

Автоматизированная измерительная система регистрации параметров квазидинамических процессов при механических испытаниях материалов в условиях пониженных и криогенных температур и воздействии импульсов электрического тока

Л. С. Новогрудский, А. В. Дроздов, В. А. Стрижало, Н. Я. Оправхата

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Описана автоматизированная измерительная система установки для исследования механических свойств конструкционных материалов в интервале температур 4,2... 300 К при воздействии импульсов электрического тока.

Ключевые слова: измерительная система, испытательная установка, механические испытания, механические свойства, модернизация, программное обеспечение.

Введение. Механическое поведение металлических материалов при статическом нагружении в условиях пониженных и криогенных температур существенно отличается от такового при комнатной температуре и имеет при этом некоторые особенности. Так, при охлаждении до 4,2 К значения характеристик прочности большинства металлов увеличиваются в 2-3 раза, а характеристик пластичности изменяются в зависимости от строения кристаллической решетки. При растяжении металлических материалов в условиях температур ≤ 20 К наблюдается их скачкообразное пластическое течение, что проявляется в виде дискретных зубцов на диаграмме растяжения, так называемая “прерывистая текучесть” [1]. Кроме того, на сопротивление деформированию, на прочность, пластичность и трещиностойкость конструкционных материалов в указанном интервале температур существенное влияние оказывают кратковременные электромагнитные воздействия, в частности импульсы электрического тока [2]. При этом изменение параметров испытаний, как правило, регистрируемых в процессе статического нагружения, происходит за короткое время: в условиях прерывистого течения за $10^{-2} \dots 10^{-3}$ с [2], а при действии импульсов электрического тока за время, равное длительности импульса (в основном это милли- и микросекундный диапазон). Очевидно, что в таких случаях для получения полной и корректной информации о кинетике деформирования и разрушения металлов, значениях их механических характеристик необходимо использовать измерительные средства и методы, обеспечивающие точное и всеобъемлющее измерение и регистрацию параметров испытаний (нагрузка, перемещение захватов, удлинение и температура образца, амплитуда и длительность импульса электрического тока) не только при квазистатическом деформировании материалов, но и при их деформации с весьма высокой скоростью.

Ранее [3] в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины (далее – институт) была разработана специализированная установка УТН-10, предназначенная для испытаний образцов материалов, сплавов и их сварных соединений на растяжение, сжатие и изгиб при воздействии электрического тока в интервале температур 4,2...300 К. Методики испытаний, реализованные на данной установке, в полной мере соответствуют требованиям стандартов [4–6]. Однако при ее создании использовали аналоговые измерительные и регистрирующие устройства, что затрудняет процесс регистрации быстроизменяющихся измеряемых величин и первичной обработки данных. Кроме того, дальнейшая обработка результатов испытаний выполняется ручным способом, что существенно снижает эффективность исследований.

В настоящей работе описана автоматизированная измерительная система испытательной установки, разработанная с целью повышения достоверности измерений, разрешающей способности и точности измерительных и регистрирующих устройств, которая реализует высокопроизводительное измерение входных величин (параметров испытаний), их накопление и обработку, а также анализ и хранение как первичных данных испытаний, так и рассчитанных механических характеристик испытываемых материалов.

Автоматизированная измерительная система (АИС УТН-10) создана с учетом современного уровня развития средств измерительной и вычислительной техники и накопленного в институте опыта разработки испытательной техники. Система включает в себя аппаратную часть и соответствующее программное обеспечение.

Аппаратурная часть измерительной системы. Блок-схема измерительной системы АИС УТН-10 приведена на рис. 1. Основным блоком измерительной системы является многофункциональный модуль накопления данных NI USB-6210 компании National Instruments, обеспечивающий высокую точность измерений при относительно высоких скоростях аналого-цифрового преобразования сигналов.

