

ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ВИРТУАЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ КОНТРОЛИРУЕМОГО ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ СВС В ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЯХ

© 2004 И. В. Шишковский¹, Ю.Г. Морозов²

¹Самарский филиал Физического института им. П. Н. Лебедева РАН

²Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН

Представлено описание программно-аппаратного комплекса для измерения электродвижущей силы и температурных пиков, возникающих во фронте волны гетерогенного горения при совмещении процессов СЛС и СВС, с обработкой пространственно-временных данных через АЦП на компьютере. Использование наработок ЗАО "L-Card" позволило оформить и управлять процессом измерений в виде виртуального стенда, созданного в среде LabView.

Введение

Одним из перспективных направлений по созданию функциональных градиентных материалов и изделий (ФГМИ) на их основе методом послойного селективного лазерного спекания (СЛС) признается идея совмещения данного метода с процессом Самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [1]. Управлять СВС-процессом путем внешнего энергетического воздействия (ультразвук, лазерный и/или электронный пучок, электрический ток и/или магнитное поле т.п.) предлагалось уже давно. Оказывается, что таким образом можно обрести дополнительную степень свободы в сложной системе взаимодействий и погасить негативную неустойчивость динамики СВС-процессов [2, 3]. Внешние электрическое и магнитное воздействия не сводятся лишь к дополнительному тепловому подогреву реагирующей смеси. Так, определенным подбором частоты и амплитуда внешнего поля по отношению к собственным частотам колебаний системы – порошковая смесь плюс конечный продукт синтеза – можно инициировать ряд явлений резонансного характера. Поэтому внешнее лазерное излучение (ЛИ), как один из способов реализации такого резонансного состояния, легко управляемое и энергоемкое, имеет большие перспективы в качестве источника необходимых электромагнитных полей.

Заметим, что в принципе совмещение

процессов СВС и СЛС является трудно управляемым. Начало реакции СВС может "опередить" или "отстать" от собственно процесса спекания и произойдет сгорание (недогорание) исходных компонентов. Поэтому главной задачей лазерного синтеза является прецизионный подбор режимов лазерного воздействия (ЛВ), при которых оба процесса (СВС и СЛС) находились бы в динамическом равновесии.

К настоящему времени [4–9] имеются следующие примеры успешного совмещения технологических процессов СВС и СЛС для смеси:

- металлов для синтеза интерметаллидных фаз: Ni + Ti, Ni + Al, Ti + Al;
- оксидов для синтеза керамики: TiO₂ + ZrO₂ + PbO, Al(Al₂O₃) + Zr(ZrO₂);
- оксидов для синтеза ферритов: BaO₂ + Fe₂O₃ + Cr₂O₃ + Fe, Li₂CO₃ + Fe₂O₃ + Cr₂O₃ + Fe.

В работе [10] было показано, что в условиях фазовых превращений в волне горения при СВС, наблюдаются характерные электрические явления, названные автором электродвижущей силой горения и связанные с кинетикой химического реагирования и особенностями диффузионных процессов в исходной шихте. Обнаружение подобных явлений и развитая автором методика *динамической ионографии* позволили поднять на новый уровень диагностические исследования СВС-процессов и расширить возможности

эффективного контроля над характером химических превращений в волне гетерогенного горения в системах с конденсированными продуктами химической реакции.

Так было выявлено, что в процессе горения, величина и тип регистрируемого сигнала, могут изменяться в зависимости от состава компонентов и газовой среды в изучаемой СВС-системе. По введенной в [10] экспериментальной классификации можно выделить три основных типа изменений электрических сигналов (E_c) с течением времени (см. рис. 1 и табл. 1). I-тип - при прохождении фронта волны горения через регистрирующий зонд в основном наблюдается резкий положительный пик электрического сигнала. II-тип - сходная зависимость, но знак сигнала - отрицательный. III-тип: электрический отклик горячей системы содержит как положительную, так и отрицательную составляющие.

Эксперименты по измерению проводимости СВС-систем в процессе горения установили, что регистрируемая ЭДС горения снимается с узкой зоны (между реагирующими

компонентами и полностью прореагировавшим электрически нейтральным продуктом), перемещающейся вместе с фронтом волны горения.

