

**АППАРАТУРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ  
ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ  
В РЕЖИМЕ СУБСЕКУНДНОГО НАГРЕВА**

**Э.Р. Заянов<sup>1</sup>, А.А. Гиниятуллин<sup>1</sup>, В.И. Горбатов<sup>1</sup>, А.А. Старостин<sup>2</sup>,  
И.Г. Коршунов<sup>1</sup>, В.В. Шангин<sup>2</sup>**

*Уральский государственный горный университет (1),  
Институт теплофизики УрО РАН (2)*

*Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым*

**Ключевые слова и фразы:** вакуумная ячейка; луч нагрева; субсекундный нагрев; температуропроводность.

**Аннотация:** Описывается разработанная и созданная автоматизированная аппаратура для измерения теплофизических свойств твердых тел методом температурных волн при скоростях нагрева образцов в вакуумной ячейке до  $10^3$  К/с и частотах модуляции теплового потока до 20 кГц. Также рассматривается общая схема установки на базе твердотельного лазера ИАГ-Nd типа ЛТН-103 мощностью до 200 Вт, предназначенная для сварки и резки металла.

---

Измерение теплофизических свойств металлов может существенно помочь в расчетах технологических процессах обработки с интенсивным тепловыделением. Эффективность измерения определяется, в первую очередь, возможностями аппаратуры и новыми методическими разработками в этой области.

Цель создания устройства – измерение тепловых свойств металлов и твердых веществ в области высоких температур. Для реализации данной цели необходима была разработка методов и средств, пригодных для теплофизических измерений в режиме субсекундного нагрева. Основными задачами стали: разработка аппаратных средств автоматизации нестационарных теплофизических измерений в режиме субсекундного нагрева, разработка быстродействующих автоматических электронных средств для управления нагревом малоинерционного зонда по заданному закону, экспериментальное определение температуропроводности в области высоких температур. В результате была создана аппаратура с быстрым нагревом образца ( $10^3$  К/с) лазерным излучением для измерения теплопроводности металлов.

Установка основана на базе твердотельного технологического лазера ИАГ-Nd типа ЛТН-103. Лазеры этого типа предназначены для резки и сварки листового металла. Мощность лазера достигает 200 Вт в многомодовом режиме [1].

Особенности лазерного нагрева заключаются в ограничениях, которые обусловлены необходимостью нагрева образца до заданной температуры и осуществления колебаний температуры, что требует фокусированного излучения, в то время как для метода плоских температурных волн должно выполняться условие одномерности потока хотя бы на части образца [2]. Для решения этой проблемы выбрано оптимальное соотношение между величиной области нагрева и размером площадки измерения. Поскольку работа с расфокусированным лучом обуславливает применение лазеров с большой мощностью излучения и оптическими уст-

ройствами для формирования луча, выбран лазер, использующийся в процессах сварки и резки металлов.

Еще одна проблема – флуктуации мощности нагрева, основными причинами которых являются механическое сотрясение корпуса лазера, непостоянство тока ламп накачки, термооптические искажения активных элементов, колебания в системе охлаждения и модуляция потерь резонатора. Это требует упругой амортизированной развязки оптической системы на жестком основании с остальным оборудованием, фильтрации и стабилизации тока накачки, применение акустооптического модулятора, а также подбора режима работы лазера с введением компенсирующих обратных связей на устройство регулирования выходной мощности.