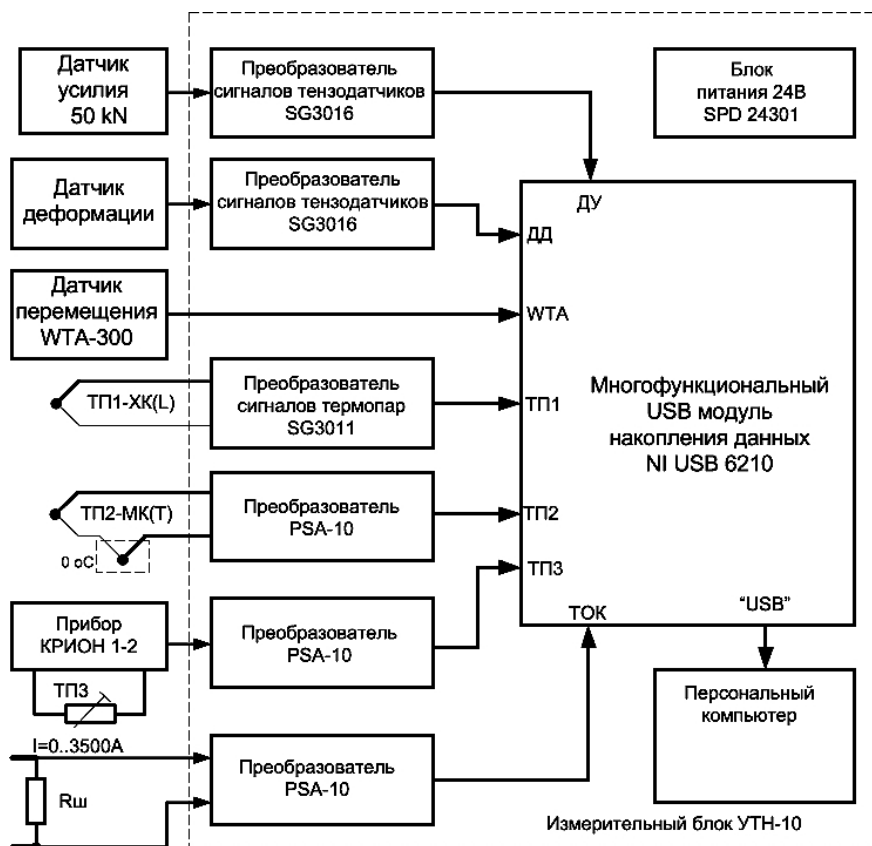


Рис. 1. Блок-схема измерительной системы АИС УТН-10.

В состав модуля входят 16 каналов аналогового ввода при однопроводном или 8 каналов при дифференциальном подключении с разрешением аналого-цифрового преобразования 16 бит и частотой преобразования до 250 кГц в одноканальном режиме. Модуль имеет также восемь цифровых входов/выходов, линии цифровой синхронизации и два 32-разрядных счетчика, которые могут работать с квадра-

турными сигналами энкодерных датчиков перемещения. Существенным преимуществом такого модуля, а также других модулей этой компании, является наличие обширного комплектного программного обеспечения, а также возможность работы в среде графического программирования LabView [7, 8].

Датчик нагрузки представляет собой специально разработанную и изготовленную конструкцию в виде полого цилиндра с восемью наклеенными и равномерно расположенными на его наружной образующей поверхности тензорезисторами, соединенными по мостовой схеме. Датчик нагрузки установлен соосно с образцом и обеспечивает измерение нагрузки в диапазоне 0...50 кН. В качестве датчиков деформации используют упругие скобы с приклеенными на них тензорезисторами, соединенными по мостовой схеме.

Перемещения активного захвата (траверсы) установки измеряли с помощью линейной шкалы WTA 1-300, обеспечивающей прецизионное, с разрешающей способностью 1 мкм, преобразование линейного перемещения в интервале 0...300 мм в квадратурный цифровой сигнал, который непосредственно поступает на входы одного из счетчиков модуля накопления данных NI USB-6210. Шкала сохраняет нормированные параметры в диапазоне изменения скорости перемещения 0...50 м/с.

Измерение температуры в различных температурных интервалах осуществляется с помощью следующих термопреобразователей: ТП1 – 73...1073 К (термопара группы ХК(L)); ТП2 – 50...473 К (термопара группы МК(T)); ТП3 – 1,5...20 К (специальный полупроводниковый термометр сопротивления типа КГГ и прибор КРИОН 1-2).