В табл. 1 представлены данные анализа электрических сигналов ряда интересных для совмещения СЛС и СВС процессов - систем: самые максимальные положительные и отрицательные значения E_c (E_c^{\max}) и интервал времени t между нулевыми уровнями первого пика $E_c - \Delta t$ (без учета его тонкой структуры). Кроме того, в таблице имеются и зарегистрированные термокинетические параметры процесса - максимальная температура горения T_c и скорость горения U , а также информация о составе газовой среды.

Очевидно, что экспериментальное исследование условий реализации процесса инициирования и протекания экзотермической реакции горения в исследованных нами порошковых средах при строгом контроле хода самой реакции за счет дозирования лазерной энергии точно в пятне обработки невозможно без изучения подобных явлений.

Это позволит оптимизировать тот диа-

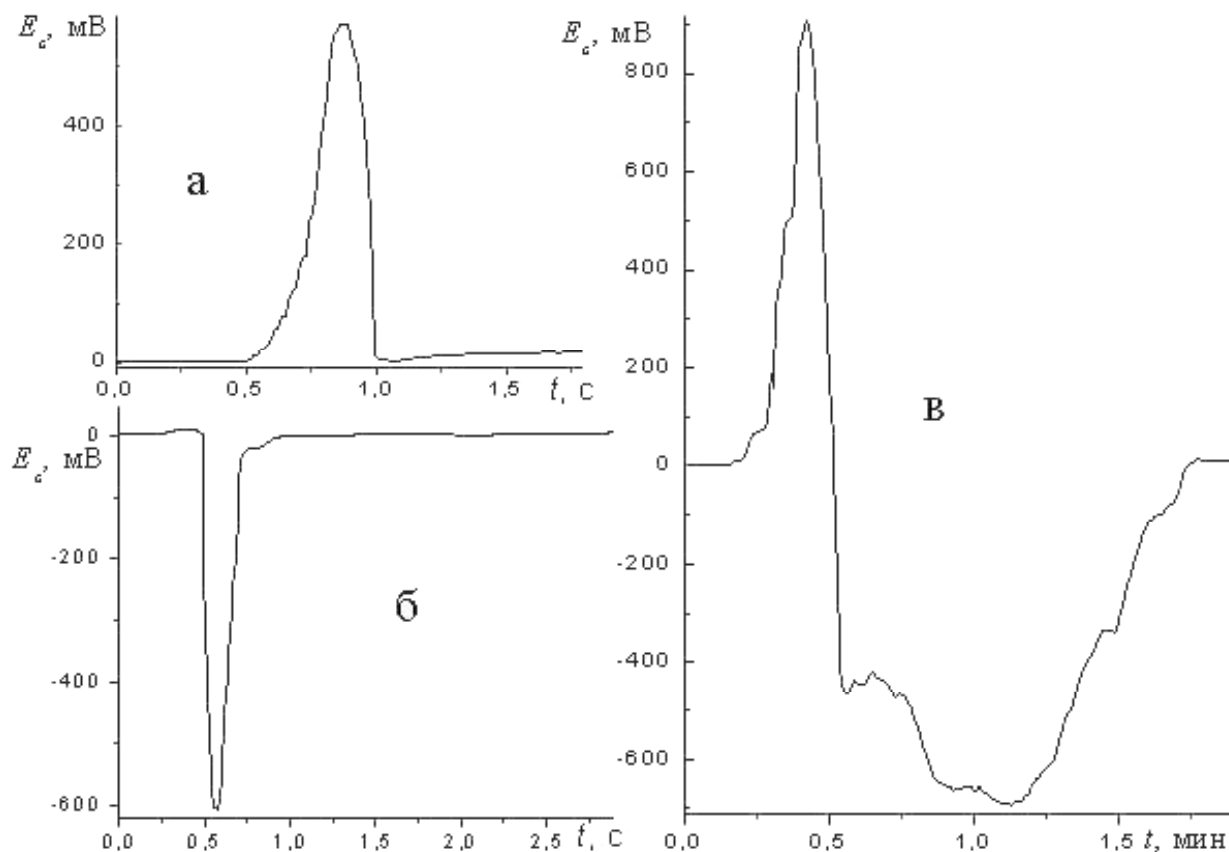


Рис. 1 Электрический отклик от горящих СВС - систем: а) - I типа (Ni + Al), б) - II типа (Ti + 2B), в) - III типа ($2BaO_2 + 3Cu + 0,5Y_2O_3 + NaClO_4$)

