

## Исследование демпфирующих свойств деталей из марганцево-медного сплава электрошлакового рафинирования

А. П. Яковлев<sup>а</sup>, И. Г. Токарь<sup>а</sup>, А. Ю. Береговенко<sup>а</sup>, А. И. Устинов<sup>б</sup>, В. С. Скородзиевский<sup>б</sup>, Ф. К. Биктагиров<sup>в</sup>

<sup>а</sup> Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

<sup>б</sup> Институт металлофизики им. В. Г. Курдюмова НАН Украины, Киев, Украина

<sup>в</sup> Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина

*Изложены результаты экспериментального изучения демпфирующих свойств марганцево-медного (75%Mn–23%Cu–2%Ni) сплава, полученного на основе технологии электрошлакового рафинирования, и ряда натуральных деталей газотурбинных двигателей из него. Обнаружен высокий уровень декремента изгибных колебаний (характеристики демпфирующей способности) образцов и элементов конструкций из исследованного марганцево-медного сплава, на 1...2 порядка превышающий величину декремента колебаний распространенных конструкционных сталей и деталей из них.*

Высокодempфирующие марганцево-медные (Mn–Cu) сплавы находят широкое применение при изготовлении элементов конструкций, подвергающихся в эксплуатационных условиях интенсивному вибрационному нагружению, особенно при резонансных режимах [1]. Функциональные, технологические и эксплуатационные свойства Mn–Cu-сплавов во многом зависят от химического состава и чистоты металла, а также от технологии производства. Один из возможных способов производства качественных сплавов базируется на технологии, совмещающей процессы электрошлакового рафинирования (ЭШР) марганца и плавки слитка путем дозированной подачи шихты в зону расплава [2, 3].

В настоящем сообщении изложены результаты изучения демпфирующих свойств сплава 75%Mn–23%Cu–2%Ni, который получен на основе технологии ЭШР, и ряда натуральных деталей газотурбинных двигателей (ГТД) из него. В области высоких температур (> 970 K) сплав представляет собой однородный твердый раствор меди и никеля в марганце на основе ГЦК-решетки [4]. Такое состояние сплава фиксируется при его охлаждении до комнатной температуры. Высокий уровень демпфирующей способности сплава реализуется только при наличии в нем мартенситной фазы с ГЦТ-решеткой, необходимым условием образования которой является предварительное расслоение твердого раствора за счет отжига в области средних температур (620...770 K). Микроструктура мартенситной фазы характеризуется большой плотностью пластин, находящихся в двойниковой ориентации. Принято считать, что высокая подвижность границ раздела двойников под действием внешнего нагружения является основным механизмом рассеяния энергии в Mn–Cu-сплавах при механических колебаниях [5, 6].

Характеристику демпфирующей способности (логарифмический декремент колебаний) марганцево-медного сплава и деталей из него определяли по ширине резонансного пика [7] при поперечных колебаниях консольно

закрепленных призматических образцов и соответствующих натуральных деталей. Экспериментальные резонансные кривые для изучаемых объектов получали с помощью части экспериментального комплекса установки КД-4М, разработанной в Институте проблем прочности НАН Украины [8, 9].

Исследуемые образцы, изготовленные из вальцованного материала, имели вид призматических стержней постоянного поперечного сечения. Размеры образцов, плотность и собственная частота приведены в таблице.

Данные для испытанных Мп–Си-сплавов

№ партии образцов	Длина $l$ , см	Ширина $b$ , см	Толщина $t$ , см	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$f$ , Гц
1	8,6	1,37	0,28	7,12	169,0
2	8,6	1,48	0,29	7,12	194,0

Образцы подвергали гомогенизации при 1113 К в течение 3 ч, закалке в масло и отжигу при 693 К в течение 4 ч (образцы № 1) и 7 ч (образцы № 2).

На рис. 1 показаны зависимости декремента колебаний  $\delta$  от амплитуды максимальной относительной деформации  $\varepsilon$  образцов № 1 и 2 из испытанного марганцево-медного сплава. В обоих случаях наблюдался высокий уровень демпфирующей способности. Так, при амплитуде деформации  $5,5 \cdot 10^{-4}$  логарифмический декремент колебаний образцов № 1 составил 11%, образцов № 2 – 10%.

