

тельно повышен путем перемонтажа секций змеевиков: когда металл труб со стороны огневого обогрева достигает состояния, близкого к предельному, целые секции змеевиков или их участки переворачиваются на 180 градусов.

### Список литературы

1. ГОСТ 8732-78-78 Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Сортамент.
2. Инструкция по техническому надзору, методам ревизии и отбраковки трубчатых печей, резервуаров, сосудов и аппаратов нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств. ИТН-93. ВНИКТИнефтехимоборудование, Волгоград, 1993 -188 с.
3. Ентус Н.Р., Шахрин В.В. Трубчатые печи в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. М.: Химия, 1987. 301 с.
4. ГОСТ 20072-74 Сталь теплоустойчивая. Технические условия.
5. ГОСТ 550-75 Трубы стальные бесшовные для нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Технические условия.
6. Антикайн П.А. Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов. М.: Энергия, 1980. 423 с.

УДК 534.8

## ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗОНАНСНЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Клубович В. В., Рубаник В. В., Бегунов М. А., Рубаник В. В. (мл.),  
Борозенцева Ю. Б.

*Институт технической акустики, Витебск, Беларусь*  
[ita@vitebsk.by](mailto:ita@vitebsk.by)

Возбуждение акустических колебаний ультразвукового низкочастотного диапазона (УЗК) в материале приводит к рассеянию части звуковой энергии, которая необратимо переходит в тепло. Ультразвуковой разогрев может быть неравномерным по длине образца и довольно значительным, вплоть до температур плавления. Вследствие этого возникает необходимость учитывать тепловую составляющую ультразвукового воздействия на материалы и, где необходимо, сводить ее к минимуму.

Максимальный отбор акустической энергии от преобразователя реализуется, если собственная частота элементов колебательной системы совпадает с частотой возбуждаемых колебаний, т.е. в резонансном режиме. Этот режим характеризуется распределением акустических параметров по длине волновода. В случае полуволнового стержня со свободным концом ( $l = \lambda/2$ ) в его середине наблюдается узел механических смещений и пучность напряжений (напряжения достигают максимума), а на торце волновода – пучность смещений и узел напряжений. При этом распределение амплитуд смещений, деформаций и напряжений в случае однородного стержня постоянного сечения соответственно равны:

$$\xi_m = \xi_{m0} \cos kx, \quad \varepsilon_m = k\xi_{m0} \sin kx, \quad \sigma_m = Ek\xi_{m0} \sin kx, \quad (1)$$

где  $\xi_{\text{мо}}$  – амплитуда смещений, возбуждаемая на закрепленном конце стержня;  $k = \omega/c$  – волновое число;  $c = (E/\rho)^{1/2}$  – скорость звука в стержне.

Следует заметить, что выражения (1) описывают поведение идеальной системы, т.е. системы без потерь. При небольших мощностях ультразвука с амплитудами деформации  $\epsilon_m < 10^{-6} + 10^{-5}$  внутреннее трение не зависит от  $\epsilon_m$ , и в волноводных системах не происходит перераспределения акустических параметров по длине волновода и изменения резонансной частоты [1, 2].

В случае больших интенсивностей ультразвука происходит рассеяние упругой энергии ультразвуковой волны, возрастание коэффициента затухания, который связан с коэффициентом внутреннего трения материала. При этом изменяется резонансная частота ультразвуковой волны, перераспределяются акустические параметры системы. Неучет амплитудно-зависимого затухания может приводить к ошибке в определении амплитуды деформации в волноводе по выражению (1) до 20 % [3].

При работе волноводной системы в резонансном режиме наблюдается постоянное распределение акустических параметров в ней. Поскольку выделение тепла зависит от амплитуды деформации, то распределение температуры в образце также описывается функцией синуса, т.е. волновод должен нагреваться неравномерно. Такой неравномерный нагрев действительно наблюдается в [4-6], причем градиент температур может достигать по длине образца 1000°C [5]. При ультразвуковом воздействии в полуволновых металлических образцах максимум температуры приходится на середину волновода. Так, при воздействии УЗК в течение 20 секунд образцы из стали, меди и латуни нагревались на 100÷200°C, алюминиевые образцы – всего на 5÷10°C. В нерезонансных образцах локальный нагрев наблюдался в месте крепления к концентратору [7].

В работах по ультразвуковому разогреву волноводных систем в качестве датчиков температуры обычно используют термопреобразователи (термопары), запрессованные в различных местах образца, либо оптические пирометры – при нагреве до высоких температур. С появлением нового оборудования, способного измерять температуру тела с хорошей разрешимостью бесконтактными способами в инфракрасной области спектра, было показано, что зачеканенные в тело волновода термопары, всевозможные дефекты в нем (трещины, границы зерен, срезы) способны при ультразвуковом воздействии инициировать локальный разогрев [7], что, в свою очередь, ведет к искажению всей картины теплового действия ультразвука.