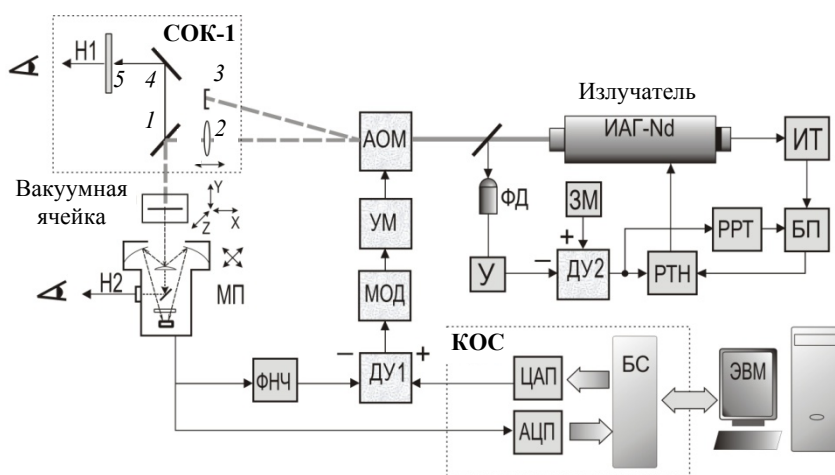
Данные особенности определили основные функции установки по стабилизации средней мощности излучения лазера, плавному нагреву со скоростью до  $10^3$  К/с, модуляции части мощности нагрева с частотой до 20 кГц, слежению за средней температурой нагрева образца, формированию сигналов цифрового управления установкой, преобразованию аналоговых сигналов для ввода в ЭВМ и обеспечению оптических юстировок и формированию луча нагрева.

Стандартная технологическая схема нагрева с помощью лазера ЛТН-103 включает блок питания БП, излучатель ИАГ-Nd и систему отклонения и фокусировки луча СОК-1 (рис. 1).

Нагрев образца происходит в вакуумной ячейке. Для выполнения задач управляемого нагрева в ячейке с выполнением условий метода плоских температурных волн и автоматизации измерений дополнительно введены следующие устройства:

- 1) контроллер обработки сигналов (**КОС**) и ЭВМ;
- 2) контур стабилизации мощности лазерного излучения через регулятор тока накачки (**РТН**);
- 3) контур слежения за средней температурой образца через микропирометр (**МП**) и акустооптический модулятор (**АОМ**);
- 4) цепь модуляции мощности греющего излучения с цифровым задатчиком через КОС и АОМ;
- 5) система юстировки и формирования луча нагрева.

Лазерное излучение может быть сконцентрировано на образце, не затрагивая элементы конструкции ячейки. Это основное преимущество обеспечивается оптико-



**Рис 1. Функциональная схема автоматизированной установки лазерного нагрева в вакуумной ячейке**

механическим устройством для фокусировки и юстировки луча нагрева. Основные элементы оптической схемы размещены на общем основании в виде П-образного стального профиля длиной 1500 мм. Конструкция имеет два уровня. На верхнем уровне смонтированы излучатель, АОМ, СОК-1, юстировочные приспособления; на нижнем уровне расположены микропирометр, контроллер обработки сигналов, электронные блоки. Миниатюрная конструкция вакуумной ячейки позволила построить юстировочные приспособления на основе элементов точной механики микроскопа и разместить всю сборку между устройствами СОК-1 и МП ( $\approx 200$  мм).

Система юстировки имеет три подвижные части. Перемещение ячейки осуществляется в трех плоскостях микрометрическими винтами. Формирователь луча в устройстве СОК-1 имеет одну степень свободы для перемещения линзы вдоль оптической оси. Подвижная часть МП обеспечивает настройку положения площадки визирования на образце регулированием наклона зеркального объектива.

Дополнительные настройки обеспечивают регулировку положения излучателя, АОМ, СОК-1 относительно общей оптической оси.

В установке лазерного нагрева используется микропирометр, измеряющий отношение потоков непосредственно по излучению в двух участках спектра [3]. Поскольку пирометр используется в модуляционных измерениях, то температура определяется по переменной составляющей сигналов фотодатчиков, которые изготовлены по пленочной технологии из халькогенидов свинца PbS и PbSe.

