

## ЛИТЕРАТУРА

1. Liebman I., Corry J. e. a. Comb. Sci. and Techn., 1972, 5, 1, 21.
2. Каминская Н. В., Шевчук В. Г., Коровин В. Я. и др.— В кн.: Физика аэродисперсных систем. Вып. 21.— Киев — Одесса: Вища школа, 1982.
3. Иванов В. Н., Коровин В. Я., Уваров А. Д. Тр. Ин-та экспер. метеор., № 31/105, 1983.
4. Минько Л. Я., Гончаров В. К., Лопарев А. И. Физика и химия обработки материалов, 1979, 1, 3.
5. Мощное лазерное излучение в атмосферном аэрозоле/Под ред. М. В. Кабанова.— Новосибирск: Наука, 1984.
6. Бункин Ф. В., Кириченко П. А., Лукьянчук Б. С. УФН, 1982, 138, 1, 45.
7. Пустовалов В. К., Романов Г. С. Докл. АН БССР, 1985, 29, 1, 50.
8. Пустовалов В. К. VII Всесоюз. симп. по распространению лазерного излучения в атмосфере.— Томск, 1983.
9. Пустовалов В. К., Бобученко Д. С. Докл. АН БССР, 1985, 29, 6, 527.
10. Таблицы физических величин. Справочник/Под ред. И. К. Кикоина.— М.: Атомиздат, 1976.
11. Варгафтик И. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей.— М.: Наука, 1972.
12. Гуревич М. А., Степанов А. М. ФГВ, 1968, 4, 18, 2.
13. Свойства элементов/Под ред. Г. В. Самсонова. Ч. 1.— М.: Металлургия, 1976.
14. Конов В. И., Токарев В. Н. Квантовая электроника, 1983, 10, 2, 327.
15. Пустовалов В. К., Романов Г. С., Хорунжий И. А. Квантовая электроника, 1982, 9, 2, 332.

Поступила в редакцию 10/X 1986,  
после доработки — 6/I 1987

## МАКРОКИНЕТИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ТЕПЛООВОЙ ВЗРЫВ В СМЕСЯХ ПОРОШКОВ Ni И Al

*А. Г. Гаспарян, А. С. Штейнберг*  
(Черноголовка)

Изучение макрокINETических особенностей развития процесса взаимодействия в смесях порошкообразных компонентов представляет значительный интерес для понимания механизма теплового взрыва, зажигания и горения гетерогенных систем. Исследование этих процессов связано со значительными методическими трудностями, обусловленными как специфическими особенностями вещества в порошкообразном состоянии<sup>1</sup>, так и сильной неизотермичностью (временной и пространственной) превращения в этих системах. Полезную информацию о макрокинетике процессов взаимодействия в этих системах может дать количественная высокотемпературная термография [2, 3].

Настоящая работа посвящена исследованию закономерностей тепловыделения и теплового взрыва в эквивалентных смесях порошков никеля и алюминия. Результаты исследования представляют интерес для описания закономерностей образования интерметаллидов как при печном нагреве, так и в процессах безгазового горения [4—6].

Применение термографического метода для количественных кинетических исследований предъявляет повышенные требования к конструкциям соответствующих приборов. Прецизионные измерения небольших температурных перепадов (сигналов ДТА) в высокотемпературной (до 1000°С) области под вакуумом невозможно проводить на стандартных приборах, типа дериватографа системы Паулик. В этой связи в настоящей сообщении представляется целесообразным краткое описание разработанного авторами прибора, позволяющего проводить количественные

<sup>1</sup> Здесь имеются в виду такие факторы, как размер и дефектность зерен, обуславливающие зависимость реакционной способности материала от способа и условий получения, предварительной механической обработки порошков и т. д. [1].

исследования кинетики тепловыделения в конденсированных средах при температурах  $T \leq 950^\circ\text{C}$  в контролируемой атмосфере в интервале давлений  $p = 10^3 \div 10^5$  Па.

### Методика эксперимента

Установка, схема которой представлена на рис. 1, состоит из собственно термографа, измерительной схемы и системы программного регулирования температуры.

