

Базаров Н.Д., студент ДВНЗ «ДонНТУ»,  
Тарасюк В.П., канд. техн. наук, доц. ДВНЗ «ДонНТУ»,

### РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ В'ЯЗКОСТІ РОЗПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ

У роботі наведено результати досліджень можливості використання розробленої математичної моделі для акустичного аналізу пластичних властивостей розплавленого металу. Він дозволяє значно скоротити часові та матеріальні витрати при контролі якості виготовлення кінцевих виробів.

In the work the results of researches possibility using the developed mathematical model for the method of acoustic analysis for plastic properties of fusions metals is explored. That will allow to shorten temporal and material expenses on the control of quality in the conditions of industrial production substantially.

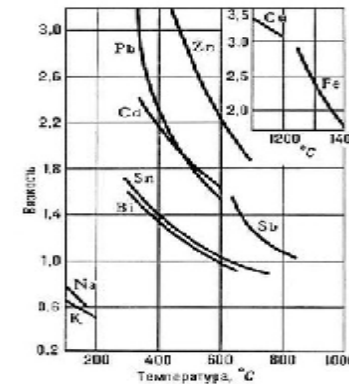
**Загальна постановка завдання.** При виготовленні суцільнолитих виробів складної форми із сталі і її сплавів, а також в процесі безперервного розливання сталі важливим завданням є контроль в'язкості сталі, що знаходиться в розплавленому стані. Це пов'язаним з контролем досягнення сплавом необхідної рідкотекучості для: рівномірного заповнення форми при мінімальних витратах енергоносіїв на розігрівання сплаву у разі суцільнолитих виробів; уникнення передчасного зносу кристалізатора, що випробовує тиск при контакті з потоком розплавленого металу у разі безперервного розливання сталі [1-2]. Найбільш поширеними на даний момент методами такого контролю є ротаційна і вібраційна віскозиметрія [6]. Але використання вказаних методів в описаній ситуації зв'язане з рядом труднощів, основним з яких є безпосередній контакт чутливого елемента віскозиметрів з агресивним середовищем, ведучий до його передчасного зносу. Тому актуальною проблемою є розробка безконтактного методу експрес - контролю в'язкості.

**Постановка завдання дослідження.** Необхідно дослідити можливість безконтактного експрес - контролю в'язкості розплаву за допомогою аналізу швидкості розповсюдження сдвігових (поперечних) ультразвукових хвиль. Подовжні ультразвукові хвилі характеризують пружні властивості рідин, їх структуру і сили міжмолекулярного відштовхування, сдвігові - в'язкі властивості, і як наслідок, сили міжмолекулярного тяжіння. І якщо методи визначення швидкості розповсюдження подовжніх ультразвукових хвиль в рідині досить добре розроблені і знаходять широке застосування в практиці ультразвукового контролю стану рідких середовищ, то сдвігові хвилі практично не використовуються із-за загасання в рідині на

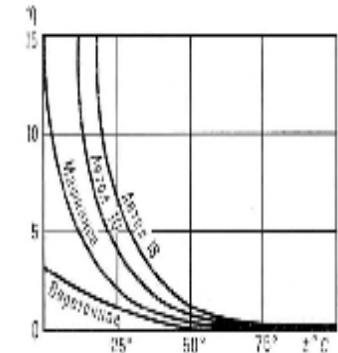
відстанях порядку довжини хвилі [3-6]. Тому значний інтерес представляє розробка методів вимірювання швидкості розповсюдження поперечних хвиль.

**Рішення задачі і результати досліджень.** Розплавлені метали мають в'язкість того ж порядку, що і звичайні рідини (див. мал. 1) [3-6].

У рідинах, де відстані між молекулами багато менше, ніж в газах, в'язкість обумовлена, насамперед, міжмолекулярною взаємодією, що обмежує рухливість молекул. У рідині молекула може проникнути в сусідній шар лише при освіті в ній порожнини, достатньої для перескакування туди молекули. На утворення порожнини (на «спушення» рідини) витрачається так звана енергія активації в'язкої течії. Енергія активації зменшується із зростанням температури і пониженням тиску. У цьому полягає одна з причин різкого зниження в'язкості рідин з підвищенням температури (див. мал. 2) і зростання її при високому тиску. При підвищенні тиску до декількох тис. атмосфер  $\eta$  збільшується в десятки і сотні разів.



