

*Н. В. НОВИКОВ*

## ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ РАССЕЯНИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ ДЛЯ НЕКОТОРЫХ МАТЕРИАЛОВ

Потери энергии при колебаниях деталей авиационных двигателей происходит за счет внешних и внутренних источников. Ко внешним потерям относят конструктивное демпфирование, обусловленное в основном трением в сопряженных деталях, и потери за счет газового либо воздушного потока. Внутренними потерями считают способность материалов поглощать часть энергии механических колебаний с выделением соответствующего количества тепла.

Для конструкций типа авиационной газовой турбины, планетарных механизмов, трубопроводов доля внутренних потерь энергии при колебаниях невелика по сравнению с внешними. Однако, как и в этом случае, так и для деталей, где рассеяние энергии в материале имеет существенное значение, например, лопатки, пропеллеры и др., знание величины демпфирующей способности является необходимым для анализа источников потерь, конструирования как самих деталей, так и демпфирующих устройств. Строгий учет демпфирующей способности материалов необходим также при конструировании ряда точных приборов, включающих в силовую схему упругие элементы и работающих в динамическом режиме.

Исследование рассеяния энергии в материале, как при нормальной температуре, так и при повышенных температурах проводится и является необходимым для выяснения причин явлений, происходящих в материале при нагреве, в условиях динамического нагружения, для углубленного изучения причин явления тех или иных факторов на усталость, длительную прочность, термоудар и термостойкость и др. Кроме этих областей, где демпфирующая способность материалов изучается при высоких уровнях напряжений, порядка предела усталости, существует область физического анализа, где определения внутреннего трения производятся при малых напряжениях с целью изучения внутренних превращений и структуры материалов.

Для практического учета рассеяния энергии в материале при колебаниях, в связи с существенным влиянием на это свойство вида структуры материала, его термической, термохимической, механической обработкой, вида напряженного состояния, внешней среды и отсутствием полных данных о закономерности такого влияния, в настоящее время наиболее целесообразно пользоваться лишь данным, полученным на материалах и в условиях близких к имеющимся, например, в практике турбостроения.

В связи с этим, для характеристик металла, как конструкционного материала, в машиностроении и приборостроении нужны определения демпфирующей способности при высоких уровнях напряжений в условиях, близких к рабочим для испытываемого материала (по температуре и виду напряженного состояния).

В настоящей статье приводятся данные о демпфирующей способности при нормальной и высоких температурах для сталей ЭИ612, 1Х13 и дюралюмина (таблица 1).

Испытанные образцы представляли собой плоские прямоугольные стержни с размерами рабочей части 175×15×2,5 мм. Утолщенные головки образцов зажимались в инерционных грузах, подвешенных на струнах.

Таблица 1

Механические характеристики испытанных материалов

Марка матер.	Термообработка	°С			%	%	H <sub>B</sub>	Примечание
			кг мм <sup>2</sup>	кг мм <sup>2</sup>				
ЭИ612	Закалка 1080—1130°С (вода) . . .	20°	—	95	23	51	230	
	1 отпуск 740—760°С 5 ч., воздух Отпуск 710—720°С, 20 ч., воздух . . . . .	630°	—	68,5	—	33	—	
1Х13	Закалка 1000°С, 2 ч. воздух . . . . .	20°	42,0	62,1	25,1	76,6	—	
	Отпуск 760°С, 2ч. воздух . . . . .	100°	39,0	58,0	—	—	—	
		400°	—	42,5	—	—	—	
	Закалка 1000°С, 2 ч. воздух . . . . .	20°	93,0	123,0	16,8	57,7	325	
	Отпуск 420°С, 2 ч. воздух . . . . .	100°	83,0	110,0	—	51,0	—	
		400°	—	105,0	—	50,0	—	
АМг	Отожженный . . . . .	20°	12	27	18	—	70	—2,0—2,8% —0,15—0,4% алюмин.-ост.

Возбуждение поперечных колебаний осуществлялось с помощью элетромагнитной системы, на которую подавался единичный импульс постоянного тока, вызывающий у образца свободные поперечные затухающие колебания. Виброграммы этих колебаний записывались с помощью оптической системы на осциллографной фотобумаге. Обработка виброграмм позволяла получать значения логарифмического декремента затухания колебаний, принятого нами для оценки демпфирующих свойств материала, в зависимости от максимальных нормальных напряжений. Образец при колебаниях находился в условиях чистого изгиба. При определении напряжений учитывались изменения модуля  $E$  с ростом температуры.

