

Исследование демпфирующей способности плоских образцов из титанового сплава Ti–6%Al–4%V с покрытиями из олова и иттрия

А. И. Устинов^а, Б. А. Мовчан^а, В. С. Скородзиевский^б

^а Международный центр электронно-лучевых технологий Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина

^б Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, Киев, Украина

Исследована демпфирующая способность плоских образцов из титанового сплава Ti–6%Al–4%V с нанесенными методом электронно-лучевого осаждения покрытиями из иттрия и олова. Показано, что путем механической обработки (пластическая деформация) материала покрытия можно увеличить уровень демпфирования напыленных изделий в области малых и средних амплитуд деформаций. Описан прибор для измерения характеристик демпфирования консольно закрепленных пластинчатых образцов.

Одним из путей уменьшения уровня циклических нагрузок при эксплуатации различного типа машин и механизмов является применение демпфирующих покрытий, в том числе металлических, нанесенных на соответствующие готовые изделия. Выполненные в этом направлении работы в основном касались исследования демпфирующих свойств электролитически осажденных конденсатов [1–3]. Чаще всего в качестве подложки использовали стали или латунь, а наносимыми материалами служили Ni, Cu, Ag, Sn, Pb [2, 3]. Поскольку такие покрытия характеризуются высокой газонасыщенностью, в особенности водородом, их применение проблематично в тех случаях, когда из-за наличия этого элемента поверхность материала основы охрупчивается, как это происходит, например, в титановых сплавах.

Более перспективны – технологии вакуумного напыления, позволяющие гибко управлять структурой и химическим составом конденсата, а также влиять на его адгезию. В данной работе исследовали демпфирующие свойства плоских образцов из титанового сплава Ti–6%Al–4%V с нанесенными методом электронно-лучевого осаждения [4] покрытиями из иттрия и олова. При выборе материала покрытий учитывали, что оба металла не провоцируют образование на поверхности титановых сплавов новых фаз и, следовательно, не должны ухудшать механические свойства основы. Поэтому настоящее исследование представляется целесообразным с точки зрения выяснения эффективности применения олова и иттрия в качестве покрытий или промежуточных слоев для уменьшения влияния вибраций на усталостное разрушение изделий из титановых сплавов, например турбинных лопаток.

Методика исследования. Измерение сравнительных характеристик демпфирования (логарифмического декремента колебаний) проводили на автоматизированной лабораторной установке, разработанной Международным центром электронно-лучевых технологий Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины совместно с Институтом металлофизики

им. Г. В. Курдюмова НАН Украины (рис. 1). Установка создана на основе ранее разработанных методов определения характеристик демпфирования консольно закрепленных плоских образцов [5]. Амплитуду колебаний измеряли высокостабильным дифференциальным емкостным датчиком, одной из обкладок которого является жестко закрепленный на свободном конце образца подвижный металлический лепесток. Точность измерения составляет ± 5 мкм, что обеспечивает определение эффективной амплитуды деформации с точностью не хуже $\Delta \varepsilon = \pm 10^{-5}$. Программное обеспечение позволяет измерять декремент колебаний, с автоматической обработкой экспериментальных данных, методами свободно затухающих колебаний и резонансной кривой, а также характеристики усталости в автоколебательном режиме на образцах толщиной до 2,5 мм при длине рабочей части 55...120 мм в частотном диапазоне $20 < f < 300$ Гц.

