

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КЛЕЕВОЙ ПРОСЛОЙКИ НА РАБОТУ МЕТАЛЛОПОКРЫТИЯ ИЛИ ДАТЧИКА УСТАЛОСТИ

Канд. техн. наук, доц. С.Г. ТЮТРИН, канд. техн. наук, доц. Л.Н. ТЮТРИНА

Рассмотрено влияние клеевой прослойки на прогон (прокат) алюминиевой фольги, используемой в качестве датчика усталости. Проведено экспериментальное исследование и моделирование с помощью метода конечных элементов.

The influence of glue film on aluminum foil, transport used as a fatigue sensor, is examined. Experimental modeling and finite element method are tested.

Метод определения циклических напряжений, возникающих на поверхности деталей машин, с помощью гальванического меднения широко известен по работе [1], в которой предлагается технология получения медной гальванической фольги с помощью специального катода с последующей наклейкой кусочков этой фольги на исследуемую деталь. Данное мероприятие не только существенно упростило способ контроля напряжений, возникающих в деталях машин, но и изменило характер связи исследуемой поверхности с металлопокрытием. Поэтому был рассмотрен вопрос о влиянии клеевой прослойки на работу датчиков из гальванической фольги. Экспериментально были получены калибровочные зависимости гальванических покрытий, непосредственно нанесенных на исследуемые образцы, и калибровочные зависимости для датчиков, полученных из гальванической фольги, и наклеенных на образцы. Применялись образцы из малоуглеродистой стали, которые испытывались на переменный изгиб и на усталость при кручении. Использовались клеи E910 и SP-3 [1].

Полученные результаты показали, что как при изгибе, так и при кручении передача деформаций к датчикам из фольги затруднена наличием клеевой прослойки, а предельные деформации при одинаковых числах циклов нагружения у гальванических покрытий получаются несколько меньшими [1]. Другими словами, наличие клеевой прослойки снижает чувствительность фольги, и при непосредственном нанесении гальванического покрытия на деталь темные пятна появляются раньше, чем при применении наклеенных датчиков. Разница по величине деформации в диапазоне от 1 до 8 млн. циклов составила около 3%. Эти данные вполне убедительно показывают, что влияние клеевой прослойки невелико и оно отрицательное, поскольку снижается чувствительность фольги. Сделанные выводы многие годы не вызывали сомнений, хотя метод определения напряжений был существенно развит за счет применения новых материалов датчиков, новых способов их изготовления и контроля [2, 3, 4].

Вновь актуальным этот вопрос стал при использовании новых клеев (Циакрин ЭО, «Момент-1», «Супер Момент»), поскольку каждый клей имеет свои свойства, технологию наклейки и получаемую толщину. Однако с переходом на алюминиевые датчики появилась трудность, вызванная отсутствием аналога для сравнения, поскольку такие датчики гальваническим способом не изготавливаются и клеевое крепление их является единственным практически приемлемым способом. Для того, чтобы оценить влияние клеевой прослойки на работу алюминиевого металлопокрытия, используемого в качестве датчика усталости, будем исходить из следующего предположения. Если клеевая прослойка оказывает негативное влияние на чувствительность металлопокрытия, то две клеевые прослойки будут оказывать еще большее негативное влияние. Поэтому эксперимент проводился на стальном образце с конической полированной рабочей частью в условиях

чистого изгиба при вращении, на котором был наклеен датчик из алюминиевой фольги шириной 6 мм, а на этот датчик был нанесен еще один датчик шириной 3 мм.

Первая пара датчиков испытана при применении клея «Супер Момент», для второй пары применен клей «Момент-1». Эти клеи обеспечивают толщину клеевой прослойки, соответственно, около 10 мкм и 30 мкм. В качестве металлопокрытия использовалась алюминиевая фольга толщиной $\delta = 16$ мкм в мягком состоянии (ГОСТ 25905-83).

Испытания были проведены на машине МУИ-6000, которая обеспечивает изгиб при вращении (частота нагружения 100 Гц). При проведении испытаний машина останавливалась при 12, 30, 60, 90 и 120 тысячах циклов нагружения, и производился внешний осмотр поверхностей датчиков под микроскопом МБС-9 при 98-кратном увеличении. Контролировалось появление и положение первых следов дислокаций на датчиках. При их обнаружении измерялся диаметр поперечного сечения образца (его конической рабочей части), в котором появились эти следы. Напряжения в сечении вычислялись по известным формулам сопротивления материала для чистого изгиба.