Рассматривая полученные результаты, следует учесть, что основными источниками потерь энергии колебаний в материале являются микропластические деформации, диффузорные процессы и магнитно-механический эффект.

При значительных напряжениях, порядка  $1 \text{ кг/см}^2$  потери энергии механических колебаний могут быть в основном результатом диффузионных процессов (диффузионное или релаксационное внутреннее трение). В области достаточно высоких напряжений при нормальной температуре, влияние последнего несущественно по сравнению с микропластическими сдвигами. С повышением температуры сопротивление микропластической деформации уменьшается, и, следовательно, декремент затухания растет. Кроме того, с ростом температуры количественно растет влияние на рассеяние энергии в материале диффузорных процессов, в связи с их интенсификацией.

Полученные результаты в виде графиков относительного изменения демпфирующей способности (при  $\sigma = 15,0 \text{ кг/мм}^2$ ) с ростом температуры  $\delta_t/\delta_n = f(t^\circ\text{C})$ , представлены на фиг. 1, значения логарифмического декремента при нормальной температуре ( $\delta_n$ ) в таблице 2.

Полученные результаты показывают слабую зависимость демпфирующей способности жаропрочной аустенитной стали ЭИ612 от

Таблица 2

Логарифмический декремент затухания колебаний при нормальной температуре

Логарифмический декремент затухания колебаний $\delta$ , %												
$\sigma \text{ кг/мм}^2$ матер.	2,0	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0	15,0	16,0	18,0	20,0
ЭИ612 . . . . .	—	0,12	0,14	0,155	0,17	0,18	0,20	0,215	0,23	0,24	0,25	0,31
IX13 (вос. отп.) . . .	—	1,60	2,15	2,60	3,15	3,35	3,40	3,00	2,90	2,85	2,65	2,55
IX13 (низк. отп.) . . .	—	0,16	0,18	0,19	0,21	0,23	0,24	0,25	0,25	—	—	—
IX13 (с повыш. сод. серы) . . . . .	—	0,70	1,10	1,50	1,95	2,30	2,45	2,50	2,40	2,45	2,15	1,80
АМг-5В . . . . .	—	0,62	0,64	0,69	0,83	—	—	—	—	—	—	—
АМг-6 . . . . .	0,63	0,69	0,73	0,75	0,78	—	—	—	—	—	—	—

напряжения при всех температурах. С ростом температуры цементирующая способность ЭИ612 постоянно повышается до 650°C. Некоторое снижение декремента имеет место при температуре 300°C в области напряжений 10,0—18,0 кг/мм<sup>2</sup>.

После 650°C демпфирующая способность ЭИ-612 резко растет. ЭИ-612 предназначается для лопаток турбин с рабочей температурой до 650—680°C, а также поковок дисков и роторов. Для дюралюмина АМг-5Б и АМг-6 характерна слабая зависимость декремента затухания колебаний от напряжения в пределах 2,0—7,0 кг/мм<sup>2</sup>. С ростом температуры демпфирование растет незначительно до 250°C. Резкий рост наблюдается после 300°C.

Сталь 1Х13 является ферритной нержавеющей высокохромистой сталью, которая нашла широкое применение в турбостроении для рабочих температура до 400—450°C.

Механические свойства стали 1Х13 весьма чувствительны к характеру термообработки. Испытаниям подвергались три партии стали 1Х13. Одна партия подвергалась закалке с последующим низким (при 420°C) отпуском (другая — такой же закалке с вы-

Фиг. 1. Графики относительного изменения демпфирующей способности с ростом температуры

1Х13 (низкого отпуска — при  $\sigma = 14$  кг/мм<sup>2</sup>). АМг — при  $\sigma = 5$  кг/мм<sup>2</sup>.  
Остальные материалы при  $\sigma = 15$  кг/мм<sup>2</sup>.