В работе [8] с помощью ультразвукового нагрева вызывали локальную рекристаллизацию стали, выпрямление границ зерен и их ориентацию в направлениях максимальных касательных напряжений. При выпрямлении границы за счет внутреннего трения выделяется максимальное количество тепловой энергии, что определяет выявление эффектов разрушения и пережога по ориентированным границам зерен [9].

Изучение температурного перегрева на границах зерен при ультразвуковом нагреве по микроструктуре и травимости мартенсита стали показало [10], что основное отличие ультразвукового от других методов нагрева состоит в следующем: температурное микрполе источников внутреннего трения (границы зерен) не успевает выравниваться за счет теплопроводности в упругую среду, в связи с чем часто наблюдается пережог металла по границам зерен. В некоторых случаях локальный перегрев вязких областей вызывает локальную рекристаллизацию структуры. Делается предположение о возможности влияния на процессы перекристаллизации, рекристаллизации мартенситных и других превращений в твердой фазе ультразвукового разогрева за счет действия внутренних микролокальных источников тепла, создающих микронеравномерное температурное поле в объеме образца.

В общем случае, если в однородном стержне поддерживать резонансный режим возбуждения ультразвуковых колебаний, то с высокой степенью точности можно про-

гнозировать разогрев в любом его сечении за счет поглощения УЗК. Это важно, например, при исследовании термоупругих мартенситных превращений, а так же для моделирования режимов работы волноводных систем различного технологического назначения.

Учитывая вышесказанное, и ставя задачу изучения температурных профилей различных резонансных волноводных систем, в том числе, и из никелида титана, за счет ультразвукового разогрева, нами были проведены тепловизионные исследования волноводов, предназначенных для волочения проволоки с наложением УЗК, а также моделирование процесса ультразвукового нагрева резонансных образцов.

За основу математической модели ультразвукового разогрева волновода цилиндрической формы длиной кратной половине длины волны выбрано уравнение [1]:

$$\Delta t(x, t) = t_1 - t_0 = C(x, t) + \sum_{n=0}^{\infty} (B_n - D_n - F_n), \quad (2)$$

где член

$$C(x, t) = \frac{3 x_0^2 Q^{-1}(x_{m0}) E f}{16 J a_1} \left\{ \begin{aligned} & k^2 x_1 t + \frac{1}{6} (1 - e^{-16k^2 x_1 t}) \sin^4 k(l-x) + \frac{2}{3} \left( \frac{3}{4} - e^{-4k^2 x_1 t} + \frac{1}{4} e^{-16k^2 x_1 t} \right) x \\ & x \sin^2 k(l-x) - \frac{1}{48} e^{-16k^2 x_1 t} + \frac{1}{3} e^{-4k^2 x_1 t} - \frac{5}{16} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

определяет нарастание температуры в любой точке стержня, обусловленное только выделением тепла источниками. Члены  $B_n(x, \tau)$ ,  $D_n(x, \tau)$  и  $F_n(x, \tau)$  определяют изменение температуры, обусловленное теплопроводностью стержня и теплоотводом в концентратор. При  $\frac{x}{2\sqrt{\chi_1 \tau}} \gg 1$  для определения  $\Delta t(x, t)$  достаточно взять только первый

член в выражении (2). Интервал времени воздействия составлял 10÷100 с. Величину внутреннего трения  $Q^{-1}$  определяли как

$$Q^{-1} = \frac{\pi a}{\lambda} \quad (4)$$

Таким образом, исходными данными для расчета являются:  $\alpha$  – коэффициент затухания;  $\lambda$  – длина волны;  $\varepsilon_{m0} = \xi_{m0} k$  – амплитуда в пучности деформации;  $\xi_{m0}$  – амплитуда смещений на свободном конце стержня;  $f$  – частота колебаний;  $E$  – модуль упругости;  $l$  – длина образца;  $J$  – механический эквивалент теплоты;  $x$  – смещение относительно начала образца;  $\tau$  – время воздействия ультразвука; температуропроводность:  $\chi_1 = \frac{a}{\rho_1 c_1}$ , где  $a$  – теплопроводность образца,  $\rho_1$  – плотность,  $c_1$  – теплоемкость;

$k$  – волновое число.

Разработанная компьютерная анимационная модель ультразвукового разогрева материалов на основе уравнений (1-4) позволяет визуализировать процесс нагрева материалов под действием ультразвука и состоит из двух модулей: ввода данных для визуализации процесса ультразвукового разогрева и модуля отображения температуры образца в любой его точке. В процессе работы в режиме реального времени на дисплее отображается распределение напряжений и температуры в образце при ультразвуковом воздействии. При моделировании ультразвукового разогрева в программе задаются

следующие параметры: коэффициент затухания, модуль упругости и температуропроводность материала; амплитуда, длина и частота ультразвуковой волны, время действия ультразвука. Длина образца задается равной или кратной половине длины ультразвуковой волны, т.е. выполняется условие для образования стоячей волны.

