

УДК 662.998-494

DOI 10.22213/2413-1172-2017-2-68-71

А. Г. Элбакян, аспирант, Воткинский филиал ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

Б. А. Сентяков, доктор технических наук, профессор, Воткинский филиал ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АКУСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ХОЛСТОВ ИЗ СУПЕРТОНКОГО БАЗАЛЬТОВОГО ВОЛОКНА

Теплоизоляционные материалы из базальтового волокна широко используются в машиностроении и других отраслях промышленности для тепло- и звукоизоляции различных объектов производства. Наличие в таких материалах неволоконистых включений ухудшает их качество, например, повышает теплопроводность, а также качество и безопасность труда рабочих, создающих на основе этих материалов изделия различной геометрической формы. О причинах образования неволоконистых включений в холстах из супертонкого базальтового волокна, получаемых по дуплексной технологии, известно из работы [1, с. 94]. Основной причиной их образования является нарушение технологического процесса, например, неконтролируемое изменение скорости и температуры газового потока, воздействующего на первичные нити расплавленного базальта. В этой же работе впервые были представлены сведения о возможности уменьшения концентрации неволоконистых включений в уже готовых изделиях из базальтового волокна путем воздействия на них акустическим полем.

Данное исследование ставит перед собой цель подтвердить пользу и найти рациональные параметры процесса акустической обработки уже сформированных первичных холстов. На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки для исследования воздействия акустического поля на образцы из супертонкого базальтового волокна. Источником звука является громкоговоритель 1 типа ВД 93 с диффузором диаметром 120 мм, мощностью 40 Вт и рабочим диапазоном частот создаваемых звуковых колебаний 38...18000 Гц. Громкоговоритель подключен к звуковому генератору типа ГЗ-33, обеспечивающему изменение частоты в звуковом диапазоне 20...20000 Гц с напряжением на выходе до 14 В. Для измерения массы образцов холстов из супертонкого базальтового волокна и массы выпадающих из них под действием звука неволоконистых включений использовались электронные лабораторные весы ГН-252 с ценой деления 0,1 мг. Исследуемые образцы имели одинаковую толщину  $h$  и располагались на расстоянии  $z$  от громкоговорителя на решетке 4 из проволоки диаметром 2 мм с шагом 20 мм в одном направлении и 40 мм в другом.

Опыты проводились следующим образом. Под воздействием звуковых колебаний 2 от нижней поверхности образца холста из базальтового волокна 3

действительно начинались отделяться неволоконистые включения 5.

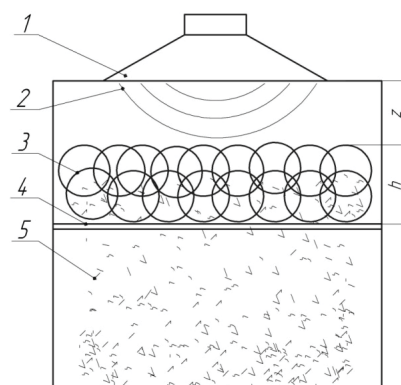


Рис. 1. Установка для акустической обработки образцов холста из базальтового волокна: 1 – источник звука; 2 – звуковая волна; 3 – базальтовый холст; 4 – решетка; 5 – неволоконистые включения;  $h$  – толщина холста;  $z$  – расстояние от источника звука до холста

Первые, предварительные, эксперименты показали, что неволоконистые включения не выпадают из холста при воздействии звука в диапазоне частот 260 Гц ... 20 кГц, а существенная реакция наблюдается лишь в диапазоне частот звука 40...160 Гц. Уровень звука при этом был равен  $118 \pm 2$  дБ.

Для дальнейших опытов было подготовлено шестьдесят пять образцов холстов из супертонкого базальтового волокна размерами  $150 \times 150 \times 8 \dots 10$  мм и плотностью 13,2...15,1 кг/м<sup>3</sup>. Все опыты были проведены за пять серий, когда каждые пять образцов подвергались воздействию звуком различной частоты – от 40 Гц через каждые 10 Гц до 160 Гц. Уровень звука при этом составлял  $118 \pm 2$  дБ. В этих опытах замерялась общая масса всех выпавших под действием звука неволоконистых включений из каждого образца без дифференциации их по массе и форме.