Параметры электрического тока, пропускаемого через испытуемый образец, измеряются путем определения величины падения напряжения на шунте $R_{ш}$, который представляет собой образцовую меру 75ШСМ и включен последовательно с образцом в выходную силовую цепь источника тока установки УТН-10.

Питание тензорезисторов датчиков нагрузки и деформации, а также усиление сигналов разбаланса их мостов осуществляются посредством преобразователей сигналов тензодатчиков SG-3016. Нормализация выходных сигналов термопреобразователей ТП1–ТП3 и падения напряжения на шунте $R_{ш}$ до уровня 10 В выполняется с помощью преобразователя сигналов термопар SG-3011 и преобразователей PSA-10 с установленными соответствующими диапазонами их входных и выходных сигналов.

Для питания элементов измерительной системы используется стабилизированное напряжение (24 В) от импульсного источника питания типа SPD 24301. Преобразование аналоговых сигналов, пропорциональных нагрузке, удлинению и температуре образца, длительности и амплитуде импульса электрического тока, в цифровую форму, а также ввод дискретных сигналов от линейной шкалы WTA 1-300 осуществляются многофункциональным модулем накопления данных NI USB-6210, которые передаются в персональный компьютер по последовательному USB интерфейсу.

Разработанная измерительная система АИС УТН-10 обеспечивает измерения нагрузки, удлинения образца, перемещения траверсы установки (захвата), температуры, амплитуды и длительности импульса тока в реальном масштабе времени с частотой опроса каждого из аналоговых каналов измерения 10 кГц при точности не хуже 1%. Реализованное быстроедействие системы позволяет получать достоверную информацию о процессах продолжительностью 10^{-3} с и больше, что соответствует времени динамических скачков нагрузки при прерывистой текучести, а также изменению регистрируемых параметров за время действия импульса электрического тока весьма малой длительности (до $5 \cdot 10^{-3}$ с).

Программное обеспечение измерительной системы. Разработанное программное обеспечение включает в себя программы УТН-10, HFViewer и EOMC. Программа УТН-10, разработанная в среде графического программирования [8], обеспечивает

измерение и графическое представление входных величин на экране дисплея, накопление и сохранение первичных данных на персональном компьютере. Графический интерфейс программы (рис. 2) имеет несколько рабочих вкладок, на которых расположены цифровые индикаторы измеряемых физических величин (нагрузка, перемещение, деформация, температура и электрический ток), органы управления работой АИС УТН-10, графические окна для отображения изменения измеряемых величин в реальном времени.

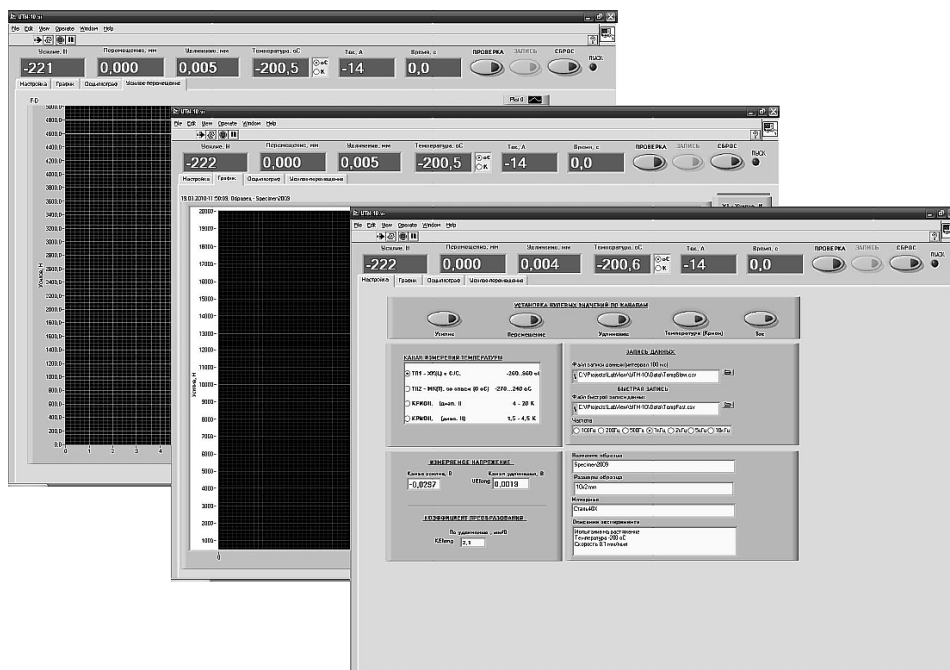


Рис. 2. Графический интерфейс программы UTN-10.

