

## Устройство для синхронизации циклов нагрева и малоциклового механического нагружения

А. П. Гопкало, Н. Н. Теслюк

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

*Описано устройство для обеспечения циклического нагрева лабораторных образцов синфазно или противофазно малоциклового механическому нагружению на стандартной испытательной малоцикловой машине. Разработан специальный фазовращатель для компенсации запаздывания фаз нагрева образца относительно фаз его механического нагружения и возможности регулирования смещения фаз циклического нагрева относительно механического нагружения.*

**Ключевые слова:** циклический нагрев, механическое нагружение, фаза нагружения.

**Введение.** Многие детали машин и конструкций работают в условиях циклического воздействия механических нагрузок и температуры. Для прогнозирования ресурса материалов и деталей, которые получили повреждения при термомеханическом нагружении, необходимо знать соответствующие критерии, характеризующие их прочность и долговечность в тех или иных условиях эксплуатации. В настоящее время такие надежные критерии отсутствуют. При использовании критериев, разработанных для изотермических условий циклического механического нагружения, получают некорректные результаты, поскольку процессы деформирования и разрушения материалов в изотермических и неизотермических условиях существенно различаются [1, 2]. В связи с этим возникает необходимость в получении экспериментальных данных о закономерностях деформирования и разрушения материалов в сложных условиях циклического воздействия температур и механических нагрузок и разработке на их основе соответствующих методов оценки долговечности.

Поскольку стандартное испытательное оборудование не позволяет осуществлять подобное нагружение образцов материалов, необходимо доработать существующие испытательные машины с целью получения возможности проведения испытаний в требуемых условиях нагружения. Из известных [3, 4] методик испытаний материалов на трещиностойкость при совместном воздействии механического нагружения и циклического нагрева, согласно которым образцы нагревают с помощью кварцевых ламп или индуктора, к сожалению, не ясно, каким образом осуществляется компенсация задержки фазы нагрева относительно фазы механического нагружения вследствие инерционности выбранного метода нагрева образца. Кроме того, в работе [5] показано, что при исследовании материалов при совместном изменении температуры и внешней нагрузки следует также учитывать тепловое деформирование системы силонагружения. При этом практически невозможно обеспечить полное соответствие циклов изменения темпера-

туры и механической деформации, которое определяется соотношением скоростей теплового деформирования и нагружения образца.

В настоящей работе осуществлена доработка стандартной испытательной малоцикловой машины с целью получения возможности проведения испытаний материалов на малоцикловую усталость или трещиностойкость в условиях совместного воздействия синфазного, противофазного (или регулируемого смещения фаз) механического нагружения и циклического нагрева.



Рис. 1. Структурная схема системы циклического нагрева образца.

**Структурная схема системы циклического нагрева образца.** Используемая в настоящей работе стандартная испытательная машина, предназначенная для испытаний образцов материалов на малоцикловую усталость при комнатной температуре, позволяет осуществлять механическое нагружение лабораторного образца растяжением–сжатием при пилообразной или трапецеидальной форме цикла. Максимально развиваемые усилия составляют  $\pm 200$  кН, вид нагружения – от кратковременного или длительного статического до знакопеременного или знакопостоянного циклического, частота нагружения до 0,3 Гц, режим нагружения – мягкий (при сохранении в течение испытаний заданных значений усилий) или жесткий (при сохранении в течение испытаний заданных значений перемещений или деформаций). В рассматриваемом варианте доработки испытательной машины циклический нагрев образцов предлагается осуществлять либо путем прямого пропускания электрического тока через испытуемый образец, либо с помощью малогабаритной электрической печи сопротивления. Для циклического нагрева образца в блоке задания и синхронизации циклов нагрева (рис. 1) вырабатывается сигнал управления нагревом, который сравнивается с сигналом от термопары, прикрепленной к поверхности образца, и на основании этого сравнения вырабатывается сигнал рассогласования для управления нагревом. Последний подается на регулятор температуры ВРТ-3. Взаимосвязь циклов механического нагружения и циклов нагрева описана

