

ГЕНЕРАЦИЯ НОРМАЛЬНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН (ВОЛН ЛЭМБА) В МЕТАЛЛАХ С ПОМОЩЬЮ ИМПУЛЬСОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

СЮ. Гуревич, Ю.В. Петров, В.Ф. Божко

Представлены результаты экспериментальных исследований по лазерной генерации ультразвуковых волн Лэмба в ферромагнитной пластине.

Введение. В практике ультразвуковой дефектоскопии широко применяются неразрушающие методы контроля с помощью нормальных волн (волн Лэмба) [1-4]. Нормальные волны возникают в результате трансформации продольных волн, падающих на поверхность контролируемого изделия под отличным от нуля углом. Такие волны связаны с волноводным механизмом распространения ультразвуковых колебаний и могут существовать только в пластинах, листах, лентах и оболочках (например, в стенках труб) сравнительно небольшой толщины (от 0,15 до 3,5 мм).

Для возбуждения и регистрации нормальных волн обычно используют пьезоискатели с большими размерами в плоскости падения ультразвука с жестко установленным или переменным углом падения. Ввод акустических колебаний в контролируемое изделие осуществляется либо через смазку, либо через струю воды, либо иммерсионным методом.

Генерация акустических волн (в том числе и нормальных) с помощью коротких лазерных импульсов имеет ряд существенных преимуществ перед традиционными методами. В первую очередь это отсутствие непосредственного контакта с контролируемым изделием, возможность возбуждать ультразвук в объекте контроля на большом расстоянии от него, вводить световую энергию в любую точку поверхности контролируемого изделия, генерировать акустические импульсы малой длительности и использовать их для контроля изделий с грубо обработанной поверхностью и т.п. [5, 6]. В сочетании с оптимальными способами регистрации возбуждаемых нормальных ультразвуковых волн, это позволило бы существенно улучшить параметры аппаратуры для контроля металлических тонкостенных изделий.

Лазерная генерация акустических волн в металле осуществляется за счет повышения температуры поверхности металла в зоне облучения. Параметры возбуждаемых акустических импульсов (амплитуда, длительность, спектр и т.д.) в этом случае определяются размерами зоны облучения, энергией поглощаемого лазерного импульса, а так же теплофизическими характеристиками металла.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию лазерного возбуждения в металлических пластинах нормальных волн (волн Лэмба) и влиянию механизма термоакустического преобразования на параметры возбуждаемых акустических импульсов.

Теория. Проведем расчет скорости распространения нормальных акустических волн как функции частоты колебаний ν и толщины h пластины. Известно, что в свободной пластине можно возбудить два типа нормальных волн: симметричные S и антисимметричные A . Первый тип волн соответствует волнам расширения, второй - изгибным волнам. Скорость распространения нормальных волн зависит от частоты колебаний ν , толщины пластины h и определяется решением дисперсионных уравнений [4]:

– для симметричных волн

$$\operatorname{th} \left[\frac{\pi \nu h}{\nu} \sqrt{1 - \left(\frac{\nu}{\nu_t} \right)^2} \right] \operatorname{cth} \left[\frac{\pi \nu h}{\nu} \sqrt{1 - \left(\frac{\nu}{\nu_t} \right)^2} \right] = 4 \sqrt{1 - \left(\frac{\nu}{\nu_t} \right)^2} \sqrt{1 - \left(\frac{\nu}{\nu_t} \right)^2} \left(2 - \frac{\nu^2}{\nu_t^2} \right)^{-2}, \quad (1)$$

– для антисимметричных волн

$$\operatorname{th} \left[\frac{\pi \nu h}{\nu} \sqrt{1 - \left(\frac{\nu}{\nu_t} \right)^2} \right] \operatorname{cth} \left[\frac{\pi \nu h}{\nu} \sqrt{1 - \left(\frac{\nu}{\nu_t} \right)^2} \right] = 4 \sqrt{1 - \left(\frac{\nu}{\nu_t} \right)^2} \sqrt{1 - \left(\frac{\nu}{\nu_t} \right)^2} \left(2 - \frac{\nu^2}{\nu_t^2} \right)^{-2}, \quad (2)$$

где v - фазовая скорость нормальных волн, $v_l = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}$ и $v_t = \sqrt{\mu/\rho}$ - скорости продольной и поперечной волн в материале пластины. Здесь ρ - плотность, λ, μ - упругие постоянные материала пластины.