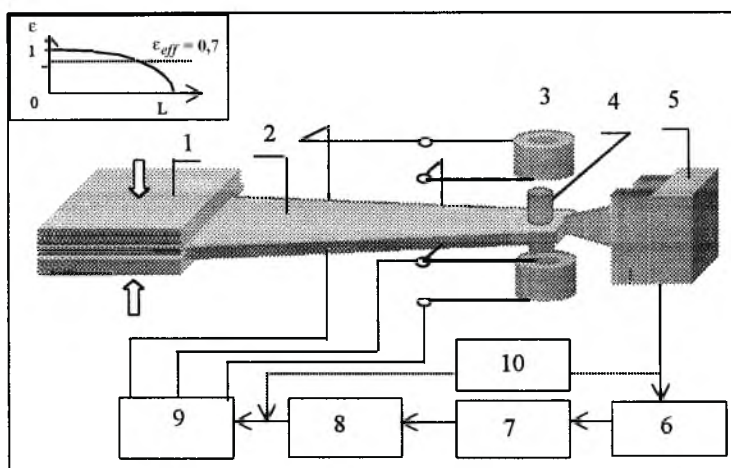


Рис. 1. Схема установки для измерения характеристик демпфирования: 1 – зажимное устройство; 2 – образец; 3 – магнитные катушки; 4 – ферромагнитный навес; 5 – дифференциальный емкостный датчик; 6 – усилитель; 7 – ПЭВМ; 8 – управляемое генераторное устройство; 9 – усилитель мощности; 10 – устройство обратной связи.

Покрyтия наносили в камере, предварительно откачанной до давления $P = 10^{-4}$ Па. Подложку (образец) нагревали до заданной температуры расфокусированным пучком электронов: при напылении иттрия ее температура составляла 400°C , при напылении олова – 100°C . Другим, сфокусированным пучком, разогревали слиток наносимого металла до образования расплавленной ванны в его верхней части, затем увеличивали мощность пучка, что приводило к интенсивному испарению металла. Скорость нанесения покрытий составляла 5...10 мкм/мин.

Логарифмический декремент колебаний δ определяли методом свободно затухающих колебаний на различных участках осциллограммы по формуле [6]

$$\delta = \ln(A_i / A_{i+n}) / n, \quad (1)$$

где A_i и A_{i+n} – амплитуды колебаний i -го и n -го циклов. Измерения проводили при частоте колебаний образцов $f \approx 150$ Гц.

Материалы исследования. Объектом исследования служили образцы, вырезанные из листа толщиной 2 мм сплава Ti-6%Al-4%V (состояние поставки) с нанесенными на одну из сторон покрытиями из иттрия (толщиной 58 и 130 мкм) и олова (толщиной 4, 8, 19 мкм). Оба металла покрытия – высокопластичные, однако их физико-механические характеристики значительно отличаются. Для иттрия: $\sigma_T = 175$ МПа, $E = 66000$ МПа; для олова: $\sigma_T = 10...20$ МПа, $E = 55000$ МПа [7]. По характеру взаимодействия с титаном указанные металлы также различаются. Так, система Ti-Sn представляет собой однородный твердый раствор в области концентраций вплоть до 20 вес.% Sn [8], тогда как иттрий, обладая высокой адгезией с титаном, не растворяется в нем [9]. Такой характер взаимодействия исследуемых покрытий с титаном определяет их нейтральность относительно образования на поверхности титановых сплавов новых фаз, ухудшающих их механические свойства.

Образцы изготавливали в виде удлинённых треугольников (рис. 2), что позволило уменьшить разницу в распределении деформаций по длине по сравнению с образцами призматической формы. Эффективную деформацию покрытия определяли как усреднённую деформацию поверхностного слоя подложки на различных ее участках:

$$\varepsilon_{eff} = (1/S_0) \sum S_i \varepsilon_i, \quad (2)$$

где S_0 – площадь поверхности образца; $\varepsilon_i \approx h / (2R_i)$ – деформация участка поверхности на расстоянии $x_i + \Delta x$ от места зажима образца; $S_i = y_i \Delta x$ – площадь i -го участка; h – толщина образца; R_i и y_i – радиус кривизны изгиба и его ширина в i -й точке. Значения ε_i с учетом формы образца рассчитывали по измеряемой амплитуде колебаний свободного конца. Соотношение между эффективной деформацией покрытия и фактическим распределением деформаций вдоль образца схематически показано на вставке к рис. 1.

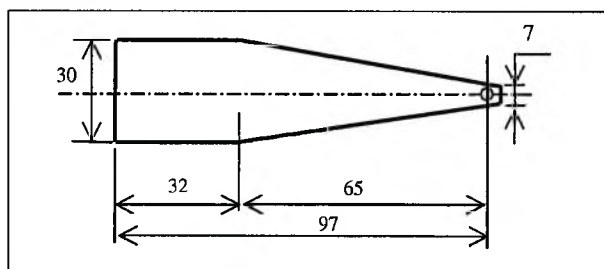


Рис. 2. Форма образца из листового материала толщиной 2 мм.