Таблица 1. Электро - и термокинетические характеристики процесса горения в некоторых классах СВС - систем

№	СВС - система	E_c^{max} , мВ		Тип	Δt , с	T_c , К	U , мм/с	Среда
		+	-					
1	Ni + Al	570	0	I	0,6	1900	10,0	Ar
2	Ti+воздух	5	40	II	1,8	-	-	воздух
3	0,53Ti + 0,47TiN	40	80	III	20	2450	4,0	N ₂
4	Fe + Ti	40	30	III	0,7	1550	2,0	воздух
5	Fe + 2Al	3	17	III	1,0	1100	0,3	Ar

пазон параметров ЛВ (мощность, скорость сканирования, диаметр пятна ЛИ и т.д.) и требования к порошковым композициям (их дисперсность, состав, способы приготовления), при которых данный режим спекания принципиально возможен.

Поэтому целью настоящей работы было разработка схемы и виртуального стенда для измерения электродвижущей силы и температурных пиков, возникающих на фронте волны горения, с обработкой пространственно-временных данных через АЦП на компьютере. Использование наработок ЗАО “Л-Кард” позволяет оформить и управлять процессом измерения в виде виртуального стенда, созданного в среде LabView.

Схема эксперимента и оборудование

Технологический стенд для СЛС-порошковых композиций состоял из: лазера на YAG:Nd³⁺ (Квант-60, длина волны излучения $\lambda = 1,064$ мкм), работавшего в непрерывном режиме; дефлекторов для сканирования ЛИ по поверхности; управляющего процессом персонального компьютера; сменных фокусирующих линз $f = 149$ и 336 мм (диаметр лазерного пучка в фокусе $d_{\text{л}} = 50$ и 100 мкм, соответственно); механизма для нанесения и разравнивания порошковой смеси; цилиндрической платформы, перемещающейся в вертикальном направлении. Сам процесс СЛС и схема стенда были подробно описаны ранее в работе [11]. Скорость сканирования ЛИ по поверхности V могла изменяться аппаратно в широких пределах, а мощность ЛВ P от $0,5$ до 21 Вт и контролировалось прибором ТИ-3.

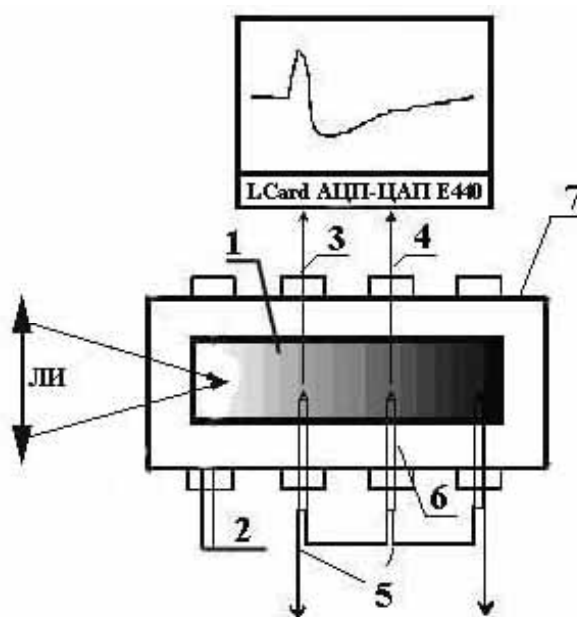


Рис. 2. Схема установки для изучения электро-термических явлений в СВС - процессах: 1 – исследуемая шихта, 2 – входы для измерительных устройств, 3 – опорный зонд, 4 – регистрирующий зонд, 5 – термопары, 6 – изоляторы