Анализ выражений (1) и (2) показывает, что в листе заданной толщины может существовать бесчисленное множество симметричных и антисимметричных волн с различными частотами колебаний (моды). При этом каждой из мод соответствует строго определенное значение фазовой скорости. Максимальное преобразование энергии падающей волны в энергию одной из нормальных волн происходит при совпадении фазовой скорости в падающей волне с одной из возможных скоростей нормальной волны:

$$v = v_i / \sin \alpha, \quad (3)$$

где v_i - фазовая скорость ультразвука в окружающей среде, α - угол падения.

Как известно, перенос энергии упругих колебаний связан не с фазовой, а с групповой скоростью волн. Именно эта скорость характеризует форму импульсного сигнала и его перемещение, поэтому в импульсной дефектоскопии она играет существенную роль. Групповую скорость нормальных волн можно рассчитать по следующему соотношению [7]

$$v_g = v \left(1 - \frac{v h}{v} \frac{dv}{d(vh)} \right)^{-1}. \quad (4)$$

Эксперимент. Для проведения исследований по лазерному возбуждению нормальных волн в металлических пластинах была разработана и собрана экспериментальная установка, принципиальная схема которой показана на рис. 1. Импульсный YAG: Nd³⁺-лазер ЛТИ-403, работающий в режиме активной модуляции добротности, излучает световые импульсы длительностью 30 нс с частотой следования 12,5 Гц. Длина волны лазерного излучения составляет 1,06 мкм, максимальная энергия импульса 400 мДж. Пространственное распределение энергии в выходном излучении лазера имеет сложную структуру, изменяющуюся от импульса к импульсу. Распределение энергии по сечению лазерного луча также неоднородно. Кроме того, энергия оптического импульса не является постоянной величиной и может отклоняться на 10-15% от его среднего значения.

Интенсивность ультразвука при его лазерной генерации определяется средней поверхностной плотностью тепловой мощности лазерного излучения $\langle q \rangle$. Она рассчитывается по формуле

$$\langle q \rangle = \frac{4 \langle P \rangle}{\pi d^2 n \tau},$$

где $\langle P \rangle$ - измеряемая средняя мощность излучения d - диаметр светового пятна n - частота следования лазерных импульсов, τ - длительность оптического импульса. При проведении эксперимента величины $\langle q \rangle$ соответствовали трем различным механизмам генерации ультразвука: для диаметра светового пятна $d = 1,00$ мм - испарительному, для $d = 2,00$ мм - гидродинамическому, для $d = 3,00$ и $4,00$ мм - термоупругому [8, 9].

Мощность падающего на поверхность образца излучения регулируется с помощью оптического аттенюатора, состоящего из набора тонких стеклянных пластинок. Каждая последующая пластинка устанавливается так, чтобы поперечное смещение светового луча от предыдущих пластинок было скомпенсировано. Излучение лазера ограничивается диафрагмой с диаметрами 1,00; 2,00; 3,00; 4,00 мм. Мощность лазерного излучения контролируется прибором ИМО-2Н.

Образцы представляют собой шлифованные прямоугольные пластины размерами 270x60 и толщиной $h = 0,60; 1,50; 2,90$ мм, изготовленные из заготовки железоникелевого сплава инварного состава 32НКД. На пластине помещается приемный стэнд в виде иммерсионной ванны с

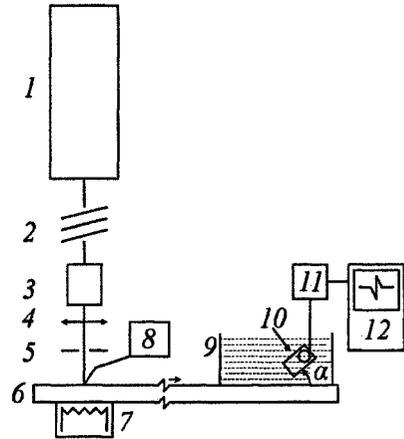


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 - лазер, 2 - оптический аттенюатор, 3 - измеритель мощности лазерного излучения, 4 - линза, 5 - диафрагма, 6 - ферромагнитная пластина, 7 - нагреватель, 8 - измеритель температуры, 9 - ванна с водой, 10 - прямой пьезоискатель продольных волн и устройство для его закрепления и поворота, 11 - усилитель, 12 - осциллограф

водой, дном которой служит поверхность пластины. В ванне в специальном устройстве закрепляется пьезопреобразователь продольных волн (1111), Этим же устройством осуществляется плавное изменение угла наклона α плоскости искателя относительно поверхности пластины от 0° до 90° с точностью $\pm 1^\circ$. Для проведения температурных исследований в установке в зоне лазерного пятна предусмотрен нагреватель.