С помощью программы UTN-10 можно измерять все величины с двумя фиксированными частотами опроса: с низкой, равной 10 Гц, и высокой, которая может быть выбрана в пределах 100 Гц...10 кГц. Использование такого подхода обусловлено тем, что быстроизменяющиеся значения нагрузки и удлинения образца измеряются с высокой частотой опроса, что приводит к необходимости накопления и сохранения весьма большого объема данных. Например, при измерении пяти различных физических величин с частотой 10 кГц при продолжительности испытаний 10 мин получаем $6 \cdot 10^6$ записей или $3 \cdot 10^7$ измеренных значений. Обычные программы для обработки и представления результатов экспериментов, в том числе известные табличные процессоры, не позволяют оперировать таким объемом экспериментальных данных. Поэтому для получения массива информации небольшого объема с целью ее дальнейшего анализа с помощью распространенных программ, например Excel, осуществляется опрос с низкой частотой (10 Гц), при этом измеренные значения усредняются на интервале 100 мс. Программа одновременно записывает данные измерений в два файла с текстовым форматом с расширением *.csv: в один – “медленные” измерения с частотой опроса 10 Гц, в другой – “быстрые” измерения с частотой опроса от 100 Гц до 10 кГц.

Для анализа и дальнейшей обработки больших объемов экспериментальных данных, представленных в файлах быстрых измерений с размером в сотни мегабайт,

была разработана специальная программа HFViewer (HugeFileViewer). Программа создана в среде визуального программирования. Ее графический интерфейс, который содержит две отдельные вкладки, приведен на рис. 3. С помощью первой вкладки можно выбрать и открыть необходимый файл с экспериментальными данными, выполнить экспресс-анализ полученных данных путем автоматического построения (вывода) временных диаграмм всех измеренных величин в отдельном обзорном окне. В таблице, расположенной в нижней части этой вкладки, выводятся минимальные и максимальные значения для каждой измеряемой величины. Программа позволяет установить необходимый масштаб представления временных диаграмм в обзорном окне, выбрать цвет их отображения, скрыть или показать диаграмму конкретной измеряемой величины. Вторая вкладка графического интерфейса программы предназначена для детального просмотра полученных экспериментальных данных. Программа позволяет выбрать три физические величины, временные диаграммы которых будут отображаться в отдельных графических окнах, и установить требуемый масштаб. Программа HFViewer обеспечивает выбор какого-либо участка диаграмм, усреднение данных с заданным коэффициентом, если это необходимо, запись обработанных данных в файл и печать диаграмм на принтере.

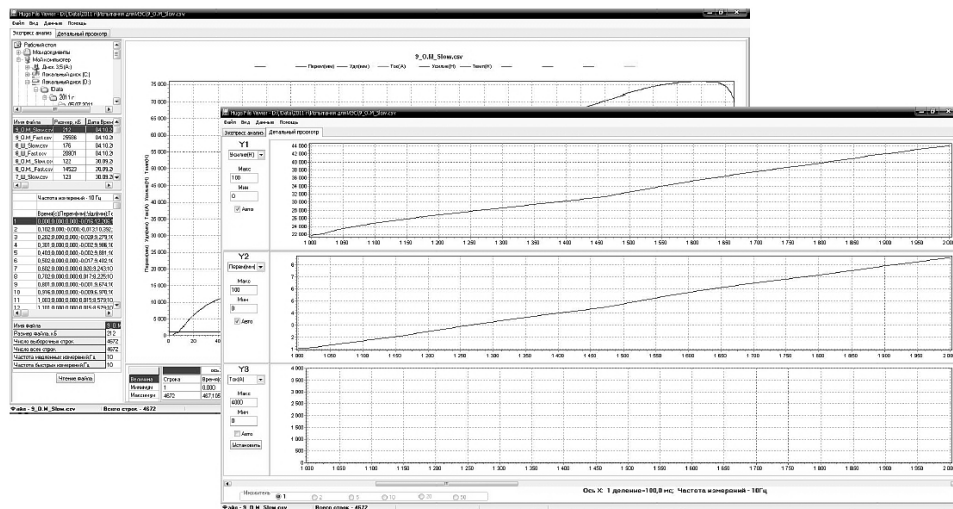


Рис. 3. Графический интерфейс программы HFViewer.