Исследовали образцы с покрытиями из иттрия и олова в исходном состоянии (после напыления), а также образцы с покрытием из олова толщиной $d = 19$ мкм после пластической деформации путем обжатия на валках с усилиями, исключаящими пластическую деформацию основы. Деформированный металл не отслаивался и оставался в пределах поверхности основы.

Результаты эксперимента и их обсуждение. *Исходное состояние конденсата.* При напылении оловом декремент колебаний δ образцов заметно возрастает по сравнению с чистой подложкой* уже при толщине слоя $d = 4$ мкм, что хорошо видно из рис. 3 (кривая 1). С увеличением толщины слоя d значения δ продолжают возрастать, а на кривых $\delta(\varepsilon)$ образуются два участка: приблизительно линейное увеличение декремента колебаний в области малых и средних амплитуд деформаций и насыщение в области больших, что отчетливо наблюдается при $d = 19$ мкм (кривая 3).

Для образцов с иттриевым покрытием область линейной зависимости $\delta(\varepsilon)$ шире: признаки начала насыщения кривой $\delta(\varepsilon)$ проявляются лишь при больших амплитудах деформации (на рис. 4 кривая 2).

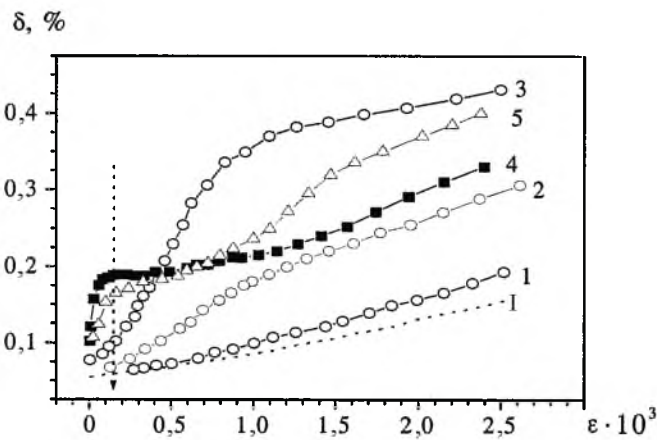


Рис. 3. Амплитудная зависимость декремента колебаний: 1, 2, 3 покрытие из олова толщиной 4, 8, 19 мкм соответственно; 4, 5 после пластической деформации и рекристаллизации покрытия толщиной 19 мкм соответственно. (Здесь и на рис. 4: 1 – титановый сплав без покрытия.)

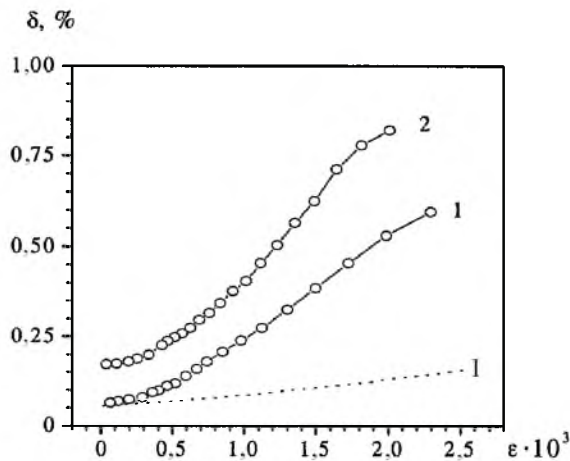


Рис. 4. Амплитудная зависимость декремента колебаний: 1, 2 покрытие из иттрия толщиной 58 и 130 мкм соответственно.

* Для сплавов ВТЗ и ВТ8 в состоянии поставки также получена [11] линейная зависимость $\delta(\varepsilon)$ при значениях δ , на 5...20% меньших приведенных на рис. 3 (кривая 1).

Линейный участок зависимости $\delta(\varepsilon)$ в области исследуемых деформаций характерен для чистых металлов. Он обусловлен главным образом микропластичностью, эффект которой увеличивается по мере вовлечения в процесс микропластичной деформации части дислокаций с неблагоприятно ориентированным вектором Бюргерса по отношению к действующему напряжению. По достижении $\sigma = \sigma_T$ металл испытывает пластическое течение, что отражается на характере зависимости $\delta(\varepsilon)$ – ее насыщении [10].