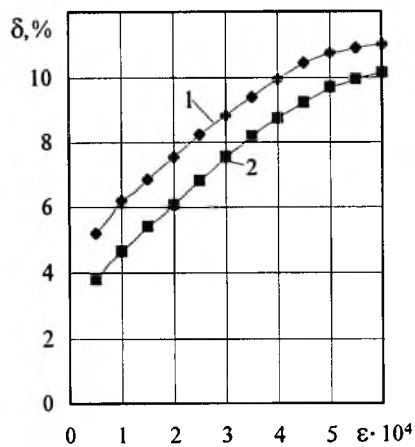


Рис. 1. Зависимость декремента колебаний  $\delta$  от амплитуды максимальной относительной деформации  $\varepsilon$  образцов № 1 (1) и № 2 (2) из марганцево-медного сплава.

Довольно резкая и монотонная амплитудная зависимость декремента колебаний, который в диапазоне амплитуд деформаций  $(1,0 \dots 5,5) \cdot 10^{-4}$  увеличился для образцов № 1 с 6 до 11%, а для образцов № 2 – с 4,5 до 10%, т.е. соответственно в 1,8 и 2,2 раза, характерна для данных режимов термообработки. При других, например меньших, временах отжига Мп–Си-сплавов зависимость декремента колебаний от амплитуды деформации обычно выражена слабее.

Увеличение длительности отжига с 4 до 7 ч привело (рис. 1) к снижению в среднем на 19% декремента колебаний исследуемого сплава при всех амплитудах деформаций.

Высокий уровень демпфирующей способности испытуемого материала в целом соответствует литературным данным для Мп–Си-сплавов близкого состава, в частности для прокатанного сплава Мп–25%Cu [1].

Обнаруженное влияние длительности отжига на декремент колебаний исследуемого сплава согласуется с результатами структурного анализа [3],

который показал, что при длительности отжига менее 2 ч в нем сохраняется ГЦК-решетка и, как следствие, имеет место сравнительно невысокий уровень декремента колебаний ( $\delta < 3\%$ ). Увеличение длительности отжига ( $> 2$  ч) приводит в процессе последующего охлаждения к интенсификации мартенситного превращения, обуславливающего, как уже отмечалось выше, увеличение рассеяния энергии и, следовательно, рост декремента колебаний. Однако при еще большей длительности отжига ( $> 6$  ч) декремент колебаний несколько снижается вследствие отрицательного влияния выделяющейся равновесной  $\alpha$ -фазы.

Данные, представленные на рис. 1, вполне укладываются в рамки вышеприведенного анализа и заключений [1, 10].

Практическая апробация рассматриваемого марганцево-медного сплава осуществлялась путем испытания натуральных деталей из него и определения характеристик демпфирующей способности.

Для исследований были выбраны детали, от которых зависит вероятность возникновения опасного уровня вибраций закрепленных на них агрегатов и приборов, в частности кронштейны крепления агрегата зажигания и пускового топливного насоса газотурбинного двигателя АИ8-3Б, а также кронштейн крепления датчика вертикальной вибрации ГТД Д18Т (рис. 2).

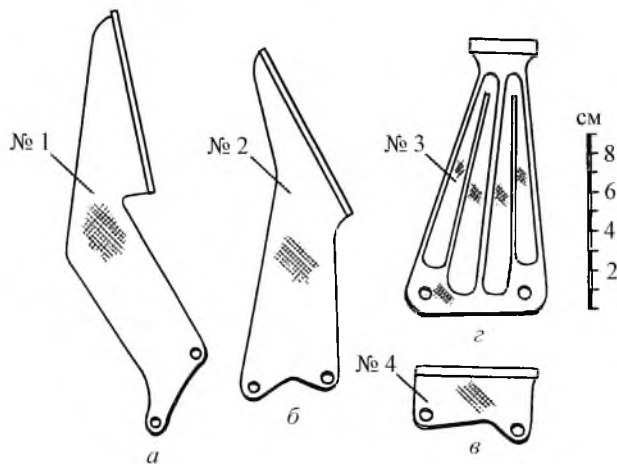


Рис. 2. Испытанные натурные детали: а, б – кронштейны крепления агрегата зажигания; в – кронштейн пускового топливного насоса ГТД АИ8-3Б; г – кронштейн крепления датчика вертикальной вибрации ГТД Д18Т.