Малюнок 1 - В'язкості деяких розплавлених металів в спз



Малюнок 2 - Вимірювання в'язкості деяких змащувальних масел залежно від температури ( $\eta$  дана в пз)

У основі пропонованого способу експрес-контролю лежить вимір акустичних характеристик вихідної сировини (коефіцієнт поглинання, швидкість ультразвуку) методами молекулярної акустики, розділу фізичної акустики, в якому властивості речовини і кінетика молекулярних процесів досліджуються акустичними методами.

За швидкістю звуку можна визначити такі характеристики речовини, як стисливість, відношення теплоємностей, пружні властивості твердого тіла та ін., а по поглинанню звуку — значення сдвігової і об'ємної в'язкості, час релаксації і ін. У рідині, обчислюючи швидкість звуку на підставі тієї або іншої моделі рідини і порівнюючи результати розрахунку з дослідними

даними, у ряді випадків можна оцінити правдоподібність використовуваної моделі і визначити енергію взаємодії молекул. На швидкість звуку впливають особливості молекулярної структури, сили міжмолекулярної взаємодії і щільність упаковки молекул. Таким чином, вимірюючи швидкість звуку і поглинання залежно від частоти і визначаючи час релаксації, можна судити про характер молекулярних процесів і про те, який з цих процесів вносить основний внесок в релаксацію.

У молекулярній акустиці для досліджень зазвичай застосовується ультразвук. Це пов'язано як з високим розвитком техніки випромінювання та прийому ультразвуку і з великою точністю вимірювань в цьому діапазоні частот, так і з тим, що робота на нижчих частотах зажадала б дуже великих об'ємів досліджуваної речовини, а на вищих частотах поглинання звуку стає таким великим, що багато акустичних методів виявляються непридатними.

Однією з суттєвих переваг ультразвукових коливань високої частоти перед звуковими є те, що їх можна посылати у вигляді малих пучків променів, що розходяться. Це забезпечує можливість спрямованого випромінювання і прийому. Відомо, що чим більше діаметр випромінюючої п'єзопластини в порівнянні з довжиною хвилі, тим вище спрямованість випромінювання. Наприклад, для забезпечення на частоті 1 МГц випромінювання у вигляді пучка променів з кутом розбіжності що не перевищує  $10^\circ$  ( $0,2$  рад) досить вибрати діаметр п'єзоелементу рівним 20мм.

Частоти вживаного ультразвуку в рідинах і твердих тілах — в діапазоні  $10^5$ — $10^8$  Гц. Поглинання звуку, перетворення енергії звукової хвилі в інші види енергії, і зокрема в тепло, характеризується коефіцієнтом поглинання  $a$ , який визначається як величина, зворотна відстані, на якій амплітуда звукової хвилі зменшується в  $e = 2,718$  разів.  $a$  виражається в  $\text{см}^{-1}$  тобто в Непері на см або ж в децибелах на м ( $1 \text{ дБ/м} = 1,15 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ ). Поглинання звуку характеризують також коефіцієнтом втрат

$$e = a/lp,$$

(де  $l$  — довжина хвилі звуку) або добротністю  $Q = 1/e$ . Величина  $a \cdot l$  називається логарифмічним декрементом загасання. При розповсюдженні звуку в середовищі, що володіє, в'язкістю і теплопровідністю

$$a = \frac{w^2}{2 \cdot r \cdot \tilde{n}^3} \left[ \frac{4}{3} \cdot h + x + c \cdot \left( \frac{1}{\tilde{N}_v} - \frac{1}{\tilde{N}_r} \right) \right] \quad (1)$$

де  $r$  — щільність середовища,  $C$  — швидкість звуку в ній,  $w$  — кругова частота звукової хвилі,  $h$  і  $x$  — коефіцієнт сдвигової і об'ємної в'язкості відповідно,  $c$  — коефіцієнт теплопровідності,  $C_p$  і  $C_v$  — теплоємності середовища при постійному тиску і об'ємі відповідно. Якщо жоден з