Результаты опытов представлены на рис. 2, из которого следует, что наибольшее количество неволоконистых включений по их общей массе отделяются от образцов холста под воздействием звука частотой 90 Гц.

Следует отметить, что определенная в этих опытах общая масса выпавших неволоконистых включений не позволяет с уверенностью судить об оптимальных параметрах акустической обработки – частоте и уровне звука, при которых из холстов выпадает наибольшее количество включений, так как

доля включений в разных образцах различная. Подготовить образцы холстов с одинаковым количеством содержащихся в них неволокнистых включений оказалось невозможным вследствие того, что процессы образования включений имеют случайный характер.

Более строго об эффективности акустической обработке рассматриваемых изделий можно судить, если определить массовые доли неволокнистых включений, содержащихся в образцах до и после акустической обработки. Для этого введен показатель эффективности акустической обработки холстов из базальтового волокна – коэффициент уменьшения содержания неволокнистых включений в образце холста  $K_{НВ}$ , определяемый отношением

$$K = \frac{\omega_0}{\omega_1}, \quad (1)$$

где  $\omega_0$  и  $\omega_1$  – массовая доля неволокнистых включений в образце до и после обработки соответственно, %, которые, в свою очередь, определяются выражениями:

$$\omega_0 = \frac{m_0}{M_0} \cdot 100; \quad \omega_1 = \frac{m_1}{M_1} \cdot 100, \quad (2)$$

где  $m_0$  и  $m_1$  – соответственно, масса неволокнистых включений в образце до и после обработки;  $M_0$  и  $M_1$  – соответственно, масса образца до и после обработки. Значения  $m_0$ ,  $m_1$ ,  $M_0$ ,  $M_1$  получены при помощи электронных лабораторных весов ГН-252 с ценой деления 0,1 мг.

Для следующей серии опытов было подготовлено двадцать четыре образца размерами  $150 \times 150 \times 8 \dots 10$  мм и плотностью  $13,2 \dots 15,1$  кг/м<sup>3</sup> с целью определения коэффициента уменьшения содержания неволокнистых включений в образце холста  $K_{НВ}$  (формулы (1), (2)) при значениях частоты воздействующего звукового поля  $f = 70$  Гц,  $f = 90$  Гц и  $f = 100$  Гц и уровня звука  $L = 100$  дБ и  $L = 118$  дБ соответственно. Результаты замеров  $m_0$ ,  $m_1$ ,  $M_0$ ,  $M_1$  и вычислений  $\omega_0$ ,  $\omega_1$  и  $m_2$  (масса выпавших неволокнистых включений из холста супертонкого базальтового волокна в процессе акустической обработки) представлены в табл. 1.

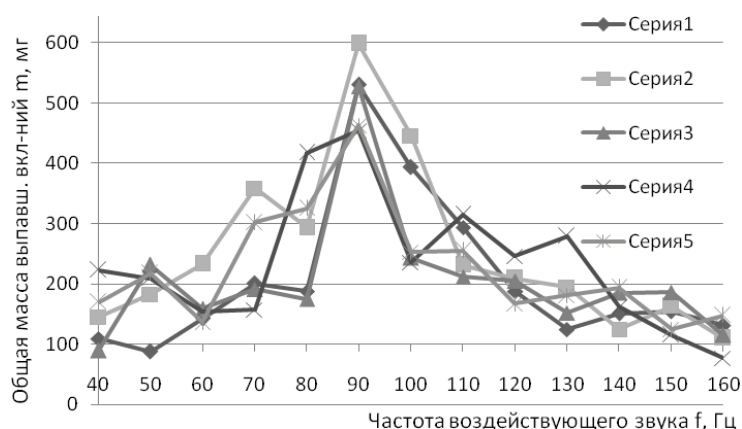


Рис. 2. Зависимость общей массы всех выпадающих под действием звукового поля неволокнистых включений от частоты звука

