

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВІБРАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛУ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТРУБНИХ ЗАГОТОВОК

Балакін В.Ф., д.т.н., проф., Савкин С.В., аспірант

*Національна металургійна академія України, Україна.*

**Вступ.** Питанням експериментальних досліджень вібраційного обробки металів при зварюванні присвячена велика кількість робіт [1-5], при цьому відсутні описи моделей, що дозволяють визначати залишкові напруги в процесі релаксації. У наявних публікаціях описані лише тільки загальні принципи створення таких моделей [6], а також наводяться залежності, що дозволяють оцінити загальний рівень зниження залишкових напружень [7,8].

Таким чином, виникає необхідність в створенні математичної моделі вібраційної обробки для конструкцій різної форми, при якій можливе визначення всіх компонентів тензора напружень в довільній точці.

**Основний матеріал.** Для зварних з'єднань циліндричної форми, згідно [7], зварні конструкції розглядаються як нескінченно-довгі товстостінні циліндри, навантажені рівними тисками на поверхнях сполучення. Розрахунок напружень, що виникають в з'єднанні, проводиться за умови, що зварні поверхні знаходяться в плоскому деформованому стані.

При побудові математичної моделі зварювання труб вводяться такі припущення.

1. Матеріал труб, що зварюються є ідеально пружним і лінійно деформуємим.

2. Температурне поле в кожній точці поверхонь зварювання не залежить від координат точки.

Для побудови математичної моделі вібраційного обробки труб, що зварюються вводимо такі припущення:

- відбувається миттєве укладання шва по всій довжині;
- лінії зварювальних швів є лініями нагріву до температури зварювання;
- зварювані тіла і деформація їх матеріалу є пружно-пластичними;
- пластична течія матеріалу має хвильовий характер.

При цьому вважається, що пластична деформація розглядається як сукупність послідовно протікаючих елементарних релаксаційних актів, в ході яких, в області поблизу концентраторів напружень, зароджуються зрушення.

Осцилюючий характер пластичної течії дозволяє розглядати цей процес як автоколивальний. Визначивши власну частоту осциляцій пластичної течії, можна за допомогою резонансного зовнішнього вібраційного впливу викликати штучне підвищення інтенсивності пластичної течії твердого тіла (металу або сплаву), і за рахунок цього домогтися зниження величини зусилля деформації [9].

Математична модель трубного зварного з'єднання, в умовах вібраційного впливу має вигляд:

$$U = \iint_V W r dr dz \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$u_{\tau\vartheta} = u_{\tau\chi}; \quad (2)$$

$$u_{\gamma\vartheta} = u_{\gamma\chi}; \quad (3)$$

$$m\omega_0 + \min Q(\alpha) < \omega < m\omega_0 + \max Q(\alpha). \quad (4)$$

Рівняння (1) представляє собою мінімізацію функціоналу потенційної енергії, що накопичується в з'єднанні; (2), (3) – обмеження у вигляді рівності, що описують умови зчеплення шарів; (4) – обмеження у вигляді нерівностей для частот вібраційного пристрою.

Співвідношення (4) описує межу частотної смуги, в межах якої вібраційний вплив має стимулюючу дію на процес пластичної деформації.

Тут:  $W$  – питома потенційна енергія, що накопичується в одиничному шарі металу;  $u_{\tau\vartheta}, u_{\tau\chi}, u_{\gamma\vartheta}, u_{\gamma\chi}$  – дотичні компоненти вектора переміщень шарів металу з діаметрами  $\vartheta$  і  $\chi$ ;  $Q(\alpha)$  – функція зовнішнього впливу;  $V$  – об'єм зварювальних шарів;  $\omega$  – циклічна частота навантаження;  $\omega_0$  – власна циклічна частота осциляцій;  $\alpha$  – початкова фаза навантаження;  $m$  – число шарів.

Питома потенційна енергія одиничного шару складається з потенційних енергій взаємодії окремих частинок [10]:

$$W = \sum_{i=1}^n W_i, \quad (5)$$

де  $W_i$  – питома потенційна енергія  $i$  – ої частинки;  $n$  – число частинок в шарі.

Для питомої потенційної енергії частинки має місце наступна формула [9]:

$$W_i = \theta \cdot \frac{A}{d^m} \left( \frac{d^m}{r} - \left( \frac{d}{r} \right)^n \cdot \frac{m}{n} \right) \quad (6)$$

Тут:  $d$  – діаметр частинки;  $r$  – відстань між найближчими сусідніми частинками;  $A, \theta$  – постійні для заданої речовини ( $A \geq 0$ ;  $\theta \geq 0$ );  $m$  – число шарів.

Для знаходження об'єму  $V$  зварювальних шарів має місце наступна формула:

$$V = \pi n m (\chi - \vartheta)^2 / 4. \quad (7)$$

У процесі зварювання пластична течія втрачає автоколивальний характер і повністю підпорядковується зовнішній дії вібрації, тобто настає так званий вібропластичний ефект, при цьому компоненти тензора напружень знаходяться з рішення диференціального рівняння:

$$\ddot{y} + 2\delta \cdot \dot{y} + \omega_0^2 \cdot y = F(\omega t + \alpha; y_a; \varepsilon; t), \quad (8)$$

Тут:  $\varepsilon$  – оператор тензора деформацій  $\varepsilon_{ij}$ ;  $t$  – час;  $y_a$  – вихідні напруги, створені зовнішнім впливом;  $F(\omega t + \alpha; y_a; \varepsilon; t)$  – функція вібраційного змушуючого впливу;  $y$  – оператор тензора напружень  $y_{ij}$ .