Результаты опыта представлены на рис. 1 в виде калибровочных зависимостей числа циклов до появления внешнего эффекта на поверхности датчиков от амплитуды циклического напряжения, действующего на поверхности образца. При применении клея «Супер Момент» показания нижнего датчика отмечены на рисунке кружками, верхнего датчика – квадратами. При применении клея «Момент-1» показания нижнего датчика обозначены на рисунке треугольниками, верхнего датчика – крестиками.

Из рис. 1 видно, что наличие клеевой прослойки повышает чувствительность датчика к циклическим напряжениям, причем чем толще эта прослойка, тем более «чувствительным» становится металлопокрытие. Отклонение показаний однослойного датчика от двухслойного составляет 0...3 % при числе циклов нагружения до появления реакции датчиков, равным 120 тысячам, и увеличивается примерно до 5...7 % при числе циклов 12 тысяч. Таким образом, полученные результаты противоречат (и по величине, и по знаку) данным Окубо Хадзимэ. Но если попытаться экстраполировать данные работы [1, рис. 28, 29] до уровня 120 тыс. циклов, можно также увидеть существенное возрастание расхождения приблизительно до 10 %.

Вероятной причиной повышения чувствительности металлопокрытия при увеличении клеевой прослойки, наблюдаемое по рис. 1, может быть то, что при этом датчик отдалается от нейтральной оси образца и, следовательно, испытывает более высокие амплитуды деформаций. (При изгибе напряжения и деформации возрастают прямо пропорционально расстоянию до нейтральной оси.)

Причиной более высокой чувствительности медного гальванопокрытия по сравнению с наклеиваемой фольгой, полученное в опытах [1], может быть наличие в гальванопокрытии остаточных растягивающих напряжений, возникающих при электролизе [5].

Более подробный анализ условий работы металлопокрытия или датчика усталости позволяет применение метода конечных элементов, например, пакета FEMLAB [6]. С этой целью была рассмотрена плоская модель, состоящая из стальной детали с металлопокрытием. Длина детали 0,04 м, высота – 0,01 м. Материал детали – сталь с модулем продольной упругости $E_d = 200$ ГПа и коэффициентом поперечной деформации $\mu_d = 0,29$. Материал покрытия – алюминий с $E_n = 70$ ГПа и $\mu_n = 0,31$. Условия закрепления и варианты нагрузки модели обеспечивали растяжение и изгиб детали с металлопокрытием. Величины нагрузок выбраны такими, чтобы напряжение на поверхности детали (без металлопокрытия) составляло 60 МПа. Использовались квадратичные треугольные элементы. Расчеты проведены для случая плоского напряженного состояния.

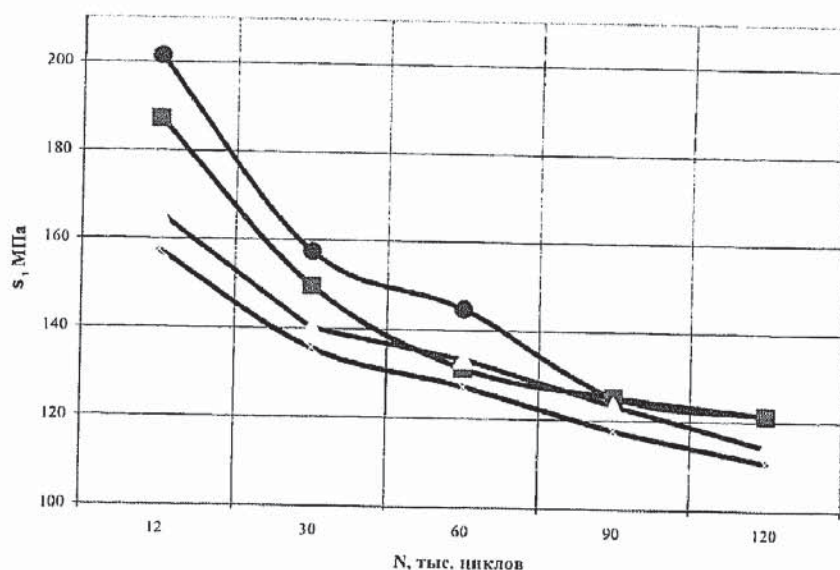


Рис. 1. Влияние прослойки на калибровочные зависимости металлопокрытия

На начальном этапе для оценки точности получаемых решений, был проведен расчет детали без металлопокрытия (т.е. без датчика). Отклонение этого напряжения от номинального, вычисленного по формулам сопротивления материалов, составило $-0,05\%$. Здесь же были определены величины напряжений в точке, смещенной на 1 мкм в глубину детали, что потребуется в дальнейшем.