коефіцієнтів  $h$ ,  $x$  і  $c$  не залежить від частоти, що часто виконується на практиці, то  $a \sim w^2$ . Якщо при проходженні звуку порушується рівноважний стан середовища, поглинання звуку виявляється значно більшим, ніж визначуване по формулі (1). Таке поглинання називається релаксаційним і описується формулою:

$$a = \frac{1}{2 \cdot C_0^3} \cdot \frac{w^2 \cdot t \cdot (C_w^2 - C_0^2)}{1 + w^2 \cdot t^2}, \quad (2)$$

де  $t$  — час релаксації,  $C_0$  і  $C_w$  — швидкості звуку при  $wt \ll 1$  і при  $wt > 1$  відповідно. В цьому випадку поглинання звуку супроводиться дисперсією звуку. Величина  $a/f^2$ , де  $f = \omega/2\pi$ , є характеристикою речовини, що визначає поглинання звуку. Вона, як правило, в рідинах менше, ніж в газах, а в твердих тілах для подовжніх хвиль менше, ніж в рідинах.

У рідинах поглинання звуку в основному визначається в'язкістю, а внесок теплопровідності малий і його можна не враховувати. У більшості рідин для поглинання звуку істотної об'ємна в'язкість і релаксаційні процеси. Частота релаксації в рідинах, тобто величина  $\rho \cdot w = 1/t$ , як правило, дуже велика і область релаксації виявляється лежачою в діапазоні високих ультразвукових і гіперзвукових частот. Коефіцієнт поглинання звуку зазвичай сильно залежить від температури і від наявності домішок.

Вимірювання швидкості ультразвуку в більшості випадків зводиться до вимірювання часу пробігу  $\tau$  акустичного імпульсу в досліджуваному зразку і вимірювання довжини акустичного шляху  $l$ . В цьому випадку швидкість розповсюдження ультразвукових хвиль:

$$c = l/\tau, \quad (3)$$

Вимірювання коефіцієнта затухання ультразвуку в рідинах і твердих тілах може проводитися при імпульсних і безперервних ультразвукових коливаннях. У разі імпульсних коливань прийом ультразвукової хвилі може здійснюватися як окремим приймачем, так і самим випромінювачем після віддзеркалення імпульсу від відбивача. При цьому коефіцієнт затухання визначається по формулі:

$$a = \frac{1}{h} \cdot \ln \frac{A_1}{A_2}, \quad (4)$$

де  $h$  — товщина зразка,  $A_1$ ,  $A_2$  — амплітуди випромінювача і приймача відповідно.

У основі залежності акустичних параметрів (затухання і швидкість ультразвука) від в'язкопружних властивостей (модуль Юнга, ефективна в'язкість), відповідно до феноменологічної теорії, може бути використана модель в'язкопружного тіла з довільним числом релаксаційних максвелловських механізмів. Відповідно до цієї моделі вираз для комплексного модуля пружності має вигляд [4]:

$$\begin{aligned} \tilde{E} &= E(w) + iwh(w) = E_0 + iwh_\infty + \sum_{j=1}^n \frac{iwh_j}{1 + iwt_j} = \\ &= \left( E_0 + \sum_{j=1}^n \frac{E_j w^2 t_j^2}{1 + w^2 t_j^2} \right) + iw \left( h_\infty + \sum_{j=1}^n \frac{h_j}{1 + w^2 t_j^2} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

де  $E_0$  – рівноважний або статичний модуль, що характеризує чисто пружні властивості полімерів;  $h_\infty$  – нерелаксуюча в'язкість (для випадку нескінченно швидкій деформації);  $h_j, t_j, E_j$  – в'язкість, часи релаксації і модулі пружності різних релаксаційних механізмів;  $w$  – частота акустичних коливань;  $n$  – число релаксаційних механізмів.