Для последующей обработки экспериментальных данных, автоматизации этого процесса, расширения возможностей графического представления и определения основных механических характеристик была создана программа EOMC (Evaluating of Mechanical Characteristics). Программа работает с файлами первичных данных, полученных с помощью программы UTN-10, и с файлами данных, которые были обработаны в программе HFViewer.

Преимуществом использования программы EOMC для обработки параметров эксперимента является возможность по данным зависимости нагрузка P – удлинение Δl в соответствии с [4] в оперативном режиме рассчитывать значения характеристик механических свойств испытываемых материалов (рис. 4). Для этого требуется задать исходные и конечные геометрические размеры испытываемого образца, а также указать тип диаграммы растяжения [4]. Остальные данные, необходимые для расчета, определяются расчетным путем и непосредственно по диаграмме растяжения средствами программы EOMC.

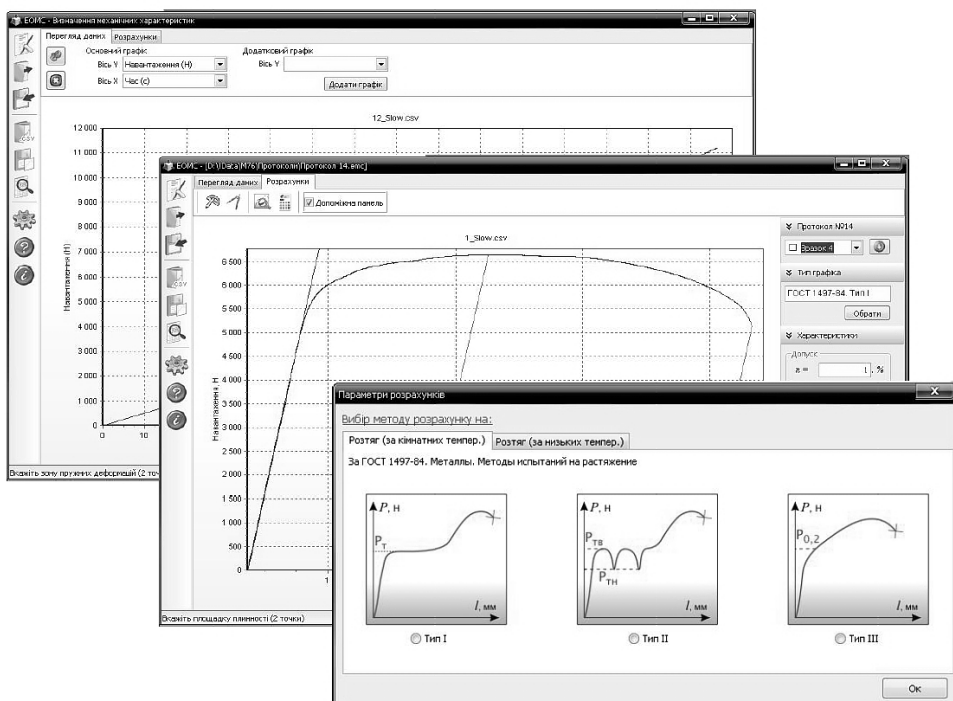


Рис. 4. Графический интерфейс программы EOMC.

Для определения значений характеристик прочности и пластичности материалов, характеризующихся монотонным изменением нагрузки при росте удлинения, необходимо провести операции, подобные графическим построениям, регламентированным нормативным документом [4] (рис. 5). С помощью курсора на линейном участке OA диаграммы растяжения, воспроизведенной на мониторе, следует отметить две произвольные точки, по которым автоматически строится базовая прямая l , совпадающая с линейным участком диаграммы и проходящая через начало координат.

