t \pm kx), \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x} = \pm kA \cos(\omega t \pm kx), \quad (6)$$

де  $V_m$  і  $a_m$  - амплітудні значення швидкості й прискорення.

Враховуючи, що в пружному середовищі напруги  $\sigma$  і деформації  $\varepsilon$  зв'язані законом Гука ( $\sigma = E \cdot \varepsilon$ ), отримаємо

$$\sigma = \pm EkA \cos(\omega t \pm kx), \quad (7)$$

При розповсюдженні пружної хвилі відбувається перенесення енергії, причому в процесі коливаний енергія періодично переходить із потенційної в кінетичну і навпаки. Кінетична енергія в одиниці об'єму з урахуванням виразу (4) дорівнює

$$E_{\text{кін}} = 0,5 \rho V^2 = 0,5 \rho [A \omega \cos(\omega t \pm kx)]^2 .$$

Наближене значення середньої кінетичної енергії в одиниці об'єму буде

$$\bar{E}_{\text{кін}} = 0,25 \rho \omega^2 A^2 . \quad (8)$$

Середня потенційна енергія визначається виразом аналогічним (8), тому повна середня енергія, або середня густина енергії у біжучої хвилі, дорівнює

$$\bar{E} = 0,5 \rho \omega^2 A^2 = 2\pi^2 f^2 A^2 \rho . \quad (9)$$

У реальному пружному середовищі завжди існують сили, що перешкоджають розповсюдженню пружної хвилі. Цей опір може носити активний, або реактивний характер. В результаті активного опору відбувається поглинання механічної енергії і виділення її у вигляді теплоти. Активний опір обумовлений тим, що будь-який нескінченно малий елемент пружного середовища має масу й пружність. Опір середовища розповсюдженню пружної хвилі характеризується модулем комплексного опору  $Z$  і визначається як відношення амплітуди коливальної сили до амплітуди коливальної швидкості:

$$Z = \frac{F_m}{V_m} = \sqrt{R^2 + (\omega_0 m - D / \omega_0)^2}, \quad (10)$$

де  $F_m$  - амплітуда коливальної сили;  $V_m$  - амплітуда коливальної швидкості;  $R$  - активний опір;  $\omega_0$  - кругова частота вимушених коливань;  $m$  - маса;  $D$  - пружність.

Часто користуються поняттям інтенсивності, або сили звуку  $I$ . Це енергія, що проходить в одиницю часу через одиничну площадку, орієнтовану перпендикулярно до напрямку розповсюдження хвилі. У плоскій хвилі інтенсивність звуку дорівнює енергії, що замкнена в паралелепіпеді, площа основи якого дорівнює одиниці, а висота – швидкості звуку,  $c$

$$I = \overline{Ec} = 0,5 \rho c \omega^2 A^2 = 2\pi^2 t^2 A^2 \rho c. \quad (11)$$

Величина  $\rho c$ , що входить у вираз (11) називається питомим хвилевим опором пружного середовища. Воно носить активний характер, тобто не може записати енергію, подібно до інерційного або пружного елементу. Проте воно не перетворює енергію пружних коливань в теплоту подібно елементу тертя. Активний характер хвилевого опору полягає в тому, що при переміщенні енергії коливань від джерела коливань в кожному поперечному перерізі середовища поглинає енергію за рахунок передачі цієї енергії наступному перерізу, що має такий же опір.

При розповсюдженні хвиль у в'язкопружних середовищах, якими є, наприклад, полімерні матеріали, відбувається зменшення інтенсивності хвилі, описуване рівнянням

$$I(x) = I_0 \exp(-2\alpha x),$$

де  $I_0$  - інтенсивність в початковій точці (точка вводу коливань);  $\alpha$  - коефіцієнт затухання.

Оскільки в зварюваному полімерному матеріалі відбувається поглинання енергії, то його можна розглядати як деякий опір, яким навантажена коливальна система. По аналогії з виразом (9) активна потужність, що підводиться до зварюваного матеріалу, може бути визначена за формулою

$$P_H = 2\pi^2 f^2 A^2 r_{ak}. \quad (12)$$

де  $r_{ak}$  - активна складова опору.

Відношення повної реактивної потужності коливальної системи до потужності, що визначає власні втрати системи, називається коефіцієнтом добротності або просто добротністю  $Q$ . Добротність характеризує також збільшення амплітуди коливальної швидкості при резонансі. Вона пов'язана з коефіцієнтом затухання  $\alpha$  наступними співвідношеннями

$$Q = \pi / \theta = \pi / (\alpha T) = \omega_0 m / R = 1 / (\omega_0 D R), \quad (13)$$

де  $\theta$  - логарифмічний декремент затухання;  $\alpha$  - коефіцієнт затухання;  $T$  - період коливань;  $\omega_0$  - власна частота системи;  $m, D, R$  - еквівалентна маса, пружність і активні втрати системи відповідно.