Термограф 1 — массивный медный цилиндрический блок диаметром 90 и высотой 250 мм с двумя параллельными отверстиями. Внутри отверстий методом горячего прессования введены трубки из нержавеющей стали (толщина стенок 1, внутренний диаметр 20 мм). Блок помещен в снабженную фланцами стальную трубу, на поверхности которой уложен нихромовый нагреватель. На нижнем фланце укреплены держатели термографических ячеек, внутри которых помещены измерительные термопары. Спаи термопар введены внутрь капсул 2. Одна из капсул («реактор») содержит исследуемое вещество, другая служит эталоном («свидетелем»). В медном блоке установлена третья термопара, используемая для регистрации изменения температуры во времени. Схема регулирования температуры позволяет проводить эксперименты в режиме линейного нагрева при темпах нагрева  $\omega = 0,1 \div 20$  град/мин. В качестве задатчика темпа используется прибор 3 линейного программирования температуры (ПЛПТ), собранный на основе мультивибратора с варьируемой частотой следования импульсов. Импульсы напряжения суммируются с помощью цифроаналогового преобразователя. Линейно изменяющееся во времени напряжение на выходе ПЛПТ сравнивается с термо-ЭДС регулирующей термопары, а сигнал разбаланса подается на вход фотогальванометрического усилителя (Ф-116) 4. Нагрузкой фотоусилителя служит обмотка электронного реле 5, управляющего током в цепи нагревателя термографа. Эта же схема использовалась при проведении изотермических опытов.

В состав измерительной схемы входят многоточечный электронный потенциометр (КСП-4) 6 и два фотогальванометрических усилителя 4' (Ф-116). Абсолютная температура блока регистрируется на шкале самописца (вход I) дополнительным потенциометром (Р-307) 7, на котором устанавливается сдвигающее напряжение, что позволяет измерять и регистрировать температуру с повышенной точностью (не менее  $1^\circ\text{C}$ ).

Через усилители на вход потенциометра также подаются сигналы от дифференциальных термопар, измеряющих соответственно разность температур «реактора» и «свидетеля» (ДТА, вход III) и разность температур блока и «свидетеля» (вход II). Последняя величина используется для определения температурной зависимости эффективного коэффициента теплообмена  $\alpha = \alpha(T)$  между капсулой и печью. В связи с тем что при высоких температурах значительная доля теплообмена приходится на излучение, для стандартизации параметров последнего перед каждым опытом обе капсулы обертывались зеркальной никелевой фольгой. Это позволило существенно снизить интенсивность теплообмена, что необходимо как для увеличения чувствительности метода, так и для надежного выполнения требования малости критерия теплообмена Био<sup>2</sup>.

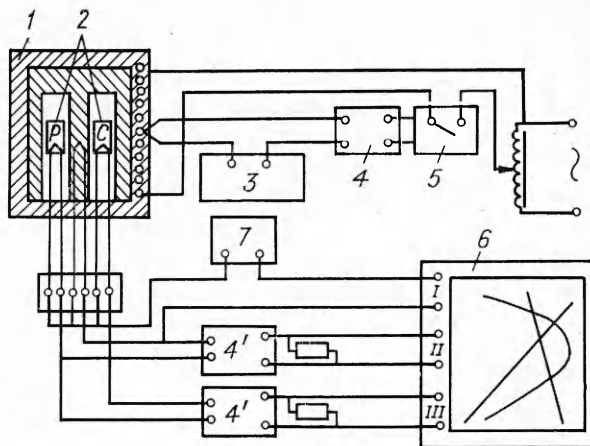
В процессе опыта во внутренней полости термографа поддерживался вакуум ( $10^{-3}$  мм рт. ст.). Эксперименты проводились на плотных эквивалентных смесях порошков алюминия марки ПА-4 с удельной поверхностью  $0,24$  м<sup>2</sup>/г и никеля марки ПНК-1 с удельной поверхностью  $0,054$  м<sup>2</sup>/г. Образцы запрессовывались внутрь цилиндрических стальных капсул ( $d = 9$  мм). Давление прессования варьировалось в интервале

<sup>2</sup> Выполнение неравенства  $Bi = \alpha d / \lambda \ll 1$  позволяет использовать для макрокINETических расчетов уравнение теплового баланса [2].

Рис. 1. Схема установки.

$p = 20 \div 240$  МПа. Основная серия экспериментов проводилась в динамическом режиме с изменением темпов линейного нагрева  $\omega = 2 \div 13$  град/мин.

Часть опытов поставлена с использованием так называемого «теплового разбавления» [3, 7], когда тонкий (менее 1 мм) слой  $m = 0,2$  г реакционной смеси зажимался между торцами медных цилиндров с общей массой  $M = 5$  г, помещавшихся в рабочую ампулу. Применение этой методики облегчает количественное изучение процессов, сопровождающихся интенсивным тепловыделением. После опытов проводился рентгенофазовый анализ образцов. Часть образцов подвергалась также металлографическому исследованию. Взвешивание образцов до и после эксперимента показало, что их вес практически не менялся.