Положение базовой прямой является основой для определения абсолютного и равномерного удлинения образца, нагрузок, соответствующих нагрузкам пределов пропорциональности и текучести. Так, для нахождения значения условного предела текучести в меню "Характеристики" необходимо задать допуск на величину остаточной деформации, которая устанавливается нормативно-техническими документами (например, 0,2%), программа произведет расчет значения удлинения рабочей части образца (на рис. 5 отрезок OF), соответствующего выбранному допуску, и через полученную точку F на оси абсцисс проведет прямую 2, параллельную базовой прямой l . Ордината точки пересечения прямой 2 с диаграммой растяжения (точка B) дает значение осевой нагрузки P_B , которая отвечает нагрузке условного предела текучести. При последовательном сравнении значения ординаты каждой последующей точки диаграммы с ее предыдущим значением определяется величина максимальной осевой нагрузки P_{\max} (точка C) и нагрузки, соответствующей разрушению образца P_D (точка D).

По отношению осевой растягивающей нагрузки P_B и P_{\max} к начальной площади поперечного сечения рабочей части образца F_0 определяются условный предел текучести $\sigma_T = P_B / F_0$ и предел прочности $\sigma_B = P_{\max} / F_0$ материала, а по отношению нагрузки P_D к минимальной площади поперечного сечения образца после раз-

рушения – истинное напряжение разрушения S_k . Значение абсолютного удлинения образца Δl находится как абсцисса точки пересечения прямой 3, программно проведенной из крайней точки D диаграммы растяжения параллельно базовой прямой 1, с осью абсцисс (точка E – рис. 5). Относительное удлинение образца после разрыва (в %) определяется из соотношения $\delta = (\Delta l / l_0) \cdot 100\%$ (l_0 – начальная расчетная длина рабочей части образца). Относительное сужение после разрыва (в %) находится из соотношения разницы начальной площади поперечного сечения рабочей части образца F_0 и минимальной площади поперечного сечения рабочей части образца после разрыва F_k к начальной площади поперечного сечения F_0 : $\psi = [(F_0 - F_k) / F_0] \cdot 100\%$. Погрешность расчета значений механических характеристик материала, производимого в программе ЕОМС, не превышает 0,5%.

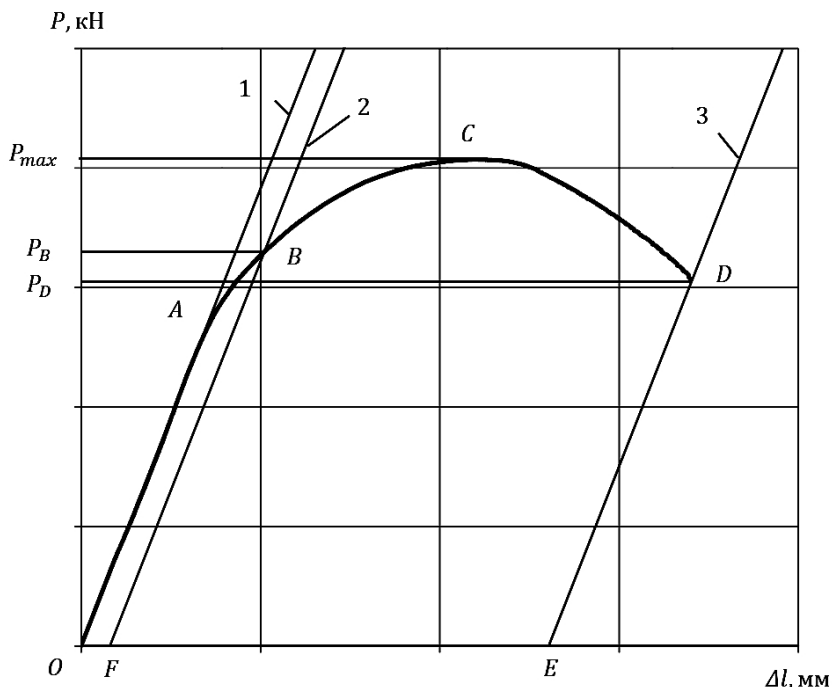


Рис. 5. Схема определения механических характеристик материала.