Схема установки для изучения электрических и термических явлений в контролируемых лазером СВС-процессах представлена на рис. 2. Свободно насыпанная порошковая композиция размещается на платформе 7. При заданных размерах зоны ЛВ, например, 15×30 мм и толщине спекаемых монослоев $\sim 0,5-3$ мм на расстоянии ~ 5 мм от края зоны спекания и на глубину $\sim 3-5$ мм вводились пассивные электрические зонды (опорный и регистрирующий), скомбинированные в единую измерительную ячейку. В целом электроды располагаются как можно ближе к зоне спекания, но гораздо дальше, чем до краев платформы 7, куда насыпается порош-

ковая смесь. Этим обеспечивается исключение влияния краев (стенки) платформы на фронт реакции горения. Для одновременно-го определения термических и кинетических характеристик исследуемого процесса, вблизи каждого из зондов были размещены также спаи подходящих термопар. Заметим, что по методике работы [12] предполагается, что фронт реакции горения плоский и электроды (опорный и регистрирующий) следует располагать по разные стороны от зоны реакции (зоны ЛВ, например, на рис. 2 измерительной ячейкой следует считать не 3 и 4 электроды, а 3 и 5 и т.д.). Нами предполагается проведение измерений и по этой схеме. При синтезе интерметаллидов нами использовались хромель-алюмелевые термопары (диапазон температур 0-1200 °С, до 52 мВ), а в области более высоких температур – W+Re(5%)-W+Re(20%) (диапазон 0-2400 °С, до 32 мВ). Сверху на платформу осуществлялось воздействие ЛИ. Сканированием лазерного пучка по поверхности платформы можно реализовать любой контур обхода (мандр, растр). Через редуктор газового баллона при необходимости в зону обработки осуществлялась подача инертного или реагирующего газа.

Для оцифровки экспериментальных данных по схеме рис. 2 использовался 16 канальный внешний модуль АЦП/ЦАП E-440 соединенный с персональным компьютером шиной USB 1.1 (совместимо с USB 2.0). Его технические характеристики представлены, например, в Интернете на сервере ЗАО «Л-Кард» по адресу <http://www.lcard.ru/e-440.php3>.

Внешняя USB шина данных позволяет повысить помехозащищенность измерительного стенда, развязать наводки из зоны ЛВ и внутри компьютера. Применение цифрового сигнального процессора ADSP 2185M позволяет разгрузить процессор компьютера от управления вводом/выводом и первичной обработки сигналов, программно реализовать выбор диапазонов измерения, частоту дискретизации и осуществить конфигурации входов АЦП как дифференциальных и/или с общей «землей». Синхронизация в E-440 возможна как по внешнему синхросигналу, так и по уровню входного сигнала. Дополни-

тельно E-440 имеет «медленные» цифровые TTL входы и выходы.

Виртуальный измерительный стенд в среде LabView

Предварительные эксперименты [10] выявили, что при распространении фронта волны горения через зону действия опорного и регистрирующего зондов (при нулевом потенциале зондов) между ними возникает электрический сигнал в диапазоне от нескольких до сотен мВ разного знака, очень похожий на сигнал, наблюдаемый в случае применения обычных Лэнгмюровских зондов при измерениях ионизации в газовых пламенах, когда потенциал зонда равен потенциалу пламени. Далее, отдельными исследованиями было установлено, что наблюдаемые эффекты не связаны с физическими процессами накопления статического электричества в порошковой композиции, поскольку на эти эффекты не влияет заземление любого из зондов.

Термоэлектрическая эмиссия при СВС в системе газ «твердое тело» не принималась во внимание не только ввиду использования прямой схемы электрического зондирования порошковой композиции, но также из-за проведения экспериментов при нормальных давлениях и довольно широком спектре температур горения большинства исследованных систем.

Специальные эксперименты по сравнению временных зависимостей сигнала, полученных в стандартном режиме исследования (он описан выше) и при последующем локальном лазерном нагреве уже сгоревшего образца, также никаких электрических сигналов не обнаружили. Это позволяет не учитывать возможные электронные (термоэлектрические или контактные) явления (ввиду их малости по сравнению с E_{γ}) в изучаемых системах и заставляет искать причину появления сигнала в зарядообразовании при ионизации исследуемой среды в процессе ее горения.