Також відомо [4], що вирази для  $c$  та (5), можуть бути записані у вигляді:

$$c = \sqrt{\frac{E}{r}} \sqrt{\frac{2(1 + w^2 r^2) \left( \sqrt{1 + w^2 r^2} - 1 \right)}{w^2 r^2}} \quad (6)$$

$$a = w \sqrt{\frac{r}{E}} \sqrt{\frac{\sqrt{1 + w^2 r^2} - 1}{2(1 + w^2 r^2)}} \quad (7)$$

З урахуванням виразів (5), (6), (7) ми можемо отримати залежності для  $E$  і  $h$  [4]:

$$E(w) = rc^2 \frac{1 - (ac/w)^2}{[1 + (ac/w)^2]^2}, \quad (8)$$

$$h(w) = \frac{2rc^2}{w} \frac{ac/w}{[1 + (ac/w)^2]^2}. \quad (9)$$

Розглянемо в'язку складову.

Ефективна в'язкість є сумою два складових [4]:

$$h = \frac{4}{3} h' + h'', \quad (10)$$

де  $h'$  – зсувна в'язкість, пов'язує швидкість деформації зсуву з виникаючою тангенціальною напругою [4], обумовлена механізмом в'язкого тертя ланок макромолекул.

$h''$  – об'ємна в'язкість, визначає диссипативні сили, що виникають при всебічному рівномірному стисненні або розширенні [4].

Т. ч. використання залежностей (9) і (10) дозволяє, знаючи акустичні параметри матеріалу, визначати в'язку складову.

Дослідженню впливу молекулярної маси і інших параметрів ММР на течію розчинів, зокрема на зсувну в'язкість, присвячено достатньо багато робіт [6].

За основу визначення молекулярної маси по в'язкості розчинів і розплавів полімерів, як правило, береться рівняння Марка-куна-хувінка [7].

$$h = K_1 \cdot MM^{K_2}, \quad (11)$$

де  $K_1, K_2$  – const;

$MM$  – молекулярна вага зразку.

Це рівняння зв'язує молекулярну вагу ( $MM$ ) з характеристичною в'язкістю без урахування розгалуженості, зшивання і дисперсності полімеру.

Також існують дослідження впливу  $MM$  і параметрів молекулярно масового розподілу (ММР) на такі технологічні характеристики, як в'язкість по Муні ( $Mh$ ), пластичність, жорсткість і ін.[8,9]. В'язкість по Муні без урахування розгалуженості і зшивання, як функція  $MM$ , може бути описана наступним рівнянням.

$$Mh = m_1 \cdot MM_n^{m_2} \cdot K_j^{m_3}, \quad (12)$$

де  $m_1, m_2, m_3$  – const;

$MM_n$  – молекулярна вага, визначувана методами віскозиметрії.

$K_j$  – коефіцієнт полідисперсності;

Найчастіше, його впливом можна нехтувати, тоді формула (12) спроститься до вигляду:

$$Mh = m_1 \cdot MM_n^{m_2}, \quad (13)$$

Т. ч., виражаючи  $MM$  з (11), підставляючи в (13) і замінюючи  $h$  на (9) можна отримати залежність, що об'єднує модель акустичних властивостей

розплаву ( $a$ ,  $C$ ) і його в'язкопружних характеристик (ефективна в'язкість  $h$  і модуль пружності  $E$ ) з моделлю пластоеластичних властивостей розплаву і що дозволяє зв'язати в'язкість по Муні ( $Mh$ ) з акустичними властивостями:

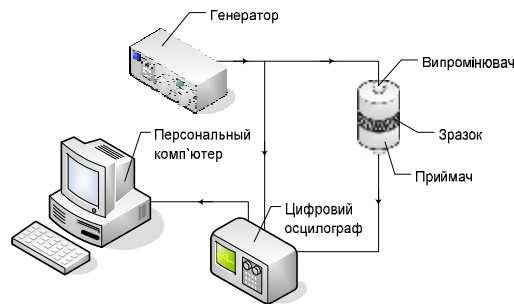
$$Mh = m_1 \left( \frac{2rc^2}{K_1 w} \cdot \frac{ac/w}{[1 + (ac/w)^2]^2} \right)^{\frac{m_2}{K_2}} \quad (14)$$

введемо  $Z_1 = m_1 \left( \frac{2}{K_1} \right)^{\frac{m_2}{K_2}}$  та  $Z_2 = \frac{m_2}{K_2}$ , отримаємо:

$$Mh = Z_1 \left( rac^3 / w^2 \left[ 1 + \left( \frac{ac}{w} \right)^2 \right]^2 \right)^{Z_2} \quad (15)$$

де  $Z_1$  і  $Z_2$  – параметри моделі, індивідуальні для кожної марки сплаву.