Известно, что упругопластические характеристики конденсатов существенно отличаются от свойств исходного металла в массиве из-за наличия большого количества вакансий и пор [3]. Вблизи последних могут возникать напряжения, достаточные для реализации не только микропластической, но и локальной “квазиобратимой” (при достаточной жесткости подложки) пластической деформации [12]. Поэтому можно предположить, что в исследуемых объектах основным механизмом демпфирования при относительно малых амплитудах действующих нормальных напряжений остается микропластичность. С увеличением напряжения возрастает вклад в демпфирование локальной пластической деформации на границе раздела пор-матрица, а при больших амплитудах доминирует механизм пластической деформации, распространяющийся на весь объем кристаллов. Такое совместное действие двух механизмов демпфирования приводит к смещению начала насыщения кривых $\delta(\varepsilon)$ от ожидаемого в сторону больших амплитуд деформаций, что и наблюдается для оловянного покрытия толщиной 19 мкм: $\varepsilon_{см} \approx 10^{-3}$ и $\varepsilon_{ож} \approx (2...4) \cdot 10^{-4}$ соответственно. Для иттрия предел текучести примерно в десять раз больше, чем для олова, поэтому насыщение кривой $\delta(\varepsilon)$ происходит в области еще больших значений ε . Отметим, что максимальные амплитуды деформаций поверхности подложки, реализованные в ходе данных измерений, соответствуют нормальным напряжениям $\sigma \approx 240$ МПа, близким к уровню усталостной прочности таких сплавов, как ВТ1 ($\sigma_{-1} = 260$ МПа) или ВТ6 ($\sigma_{-1} = 220$ МПа).

Влияние пластической деформации. Изменение кристаллической структуры олова при его обжиге качественно отражает рис. 5: из-за измельчения зерна ($D \approx 0,03$ мкм по сравнению с первоначальным $D \approx 0,1$ мкм) и увеличения плотности дислокаций дифракционный максимум (кривая 2) значительно уширен по сравнению с исходным состоянием конденсата. В результате последующей рекристаллизации покрытия (отжиг при $T = 200^\circ\text{C}$ в течение 0,25 ч) его профиль практически полностью восстанавливается. Термомеханическая обработка существенно повлияла на характер зависимости $\delta(\varepsilon)$:

декремент колебаний после пластической деформации заметно увеличился по сравнению с таковым в исходном состоянии в области малых и средних значений ε , тогда как в области больших он уменьшился (на рис. 3 кривая 4);

начало насыщения кривой $\delta(\varepsilon)$ существенно смещено в сторону меньших значений ε ;

для рекристаллизованного покрытия (на рис. 3 кривая 5) зависимость $\delta(\varepsilon)$ имеет вид промежуточной между исходным и деформированным состоянием, сохраняя особенность последнего – насыщение начинается при малых значениях ε .

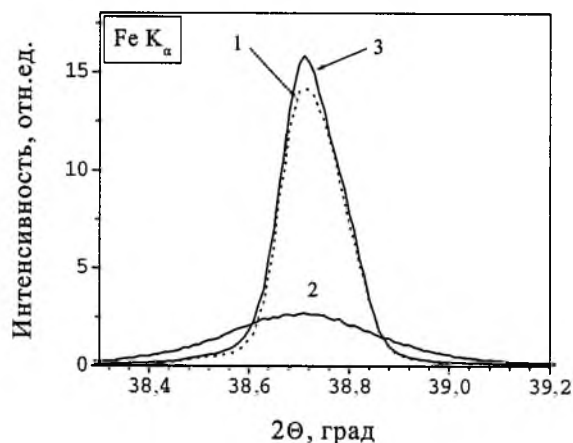


Рис. 5. Влияние термомеханической обработки покрытия из олова на изменение профиля дифракционного максимума (002): 1 – исходное состояние; 2, 3 – после пластической деформации и рекристаллизации соответственно.