Испытывали идентичные по конструкции детали из стали и марганцево-медного сплава, изготовленные по чертежам предприятия. Исключение составила деталь № 4, которая была изготовлена только из марганцево-медного сплава.

Декремент колебаний деталей определяли экспериментально при изгибных колебаниях основной (первой) формы по методу резонансной кривой [7], как уже упоминалось выше. С этой целью деталь закрепляли на подвижном столе вибростенда с помощью специально сконструированного и изготовленного приспособления.

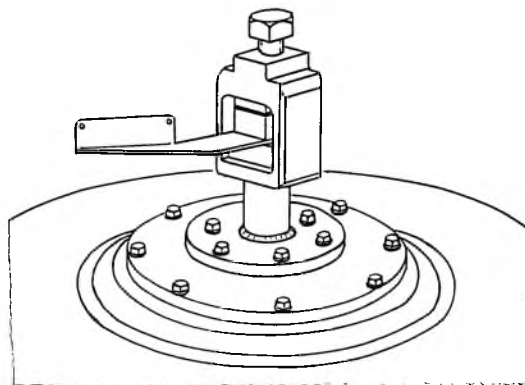


Рис. 3. Общий вид крепления натурной детали № 1 (рис. 2,а) на подвижном столе вибратора.

Общий вид закрепленной на вибростенде одной из деталей представлен на рис. 3.

Резонансную кривую и уровень максимальной относительной деформации регистрировали с помощью тензорезисторов, наклеенных вблизи корневого сечения детали.

Логарифмический декремент колебаний для идентичных деталей из стали и марганцево-медного сплава определяли при одинаковых значениях амплитуды максимальной относительной деформации, что обеспечивало возможность сопоставления измеряемых характеристик.

На рис. 4 приведены зависимости логарифмического декремента колебаний  $\delta$  от амплитуды максимальной относительной деформации  $\varepsilon$  для деталей № 1 и № 2, изготовленных из марганцево-медного сплава, а также для идентичных деталей из стали.

Каждая из этих деталей представляет собой пластинку с полкой на конце, которую в случае марганцево-медного сплава формировали в два этапа путем деформирования (загиба) части пластины с последующими отжигами в течение 4 ч. Исходным материалом служил лист толщиной 5 мм из исследуемого сплава, который предварительно подвергался гомогенизации при температуре 1113 К в течение 3 ч, закалке в масло и последующему отжигу при 693 К в течение 4 ч. Стальные детали изготавливали по заводской технологии.

Как видно из рис. 4, декремент колебаний деталей из марганцево-медного сплава оказался в 5...10 раз большим, чем декремент колебаний деталей из стали, во всем исследованном диапазоне амплитуд деформации  $(1...5) \cdot 10^{-4}$  и достиг 10...11%. Для детали № 1 имеет место очень слабая амплитудная зависимость декремента колебаний, в то время как для детали № 2 такая зависимость весьма существенна. Так, с увеличением амплитуды деформации с  $1 \cdot 10^{-4}$  до  $6 \cdot 10^{-4}$  декремент колебаний детали № 2 увеличился практически в два раза. Разный вид амплитудных зависимостей декремента колебаний деталей № 1 и № 2, по-видимому, обусловлен неодинаковым распределением амплитуды деформации по их колеблющейся части ввиду существенной зависимости декремента колебаний самого марганцево-медного сплава от амплитуды циклической деформации (рис. 1). Следует отме-

туть довольно высокий уровень демпфирующей способности обеих деталей ( $\delta = 5...10\%$ ) при малых значениях амплитуды деформаций ( $< 2 \cdot 10^{-4}$ ), что является дополнительным преимуществом с точки зрения звукоизоляции и акустического нагружения. Кроме того, обращает на себя внимание большое сходство амплитудных зависимостей декремента колебаний детали № 2 и образцов из марганцево-медного сплава (рис. 1).