Лазерный луч, сфокусированный линзой, направлялся через диафрагму на поверхность образца. Возбуждаемые ультразвуковые колебания, распространяясь по пластине в виде нормальных волн, трансформируются на границе раздела «пластина-вода» в продольные волны. С помощью поворотного устройства определялись положения пьезоискателя (угол α), при которых он регистрирует максимум амплитуды колебаний в нормальных волнах. Далее сигнал с преобразователя поступает на усилитель, а затем на вход осциллографа. По экрану осциллографа измеряют амплитуду U , частоту ν и время прохождения t упругого импульса в пластине. По времени и измеренному пути прохождения рассчитывались групповые скорости нормальных волн ν_g .

В качестве приемников акустических колебаний использовались демпфированные пьезопластины с резонансными частотами ν^m на 0,49; 0,94; 1,07; 1,50; 1,81; 2,69; 3,76; 6,27 МГц и широкополосный клиновидный поверхностно-возбуждаемый толстый пьезопреобразователь (КПВТП) [10] при работе с диафрагмами диаметры, которых 1,00; 2,00; 3,00 мм. При работе с диафрагмой диаметром 4,00 мм приемниками служили прямые пьезоискатели из комплекта дефектоскопа УД 2-12 с резонансными частотами ν^m 0,6; 1,25; 2,5; 5,0; 10,0 МГц, (КПВТ) и электромагнитноакустический преобразователь (ЭМАП). Результаты исследований отражены в табл. 1-12.

Таблица 1

Толщина пластинки $h = 0,6$ мм, диаметр лазерного пятна $d = 1,0$ мм, $\langle q \rangle = 180$ МВт/см ²					
ν^m , МГц	ν , МГц	νh , МГц·мм	α , град	$\nu_g \pm 100$, м/с	U , 10^{-2} В
0,49	0,56	0,34	40	3889	22,0
0,94	1,00	0,60	38	3889	36,0
1,07	1,10	0,67	38	3889	44,0
1,50	1,67	1,00	40	4000	30,0
1,88	1,40	0,84	40	4118	12,0
2,69	1,10	0,66	40	4242	7,50
3,76	1,10	0,66	40	4058	8,00
6,27	1,25	0,75	39	4118	4,00
КПВТП	1,25	0,75	40	3590	8,0

Таблица 2

Толщина пластинки $h = 1,5$ мм, диаметр лазерного пятна $d = 1,0$ мм, $\langle q \rangle = 180$ МВт/см ²					
ν^m , МГц	ν , МГц	νh , МГц·мм	α , град	$\nu_g \pm 100$, м/с	U , 10^{-2} В
0,49	0,67	1,01	35	1321	14,0
	1,43	2,15	35	3182	15,0
0,94	1,00	1,50	40	3182	31,0
1,07	1,11	1,67	25	2917	32,0
1,50	1,54	2,31	34	3043	27,0
	0,87	1,30	43	3684	6,00
1,88	1,43	2,15	33	3182	10,5
	0,78	1,17	38	3889	5,50
2,69	1,43	2,14	33	3040	5,20
	1,00	1,50	43	3333	2,40
3,76	1,43	2,14	30	3111	4,00
	1,00	1,50	43	3680	2,00
6,27	1,54	2,31	35	3890	6,00
КПВТП	0,67	1,00	35	4118	4,00
	1,43	2,14	35	2692	4,00