С помощью визуального контроля было установлено, что ЭДС сигнал становится заметным только при приближении фронта к регистрирующему зонду (рис. 2). После это-

го сигнал измеряется в виде разности электрических потенциалов по отношению к опорному зонду, находящемуся в образовавшемся после горения продукте (спекшемся монослое). Исследование влияния материала, формы и размеров зондов на параметры электрического сигнала и показало, что величина сигнала не зависит от характеристик опорного зонда и расстояния между зондами, а полностью определяется параметрами процесса горения конкретной СВС - системы и параметрами регистрирующего зонда. С учетом минимизации теплоотвода при сохранении необходимой прочности для проведения многократных экспериментов, в дальнейших исследованиях планируется использовать стандартные зонды, изготовленные из вольфрамовой проволоки диаметром 0,2 мм. Ожидается, что использование таких зондов с низкой химической активностью и отработка методики измерения позволит улучшить стабильную воспроизводимость величины и характера наблюдаемого сигнала для различных СВС - систем.

Из 16 дифференциальных каналов 8 каналов (4 зонда) оцифровывали показания ЭДС, а остальные 8 (4 термопары) – показания температуры. Сигнал – напряжение ($\mu\text{В}$), снимаемое с каждой термопары считается относительно медленно меняющийся характеристикой. С другой стороны, при скоростях перемещения лазерного источника соизмеримых или более скорости перемещения фронта СВС горения ($\sim 1 - 10$ мм/с см. по табл. 1) необходимо осуществлять оцифровывание ЭДС сигнала с частотой $\sim 1 - 10$ кГц. Поскольку скорость изменения температуры при лазерном спекании составляет $\sim 10^2 - 10^4$ °К/с, то оцифровка сигнала с термопары должна осуществляться с также высокой частотой ~ 10 кГц. Хотя гальваноразвязка в нашей схеме отсутствовала, но использование дифференциального включения и кабелей “витая пара” в экране с общей землей относительно 3 – го входа AGND – “аналоговая земля” на внешнем аналоговом разъеме DRB-37M платы E-440 должны были, по нашему мнению, снять проблемы помех. Общий контур заземления проводился отдельным проводом (рис. 3). Кроме того, входное сопротивление для

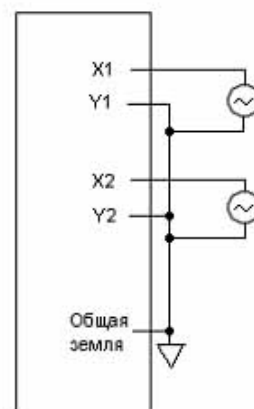


Рис. 3. Подключение контура заземления

ЭДС зондов на используемых диапазонах измерения (см. рис. 1 и табл. 1) было не менее 100 Мом. В принципе наличие цифрового сигнального процессора ADSP позволяет увеличить количество ЭДС зондов и термопар. Однако при всей привлекательности этого решения (более точная картина процессов СВС), от него пришлось отказаться по причине отсутствия мест для расположения этих оконечных устройств (см. схему на рис. 2 и ограниченные геометрические размеры зоны лазерного спекания). Однако в перспективе эта возможность будет нами использована.

Например, использование данных с большого количества термопар можно очень точно воспроизвести не только динамику продвижения фронта горения, но и построить эпюры тепловых полей при лазерном спекании. Очевидно, что решение такой задачи аналитически не представляется возможным.