Сравнение данных, приведенных на рис. 1 и 4, показывает, что в испытанных натуральных деталях практически полностью реализуется демпфирующая способность самого марганцево-медного сплава.

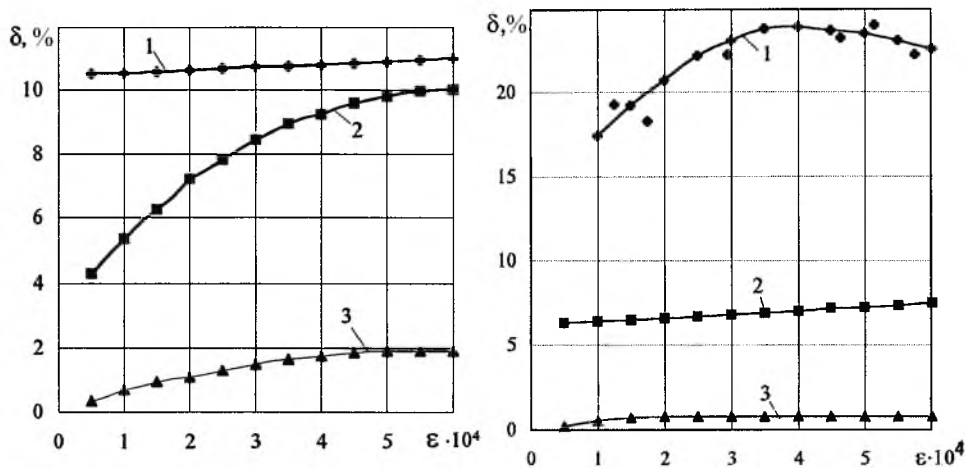


Рис. 4. Зависимость логарифмического декремента колебаний  $\delta$  от амплитуды максимальной относительной деформации  $\epsilon$ : 1, 2 – соответственно детали № 1, 2 из марганцево-медного сплава; 3 – те же детали из стали.

Рис. 5. Зависимость логарифмического декремента колебаний  $\delta$  от амплитуды максимальной относительной деформации  $\epsilon$ : 1 – деталь № 4 из марганцево-медного сплава; 2, 3 – деталь № 3 соответственно из марганцево-медного сплава и стали.

На рис. 5 показаны зависимости логарифмического декремента колебаний  $\delta$  от амплитуды максимальной относительной деформации  $\epsilon$  кронштейна крепления датчика вертикальной вибрации из марганцево-медного сплава и стали, а также кронштейна крепления пускового топливного насоса из марганцево-медного сплава. Здесь также наблюдаются значительные величины декремента колебаний в диапазоне малых амплитуд циклической деформации, что, как уже упоминалось выше, уменьшает вероятность возникновения и передачи чрезмерного уровня акустического воздействия при колебаниях рассматриваемых деталей из марганцево-медного сплава.

Значения декремента колебаний детали № 3 из марганцево-медного сплава в исследуемом диапазоне амплитуд деформации составляют 6,3...7,3%, что превышает уровень декремента колебаний стального кронштейна в 8...16 раз. При этом амплитудная зависимость декремента колебаний весьма слабая.

Уровень декремента колебаний детали № 4 из марганцево-медного сплава оказался исключительно высоким. Его величина в исследованных пределах амплитуды деформации составляет 17,5...24,0%, что почти в 50 раз

больше, чем для обычных конструкционных сталей, и значительно больше, чем для марганцево-медного сплава. По-видимому, это связано с условиями закрепления в зажимном устройстве вибратора испытуемой детали, имеющей вид неравнобокого уголка небольших размеров с относительно небольшой толщиной полок, и большой жесткостью ее консольной части, при колебаниях которой максимальные циклические деформации могут иметь место не только в корневом сечении, но и в некоторой небольшой зоне защемления, что может приводить к увеличению потерь энергии колебаний при трении в месте закрепления кронштейна. Можно ожидать, что это отразится на демпфировании колебаний испытуемого объекта и, следовательно, на экспериментально определяемой величине характеристики его демпфирующей способности. При оценке результатов указанное соображение, естественно, должно учитываться.