Таблица 3

Толщина пластинки $h = 2,9$ мм, диаметр лазерного пятна $d = 1,0$ мм, $\langle q \rangle = 180$ МВт/см ²					
ν^m , МГц	ν , МГц	νh , МГц·мм	α , град	$\nu_g \pm 100$, м/с	U , 10 ⁻² В
0,49	0,56	1,62	38	3346	11,0
0,94	1,00	2,90	35	3346	24,0
1,07	1,00	2,90	39	2806	14,0
	1,00	2,90	35	3625	12,0
1,50	1,00	2,90	39	3346	8,00
1,88	1,67	4,84	38	3625	9,50
2,69	1,00	2,90	32	3346	4,00
3,76	1,00	2,90	32	3625	3,50
6,27	1,00	2,90	35	4579	5,50
КПВТП	0,83	2,41	30	3867	11,0

Таблица 4

Толщина пластинки $h = 0,6$ мм, диаметр лазерного пятна $d = 2,0$ мм, $\langle q \rangle = 50,0$ МВт/см ²					
ν^m , МГц	ν , МГц	νh , МГц·мм	α , град	$\nu_g \pm 100$, м/с	U , 10 ⁻² В
0,49	0,59	0,35	38	3684	11,0
0,94	1,00	0,60	38	3784	26,0
1,07	1,00	0,60	39	3889	28,0
1,50	1,00	0,60	40	3889	11,0
1,88	1,10	0,66	40	3889	8,50
2,69	1,10	0,66	40	3889	3,60
3,76	1,00	0,60	39	3889	2,80
6,27	1,10	0,66	40	3784	4,00
КПВТП	1,00	0,60	36	3333	5,20

Таблица 5

Толщина пластинки $h = 1,5$ мм, диаметр лазерного пятна $d = 2,0$ мм, $\langle q \rangle = 50,0$ МВт/см ²					
ν^m , МГц	ν , МГц	νh , МГц·мм	α , град	$\nu_g \pm 100$, м/с	U , 10 ⁻² В
0,49	0,63	0,95	35	2917	44,0
	1,66	2,50	34	2917	15,0
	5,00	7,50	59	2593	0,14
0,94	1,00	1,50	40	2917	0,34
	1,25	1,88	30	3182	0,18
1,07	1,25	1,88	25	2917	0,70
	1,00	1,50	40	3333	0,36
	1,43	2,15	33	3333	0,36
1,50	1,66	2,50	34	2692	0,44
1,88	1,43	2,14	30	3111	0,14
	4,00	6,00	19	2692	0,13
2,69	1,54	2,31	30	3111	0,08
3,76	2,86	4,29	30	3111	0,06
6,27	1,67	2,50	30	4667	0,07
КПВТП	1,67	2,50	33	2692	17,0

Таблица 6

Толщина пластинки $h = 2,9$ мм, диаметр лазерного пятна $d = 2,0$ мм, $\langle q \rangle = 50,0$ МВт/см ²					
v^m , МГц	v , МГц	vh , МГц·мм	α , град	$v_g \pm 100$, м/с	U , 10 ⁻² В
0,49	0,63	1,83	38	3346	18,0
0,94	1,00	2,90	34	3346	32,0
1,07	1,00	2,90	33	3346	26,0
1,50	1,00	2,90	33	3480	7,00
1,88	1,00	2,90	32	3625	7,00
2,69	1,00	2,90	33	3625	7,00
3,76	1,00	2,90	35	3480	5,00
6,27	1,00	2,90	35	4350	10,0
КПВТП	0,83	2,41	32	2949	26,0

Таблица 7

Толщина пластинки $h = 0,6$ мм, диаметр лазерного пятна $d = 3,0$ мм, $\langle q \rangle = 20,0$ МВт/см ²					
v^m , МГц	v , МГц	vh , МГц·мм	α , град	$v_g \pm 100$, м/с	U , 10 ⁻² В
0,49	0,67	0,41	39	3684	18,0
0,94	1,00	0,60	39	3889	52,0
1,07	1,00	0,60	39	3889	52,0
1,50	1,00	0,60	40	3889	19,0
1,88	1,10	0,67	40	4000	4,00
2,69	1,00	0,60	40	4000	4,00
3,76	1,00	0,60	40	4000	4,00
6,27	1,00	0,60	38	4000	2,80
КПВТП	0,83	0,50	37	3500	8,00