ниже. При проведении подобных испытаний вследствие инерционности нагрева образца, особенно существенной при использовании электрической печи, имеет место некоторое запаздывание фаз циклического нагрева относительно механического нагружения. Для их согласования и для компенсации задержки фазы нагрева образца относительно фазы механического нагружения вследствие инерционности нагревателя и системы нагрева в целом, а также возможности проведения испытаний в условиях противофазного или регулируемого смещения фаз циклического нагрева относительно механического нагружения в блоке задания и синхронизации циклов предусмотрен специальный фазовращатель (узел формирования сигнала управления (СУ) нагревом).

Для контроля корректировки фаз механического нагружения и циклического нагрева используется двухкоординатный графопостроитель, который регистрирует сигналы нагрузки (усилие или деформация) и температуры на поверхности образца.

**Функциональная схема управления циклическим нагревом и механическим нагружением.** В качестве источника электрического тока для нагрева образца или для питания нагревателей малогабаритной электрической печи используют трансформатор *ОСУ-20*, непосредственное управление которым осуществляется с помощью регулятора температуры *ВРТ-3*, на который подается управляющий сигнал рассогласования от блока задания и синхронизации циклов. При этом на образец или нагреватели электрической печи сопротивления подается напряжение 2...10 В. Температуру на поверхности образца измеряют хромель-алюмелевой термопарой, прикрепленной к поверхности рабочей части образца.

Для обеспечения синхронизации фаз циклического нагрева и механического нагружения, регулирования заданного смещения фаз циклического нагрева относительно механического нагружения, а также в связи с запаздыванием нагрева образца относительно механического нагружения вследствие инерционности системы нагрева сигнал управления нагревом необходимо сдвинуть по фазе относительно сигнала механического нагружения. При частоте циклов нагружения до 0,3 Гц задержка нагрева будет меньше половины периода СУ (цикла), так как сдвиг его по фазе происходит только в одну сторону (задержка сигнала). Для синхронизации нагрева и механического нагружения суммарное время задержки (время задержки нагрева и СУ) должно быть равно периоду СУ (цикла) – на рис. 2 эпюры *а–в*. Отсюда следует, что необходимое время задержки по фазе СУ из-за инерционности нагрева или требуемого смещения фаз должно быть больше половины периода СУ (цикла). Эпюры на рис. 2 иллюстрируют наиболее сложный случай с точки зрения управления циклическим нагревом – трапецеидальный режим нагружения. Поскольку СУ трапецеидального режима сдвигать по фазе весьма сложно из-за наличия времени выдержки при пиковых значениях управляющих сигналов, в блоке задания и синхронизации циклов формируется свой сигнал управления с регулируемым сдвигом фаз (узел формирования сигнала управления нагревом).

Функциональная схема узла формирования сигнала управления нагревом приведена на рис. 3. Для формирования СУ циклическим нагревом и

регулирования его синхронизации с  $СУ$  механическим нагружением с блока функционального задатчика испытательной машины УЭ-20 берутся два сигнала: “Нагрузка–Разгрузка” (“Н/Р”) и “Время”, участвующие в формировании сигнала управления механическим нагружением (на рис. 2 эпюры  $z$ ,  $d$ ). Сигнал “Время” на схемах совпадений 1 и 2 разделяется на два сигнала: “Время при нагрузке” (“Время-1”) и “Время при разгрузке” (“Время-2”) – на рис. 2 эпюры  $e$ ,  $ж$ . Время задержки сигналов “Нагрузка–Разгрузка”, “Время-1” и “Время-2” одно и то же на трех идентичных схемах задержки. Последние состоят из счетчиков импульсов, триггеров и формирователей фронтов импульсов. В каждой из них отдельно задерживаются передний и задний фронты сигналов и дальше на триггере формируется задержанный сигнал. Время задержки зависит от частоты импульсов, поступающих с генератора, управляемого напряжением ( $ГУН$ ). Частота  $ГУН$  регулируется потенциометром  $RI$  “Фаза”. Необходимость разделения сигнала “Время” возникает в связи с тем, что время задержки сигналов должно быть больше половины периода сигнала управления, и при трапецеидальном режиме второй импульс “Время” может появиться раньше, чем закончится время задержки первого, что приведет к сбою работы схемы.