Одна из основных функций установки заключается в подавлении флуктуаций мощности излучения лазера [5]. Для этого вся конструкция, несущая оптические элементы, развязана с рабочим столом при помощи резиновых амортизаторов. Однако этих мер недостаточно. Излучатель лазера охвачен первым контуром стабилизации по току накачки. С помощью фотодатчика (ФД) и усилителя (У) измеряется выходная мощность излучения и подается на вход диффузилителя ДУ2. На второй вход подано напряжение с датчика мощности (ЗМ). Выходной сигнал диффузилителя управляет составным транзисторным регулятором тока накачки РТН, включенным последовательно в цепь питания излучателя от блока питания (БП). Напряжение управления транзисторным регулятором тока накачки через регулятор рабочей точки (РРТ) воздействует на вход управления тиристорами БП с целью обеспечения условий работы РТН. На второй вход управления блока питания поступает напряжение с измерителя тока (ИТ). Низкочастотные флуктуации (до 5 Гц) обрабатываются через блок питания, а высокочастотные (до  $10^3$  Гц) – через транзисторы РТН. Этими мерами флуктуации выходной мощности снижаются до уровня менее 1 % от средней мощности при значительном превышении порога генерации. Второй контур подавления флуктуаций работает относительно температуры образца в ячейке. Тепловое излучение образца воспринимается фотодатчиками пирометра. Через фильтр низких частот (ФНЧ) пирометрический сигнал поступает на вход диффузилителя ДУ1. На второй вход подано напряжение цифрового датчика температуры образца. Разностный сигнал через модулятор МОД и усилитель мощности УМ управляет мощностью высокочастотных колебаний частоты 50 МГц для возбуждения акустооптического модулятора АОМ.

Высокочастотные электрические колебания через пьезопреобразователи акустооптического модулятора возбуждают продольную бегущую акустическую волну в кварцевой призме модулятора. Вследствие фотоупругого эффекта акустические колебания вызывают локальные изменения показателя преломления в кварце. В результате дифракции часть излучения, прошедшего через модулятор, отклоняется от первоначального направления и поглощается заглушкой 3 в устройстве СОК-1. В режиме дифракции Брэгга, управляя электрической мощностью

возбуждения АОМ, можно добиться перераспределения до 90 % энергии излучения между 0 и 1 дифракционными максимумами, если угол падения лазерного излучения  $\Theta_B$  к фронту акустической волны соответствует условию Брэгга

$$\sin\Theta_B = \lambda/2\lambda_A,$$

где  $\lambda$  – длина волны падающего лазерного излучения;  $\lambda_A$  – длина акустической волны. Для модулятора МЗ-305  $\Theta_B \approx 15'$ .

Максимальная дифракция соответствует плоскости поляризации света, перпендикулярной к направлению распространения звука, и уменьшается в несколько раз для ортогональной поляризации. Из-за неравномерного распределения излучения накачки по сечению активного элемента, характерного для конструкции квантрона в ЛТН-103, излучение лазера имеет преимущественное направление поляризации в плоскости, перпендикулярной направлению «лампа – активный элемент». Причем в некоторых областях мощности накачки может существовать излучение только с этой поляризацией. Модулятор устанавливается с учетом этого обстоятельства, что значительно повышает его эффективность. Модулированное излучение после АОМ отклоняется интерференционным зеркалом 1 в устройстве СОК-1 и фокусируется на образце в вакуумной ячейке. Размер луча в плоскости образца регулируется смещением линзы 2, при этом смещается положение фокуса оптической системы. Образец располагается в плоскости перед фокусом. Тепловое излучение нагретого образца проходит через зеркало 1 и отклоняется в направлении наблюдения Н1 зеркалом 4. Заградительный фильтр 5 вырезает спектральную компоненту лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм, просочившуюся через зеркало 1 в направлении Н1. Обратную сторону образца можно наблюдать через оптическую систему пирометра в направлении Н2.

Колебания температуры образца в полосе пропускания фильтра низких частот будут подавляться за счет действия отрицательной обратной связи с ошибкой, определяемой петлевым усилением. Равенство заданной и измеренной температур соответствует нулевому сигналу на выходе ДУ1. Усиление по контуру зависит от температуры образца, так как меняется чувствительность фотодатчика пирометра. Большой коэффициент передачи может привести к выявлению автогенерации в кольце обратной связи. В данном случае это явление подавляется логарифмированием сигнала пирометра (на схеме не показано).

