

# ПРИМЕНЕНИЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТВЕРДООКСИДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*В.В. Куранов, Н.Н. Романенко, Ю.В. Худяков*

Российский федеральный ядерный центр —  
ВНИИ технической физики имени академика Е.И. Забабахина, г. Снежинск

Рассматривается проблема обнаружения, оценки и контроля остаточных внутренних напряжений в планарных ТОТЭ. Предлагается вариант решения проблемы на основе современного высокоточного метода измерения деформаций — голографической интерферометрии.

В планарном варианте ТОТЭ важно обеспечить равномерный характер температурной деформации пластин. С этой целью материалы, из которых выполняются слои электролита, катода и анода, а также токосъемы, подбираются с максимально близкими значениями КЛТР. Однако, как показывает практика, одного этого условия недостаточно, так как в каждом из слоев в процессе изготовления могут возникать остаточные внутренние напряжения. Данные напряжения нередко являются основной причиной разрушения ТЭ и выхода из строя всей батареи ТОТЭ. Поэтому для планарных ТЭ обнаружение и контроль внутренних остаточных напряжений являются актуальной проблемой. Решение этой проблемы осложняется тем обстоятельством, что большинство известных методов измерения остаточных напряжений являются разрушающими. В данной статье предлагается вариант решения проблемы на основе современного высокоточного метода измерения деформаций — голографической интерферометрии (ГИ). Этот метод более 20 лет успешно применяется в РФЯЦ — ВНИИТФ для решения самых разнообразных задач неразрушающего контроля и экспериментальной механики.

## 1. МЕТОД ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Кратко суть метода (рис. 1) состоит в том, что объект освещается лазерным светом и записывается его исходная голограмма. Затем объект деформируется (путем нагрева, подачи давления или нагрузки и т. п.) и записывается голограмма второго состояния на ту же пластинку. В результате интерференции этих наложенных голограмм получается изображение объекта, покрытое интерференционными полосами. При расшифровке картины интерференционных полос, определяются с точностью до 0,1 мкм величины перемещений любой точки объекта, иными словами деформационное поле объекта. Так как остаточные напряжения влияют на деформационное поле топливного элемента, метод ГИ был применен

в качестве одного из возможных инструментов для их обнаружения и оценки. Достоинства метода очевидны. Это высокая чувствительность и информативность, универсальность, бесконтактность и т. д.

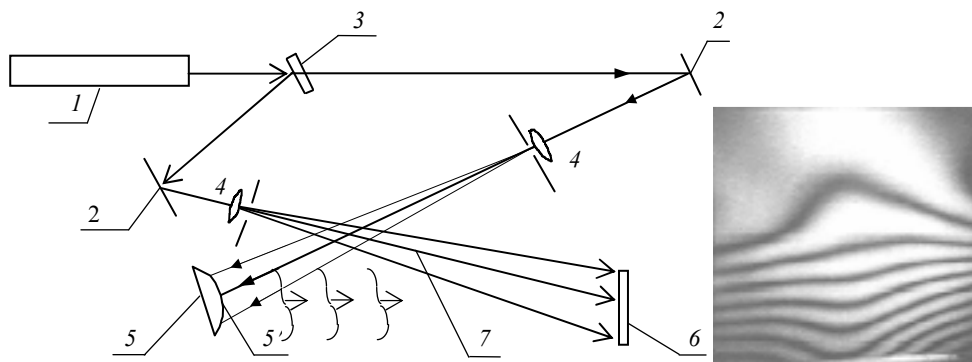


Рис. 1. Схема получения голографических интерферограмм объектов:

1 — лазер; 2 — зеркало; 3 — делитель; 4 — микрообъективы;  
5, 5' — положения поверхности объекта; 6 — фотопластинка (голограмма); 7 — опорная волна

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Первые же исследования показали, что при нагреве в свободном состоянии пластины электролита, изготовленные с помощью технологии прокатки, деформируются самым различным образом.

Как видно из приведенных интерферограмм (рис. 2), при нагреве происходит коробление пластин. В результате исходная плоская поверхность пластин приобретает как общие, так и локальные прогибы. Величины этих прогибов на отдельных пластинах при нагреве всего на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  достигали  $5\text{ }\mu\text{m}$ . Одновременно с этим, в той же партии были пластины, которые практически не имели короблений, как например, пластина, интерферограмма которой показана на рис. 2, г. Последующие исследования показали, что пластины со значительными короблениями, как правило, на следующих технологических этапах разрушались. Из этого был сделан вывод, что основной причиной коробления пластин и их последующих разрушений являются остаточные внутренние напряжения. Экспериментальным подтверждением этого вывода служат интерферограммы, приведенные на рис. 3.