На основе этих данных, была проведена оценка взаимного влияния детали и металлопокрытия. Расчеты проведены для толщины металлопокрытия δ равной 15 мкм и 30 мкм (табл. 1). Из анализа данных, представленных в табл. 1, видно, что напряжение, возникающее в металлопокрытии, существенно отличается от напряжения на поверхности детали и зависит от соотношения модулей продольной упругости материалов покрытия и детали [7]:

$$\sigma_{\text{п}} = \sigma_{\text{д}} \frac{E_{\text{п}}}{E_{\text{д}}} = 60 \frac{70000}{200000} = 21 \text{ (МПа)}.$$

Наличие металлопокрытия несколько снижает напряжения в детали: металлопокрытие усиливает поперечное сечение детали. При растяжении или сжатии напряжения по толщине покрытия практически постоянны. Наблюдаемое уменьшение напряжения в направлении от детали к свободной поверхности датчика не превышает $0,001\%$. При изгибе происходит увеличение напряжения по толщине покрытия при удалении от нейтральной оси. В рассмотренных случаях это увеличение составило около $0,28\%$ при толщине покрытия 15 мкм и около $0,58\%$ при толщине покрытия 30 мкм . При этом изменение напряжения по толщине датчика подчиняется линейной зависимости.

Сделанные выводы были подтверждены дополнительными расчетами, в которых высота поперечного сечения детали и ее длина были увеличены в 2 раза.

Не располагая данными о механических свойствах используемых в эксперименте клеев, оценим расчетным путем, насколько сильно изменяется напряжение в металлопокрытии при изменении упругих характеристик клея (при прочих равных условиях). Расчеты были выполнены для двух различных эпоксидных клеев: марки ЭПЦ-1 (его модуль продольной упругости $E_{\text{к}} = 6400\text{ МПа}$, коэффициент поперечной деформации $\mu_{\text{к}} = 0,15$) и марки К-147 (его модуль продольной упругости $E_{\text{к}} = 1800\text{ МПа}$, коэффициент поперечной деформации $\mu_{\text{к}} = 0,35$) [8].

Таблица 1

Напряжения в различных точках поперечного сечения, МПа

Модель	Расстояние точки от поверхности детали, мкм					
	-1	+1	+5	+10	+15	+30
Растяжение, $\delta = 15$ мкм	59,77399	20,92089	20,92088	20,92086	20,92085	-
Растяжение, $\delta = 30$ мкм	59,54333	20,84016	20,84012	20,84008	20,84004	20,83996
Изгиб, $\delta = 15$ мкм	59,73181	20,91452	20,93129	20,95226	20,97323	-
Изгиб, $\delta = 30$ мкм	59,50035	20,8335	20,85025	20,87119	20,89213	20,95499

Для проведения расчетов использована описанная выше плоская модель (высота поперечного сечения детали 0,01 м; высота поперечного сечения металлопокрытия $\delta = 15$ мкм), с толщиной клеевой прослойки Δ . Полученные величины напряжений в среднем поперечном сечении приведены в табл. 2.

Анализируя полученные результаты (табл. 1 и 2), можно увидеть, что наличие клеевой прослойки оказывает влияние на величину напряжения как в самом металлопокрытии, так и в детали непосредственно под ним. Так, если при отсутствии клеевой прослойки снижение напряжения в детали под металлопокрытием составило при растяжении 0,3767%, при изгибе — 0,3773% по сравнению с номинальным напряжением, то при наличии клеевой прослойки это снижение в рассмотренном случае составляет от 0,4032% до 0,539%. Вероятной причиной снижения напряжения в детали под металлопокрытием является местное повышение жесткости поперечного сечения изделия за счет материалов датчика и клеевой прослойки.

Изменения величины напряжения в металлопокрытии при наличии клеевой прослойки по сравнению с полученными ранее результатами (табл. 1) при растяжении для рассмотренных случаев не превышают 0,11%.