На рис. 1 показана схема ультразвукового зварювання пластмас. Електричні коливання ультразвукової частоти, що виробляються генератором, перетворюються в механічні подовжні коливання електроакустичного перетворювача. Амплітуда коливань останнього становить 3–5 мкм. Для збільшення амплітуди до перетворювача приєднується трансформатор пружних коливань, а до останнього – хвилевід. Змінюючи площі поперечного перерізу трансформатора і хвилеводу, можна збільшити амплітуду коливань торця перетворювача в 10–20 разів.

Таким чином, стрижень змінного перерізу можна вважати механічним підсилювачем, принцип дії якого полягає в наступному. Наприклад, ступінчастий стрижень (рис. 1, з) здійснює подовжні коливання. У перерізі  $n-n$  при цьому розташовуватиметься єдина площина вузла коливань, де зміщення відсутні. Спрощена еквівалентна схема такого стрижня включає жорсткість  $C_1$  і масу  $m_1$  верхньої частини, котрі більші, ніж жорсткість  $C_2$  і маса  $m_2$  нижньої частини стрижня. Оскільки площина  $n-n$  нерухома, то зусилля в цьому перерізі взаємно компенсують одне одного, тобто

$$m_1 = \frac{d^2 u_1}{dt^2} = m_2 = \frac{d^2 u_2}{dt^2}, \quad (14)$$

де  $\frac{d^2 u_1}{dt^2}$  і  $\frac{d^2 u_2}{dt^2}$  – прискорення, з якими рухаються маси  $m_1$  і  $m_2$ .

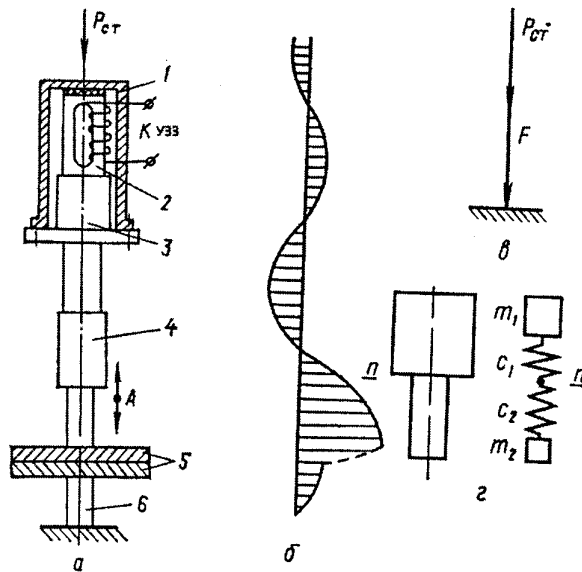


Рис. 1 – Ультразвукове зварювання з нормальним вводом коливань:  
 а – схема установки (1 – корпус перетворювача; 2 – перетворювач з обмоткою;  
 3 – трансформатор пружних коливань; 4 – хвилевід; 5 – зварні деталі; 6 – опора);  
 б – етюра амплітуди зміщення коливальної системи; в – розташування векторів статичного тиску  $P_{ст}$  і динамічного зусилля  $F$ ; г – схема ступінчастого стрижня-хвилеводу

Оскільки  $m_1 > m_2$ , то  $\frac{d^2 u_1}{dt^2} < \frac{d^2 u_2}{dt^2}$ . Верхня і нижня частини стрижня коливаються з однаковою частотою ( $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ ), тому, згідно виразу (5)  $A_2 > A_1$  ( $A_1$  і  $A_2$  – амплітуди зміщення мас  $m_1$  і  $m_2$  відповідно). Таким чином, амплітуди зміщення кінців хвилеводу і трансформатора пружних коливань різні.

Різноманіття схем ультразвукового зварювання пластмас є наслідком, в першу чергу, різних схем підведення енергії механічних коливань до зварюваних деталей. В даний час відомі наступні схеми підведення енергії: нормальна, тангенціальна, на похилій площині або похилим інструментом, крутильними коливаннями. Будь-яка з перерахованих схем може бути застосована з одностороннім або двостороннім введенням енергії.

При нормальному способі підведення енергії (рис. 1) вектори  $P_{ст}$  і  $F$  розташовані нормально до поверхні зварюваного виробу, лежать на одній прямій і співпадають за напрямом. Оскільки введення коливань і статичний тиск в цьому випадку здійснюються через один і той же робочий орган – хвилевід, то така схема називається схемою зварювання з залежним тиском.