Можно полагать, что проведенная термомеханическая обработка значительно уменьшает пористость олова. Поскольку пластическая деформация сопровождается генерированием дополнительного количества дислокаций, естественно также предположить, что наблюдаемое увеличение декремента колебаний связано именно с этим фактором. Вместе с тем из-за аннигиляции пор или их сплющивания упругопластические характеристики конденсата становятся близкими к свойственному состоянию металла в массиве. При таких условиях металл в целом должен испытывать пластическое течение при меньших значениях амплитуд деформации: отмеченное пунктиром значение $\varepsilon \approx 1,5 \cdot 10^{-4}$ (на рис. 3 кривая 4) соответствует ожидаемому $\sigma_T \approx 8$ МПа для металла в массиве. Эта особенность амплитудной зависимости декремента колебаний сохраняется и для рекристаллизованного состояния покрытия с тем лишь отличием, что из-за уменьшения плотности дислокаций его демпфирующая способность понижается.

Выводы

1. Покрытия из олова и иттрия, нанесенные на титановые сплавы, эффективно увеличивают их демпфирующую способность.
2. Характеристики демпфирования в значительной степени определяются структурным состоянием конденсата.
3. Пластическая деформация материала покрытия позволяет повысить уровень демпфирования в области малых и средних амплитуд деформаций напыляемых изделий, соответствующих циклическим нагрузкам ниже предела усталостной прочности.

Авторы признательны проф. А. П. Яковлеву и канд. техн. наук И. Г. Токарю за консультацию, оказанную при проектировании установки для измерения демпфирующих характеристик, а также инж. А. М. Свиридову и А. А. Некрасову за разработку и изготовление прецизионного высокостабильного емкостного датчика.

Резюме

Досліджено демпфіруючу здатність плоских зразків із листового титанового сплаву Ti-6%Al-4%V з покриттями з олова й ітрію, нанесеними методом електронно-променевої конденсації парів металу. Показано, що шляхом механічної обробки (пластична деформація) матеріалу покриття можна підвищити рівень демпфірування напилених виробів в області малих та середніх амплітуд деформацій. Описано прилад для вимірювання характеристик демпфірування консольно закріплених пластинчатих зразків.

1. Яковлев А. П. Диссипативные свойства неоднородных материалов и систем. – Киев: Наук. думка, 1985. – 248 с.
2. Фавстов Ю. К., Шульга Ю. Н., Рахитадт А. Г. Металловедение высокодемпфирующих сплавов. – М.: Металлургия, 1980. – 271 с.
3. Ильинский А. И. Структура и прочность слоистых и дисперсно-упрочненных пленок. – М.: Металлургия, 1986. – 141 с.
4. Paton V. E. and Movchan V. A. Composite materials deposited from the vapour phase in vacuum. Soviet technologies reviews // Weld. and Surfac. – 1991. – 2. – С. 43 – 64.
5. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов. – Киев: Наук. думка, 1971. – 375 с.
6. Писаренко Г. С., Матвеев В. В., Яковлев А. П. Методы определения характеристик демпфирования колебаний упругих систем. – Киев: Наук. думка, 1976. – 86 с.
7. Энциклопедия неорганических материалов. – Киев: Гл. ред. Укр. сов. энциклопедии, 1977. – 628 с.
8. Барабаш О. М., Коваль Ю. Н. Структура и свойства металлов и сплавов. – Киев: Наук. думка, 1986. – 598 с.
9. Терехова Б. Ф., Савицкий Е. М. Иттрий. – М.: Наука, 1967. – 103 с.
10. Фелтам П., Ньюхем С. Внутреннее трение в меди и α -латуни в процессе пластической деформации // Внутреннее трение в металлических материалах. – М.: Наука, 1970. – С. 68 – 76.
11. Яковлев А. П., Береговенко А. Ю., Лукьянов В. С., Марковский П. Е. Воздействие термомеханической обработки на демпфирующую способность титановых сплавов // Пробл. прочности. – 1999. – № 1. – С. 95 – 101.
12. Потехин Б. А., Лукашенко С. Б., Кочугов С. П. Демпфирующая способность плазменных покрытий Cu, Ni, Al // Тр. VIII Рос. науч.-техн. конф. “Демпфирующие материалы”. – СПб; Киров, 1999. – С. 57 – 60.

Поступила 17. 07. 2000