Для построения диаграмм, отображающих монотонно изменяющиеся в процессе квазистатического нагружения параметры, достаточно проводить измерение и накопление переменных с периодичностью 100 мс. Вполне понятно, что для измерения быстро и нелинейно изменяющихся величин (< 100 мс) такой период неприемлем, так как дает возможность зафиксировать менее 10 их значений за время исследуемого процесса, что, как правило, является недостаточным для корректного описания, например, проявления электропластического эффекта, эффектов прерывистой текучести, эффекта Портевена–ле Шателье и др. Для исследования быстро изменяющихся величин в качестве исходных данных следует использовать файлы с результатами быстрых измерений, в которых фиксируются данные испытаний с большой разрешающей способностью. Выбирая частоту опроса измерительных каналов, следует учитывать длительность и скорость изменения измеряемых величин. Например, ранее [2] установлено, что у стали 07X13N4AG20 при температуре 4,2 К длительность полного скачка нагрузки составляет $\leq 5 \cdot 10^{-2}$ с, при этом скачок состоит из “медленного” и “быстрого” участков. За это время система АИС УТН-10 при частоте опроса измери-

тельных каналов 1 кГц сможет сделать ~ 50 измерений, из которых ~ 40 на медленном участке кривой спада нагрузки, продолжительность которого $(3,7 \dots 4,4) \cdot 10^{-2}$ с, и лишь ~ 10 на быстром участке, продолжительностью $(0,3 \dots 0,9) \cdot 10^{-2}$ с. Увеличение частоты опроса измерительных каналов до 10 кГц обеспечит достаточное для точного описания кинетики скачка количество измерений (100 точек на быстром участке) на обоих участках кривой спада нагрузки. Для описания скачка нагрузки можно также использовать различные уравнения аппроксимации [9] экспериментальных данных файлов с результатами быстрых измерений вместо реализованного в программах HFViewer и ЕОМС соединения последовательных точек линейными отрезками.

Правильный выбор частоты опроса измерительных каналов позволяет также избежать существенных погрешностей, обусловленных несовпадением начала дискретных измерений и начала быстро протекающего процесса, либо погрешностей описания нелинейного процесса. Например, при измерении параметров импульса электрического тока длительностью 10^{-2} с и частоте опроса измерительных каналов 1 кГц за время одного импульса система произведет 10 измерений, что позволит отметить импульс на диаграмме. Однако такого количества точек измерений будет недостаточно для точного описания формы импульса, а зафиксированная амплитуда может быть на $\sim 10\%$ меньше действительной. Повысить точность измерений амплитуды импульса электрического тока можно, увеличив частоту опроса измерительных каналов. Так, при частоте опроса измерительных каналов 10 кГц зафиксированное значение амплитуды импульса будет отличаться от реального не более чем на $\sim 1\%$.

Учитывая необходимость выполнения потокового измерения и накопления данных измерений по нескольким каналам с высокой скоростью, существенное значение имеют технические характеристики персонального компьютера, пригодного для использования в системе АИС УТН-10. Компьютер должен иметь достаточное быстродействие, а также объемы оперативной памяти и дискового пространства. В данной системе был применен компьютер с процессором Intel® Core™2 Quad Processor Q8300 с тактовой частотой 2,50 ГГц и оперативной памятью 4 ГБ. Использование программой ресурсов компьютера по процессору составляет 25%, по оперативной памяти – 15%.

Таким образом, возможность выбора частоты опроса измерительных каналов позволяет подобрать оптимальный период измерений, при котором с большой точностью описывается кинетика исследуемых явлений.

Результаты метрологической поверки. В общем случае корректность результатов измерений, получаемых при использовании компьютерной системы сбора данных, определяется совокупностью погрешностей всех элементов измерительной цепи (датчики, системы преобразования и согласования сигналов, программное обеспечение). Метрологическая поверка измерительных каналов установки УТН-10 была проведена в соответствии с требованиями нормативных документов [10–13], согласно которым метрологические показатели определяли с использованием многократных измерений и статистических методов обработки результатов. При ее проведении применяли аттестованные рабочие эталоны и средства измерительной техники. Величины относительных максимальных погрешностей измеряемых параметров представлены в таблице.