При зварюванні в напуск сили  $P_{ст}$  і  $F$  впливають на додатковий присадковий матеріал (пруток, вкладений у  $V$ -подібний зазор між зварюваними деталями). Дія ультразвукових коливань на пруток призводить до його пластифікації, а під дією статичного тиску пластифікований матеріал заповнює зазор,

утворюючи міцне з'єднання. Для отримання протяжних швів проводять переміщення зварювальної головки уздовж присадкового прутка. Аналогічний ефект може бути отриманий при заповненні зазору між кромками зварюваних деталей гранулами або стружкою з відповідного полімерного матеріалу.

Близька до описаної вище схема, яка приведена на рис. 2, що розроблена для зварювання м'яких пластмас типу поліетилену. З'єднання утворюється за рахунок розплаву, що видавлюється хвилеводом із зони контакту допоміжних технологічних термопластичних деталей, що відіграють роль присадкового матеріалу (зварювання витисненням розплавом). Останні дві схеми зварювання можуть бути використані для одношарового або багатошарового зварювання встик і рантовим швом листових виробів великої товщини і протяжності по прямолінійному, криволінійному і замкненому контурах, причому амплітуда коливань хвилеводу більша за амплітуду коливань трансформатора.

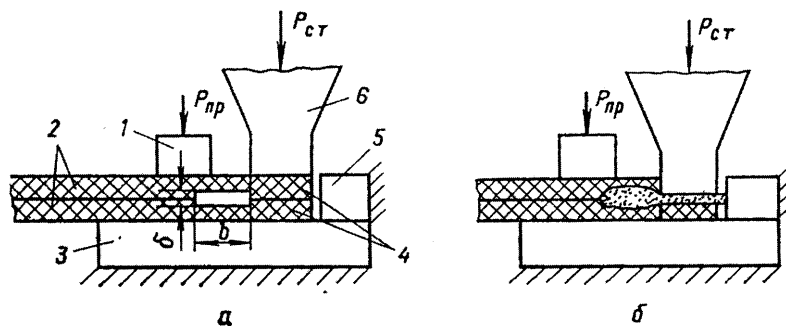


Рис. 2 – Схема ультразвукового зварювання витисненням розплавом:  
 а – початок зварювання; б – кінець зварювання; 1 – притискач; 2 – зварювані деталі;  
 3 – опора; 4 – технологічні деталі, що підлягають ультразвуковому розплаву; 5 – упор;  
 6 – хвилевід;  $P_{пр}$  – тиск притиснення;  $P_{ст}$  – статичний зварювальний тиск;  
 $\delta$  і  $b$  – товщина і ширина технологічного зазору

Трансформатор пружних коливань служить, крім того, для узгодження параметрів перетворювача і навантаження, а хвилевід – для введення ультразвукових коливань в зварюваний виріб.

Підведення механічної енергії ультразвукових коливань здійснюється за рахунок контакту випромінюючої поверхні зварювального інструмента - хвилеводу (яку надалі будемо називати робочим торцем хвилеводу) з однією або декількома зварюваними деталями. Такий контакт забезпечується статичним тиском  $P_{ст}$  робочого торця хвилеводу на зварювані деталі. Цей тиск сприяє також концентрації енергії в зоні з'єднання. Динамічне зусилля  $F$ , що виникає в результаті дії хвилеводу, що коливається, на зварюваний матеріал, приводить до його нагріву, а дія статичного тиску  $P_{ст}$  забезпечує отримання міцного зварного з'єднання. Іноді неможливо отримати стикові з'єднання листів або деталей, що мають форму стрижнів значної довжини шляхом нормального введення енергії пружних коливань по відношенню до поверхонь які сполучаються. У цих випадках найбільш сприятливим є введення у виріб енергії коливань в безпосередній близькості від зони зварювання.

**Висновок.** Ультразвукове зварювання може замінити механічні методи з'єднання і склеювання цілої групи полімерів, наприклад, полістиролу, лавсану, капрону, полівінілхлориду та ін.

Дуже цінним є те, що обладнання, призначене для ультразвукового зварювання полімерів, може використовуватися для закладення (запресування) металевої арматури в полімери, кріпильні деталі, настановні штифти, клеми, декоративні деталі та ін.

## Література

1. М.Ф. Дмитриченко, Б.В. Шапошніков, В.Г. Кошелєв, О.В. Мельник, О.П. Токін. Ультразвукове зварювання в автомобілебудуванні. К., НТУ, 2011, 136 с.
2. С.С. Волков, Б.Я. Черняк Сварка пластмасс ультразвуком.- М.:Химия, 1986, 286 с.