Таблица 1. Массовая доля неволокнистых включений (НВ) в холстах из супертонкого базальтового волокна до и после акустической обработки

№ опыта	Масса холста до обработки $M_0$ , мг	Масса выпавших НВ $m_2$ , мг	Масса холста после обработки $M_1$ , мг	Масса оставшихся НВ $m_1$ , мг	Массовая доля НВ в холсте до обработки $\omega_0$ , %	Массовая доля НВ в холсте после обработки $\omega_1$ , %	Коэффициент уменьшения массовой доли НВ $K_{НВ}$	Среднее значение $\langle K_{НВ} \rangle$
Частота звука 70 Гц, уровень 100 дБ, напряжение генератора $U = 12$ В, время воздействия $t = 40$ с								
1	998,7	5,8	992,9	76,3	8,22	7,68	1,070	1,087
2	897,9	4,5	893,4	64,3	7,66	7,20	1,064	
3	639,5	8,0	631,5	64,6	11,35	10,23	1,109	
4	1501,6	22,9	1478,7	187,1	14,02	12,69	1,105	
Частота звука 90 Гц, уровень 100 дБ, напряжение генератора $U = 12$ В, время воздействия $t = 40$ с								
5	1126,2	14,6	1111,6	88,8	9,18	7,99	1,149	1,145
6	773,3	7,1	766,2	40,8	6,19	5,32	1,164	
7	771,2	3,7	767,5	29,5	4,30	3,84	1,120	
8	682,0	13,1	668,7	78,18	13,41	11,69	1,147	
Частота звука 110 Гц, уровень 100 дБ, напряжение генератора $U = 12$ В, время воздействия $t = 40$ с								
9	425,1	4,0	421,1	39,7	10,28	9,43	1,090	1,070
10	960,6	4,1	956,5	70,2	7,73	7,34	1,053	
11	825,2	4,5	820,7	54,3	7,13	6,62	1,077	
12	1037,2	4,3	1032,9	84,2	8,63	8,15	1,059	

Окончание табл. 1

№ опыта	Масса холста до обработки $M_0$ , мг	Масса выпавших НВ $m_2$ , мг	Масса холста после обработки $M_1$ , мг	Масса оставшихся НВ $m_1$ , мг	Массовая доля НВ в холсте до обработки $\omega_0$ , %	Массовая доля НВ в холсте после обработки $\omega_1$ , %	Коэффициент уменьшения массовой доли НВ $K_{НВ}$	Среднее значение $\langle K_{НВ} \rangle$
Частота звука 70 Гц, уровень 118 дБ, напряжение генератора $U = 12$ В, время воздействия $t = 40$ с								
13	606,0	41,7	564,3	42,7	13,93	7,57	1,840	1,723
14	1045,8	73,4	972,4	86,4	15,28	8,89	1,719	
15	434,7	24,3	410,4	37,8	14,29	9,21	1,552	
16	448,5	34,59	413,91	37,2	16,00	8,99	1,780	
Частота звука 90 Гц, уровень 118 дБ, напряжение генератора $U = 12$ В, время воздействия $t = 40$ с								
17	582,9	42,4	540,5	29,8	12,39	5,5	2,253	2,368
18	996,9	44,3	952,3	53,6	9,82	5,63	1,744	
19	704,9	37,7	667,2	32,2	9,92	4,83	2,054	
20	482,7	85,1	397,6	27,0	23,22	6,79	3,42	
Частота звука 110 Гц, уровень 118 дБ, напряжение генератора $U = 12$ В, время воздействия $t = 40$ с								
21	805,1	40,3	764,8	29,8	8,71	3,90	2,233	1,850
22	545,2	16,4	528,8	22,3	7,10	4,22	1,682	
23	648,3	26,8	621,5	33,3	9,27	5,36	1,729	
24	697,1	40,6	656,5	47,0	12,57	7,16	1,756	

Как видно из таблицы, масса выпавших из образцов под действием звука неволокнистых включений пропорциональна уровню звука  $L$ , так как показатель  $K_{НВ}$  при уровне звука  $L = 118$  дБ гораздо выше по сравнению с аналогичным показателем при уровне звука  $L = 110$  дБ. Как и в предыдущих опытах, наблюдается наибольшее уменьшение содержания неволокнистых включений в образцах после акустической обработки звуком частотой 90 Гц, при этом массовая доля неволокнистых включений в холстах из базальтового волокна при уровне звука  $L = 118$  дБ уменьшается в среднем в 2,4 раза.