Анализируя влияние клеевой прослойки «по составляющим», отметим, что значения упругих постоянных материала клея оказывают слабое влияние на величину напряжений в металлопокрытии. Это видно из табл. 2, если сравнивать величину напряжений в металлопокрытии с разными марками клея, но при одинаковых толщинах и видах нагружения. Действительно, в рассмотренном случае модуль продольной упругости и коэффициент поперечной деформации материала клея изменились в 3,56 и 2,33 раз соответственно, при этом величины напряжений в металлопокрытии отличаются менее чем на 0,004 МПа. В процентном исчислении эти изменения не превысили 0,015%.

Более сильное влияние (по сравнению с величинами упругих постоянных) на величину напряжений в металлопокрытии оказывает толщина клеевой прослойки Δ . Это видно из табл. 2, если сравнивать величину напряжений в металлопокрытии с разными толщинами клеевой прослойки, но при одинаковых марках клея и видах нагружения. В процентном исчислении эти изменения показаны в табл. 3. Таким образом, влияние толщины клеевой прослойки на величину напряжений в металлопокрытии в несколько раз (и даже на порядок) сильнее, чем влияние различную величину упругих постоянных материала клея.

Таблица 2

Напряжения в различных точках поперечного сечения, МПа

Модель	Марка клея	Расстояние точки от поверхности детали, мкм				
		-1	$\Delta +1$	$\Delta +5$	$\Delta +10$	$\Delta +15$
Растяжение, $\Delta = 10$ мкм	ЭПЦ-1	59,75504	20,91408	20,91406	20,91405	20,91404
	К-147	59,75807	20,91452	20,91451	20,9145	20,91449
Растяжение, $\Delta = 30$ мкм	ЭПЦ-1	59,72031	20,90141	20,9014	20,90139	20,90138
	К-147	59,73426	20,89831	20,89828	20,89825	20,89824
Изгиб, $\Delta = 10$ мкм	ЭПЦ-1	59,71241	20,94951	20,96628	20,98724	21,00821
	К-147	59,71542	20,94994	20,96671	20,98768	21,00865
Изгиб, $\Delta = 30$ мкм	ЭПЦ-1	59,6766	21,02038	21,03715	21,05812	21,07909
	К-147	59,69051	21,0172	21,03396	21,05491	21,07588

Таблица 3

Изменение напряжения в металлопокрытии при увеличении толщины клеевой прослойки Δ с 10 мкм до 30 мкм

Растяжение (сжатие)		Изгиб	
клей ЭПЦ-1	клей К-147	клей ЭПЦ-1	клей К-147
-0,061%	-0,078%	+0,34%	+0,32%

Результаты табл. 2 подтверждают сделанный ранее вывод о том, что напряжения по толщине датчика при изгибе изменяются по линейной зависимости (это легко проверить путем построения графика).

В заключение отметим, что влияние клеевой прослойки можно минимизировать, если применять один и тот же клей, одну и ту же технологию наклеивания датчика и схему нагружения при проведении как калибровочных, так и объектных испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О к у б о Х а д з и м э. Определение напряжений гальваническим меднением/ Пер. с японск. — М.: Машиностроение, 1968. — 152 с.
2. Т р о ц е н к о Д. А. Метод металлических пленок как средство неразрушающего контроля усталости металлов // Контроль технологий, изделий и окружающей среды физическими методами: Тезисы докл. XXIII Уральской конференции. — Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2006. — С. 7.
3. С ы з р а н ц е в В. Н., Г о л о ф а с т С. Л. Измерение циклических деформаций и прогнозирование долговечности деталей по показаниям датчиков деформаций интегрального типа. — Новосибирск: Наука, 2004. — 206 с.
4. Т ю т р и н С. Г. Метод металлопокрытий для диагностики усталости деталей машин // Проблемы машиностроения и технологии материалов на рубеже веков: Сб. статей VIII Международной научно-технич. конференции. Ч. 1. — Пенза: ПДЗ, 2003. — С. 370—372.
5. П о в е т к и н В. В., К о в е н с к и й И. М. Структура электролитических покрытий. — М.: Metallurgia, 1989. — 136 с.
6. А н у ф р и е в И. Е., С м и р н о в А. Б., С м и р н о в а Е. Н. МАТЛАВ 7.- СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 1104 с.
7. Т ю т р и н С. Г. О напряженном состоянии тонких покрытий и датчиков усталости // Известия вузов. Машиностроение, 2001, № 5. — С. 15—17.
8. Справочник по клеям и клеящим мастикам в строительстве / О.Л. Фиговский, В.В. Козлов, А.Б. Шолохова и др. / Под ред. В.Г. Микульского и О.Л. Фиговского. — М.: Стройиздат, 1984. — 240 с.