Таблица 8

Толщина пластинки $h = 1,5$ мм, диаметр лазерного пятна $d = 3,0$ мм, $\langle q \rangle = 20,0$ МВт/см ²					
v^m , МГц	v , МГц	vh , МГц·мм	α , град	$v_g \pm 100$, м/с	U , 10 ⁻² В
0,49	0,59	0,86	40	3780	17,0
	1,29	1,86	33	2920	10,0
0,94	1,00	1,50	20	2500	28,0
	0,83	1,25	40	3890	26,0
1,07	1,10	1,67	25	2920	23,0
	0,83	1,25	42	3680	10,0
1,50	1,33	2,00	30	3040	5,40
	0,77	1,15	40	3680	3,60
1,88	1,43	2,14	29	3040	2,80
	0,74	1,11	40	3890	2,40
2,69	0,71	1,07	40	3890	3,20
3,76	0,77	1,15	39	4000	5,00
	1,25	1,88	24	3180	3,00
6,27	1,25	1,88	30	2800	7,00
	0,77	1,15	42	3500	12,0
КПВТП	0,71	1,07	40	3333	11,0
	1,00	1,50	20	2692	7,00

Таблица 9

Толщина пластинки $h = 2,9$ мм, диаметр лазерного пятна $d = 3,0$ мм, $\langle q \rangle = 20,0$ МВт/см ²					
ν^m , МГц	ν , МГц	νh , МГц·мм	α , град	$\nu_g \pm 100$, м/с	U , 10^{-2} В
0,49	0,67	1,94	33	3346	24,0
0,94	1,00	2,90	35	3346	48,0
1,07	1,00	2,90	33	3346	26,0
1,50	1,00	2,90	32	3480	12,0
1,88	1,00	2,90	32	3480	7,00
2,69	0,83	2,41	30	3480	4,00
3,76	1,00	2,90	34	3480	3,60
6,27	0,90	2,61	32	3222	7,00
КПВТП	0,91	2,64	31	2949	20,0

Таблица 10

Толщина пластинки $h = 0,60$ мм, диаметр лазерного пятна $d = 4,0$ мм, $\langle q \rangle = 2,30$ МВт/см ²					
ν^m , МГц	ν , МГц	νh , МГц·мм	α , град	$\nu_g \pm 100$, м/с	U , 10^{-2} В
0,6	0,83	0,50	19	4024	18,0
1,25	1,10	0,66	25	4308	18,0
2,50	1,00	0,60	20	4545	3,00
5,00	1,00	0,60	22	4125	2,50
10,0	0,91	0,54	26	4054	2,10
КПВТП	0,95	0,57	18	4178	8,00
ЭМАП	1,00	0,60		4225	0,42

Таблица 11

Толщина пластинки $h = 1,50$ мм, диаметр лазерного пятна $d = 4,0$ мм, $\langle q \rangle = 2,30$ МВт/см ²					
ν^m , МГц	ν , МГц	νh , МГц·мм	α , град	$\nu_g \pm 100$, м/с	U , 10^{-2} В
0,6	0,63	0,94	50	2108	10,0
			18	4227	4,50
1,25	1,00	1,50	48	1905	6,00
				2108	3,50
2,50	0,83	1,25	22	2054	2,24
	1,25	1,87	58	1704	5,00
	1,25	1,87	58	2192	5,00
5,00	1,00	1,50	52	1875	3,00
10,0	1,00	1,50	50	2024	2,00
КПВТП	0,85	1,27	42	2931	4,00
ЭМАП	1,92	2,88		4044	8,00

Таблица 12

Толщина пластинки $h = 2,90$ мм, диаметр лазерного пятна $d = 4,0$ мм, $\langle q \rangle = 2,30$ МВт/см ²					
ν^m , МГц	ν , МГц	νh , МГц·мм	α , град	$\nu_g \pm 100$, м/с	U , 10^{-2} В
0,6	0,83	2,24	16	3399	7,00
	0,60	1,60	44	1875	10,0
	0,63	1,70	48	3158	6,00
1,25	1,00	2,70	6	2927	5,00
	0,90	2,50	18	3333	10,0
	1,00	2,70	46	3077	5,00
2,50	0,83	2,24	6	3000	3,20
	0,71	1,92	20	3604	2,40
	0,83	2,24	52	3243	3,20