соким (760°C) отпуском. Третья партия отличалась от двух предыдущих по химическому составу (таблица 3), так как она содер-

Таблица 3

Химический состав стали 1Х13

Материал	С	Si	Mn	Cr	Ni	S   P		Примечание
						не более		
1Х13	0,09—0,15	<0,50	<0,50	12,0—14,0	0,60	0,030	0,035	ГОСТ 5632-51
1Х13	0,09	0,31	0,45	13,6	0,35	0,023	0,026	Зак. —1000°, 2ч., воз. Отп. —420°, 2 ч, гоз.
1Х13	0,12	0,29	1,09	13,85	0,19	0,22	<0,022	С повышен. содерж. серы

жала в 10 раз большее количество серы, а также по режиму термообработки (закалка 1000°C, 1,5 часа, масло и отпуск 720°C, 2 часа воздух).

Сталь 1X13 принадлежит к классу ферромагнитных сталей, для которых весьма существенную роль при рассеянии энергии колебаний в материале играет эффект механострикции.

Этот эффект рельефно проявляется при изучении зависимости демпфирующей способности 1X13 от напряжения. Для партии стали 1X13, подвергнутой высокому отпуску ( $760^{\circ}\text{C}$ ) при нормальной температуре рассеяния энергии в материале в основном определяется механострикционным эффектом [1]. Вследствие этого с ростом напряжений от  $2,0$  до  $8,0 \text{ кг/мм}^2$  декремент растет, достигая максимальных значений в области  $7,0 \div 8,0 \text{ кг/мм}^2$ , а затем до  $20 \text{ кг/мм}^2$  постепенно снижается. Эта картина характерна и для температур  $50\text{—}300^{\circ}\text{C}$ . По мере приближения к точке Кюри для данного материала кривая сглаживается, при температурах  $400\text{—}550^{\circ}\text{C}$  имеет место слабая зависимость декремента от напряжения. При  $600^{\circ}\text{C}$  наблюдается характерный рост декремента с ростом напряжений на всем диапазоне испытаний ( $2,0\text{—}16,0 \text{ кг/мм}^2$ ).

На характер зависимости декремента от температуры для стали 1X13, оказывает также существенное влияние в процессе дисперсионного твердения. Выделения карбидов из твердого раствора при  $450\text{—}500^{\circ}\text{C}$  затрудняют возможность пластического деформирования зерен, что приводит к снижению демпфирующей способности и ее слабой зависимости от уровня напряжений при указанных температурах [2].

Существенное влияние на зависимость рассеяния энергии в материале от напряжения и от температуры для 1X13 оказывает термическая обработка и некоторые изменения в химсоставе.

Для партии стали 1X13, подвергнутой после закалки низкому отпуску ( $420^{\circ}\text{C}$ ) эффект механострикции не проявляется, величина демпфирующей способности в 10 раз меньше, чем в случае высокого отпуска, имеет место слабая зависимость декрементов от напряжения при всех температурах испытаний. С повышением температуры наблюдается последовательный рост демпфирующей способности до  $350^{\circ}\text{C}$ , после чего декремент несколько снижается с минимумом при  $500^{\circ}\text{C}$ . Резкое повышение демпфирующей способности наступает после  $550^{\circ}\text{C}$ .

Испытания партии стали 1X13 с повышенным содержанием серы показали, что в этом случае демпфирующая способность практически соответствует данным для партии 1X13 с высоким отпуском, начиная с  $250^{\circ}\text{C}$ .

До этой температуры значения демпфирующей способности для серийной партии 1X13 лежат между значениями для партии стали 1X13 с высоким и низким отпуском и нормальным содержанием серы.

Результаты определения демпфирующей способности жаропрочных сталей и дюралюмина показывают, что с ростом температуры логарифмический декремент затухания колебаний, как правило, растет. Влияние температуры на рассеяние энергии в материале различно для различных материалов и может изменяться с измене-

нием термообработки. При общем росте демпфирования за счет потерь энергии механических колебаний в материале с ростом температуры, при некоторых, характерных для испытуемого материала, температурах могут иметь место изменения демпфирующей способности, связанные со структурными преобразованиями в материале под воздействием температуры и напряжений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. М. Писаревский и И. Г. Соколинская, сб. 2 «Свойства материалов, применяемых в турбостроении и методы их испытаний», Машгиз, 1955.
  2. В. В. Хильчевский, известия Киевского политехнического института, том XVIII, ГИТЛ УССР, Киев, 1955.
-