На рис. 4 представлен передний план панели виртуального стенда, на котором расположены органы управления процессом измерения ЭДС горения и температуры в различных точках порошковой композиции по мере продвижения фронта горения (лазерного пучка) по поверхности порошка (платформы). Слева расположены окна, на которые выводится информация о загрузке LBIOS платы E-440, ее серийный номер, тип и частота работы сигнального процессора DSP, наличие и состояние ЦАП. Следующий блок показывает номер измерительного устройства (в данном случае термопары), ее тип, частоту опроса по задействованному каналу. Температура измеряется относительно ком-

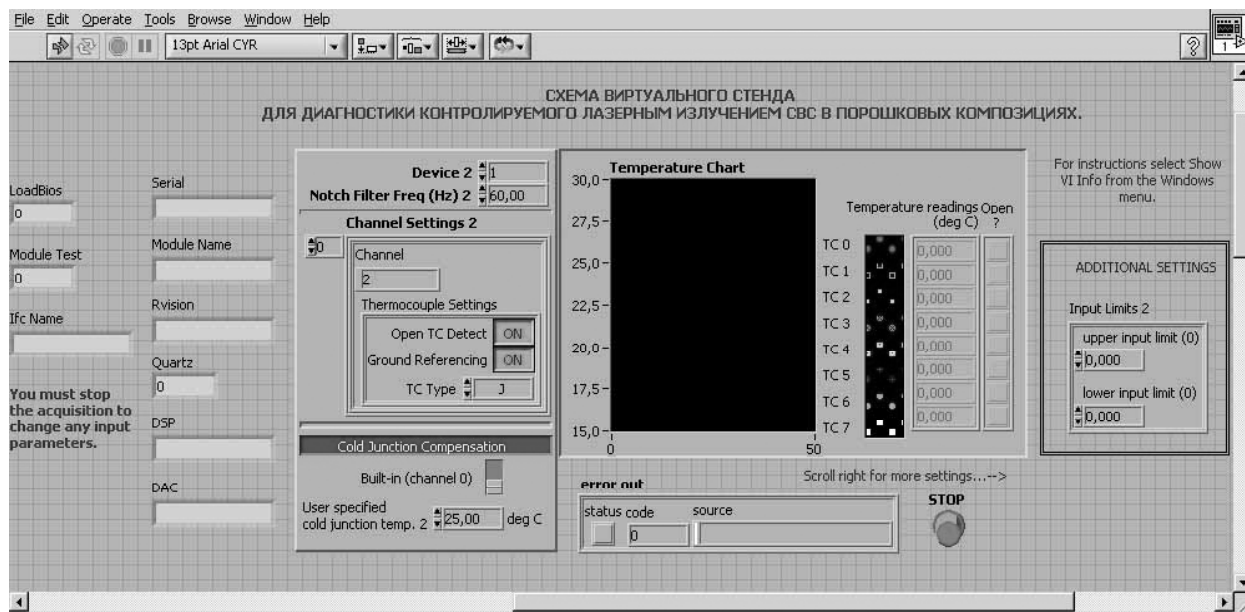


Рис. 4. Панель виртуального стенда

натной (холодный спай). В центре на графике выводится результат измерения температуры.

Цифровые и графические табло помогают интерактивно отслеживать процесс измерения. Они непосредственно связаны через E-440 с термопарами и электрическими зондами. Оформленный в виде оболочки интерфейс обеспечивает дистанционное управление между измерительными зондами, АЦП и виртуальным пунктом управления, осуществляет сбор и статистическую обработку данных для последующего вывода в виде графиков. Фильтрация помех может быть осуществлена ресурсами LabView. Использование указателя на массив (Array Data Pointer) или дескриптор (Array Handle) позволяет передавать данные в другие программы (MatLab/Simulink, Wavelet Toolbox, Signal Processing Toolbox/). Представляемые LabView возможности обработки SQL запросов, поддержка удаленных баз данных, создание CGI и использование G Web Server упрощает разработку дистанционных измерительных систем, работающих, в том числе и через Интернет. Радио кнопки реализует виртуальное подключение измерительных трактов. Табло из сигнальных лампочек показывает, какой тракт (способ измерения) в настоящее время активизирован.