Как видно из приведенных результатов исследований, метрологические характеристики модернизированной установки УТН-10, предназначенной для изучения механических характеристик конструкционных материалов при их испытании на растяжение, сжатие и изгиб в широком интервале температур при воздействии импульсов электрического тока, отвечают требованиям нормативных документов, предъявляемым к испытательному оборудованию, что подтверждается свидетельством о метрологической аттестации установки.

Погрешности измерения параметров установки УТН-10

Параметр	Допустимое значение [12, 13], %	Полученное значение, %	
		прямой ход	обратный ход
Основная относительная погрешность измерений и регистрации нагрузки в диапазонах: 1...10 кН 5...40 кН	$\pm 1,0$ $\pm 1,0$	$\pm 1,0$ $\pm 1,0$	$\pm 1,0$ $\pm 0,8$
Основная приведенная погрешность измерений и регистрации перемещения активного захвата в диапазоне 0...4 мм	$\pm 1,0$	$\pm 0,9$	$\pm 0,9$
Основная приведенная погрешность измерений и регистрации температуры эксперимента в диапазонах: 0...600°C -196...240°C 4,2...20 К	$\pm 1,0$ $\pm 1,0$ $\pm 1,0$	$\pm 0,2$ $\pm 0,3$ $\pm 0,9$	$\pm 0,2$ $\pm 0,3$ $\pm 0,9$
Основная приведенная погрешность измерений и регистрации силы тока в диапазоне 0...4000 А	$\pm 1,0$	$\pm 0,3$	

Вывод. Цифровая система регистрации данных АИС УТН-10 позволяет осуществлять автоматическую фиксацию и обработку результатов как поисковых испытаний, так и проводимых в соответствии со стандартизированными методами. Замена аналоговой системы индикации на систему с цифровым преобразователем позволяет обрабатывать данные испытаний в реальном времени, а также расширяет функции по графическому отображению информации, ее анализу и хранению.

Резюме

Описано автоматизовану вимірювальну систему установки для дослідження механічних властивостей конструкційних матеріалів в інтервалі температур 4,2...300 К при дії імпульсів електричного струму.

1. *Вигли Д. А.* Механические свойства материалов при низких температурах. – М.: Мир, 1974. – 374 с.
2. *Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В.* Прочность материалов при криогенных температурах с учетом воздействия электромагнитных полей. – Киев: Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2008. – 507 с.
3. *Новиков Н. В., Новогрудский Л. С.* Установка для исследования влияния электрического тока на механические характеристики металлов в интервале температур 4,2–300 К // Завод. лаб. – 1979. – **45**, № 4. – С. 374–375.
4. *ГОСТ 1497-84.* Металлы. Методы испытания на растяжение (ISO 6892-84, СТ СЭВ 471-88). – Введ. 01.01.86.

5. *ГОСТ 25.506-85*. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний материалов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – Введ. 01.01.86.
6. *ДСТУ 7305-2013*. Метали. Метод випробування на розтяг металів та сплавів за низьких та криогенних температур. – Чинний з 01.01.2014.
7. *Travis J. and Kring J.* LabVIEW for Everyone: Graphical Programming Made Easy and Fun (Third edition). – Prentice Hall, 2006. – 981 p.
8. *Бутырин В. А., Васильковская Т. А., Каратаев В. В., Материкин С. В.* Автоматизация физических исследований и экспериментов: компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе LabVIEW7. – М.: ДМК, 2005. – 265 с.
9. *Лоран П. Ж.* Аппроксимация и оптимизация. – М.: Мир, 1975. – 496 с.
10. *ГОСТ 8.009-2008*. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. – Введ. 01.10.08.
11. *МИ 1317-86*. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроль их параметров. – Введ. 01.01.87.
12. *ГОСТ 28840-90*. Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования. – Введ. 01.01.93.
13. *РД 50-482-84*. Методические указания. Машины разрывные и универсальные для статических испытаний металлов и конструкционных пластмасс. Методика поверки.– Введ. 01.01.86.

Поступила 23. 10. 2014.