Следует заметить, что с точки зрения снижения уровня вибронпряженности деталей наличие рассеяния энергии колебаний вследствие трения в местах их закрепления будет играть положительную роль в реальных условиях эксплуатации конструкций.

## **Выводы**

1. Декремент колебаний (характеристика демпфирующей способности) марганцево-медного сплава электрошлакового рафинирования высок (4...11%) в исследованном диапазоне амплитуд относительной деформации  $(1...6) \cdot 10^{-4}$  и на 1...2 порядка превышает уровень демпфирующих свойств распространенных конструкционных сталей. Он остается большим ( $> 4\%$ ) при малых ( $< 10^{-4}$ ) амплитудах относительной деформации, что делает также привлекательным использование его для решения проблем звукоизоляции и снижения звукопередачи.

2. Имеет место значительная и монотонная амплитудная зависимость декремента колебаний Mn–Cu–Ni-сплава: при шестикратном увеличении амплитуды деформации декремент колебаний повысился в 1,8...2,2 раза.

3. Величина декремента колебаний большинства испытанных деталей ГТД, изготовленных из исследованного марганцево-медного сплава, достигает 5,4...11,0%, что в 5...10 раз превышает уровень декремента колебаний стальных идентичных деталей.

## **Резюме**

Викладено результати експериментального дослідження демпфувальних властивостей марганцево-мідного (75%Mn–23%Cu–2%Ni) сплаву, одержаного на базі технології електрошлакового рафінування, та ряду натурних деталей газотурбінних двигунів із нього. Виявлено високий рівень декремента коливань (характеристики демпфувальної здатності) зразків і елементів конструкцій з досліджуваного марганцево-мідного сплаву, який на 1...2 порядки перевищує величину декремента коливань поширених конструкційних сталей і деталей з них.

1. Фавстов Ю. К., Шульга Ю. Н., Рахитадт А. Г. *Металловедение высокодемпфирующих сплавов*. – М.: Металлургия, 1980. – 271 с.
2. Латаш Ю. В., Яковенко В. А., Лютый И. Ю. Электрошлаковое рафинирование электролитического марганца на установке УО-105 // *Пробл. спец. электрометаллургии*. – 1989. – № 2. – С. 14 – 21.
3. Биктагиров Ф. К., Латаш Ю. В., Крутиков Р. Г. и др. Электрошлаковое рафинирование и выплавка марганцево-медных сплавов высокого демпфирования // *Там же*. – 1999. – № 1. – С. 3 – 8.
4. Gokcen N. A. The Mn–Cu (copper–manganese) system // *J. Phase Equilib.* – 1993. – 14, N 1 – P. 76 – 83.
5. Basinski Z. S., Christian J. W. The cubic-tetragonal transformation in manganese–copper alloys // *J. Inst. Metals*. – 1951. – 80. – P. 659 – 666.
6. Удовенко В. А., Винтайкин Е. З., Дмитриев В. Б. и др. Механизмы демпфирования  $\gamma$ -Mn–Cu сплавов с ГЦТ-структурой // *Физика металлов и металловедение*. – 1990. – № 5. – С. 125 – 132.
7. Писаренко Г. С., Матвеев В. В., Яковлев А. П. *Методы определения характеристик демпфирования колебаний упругих систем*. – Киев: Наук. думка, 1976. – 86 с.
8. Токарь И. Г., Матвеев В. В., Балюк А. Д. Установка для исследования демпфирования колебаний стержневых элементов в поле центробежных сил // *Пробл. прочности*. – 1973. – № 4. – С. 114 – 117.
9. Матвеев В. В., Токарь И. Г., Городецкий С. С., Ройтман А. Б. Исследование демпфирующей способности попарно бандажированных турбинных лопаток в зависимости от условий сопряжения их бандажных полок // *Там же*. – 1978. – № 4. – С. 93 – 97.
10. Удовенко В. А., Винтайкин Е. З., Дмитриев В. Б. Механизм формирования демпфирующих свойств сплавов  $\gamma$ -Mn–Cu с ГЦТ-структурой // *Физика металлов и металловедение*. – 1990. – № 11. – С. 128 – 134.

Поступила 15. 10. 99