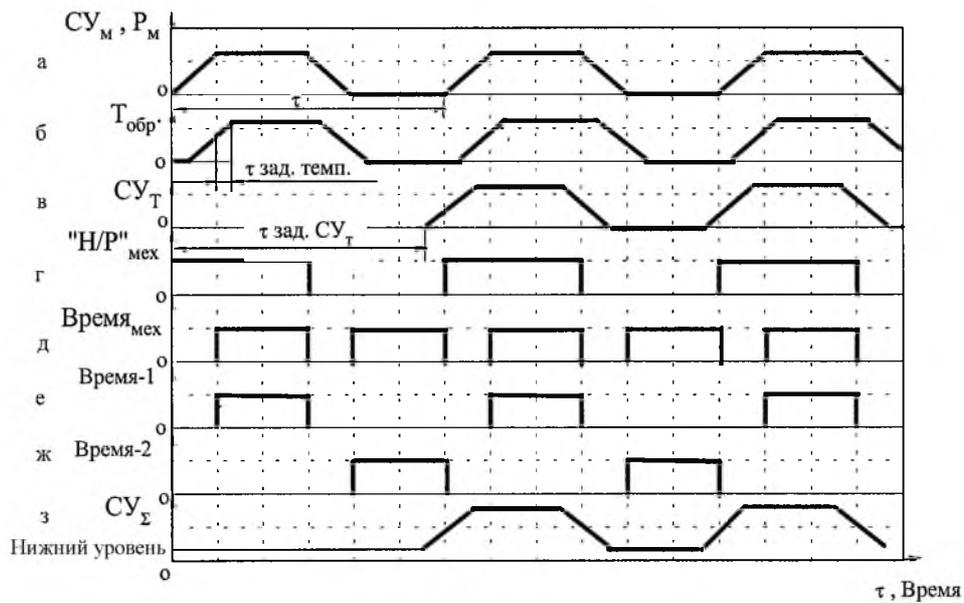


Рис. 2. Эпюры сигналов узла формирования сигнала управления циклическим нагревом.

Задержанный сигнал “Нагрузка–Разгрузка” поступает на реверсивный счетчик и управляет направлением счета (суммирование–вычитание). На счетный вход счетчика тактовые импульсы с генератора поступают через схему совпадений 3. При отсутствии на входах схемы задержанных сигналов “Время-1”, “Время-2” и блокировочного сигнала от схемы защиты от перегрузки счетчик считает тактовые импульсы, и на выходе цифроаналогового преобразователя ( $ЦАП$ ) напряжение меняется в соответствии с направле-

нием счёта. При появлении любого из этих сигналов тактовые импульсы на счётчик не поступают, и счёт останавливается, при этом на выходе ЦАП устанавливается постоянное напряжение, соответствующее уровню выдержки. Сформированный таким образом сигнал управления (на рис. 2 эпюра *в*) поступает в узел управления циклическим нагревом.