Таким образом, в настоящей статье пред-

ставлено описание схемы и программная реализация виртуального стенда для измерения электродвижущей силы и температурных пиков, возникающих на фронте волны горения, с обработкой пространственно – временных данных через АЦП на компьютере. Проведение экспериментов по измерению электродвижущей силы в процессе контролируемого синтеза и выявление пространственно-временных закономерностей развития реакции горения по отношению к движущемуся лазерному источнику.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 04-03-96500-p2004 Поволжье_a, 04-03-97204-p2004 Научоград_a и 02-03-81014 Бел2002_a).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shishkovsky I. V.* Synthesis of functional gradient parts via RP methods // Rapid prototyping Journal. V. 7. N 4.
2. *Морозов Ю. Г., Кузнецов М. В., Мержанов А. Г.* Нетепловое воздействие электрического поля на процесс СВС // Доклады РАН. 1997. Т. 352. № 6.
3. *Морозов Ю. Г., Кузнецов М. В.* Влияние магнитного поля на электродвижущую силу горения // ФГВ. 1999. Т. 35. № 1.
4. *Шшиковский И. В., Макаренко А. Г., Петров А. Л.* Исследование условий СВС ин-

- терметаллидов при селективном лазерном спекании порошковой композиции // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35. № 2.
5. Шшиковский И. В., Панин А. С., Петров А. Л., Камашев А. В. Использование лазерного источника для синтеза интерметаллидов в системе Ni-Al // Письма в Журнал технической физики. 2001. Т. 27. В. 12.
 6. Шшиковский И. В., Морозов Ю. Г., Нефедов С. А., Панин А. И., Петров А. Л. Исследование условий селективного лазерного спекания в порошковой системе Al-Ti // Труды межд. конф. «ILLA'2001». Шатура-Владимир. Июнь 2001.
 7. Гуреев Д. М., Петров А. Л., Шшиковский И. В. Формирование биосовместимых интерметаллидных фаз при лазерном спекании порошковых СВС композиций // Известия РАН. Серия физическая. 1999. № 10.
 8. Гуреев Д. М., Ружечко Р. В., Шшиковский И. В. Исследование условий селективного лазерного спекания керамических порошковых материалов системы ЦТС // Письма в Журнал технической физики. 2000. Т. 26. В. 6.
 9. Shishkovsky I. V., Zakiev S. E., Scheck Yu. B., Kuznetsov M. V., Morozov Yu. G., Vityaz P. A., Belyaev A. V., Talako T. L., Parkin I. P., Pankhurst Q. A., Khina B. B., Fernandez-Barquın L. Selective laser-assisted sintering of SHS-ferrites in powder systems based on Ba-Fe and Li-Fe compositions // In: Modern Problems of Combustion and its Applications. IV International School-Seminar. Minsk. Belarus. 2-7 September 2001.
 10. Морозов Ю. Г. Электрические и магнитные явления в самораспространяющемся высокотемпературном синтезе. Автореферат диссертации на соискание ученой степени д. ф. - м. н. ИСМАН, Черногоровка, 2001 г. 35 с.
 11. В. В. Багров, Н. А. Климов, С. В. Нефедов, А. Л. Петров, В. И. Щербаков, Шшиковский И. В. Программно - аппаратный комплекс по селективному лазерному спеканию. Известия Самарского научного центра РАН, Т 5. № 1 (9). 2003.
 12. K. S. Martirosyan, I. A. Filimonov, and Dan Luss. Electric-Field Generation by Gas-Solid Combustion. // Journal of American Institute of Chemical Engineers. January 2004 Vol. 50, No. 1.

SOFTWARE REALIZATION OF VIRTUAL SETUP FOR THE DIAGNOSTIC OF LASER CONTROLLED SHS IN POWDERED COMPOSITIONS

© 2004 I.V Shishkovski¹, U.G. Morozov²

¹ Samara Branch of Physics Institute named for P.N. Lebedev of Russian Academy of Sciences

² Institute of Structural Macrokinetics of Russian Academy of Sciences

At present paper the description of software realization of virtual setup for the measurement of an electromotive force and temperature peaks on the wave front heterogeneous combustion are presented. Combination of Selective Laser Sintering (SLS) and Self-High Temperature Synthesis (SHS) processes was realized before and now the space - temporary process parameters pointed out above were treated via analog-digital converter (DAQ E-440, © "L-Card" private company) on the computer. Using the "L-Card" software, we have arranged and managed the measurement process on the base of the virtual setup, which was created us in LabView environment.