Управление работой установки и измерение сигналов пирометра осуществляется через контроллер обработки сигналов. Основные элементы контроллера:

- коммутатор сигналов пирометра К;
- ЦАП и быстродействующий АЦП;
- блок связи с ЭВМ (БС).

Контроллер предназначен для измерения и накопления сигналов фотодатчиков пирометра, а также для формирования управляющих воздействий в установке лазерного нагрева (рис. 2). Контроллер программируется от внешней ЭВМ через отдельные 16-разрядные шины адреса и данных. Необходимость создания специализированного контроллера возникла в связи со спецификой входных сигналов и управляющих воздействий [4].

Общий принцип обработки сигналов в контроллере заключается в жесткой синхронизации процессов модуляции нагрева и измерения температурных колебаний. Для этого используются общие сигналы из блока синхронизации. Основная частота кварцевого генератора делится на  $2^n$  управляемым цифровым делителем в соответствии со значением кода  $n$  в регистре RG4. Блок вырабатывает синхропоследовательность для АЦП ADC и счетчиков адреса накопителя и

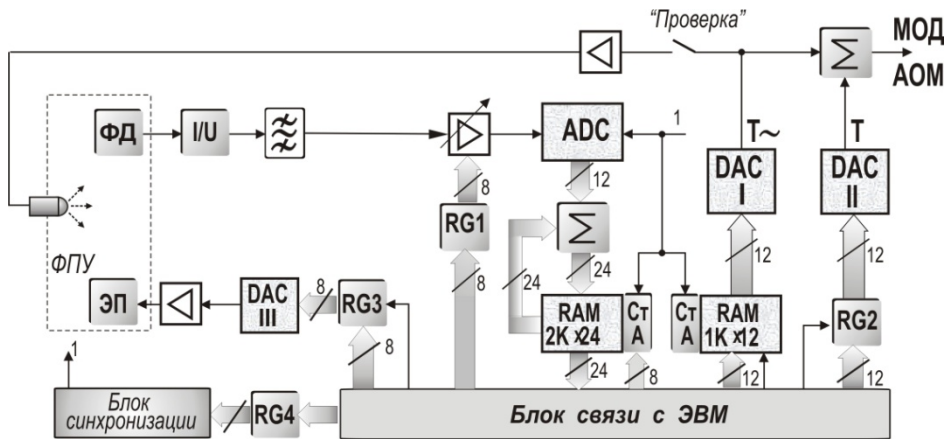


Рис 2. Контроллер обработки сигналов

модулятора. В результате каждый отсчет АЦП жестко привязан во времени к соответствующему значению модулирующей функции, например синусоиды.

Пирометрические сигналы содержат медленно меняющуюся и малую модуляционную компоненты. Для точного преобразования переменной составляющей осуществляется ее поперодное выделение из общего сигнала и усиление перед преобразованием. Сигнал усиливается схемой с цифровым управлением и преобразуется в 12-разрядный код на АЦП. При частоте модуляции 20 кГц частота выборки достигает  $\sim 1,25$  МГц. Выходной код поступает в поперодный накопитель через сумматор, где производится наложение соответствующих отсчетов каждого периода на ранее накопленное значение, то есть реализуется алгоритм цифрового синхронного детектора. Период выделения и накопления содержит два периода частоты модуляции для последующей обработки. Количество циклов усреднения программируется от ЭВМ (8-разрядный код).

Выдача модулирующего воздействия производится через сумматор задания средней температуры образца и измерительных колебаний. До этого сигналы формируются отдельно. На ЦАП поступает последовательность 12-разрядных кодов модулирующей функции из массива RAM 1Kx12 синхронно с отсчетами АЦП. Кольцевой счетчик адреса обеспечивает круговую выборку значений периодической функции, предварительно занесенных в RAM. Управление температурой производится через второй ЦАП DAC II и регистр RG2 занесением 12-разрядных кодов из ЭВМ перед измерениями на очередной температурной точке.