Для более четкого понимания практической пользы акустической обработки введем еще один показатель эффективности  $НВ\%$  – процент массовой доли неволокнистых включений, выпавших в процессе обработки, от массы всех включений, содержащихся в образце до обработки:

$$НВ\% = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \cdot 100, \quad (3)$$

где  $m_1$  – масса неволокнистых включений в образце, оставшихся после обработки;  $m_2$  – масса неволокнистых включений, выпавших при обработке.

Используя известные формулы (4)–(8) обработки результатов и определения погрешности [2, с. 11] и формулу (3), вычислим пределы показателя  $НВ\%$  при каждом из шести сочетаний ( $f = 70$  Гц и  $L = 110$  дБ;  $f = 79$  Гц и  $L = 110$  дБ;  $f = 110$  Гц и  $L = 110$  дБ;  $f = 70$  Гц и  $L = 118$  дБ;  $f = 90$  Гц и  $L = 118$  дБ;  $f = 110$  Гц и  $L = 118$  дБ) выходных параметров звукового поля, представленных в табл. 1:

$$\langle НВ\% \rangle = \frac{\sum НВ\%_i}{n}, \quad (4)$$

где  $\langle НВ\% \rangle$  – среднее арифметическое значение процента массовой доли неволокнистых включений, выпавших в процессе обработки, от массы всех

включений, содержащихся в образце до обработки;  $\sum НВ\%_i$  – сумма значений всех опытов;  $n$  – число опытов;

$$\Delta НВ\%_i = \langle НВ\% \rangle - НВ\%_i, \quad (5)$$

где  $\Delta НВ\%_i$  – отклонение значения каждого опыта от среднего;

$$S_{\langle НВ\% \rangle} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta НВ\%_i)^2}{n(n-1)}}, \quad (6)$$

где  $S_{\langle НВ\% \rangle}$  – доверительный интервал;

$$\Delta НВ\% = S_{\langle НВ\% \rangle} \cdot t, \quad (7)$$

где  $\Delta НВ\%$  – отклонение;  $t$  – коэффициент Стьюдента (3,2 для надежности  $p = 0,95$ ), то есть то, во сколько раз нужно увеличить стандартный доверительный интервал, чтобы при определенном числе испытаний  $n$  получить надежность  $p$ :

$$НВ\% = \langle НВ\% \rangle \pm \Delta НВ\%. \quad (8)$$

Результаты вычислений занесем в табл. 2.

Таблица 2. Процент массовой доли выпавших неволокнистых включений  $НВ\%$  в процессе акустической обработки холстов из базальтового волокна

№ опыта	Уровень звука $L$ , дБ	Частота звуковой волны $f$ , Гц	$НВ\%$ , %
1, 2, 3, 4	100	70	5...12
5, 6, 7, 8	100	90	11...16
9, 10, 11, 12	110	110	3,5...10
13, 14, 15, 16	118	70	38...53
17, 18, 19, 20	118	90	38...79
21, 22, 23, 24	118	110	37...58

Большой разброс показателя  $НВ\%$  объясняется неоднородностью разных образцов: невозможно по-

добрать два образца даже с примерным одинаковым содержанием количества или массовой доли неволокнистых включений. Однако просматривается некоторая закономерность. Как видно из табл. 2, массовая доля выпавших неволокнистых включений НВ% в процессе акустической обработки от всей массы неволокнистых включений, которые содержались в образце до обработки, пропорциональна уровню звука  $L$ . А максимум показателя НВ% в зависимости от частоты воздействующего приходится на  $f = 90$  Гц, при которой при уровне звука  $L = 118$  дБ доля выпавших включений может достигать до 80 %.