ν^m , МГц	ν , МГц	νh , МГц·мм	α , град	$\nu_g \pm 100$, м/с	U , 10^{-2} В
5,00	1,25	3,40	4	2553	4,00
	0,83	2,24	24	3429	2,00
	0,83	2,24	62	3750	5,00
10,0	0,87	2,30	4	3000	9,00
	1,00	2,70	6	2553	2,50
	0,87	2,30	8	3692	6,00
	0,83	2,24	10	3158	6,00
КПВТП	0,83	2,24	40	2955	16,0
ЭМАП	1,42	1,89		3688	7,00

Численные значения найденных групповых скоростей нормальных волн ν_g нанесены на расчетные зависимости этих скоростей от параметра νh . Расчет производился по формулам (1), (2), (4), в которых значения скоростей поперечных ν_t и продольных ν_l волн были равны соответственно 2683 м/с и 4878 м/с [11]. Результаты расчетов и экспериментов приведены на рис.2-5.

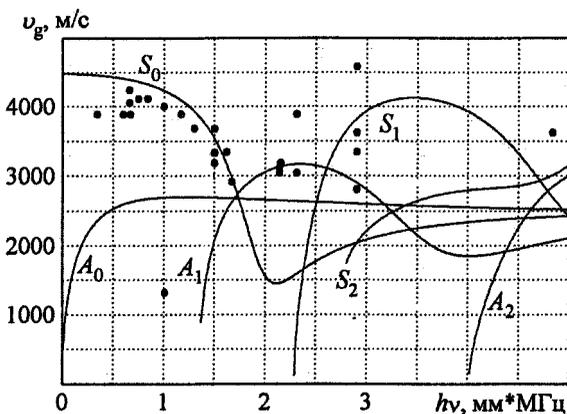


Рис. 2. Зависимость групповой скорости нормальных волн ν_g от параметра νh

-- расчет, • -- эксперимент
 $d = 1,00$ мм, $q = 180$ МВт/см²

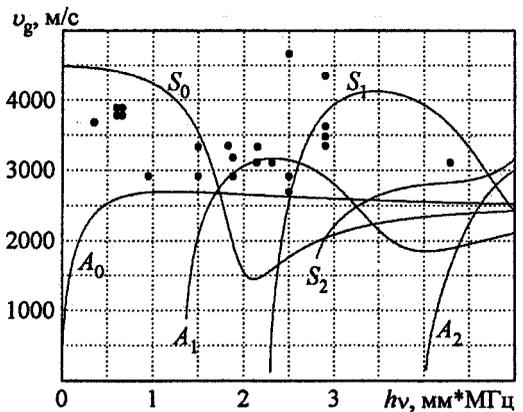


Рис. 3. Зависимость групповой скорости нормальных волн ν_g от параметра νh

-- расчет, • -- эксперимент
 $d = 2,00$ мм, $q = 50,0$ МВт/см²

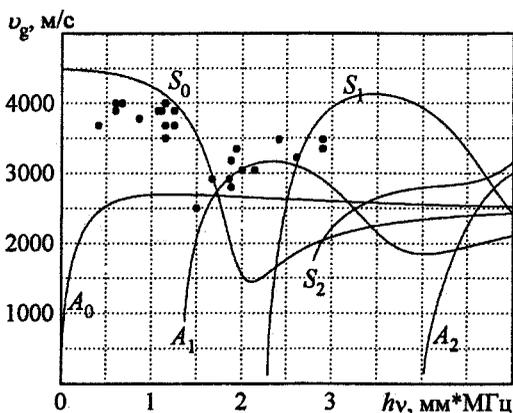


Рис. 4. Зависимость групповой скорости нормальных волн ν_g от параметра νh

-- расчет, • -- эксперимент
 $d = 3,00$ мм, $q = 20,0$ МВт/см²

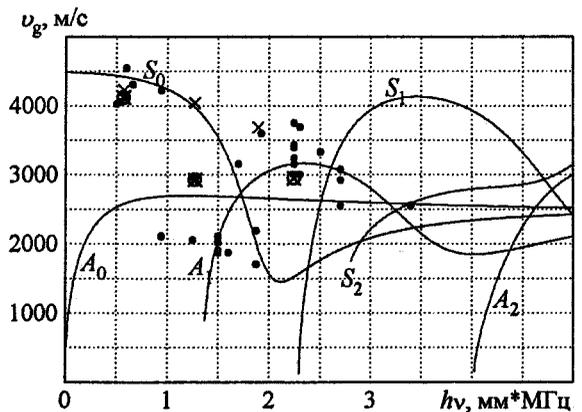


Рис. 5. Зависимость групповой скорости нормальных волн ν_g от параметра νh

-- расчет, эксперимент: • -- ПП, ⊗ -- КПВТП, × -- ЭМАП. $d = 4,00$ мм, $q = 2,30$ МВт/см²