Здесь показаны интерферограммы одной из пластин электролита, снятые при различных температурах ( $\Delta T = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) в процессе ее нагрева до  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При температуре  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  реализация остаточных напряжений привела к образованию трещины. Как видно из интерферограмм, это сразу же изменило и характер, и величину коробления пластины. Такой эффект свойственен только остаточным напряжениям.

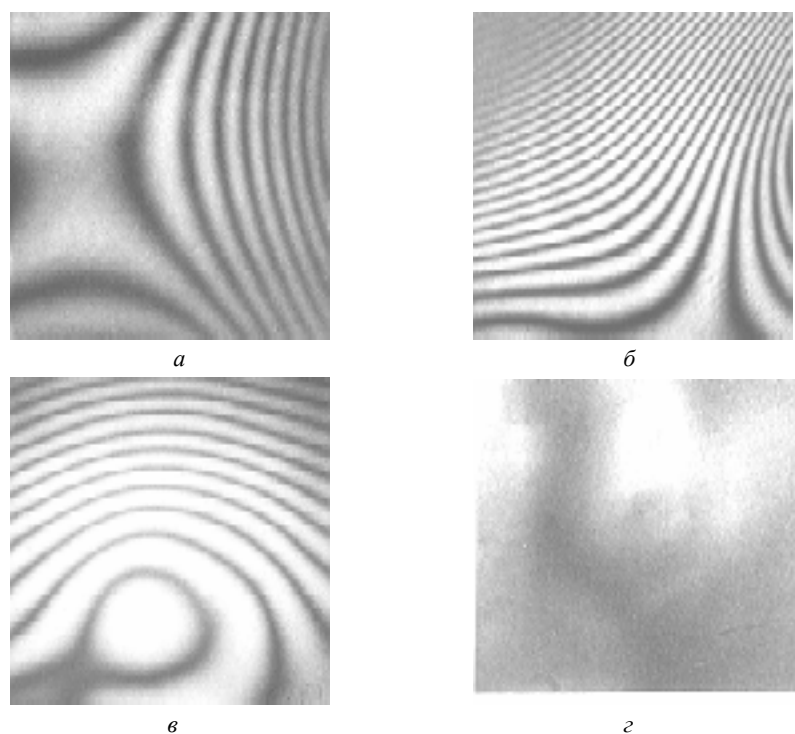


Рис. 2. Примеры интерферограмм пластин  $50 \times 50$  мм электролита из BCN:

*a, б, в, г* — различные виды коробления пластин при нагреве

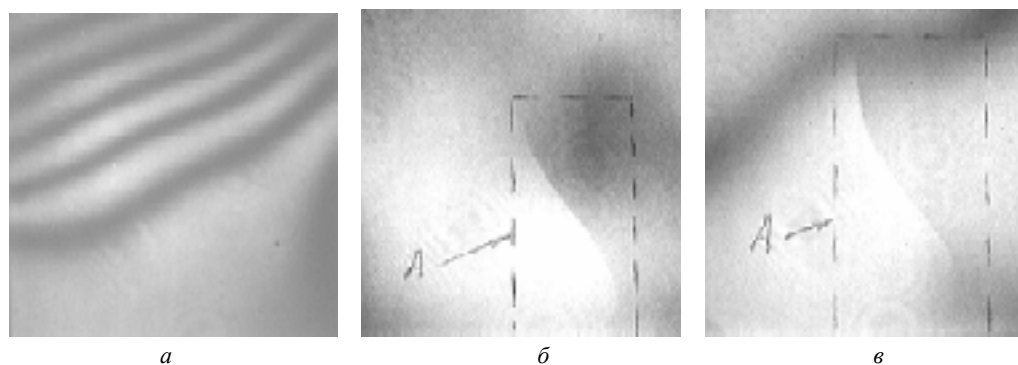


Рис. 3. Реализация остаточных внутренних напряжений в электролите (пластина  $50 \times 50$  мм из BCN):

*a* —  $T = 20$  °C,  $\Delta T = 1$  °C; *б* —  $T = 60$  °C,  $\Delta T = 1$  °C, *A* — зона трещины; *в* —  $T = 80$  °C,  $\Delta T = 1$  °C  
*A* — зона трещины

Дальнейшие исследования температурной деформации пластин после прохождения ими следующих этапов технологии изготовления ТОТЭ показали, что проблема остаточных напряжений с каждой операцией становится все более сложной, а актуальность ее не снижается.