В результате проведенного моделирования в резонансных образцах никелида титана установлено неравномерное распределение температуры по длине – градиент составляет до  $60^{\circ}\text{C}$ . Расхождение данных, полученных компьютерным моделированием и экспериментально [11], составляет  $5\text{--}10^{\circ}\text{C}$  (Рис. 1).

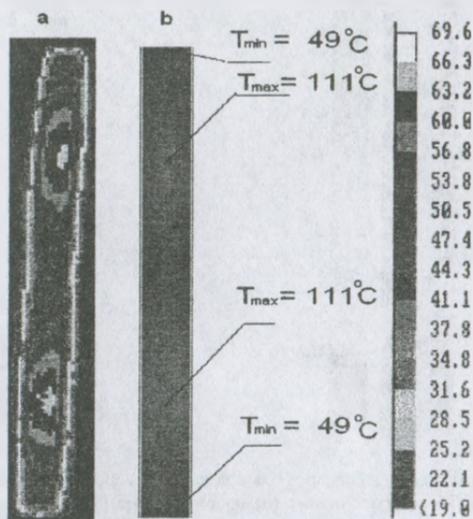
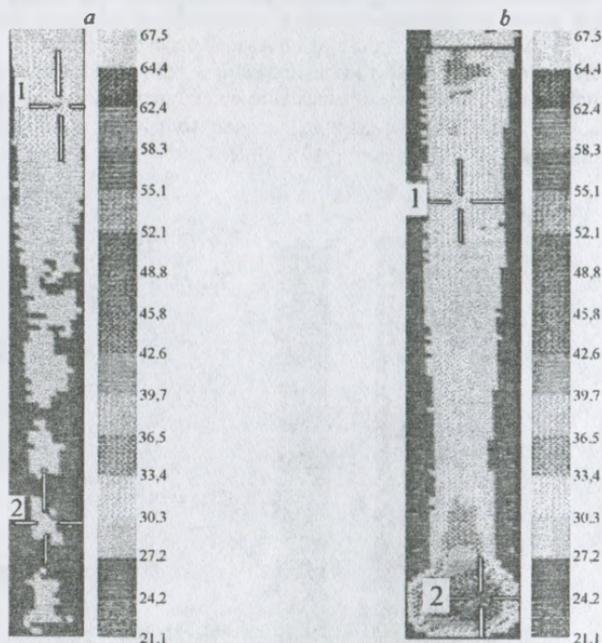


Рис. 1. Распределение температур по длине волнового стержня: а – экспериментальное, б – расчетное.

Таким образом, разработанная программа компьютерного моделирования позволяет прогнозировать тепловые режимы работы простейших волноводных систем ультразвуковых колебаний.

В качестве примера на рис. 2 приведено распределений температурных полей в наиболее используемых при волочении в волноводных системах.

В первом случае твердосплавную волоку запрессовывали на горячую в пучности механических смещений цилиндрического волновода, во втором – крепили с помощью резьбового соединения (конический волновод). Хотя технологически в эксплуатации более удобен волновод, к которому можно с помощью резьбового соединения крепить волоки различного диаметра, с точки зрения температурного режима, а значит и устойчивой работы колебательной системы предпочтительнее следует отдавать волноводам с неразъемным соединением волочильного инструмента.



**Рис. 2.** Термографический профиль волновода с запрессованной (а) и закрепленной с помощью резьбового соединения (б) волокой через 60 сек. ультразвукового воздействия. Температура в точках 1 (а) 34,4°C; 2 (а) 28,0°C; 1 (б) 31,4°C; 2 (б) 49,8°C.

## Список литературы

1. Кулемин А.В. Ультразвук и диффузия в металлах. М.: Metallurgy, 1978
2. Теумин И.И. Ультразвуковые колебательные системы. М., Mashgiz, 1959.
3. Абрамов О.В., Асташкин Ю.С. Прочность-пластичность материалов в ультразвуковом поле. Ч. II. Минск, НТО «Машпром», 1973. – С. 119-121.
4. Кузьменко В.А. Звуковые и ультразвуковые колебания при динамических испытаниях материалов. Киев. Изд-во АН УССР, 1963.
5. Миротворский В.С., Волк В.Я. // В кн.: Ультразвук в машиностроении. М., ЦНИИПИ, 1969. – С. 31-36.
6. Балалаев Ю.Ф., Постников В.С. // Физика и химия обработки материалов, 1968, № 2. – С. 117-119.
7. Mignogna R.V. etc. // Ultrasonic. July 1981. - P. 159-163.
8. Балалаев Ю.Ф. // МиТОМ, № 1, 1964 – С. 48-49.
9. Балалаев Ю.Ф., Бокштейн С.З. // Процессы диффузии, структура и свойства металлов. М.: Машиностроение, 1964. – С. 113-116.
10. Балалаев Ю.Ф., Бокштейн С.З. // ФММ, 1963, т. 16, вып. 6. – С. 872-876.
11. Rubanick V., Razov A., Rubanick V., Jr. // Shape Memory Alloys: Proceed. of the Intern. Symp. Quebec, Canada, 1999. – P. 283-287.