Обсуждение результатов и выводы

1. Разработана установка и предложена методика для экспериментальных исследований по лазерной генерации и регистрации акустических волн в металлических пластинах (волн Лэмба).
2. Установлено, что при испарительном механизме термоакустического преобразования в пластинах возникают в основном симметричные нормальные волны нулевого порядка S_0 и частично - симметричные волны первого порядка S_1 и антисимметричные волны нулевого и первого порядков A_0 , A_1 . Углы, под которыми регистрируются эти волны, лежат в пределах от 30 до 40 градусов, численные значения скоростей лежат в пределах от 2700 до 4500 м/с. При гидродинамическом механизме возбуждения антисимметричные волны нулевого порядка практически не возникают, распределение симметричных волн нулевого и первого порядков примерно одинаково.
3. В случае генерации нормальных волн за счет действия термоупругого механизма в пластинах возникают преимущественно симметричные волны нулевого и первого порядков, присутствуют некоторые моды антисимметричных волн первого порядка.
4. Диапазоны углов приема и численных значений скоростей с учетом погрешностей измерений в зависимости от механизма генерации, существенно не изменяются.
5. Начиная с частоты 1,88 МГц, частота колебаний в регистрируемых акустических импульсах нормальных волн существенно отличается от собственной частоты приемных пьезопреобразователей. Это очевидно связано с тем, что пластина независимо от ее толщины, не пропускает высокочастотную часть возбуждаемого широкополосного акустического импульса. По этой же причине максимум амплитуды возбуждаемых нормальных волн, независимо от толщины пластины, приходится на низкие частоты (0,94-1,11 МГц).
6. Широкополосный приемник (КПВТП), регистрирует примерно те же моды нормальных волн, что и резонансные преобразователи. ЭМАП регистрирует симметричные моды нулевого и первого порядков. Разложив в спектр акустический импульс, зарегистрированный этим приемником, можно получить дополнительную информацию о спектральном составе возбуждаемых нормальных волнах.
7. Полученные результаты можно использовать при разработке и создании средств и методов контроля тонкостенных металлических изделий с помощью нормальных волн, возбуждаемых лучом лазера.

Литература

1. Cavalier M.G. Controles des produits siderurgiques par methods ultrasonores. Bull. Inform/techn., 1964,1.
2. Drouet C Sondage ultrasonore des toles minces d'acier a l'aide des ondes de Lamb Metaux Corrosion - Ind., 1962, 440 с
3. Lamb H. On Waves in elastic Plate. Proc. Roy. Soc, 1916, A, XC111.
4. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Релея и Лэмба в технике. - М.: Наука, 1966. - 168 с.
5. Бондаренко А.Н. Лазерные методы возбуждения и регистрации акустических сигналов. - М.: Изд-во стандартов, 1989. - 115 с.
6. Чабанов В.Е. Лазерный контроль материалов. - Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1986. - 232 с.
7. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. - М.: Изд-во АН СССР, 1957. - 502 с.
8. Волегов Ю.В., Петров Ю.В., Шушарин А.В. О механизме возбуждения акустических волн импульсами оптического квантового генератора // Физические методы испытания материалов и веществ: Тематический сборник научных трудов. - Челябинск: ЧГТУ, 1982. - 157 с.
9. О границах механизмов термоакустического преобразования при лазерной генерации ультразвука в металлах / С.Ю. Гуревич, Ю.В. Петров, А.А. Шульгинов, К.В. Прокопьев // Дефектоскопия. - 2001. - № 4. - С. 69-75.
10. Королев М.В., Карпельсон Ф.Е. Широкополосные ультразвуковые преобразователи. - М.: Машиностроение, 1982. - 157 с.
11. Гуревич С.Ю. Основы теории и практического применения высокотемпературного ультразвукового контроля ферромагнитных конструкций: Дис. ... докт. техн. наук. - Екатеринбург: ИФМ, 1995.-416 с.

Поступила в редакцию 25 июля 2006 г.