Вспомогательная функция контроллера заключается в регулировании тока через элемент Пельтье ЭП в блоке охлаждаемых фотоприемников пирометра. Необходимый код заносится в регистр RG3 и преобразуется на третий ЦАП DAC III. Следующий затем преобразователь напряжения в ток обеспечивает питание ЭП током до 2 А. Возможно выполнить проверку функционирования всех узлов контроллера в автономном режиме.

Комплекс средств автоматизации измерений использовался для определения свойств металлов, сплавов и композиционных материалов в организациях, с которыми велись хозяйственные работы (Институт проблем материаловедения НАН Украины (г. Киев), НИИ Автопром (г. Москва), НПО «Искра» (г. Пермь)).

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ. Проекты № 07-08-00750а, 06-08-01324а.*

### Список литературы

1. Лазеры на алюмоиттриевом гранате с неодимом / Г.М. Зверев [и др.]. – М. : Радио и связь, 1985. – 144 с.
2. Ананьев, Ю.А. Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения / Ю.А. Ананьев. – М. : Наука, 1979. – С. 268–284.
3. Поскачей, А.А. Оптико-электронные системы измерения температуры / А.А. Поскачей, Е.П. Чубаров. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 248 с.
4. Программируемый автономный регистратор аналоговых и дискретных сигналов / А.А. Старостин [и др.] // ПТЭ. – 1997. – № 5. – 168 с.
5. Голяев, Ю.Д. Стабилизация мощности излучения непрерывного лазера на гранате с неодимом / Ю.Д. Голяев, К.Н. Евтюхов, Л.Н. Капцов // Радиотехника и электроника. – 1980. – Т. 15, № 1. – С. 2467–2469.

---

### Equipment for Measuring Thermal Diffusivity in Sub-Second Heating Mode

E.R. Zayanov<sup>1</sup>, A.A. Giniyatullin<sup>1</sup>, V.I. Gorbatov<sup>1</sup>, A.A. Starostin<sup>2</sup>,  
I.G. Korshunov<sup>1</sup>, V.V. Shangin<sup>2</sup>

*Urals State Mining University (1);  
Institute of Thermal Physics, Urals Branch of RAS (2)*

**Key words and phrases:** hearing ray; sub-second heating; thermal diffusivity; vacuum cell.

**Abstract:** The designed and constructed automated equipment for measuring thermo-physical properties of solid bodies by method of temperature waves while heating samples in the vacuum cell at the speed up to  $10^3$  K/s and frequency of modulation of heat flow up to 20 kHz is described. General flow chart of the plant constructed on the basis of solid-body laser IAG-Nd of LTN-103 type intended for welding and cutting of metal with capacity up to 200 W is blocked out.

---

### Apparatur für die Messung der Temperaturleitfähigkeit im Regime der Subsekundenerwärmung

**Zusammenfassung:** Es wird die entwickelte und geschaffene automatisierte Apparatur für die Messung der wärmephysikalischen Eigenschaften der festen Körper von der Methode der Temperaturwellen bei den Geschwindigkeiten der Erwärmung der Muster in der Vakuumzelle bis zu  $10^3$  K/s und den Frequenzen der Modulation des thermischen Stroms bis zu 20 kHz beschrieben. Es wird auch das allgemeine Schema der Anlage auf Grund des Festkörperlasers IAG-Nd des Typus LTN-103, das für das Schweißen und das Schneiden des Metalls mit der Leistung bis zu 200 W vorherbestimmt ist, betrachtet.

---

### Appareillage pour la mesure de la conductibilité de température dans le régime du chauffage de sous-secondes

**Résumé:** Est décrit un appareillage élaboré et automatisé pour la mesure des propriétés thermophysiques des corps solides par la méthode des ondes de température avec les vitesses de chauffage dans une cellule de vide jusqu'à  $10^3$  K/s et des fréquences de la modulation du courant thermique jusqu'à 20 kHz. Est aussi examiné les schéma générateur général de l'installation à la base du laser à base solide IAG-Nd du type LTN-103 destiné au soudage et à la coupe du métal de la puissance de 200 W.