Таким образом, в результате экспериментального исследования процесса акустической обработки подтверждена возможность практического ее использования в целях уменьшения содержания неволокнистых включений в первичных холстах из супертонкого базальтового волокна и улучшения условий труда людей, работающих с ними, и предложены следующие рекомендации для дальнейшего изучения явления выпадения неволокнистых включений под действием звука и назначения рациональных параметров процесса акустической обработки при его внедрении в производство:

– при практическом использовании следует исследовать распределение звукового поля в удаленности от источника звука, а также учесть необходимое время обработки, которое, в свою очередь, будет зависеть от создаваемого уровня звука в точке взаимодействия звукового поля с первичным холстом;

Получено 12.04.2017

– явление отделения неволокнистых включений от холста из базальтового волокна под действием звука может быть объяснено возникновением физического резонанса, когда частота звукового воздействия совпадает с собственной частотой колебания неволокнистых включений. Однако массы отдельных выпавших включений на определенной частоте сильно разнятся между собой, поэтому для точной оценки данного явления следует дополнительно изучить колебательные свойства этих частиц;

– эффективность акустической обработки будет наибольшей при частоте воздействующего звука 90 Гц;

– при конструировании оборудования для акустической обработки необходимо обеспечить возможность регулировки расстояния от источника звука до поверхности образца в пределах расстояния, которое обеспечит уровень звука в точке взаимодействия на уровне не ниже 118 дБ;

– скорость движения конвейера и количество громкоговорителей должны быть выбраны так, чтобы поверхность образца была подвержена воздействию звука в течение 20–40 с.

#### Библиографические ссылки

1. *Сентяков Б. А., Тимофеев Л. В.* Технология производства теплоизоляционных материалов на основе базальтового волокна. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2004. – 232 с.
2. *Ахматов А. С.* Лабораторный практикум по физике. – М. : Высш. шк., 1980. – 360 с.

УДК 621.833

DOI 10.22213/2413-1172-2017-2-71-74

Д. Т. Бабичев, доктор технических наук, доцент, Институт транспорта Тюменского индустриального университета

## ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ КЛАССИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ЗУБЧАТЫХ ЗАЦЕПЛЕНИЙ И ПРОБЛЕМЫ ОПТИМИЗАЦИОННОГО СИНТЕЗА ПРОФИЛЕЙ ЗУБЦОВ\*

### Об основных задачах классической теории зацеплений

**В** известной монографии Ф. Л. Литвина [1] (1968), ставшей классической по теории зубчатых зацеплений, в качестве основных названы две задачи (цит. по [2, § 40]):

1. *Задача синтеза* трехзвенного зубчатого механизма: заданы схема механизма, его закон движения и поверхность зубцов одного из звеньев; найти поверхность зубцов другого звена.

2. *Задача анализа* зубчатого механизма (*обратная задача*): задана схема механизма, известны поверхности зубцов обоих подвижных звеньев; найти закон движения в виде функции, связывающей перемещения обоих звеньев.

Автор статьи, будучи студентом Иркутского политехнического, изучал курс ТММ, в котором рассматривались для плоских зацеплений графические методы нахождения сопряженных профилей зубцов  $\Sigma_1$  и  $\Sigma_2$ , а также определения их линии зацепления  $\Sigma_0$ . Основываясь на теореме «Если известна одна из линий  $\Sigma_1$ ,  $\Sigma_2$  или  $\Sigma_0$ , то можно найти две остальные», мы решали три типа задач: 1) зная  $\Sigma_1$ , находили  $\Sigma_2$  (или наоборот); 2) зная  $\Sigma_1$  (или  $\Sigma_2$ ), находили  $\Sigma_0$ ; 3) зная  $\Sigma_0$ , находили  $\Sigma_1$  (или  $\Sigma_2$ ). Из этих трех задач в [3] рассмотрено две: задача 1, названная основной задачей синтеза, и задача 2, которую решают «попутно», рассматривая задачу 1. Задача 3 в [4] не названа, возможно, потому, что до середины 20 в. син-