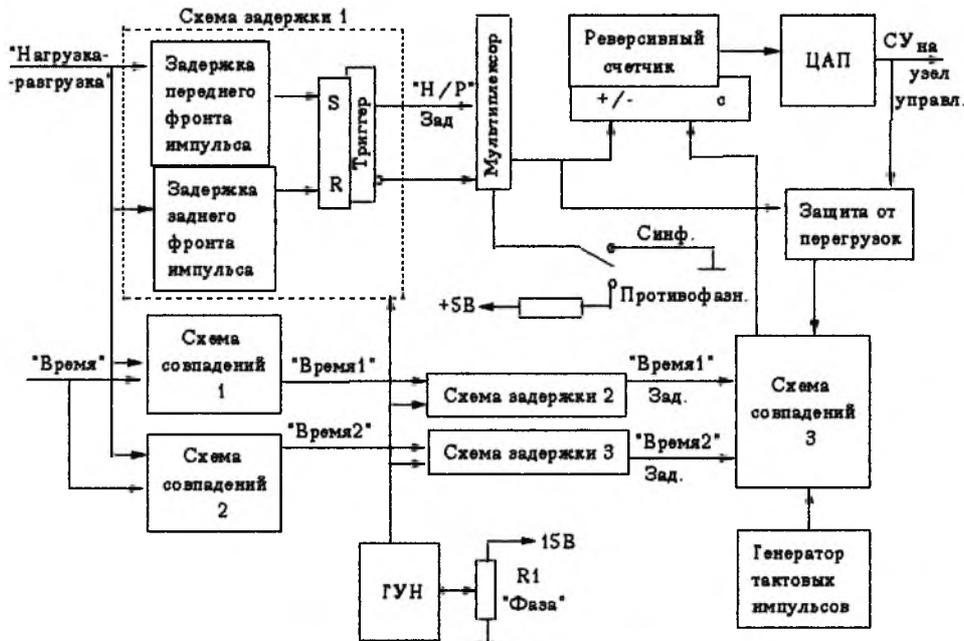


Рис. 3. Функциональная схема узла формирования сигнала управления циклическим нагревом.

Схема защиты блокирует поступление тактовых импульсов на счётчик в режиме вычитания при приближении выходного кода счётчика к нулю, так как без блокировки при этом режиме счётчик по достижении нулевого значения выходного кода перебрасывает последний в максимальное значение, и соответственно  $CV$  изменится от нулевого значения к максимальному, что приведет к аварийной перегрузке.

Для проведения испытаний образцов при нагружении по пилообразному (треугольному) режиму достаточно исключить сигнал “Время” в функциональном задатчике испытательной машины УЭ-20.

Чтобы получить противофазное воздействие механических нагрузок и циклического нагрева, достаточно переключить мультиплексором полярность сигнала “Нагрузка-Разгрузка”, управляющего направлением счёта реверсивного счётчика (рис. 3).

Функциональная схема узла управления циклическим нагревом представлена на рис. 4. В узле управления на буферном усилителе потенциометром  $R1$  “Амплитуда” устанавливается необходимая амплитуда  $CV_y$ . На сумматоре  $I$   $CV_y$  суммируется с сигналом с потенциометра  $R2$  “Нижний уровень”, с помощью которого устанавливается начальное значение темпе-

ратуры. В результате получается суммарный сигнал управления  $CV_{\Sigma}$  (на рис. 2 эпюра з). На сумматоре 2  $CV_{\Sigma}$  сравнивается с сигналом термопары  $ТП$  и вырабатывается сигнал рассогласования, который через схему аварийной защиты поступает на  $BPT-3$ . Схема аварийной защиты отключает управляющий сигнал рассогласования от  $BPT-3$  в случае перегрева образца, обрыва термопары и при ручном отключении нагрева.

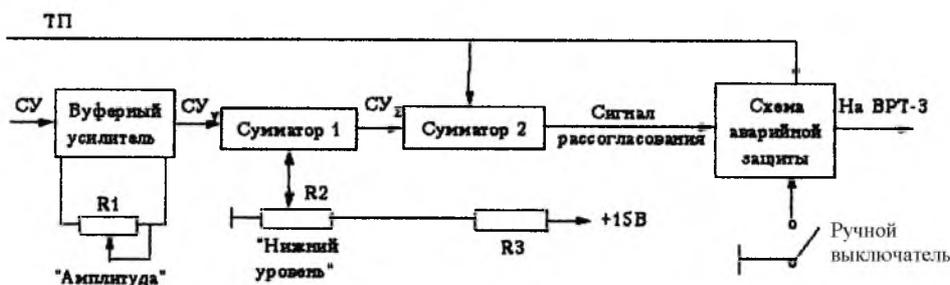


Рис. 4. Функциональная схема узла управления.