Для експериментальної перевірки отриманої математичної моделі пропонується принципова схема експериментальної установки для визначення параметрів залежності (15), яка є сукупністю апаратних засобів (генератор, цифровий осцилограф з виведенням даних на комп'ютер і п'єзокварцеві перетворювачі: випромінювач і приймач) (див. мал.3).

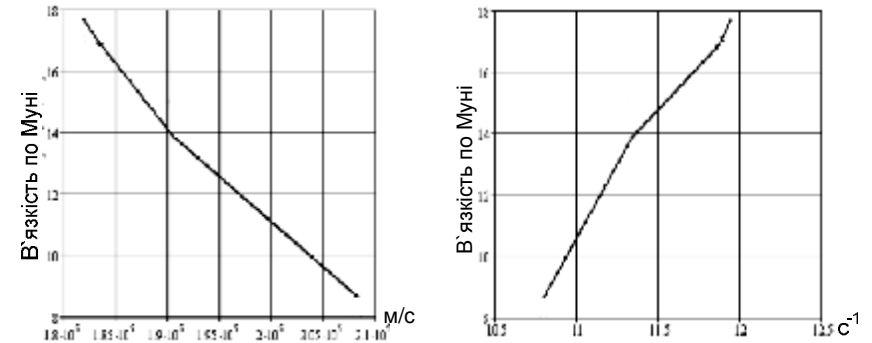


Малюнок 3 - Принципова схема експериментальної установки для оцінки параметрів математичної моделі (15)

Електричний імпульс подається генератором на випромінювач і перший канал цифрового осцилографа. Випромінювач перетворює електричний імпульс в механічні коливання, які після проходження через зразок перетворюються приймачем назад в електричні коливання і реєструються другим каналом цифрового осцилографа. Отримані дані необхідно обробляти за допомогою спеціального розробленого програмного модуля (ПМ).

Виникають передумови для розробки відповідного ПМ, що дозволяє визначати параметри запропонованої математичної моделі, а також

розраховувати статистичні оцінки моделі: відносну погрішність, абсолютну погрішність і коефіцієнт парної кореляції. Криві залежності коефіцієнта загасання і швидкості ультразвуку від в'язкості, побудовані з використанням розробленої моделі представлені на малюнку 4.



Малюнок 4. Залежність коефіцієнта загасання і швидкості ультразвуку від в'язкості

**Висновки.** Отримані залежності дозволяють зробити висновок про можливість використання розробленої математичної моделі як метод акустичного аналізу в'язких властивостей розплавів металів, що дозволить істотно скоротити тимчасові і матеріальні витрати на контролі якості в умовах промислового виробництва. Для розробки приладу експрес-контролю в'язкості розплавленого металу виникає завдання підтвердити модель експериментально і оцінити її адекватність.

#### Література.

1. Би. Ст. Лінчевський, Техніка металургійного експерименту, «Металургія», М., 1967, стор. 239.
2. С. Ст. Михайліков, С. Ст. Штенгельмейер, Р. С. Ершов, Изв. АН СРСР. Металургія і гірська справа №1, 1964.
3. А. М. Коваленко, І. А. Новохатський, Р. С. Ершов, А. До. Петров, Изв. АН СРСР. Метали № 6, 1969.
4. Резниковський, М.М., Лукомська, А.І. Механічні випробування каучуку і гуми. 2-е видавництво, перераб. і доп. / М.: Хімія. 1968. - 500с.
5. Труелл Р., Ельбаум Ч., Чик Б. Ультразвукові методи у фізиці твердого тіла. М.: мир, 1972.
6. Бражників, Н.І. Ультразвукові методи. / Фізичні і фізикохімічні методи контролю і складу властивостей речовини під загальною редакцією академіка АН Киргизькою РСР Н. Н. Шуміловського. М.-Л., видавництво «Енергія». 1965. - 248 с.

Поступила в редколлегию