Были сделаны интерферограммы пластины с нанесенными электродными покрытиями (рис. 4).

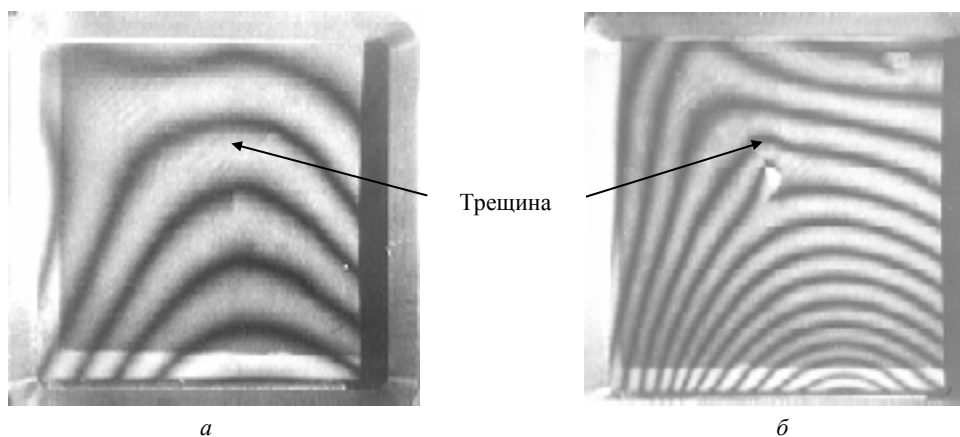


Рис. 4. Образование трещины в анодном покрытии (MLS):

*a* —  $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta T = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; *б* —  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta T = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$

При нагреве до  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  в анодном покрытии образовалась трещина, невидимая визуально, но отчетливо проявляющаяся на интерферограмме (рис. 4, *a*). При последующем охлаждении до  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  в зоне трещины произошло отслоение и разрушение покрытия (рис. 4, *б*). Как видно из интерферограмм, общий характер коробления пластины при этом практически не изменился. Здесь уже сложно выделить один фактор, ответственный за образование трещины и разрушение. Причиной могут быть и остаточные напряжения непосредственно в самом анодном покрытии, и влияние остаточных напряжений электролита, и температурные напряжения, обусловленные разностью КЛТР, а вероятнее всего, совокупные действия всех этих факторов. Вместе с тем исследования нескольких десятков пластин с покрытиями, принадлежащих различным партиям, показали, что и здесь имеется прямая взаимосвязь между степенью коробления пластин и их разрушением.

Были исследованы пластины после припекания токосъемов (рис. 5). Судить о влиянии остаточных напряжений в такой многослойной конструкции уже весьма сложно. Однако здесь проявилось другое ценное качество ГИ — возможность определения концентраторов напряжений. Как видно из приведенных интерферограмм (рис. 5, *a*), в отдельных зонах токосъемов наблюдаются резкие изгибы полос. Эти изгибы характеризуют как сами концентраторы, так и их влияние. Сравнивая интерферограммы с приведенными здесь же (рис. 5, *б*) фотографиями разрушившихся в процессе испытаний пластин, нетрудно сделать вывод, что разрушения происходят как раз по зонам концентрации напряжений.

Метод ГИ позволяет получать интерферограммы нескольких образцов (до нескольких десятков) одновременно (см. рис. 5, *a*). Это преимущество ГИ становится весьма значимым, когда речь идет о контроле сотен и тысяч изделий.

Получаемые при этом результаты контроля в ряде случаев дают возможность сразу же определить источник брака. Так, например, если у всех пластин изгибается один и тот же угол, то причину, очевидно, следует искать в технологии прессования и прокатки пластин.