**Методика испытаний.** Для проведения испытаний необходимо с помощью потенциометра  $R2$  “Нижний уровень” (рис. 4) повысить температуру на поверхности образца до нижнего уровня термического цикла. Затем на испытательной машине включить управление заданным циклическим механическим нагружением и на следующем его цикле с момента минимальной температуры термического цикла в соответствии с фазой механического нагружения посредством потенциометра  $R1$  “Амплитуда” повышать температуру до требуемого значения максимальной температуры термического цикла. Регулировка совпадения или требуемого смещения фаз циклов нагрева и механического нагружения производится потенциометром  $R1$  “Фаза” (рис. 3). При этом контроль регулировки осуществляется с помощью записи на графопостроителе диаграмм температура – механическая нагрузка. Переключение синфазного или противофазного режимов циклического нагрева и механического нагружения производится переключателем “Синф. – противофазн.”.

**Заключение.** Разработано оригинальное устройство, позволяющее на стандартной или любой другой малоцикловой испытательной машине проводить испытания лабораторных образцов на малоцикловую усталость или трещиностойкость в условиях регулируемого синфазного или противофазного циклического нагрева и механического нагружения. Испытания на трещиностойкость в изотермических и неизотермических условиях малоциклового нагружения образцов с краевой трещиной подтвердили работоспособность предложенного устройства и методики экспериментальных исследований в целом. Например, экспериментальные исследования закономерностей роста усталостных трещин в стали 25Х1М1Ф (материал роликов машин непрерывного литья заготовок Мариупольского металлургического комбината “Азовсталь”) показали, что в условиях синфазного с механическим нагружением циклического нагрева скорость роста усталостных

трещин уменьшается приблизительно в 1,6 раза по сравнению с изотермическим механическим нагружением при температуре, соответствующей максимальной температуре неизотермического цикла. Экспериментальные исследования влияния фазности циклического нагрева и циклического механического нагружения на рост усталостных трещин в указанной стали свидетельствуют о том, что синфазный с механическим нагружением циклический нагрев увеличивает скорость роста усталостных трещин приблизительно в два раза по сравнению с противофазным нагружением.

## Резюме

Описано пристрій для забезпечення циклічного нагрівання лабораторних зразків синфазно або противофазно малоцикловому механічному навантаженню на стандартній малоциклової машині. Розроблено спеціальний фазообертач для компенсації запізнення фаз нагрівання зразка відносно фаз його механічного навантаження та можливості регулювання зміщення фаз циклічного нагрівання відносно механічного навантаження.

1. *Гопкало А. П.* Исследование особенностей нагруженности материалов при термической усталости // Пробл. прочности. – 1994. – № 10. – С. 17 – 22.
2. *Гопкало А. П.* Оценка циклической долговечности сталей 15ХМл и 20ХМл в неизотермических условиях // Там же. – 1998. – № 3. – С. 22 – 27.
3. *Pernot J. J., Nicolas T., and Moll S.* Modelling thermomechanical fatigue crack growth rates in Ti–24Al–11Ni // Fatigue. – 1994. – **16**, N 2. – P. 111 – 122.
4. *Rau C. A., Jr., Gemma A. E., and Leverant G. R.* Thermal-Mechanical Fatigue Crack Propagation in Nickel- and Cobalt-Base Superalloys under Various Strain-Temperatures Cycles // Fatigue at Elevated Temperatures, ASTM STP 520, American Society for Testing and Materials, 1973. – P. 166 – 178.
5. *Стрижало В. А.* О соотношении скоростей теплового деформирования и нагружения образца при испытаниях на термомеханическую выносливость // Завод. лаб. – 1967. – **33**, № 5. – С. 620 – 622.

Поступила 10. 02. 2000