**Висновки.** В процесі чисельного експерименту визначалося вплив геометричних, фізико-механічних властивостей матеріалів, що зварюються, частотних характеристик вібраційного впливу на величини напружень в зварному з'єднанні.

Наведені вище залежності дозволяють зробити висновки про доцільність застосування математичного моделювання з метою прогнозування величини залишкових напруг у зварних швах і біляшовних зонах зварних труб в залежності від застосовуваної в процесі зварювання частоти вібрації.

### Література

1. Скаковский В.Д. Разработка технологии вибрационной обработки сварных конструкций балочного типа / автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н., К., 1987.-16 с.
2. Рагульскис К.М. и др. Вибрационное старение. Л.: Машиностроение, 1987.- 72 с.
3. Анистратов В.Д., Гини Э.Ч. Вибрационное старение корпусных чугуновых деталей станков: Обзор.- М.: НИИМАШ, 1981.- 36 с.

4. Иванова Г.Н., Могильнер М.Н., Полнов В.Г., Чикадали О.Д. Вибростабилизирующая обработка металлических деталей.- Алма-Ата, 1987.- 61 с.
5. Лашенко Г.И. Вибрационная обработка сварных конструкций.- К.: «Экотехнология», 2001.- 56 с.
6. Эльдарханов А .С. Применение физических методов моделирования для изучения влияния вибрации на процессы затвердевания сплавов // Дис. д-ра техн. наук. – Киев,1996. – 321 с.
7. Балакин Ю. А., Гладков М. И. Расчет параметров вибрационной обработки кристаллизующихся металлов // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 2003.– № 9. – С. 56-60.
8. Полнов В.Г., Могильнер М.П. Определение режимов вибрационной обработки сварных конструкций с целью снижения остаточных напряжений / Сварочное производство.- 1984.- №2.- С.32-33.
9. Дидык Р.П., Кузнецов Е.В., Забара В.Н. Физические основы прочности. Учебник.- Днепропетровск: «Наука и образование», 2005. – 608 с.
10. Подгорный А.Н., Марченко Г.А., Пустынников В.И. Основы и методы прикладной теории упругости.- К.: Вища школа, 1981.- 328 с.

## MATHEMATICAL MODEL OF VIBRATION PROCESSING OF METAL DURING WELDING OF BILLETS

Balakin Valeriy, Savkyn Svyatoslav

**Abstract.** This article discusses methods for numerical measurement of the effect of vibration frequency on the physical properties of the metal. A literature review of known studies on the effect of vibration on the physical properties of metal. According to the wave theory of vibration, by determining the natural frequency of oscillations of the plastic flow, it is possible to intensify the process of metal processing by pressure and to achieve a reduction in the magnitude of the deformation force. The mathematical model of pipe welded connection in the conditions of vibration influence taking into account the assumptions necessary for approximation of calculations is offered. Particular attention was paid to the specific potential energy of a single layer, which consists of the potential energies of interaction of individual particles. The dependences presented in the work allow to make positive conclusions about the application of mathematical modeling in order to predict the level of residual stresses in welds.

**Keywords:** vibration, residual stresses, mathematical model, welded joint, specific potential energy.

### References

1. Skakovsky V.D. Development of technology of vibration processing of welded structures of beam type / dissertation author's abstract on scientific degree competition Ph.D., K., 1987.-16 p.
2. Ragulskis K.M. and others. Vibration aging. L. : Mechanical Engineering, 1987.- 72 p.
3. Anistratov V.D., Gini E.Ch. Vibration aging of body cast-iron parts of machine tools: Review.- Moscow: NIIMASH, 1981.- 36 p.
4. Ivanova G.N., Mogilner M.N., Polnov V.G., Chikadali O.D. Vibration stabilizing treatment of metal parts.- Alma-Ata, 1987.- 61 p.
5. Lashchenko G.I. Vibration treatment of welded structures. - Kiev: "Ecotechnology", 2001. - 56 p.
6. Eldarkhanov A.S. Application of physical methods of modeling to study the effect of vibration on the solidification of alloys // Dis. Dr. tech. sciences. - Kiev, 1996. - 321 p.
7. Balakin Yu. A., Gladkov MI Calculation of the parameters of vibration treatment of crystallizing metals. Izv. universities. Black metallurgy. - 2003.- No. 9. - S. 56-60.
8. Polnov V.G., Mogilner M.P. Determination of modes of vibration processing of welded structures in order to reduce residual stresses / Welding production.- 1984.- No. 2.- P.32-33.
9. Didyk R.P., Kuznetsov E.V., Zabara V.N. Physical foundations of strength. Textbook. - Dnepropetrovsk: "Science and Education", 2005. - 608 p.
10. Podgorny A.N., Marchenko G.A., Pustynnikov V.I. Fundamentals and Methods of Applied Theory of Elasticity.- Kiev: Vischa Shkola, 1981.- 328 p