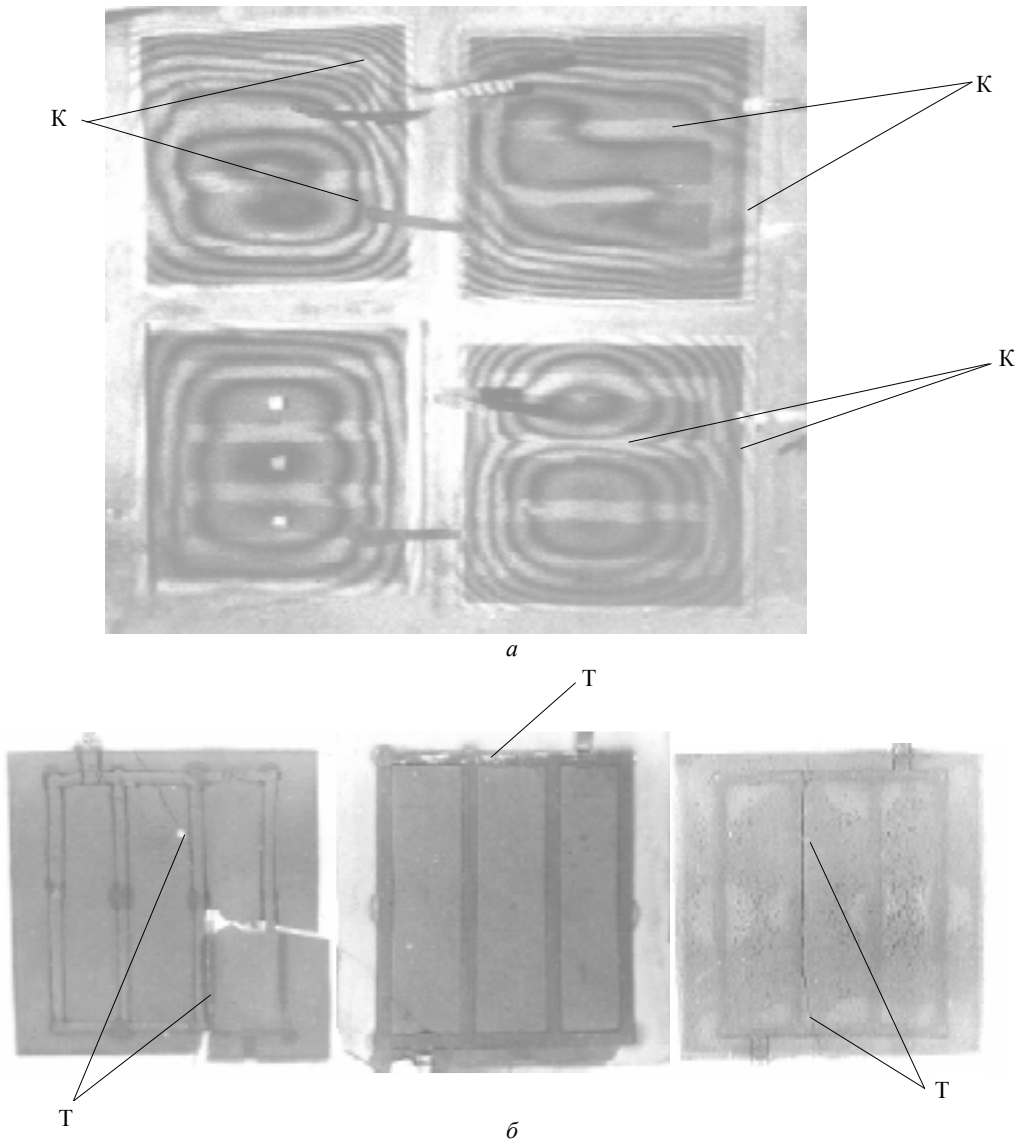


Рис. 5. Интерферограммы (а) и вид разрушений пластин с токосъемами (б):

К — концентраторы напряжений;  
Т — места образования трещин

### **3. ВЫВОДЫ**

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что метод ГИ — это не только достаточно тонкий инструмент исследователей, но и весьма мощное средство управления технологией на производстве. В частности, данный метод весьма эффективно может быть использован при решении задачи обнаружения и оценки остаточных напряжений в пластинах ТОТЭ, а также для оптимизации технологии изготовления ТОТЭ и их сборок.

Работа финансирована Институтом исследования электрической энергии,  
г. Пало-Альто, США, контракт № WO 8062–10.