### Закономерности тепловыделения в системе Ni—Al

На рис. 2 приведены типичные термограммы процесса в эквиполной смеси порошков Ni и Al при различных темпах нагрева. Как видно из графиков, при достижении  $T = 640^\circ\text{C}$  независимо от темпа линейного нагрева наблюдается скачкообразный рост саморазогрева, свидетельствующий о резком увеличении скорости взаимодействия. Качественно этот саморазогрев может быть отождествлен с тепловым взрывом в системе. После такого взрыва максимальная температура образцов достигала  $1210^\circ\text{C}$ . При медленных темпах нагрева отчетливо выделяются два пика, разделенные температурной точкой  $640^\circ\text{C}$ , что также свидетельствует о двухстадийном протекании реакции. Расчетные оценки показывают, что при  $T = 640^\circ\text{C}$  мощность тепловыделения в веществе увеличивается скачкообразно не менее чем на порядок.

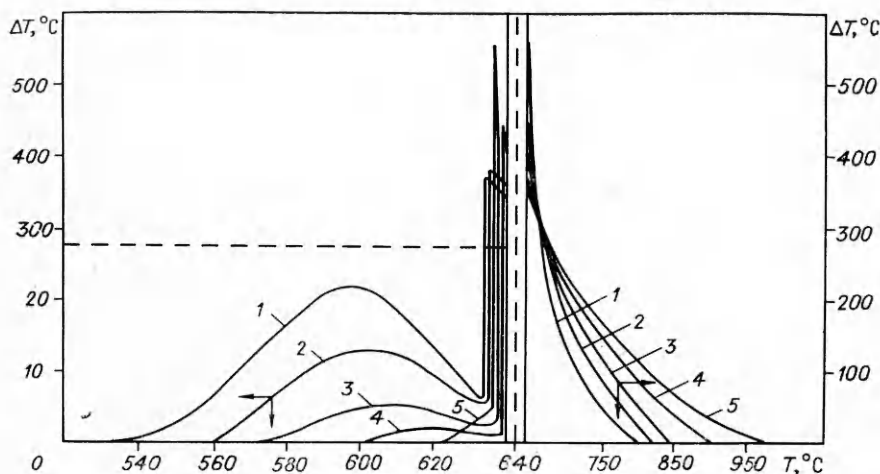


Рис. 2. Изменение сигнала ДТА ( $\Delta T$ ) в зависимости от температуры «свидетеля»  $T$  при различных темпах нагрева  $\omega$ , град/мин: 1 — 2,4, 2 — 3,1, 3 — 4,2, 4 — 6,6, 5 — 13 ( $\approx p = 115$  МПа,  $m = 2$  г).

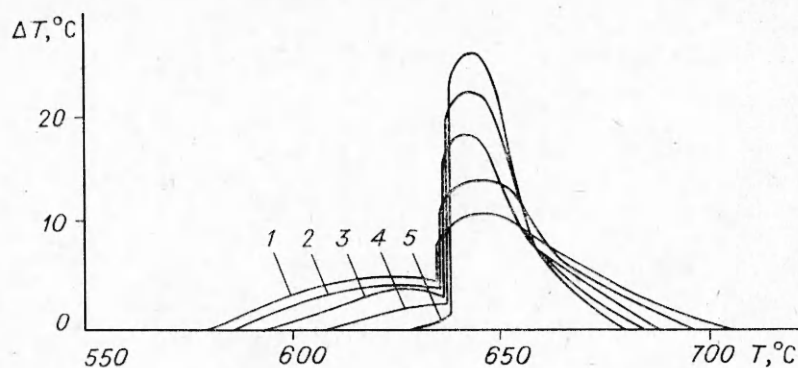


Рис. 3. Термограммы процесса при тепловом разбавлении ( $M = 5$  г,  $m = 0,2$  г,  $p = 115$  МПа, величины  $\omega$  соответствуют рис. 2).

После проведения опытов с  $\omega \leq 6$  град/мин образцы имели на верхних торцах небольшие выпуклости и легко рассыпались в порошок, а при  $\omega = 13$  град/мин имели оплавленный вид.

На рис. 3 приведены термограммы процесса при тепловом «разбавлении». Здесь стадийность также проявляется достаточно четко: скачкообразное нарастание температуры, как и в опытах без теплового «разбавления», происходит в момент достижения в реакционной смеси  $T = 640^\circ\text{C}$ . Увеличение  $p$  исходной смеси интенсифицирует процесс взаимодействия в смеси (рис. 4). Температуры, соответствующие началу разогрева, снижаются, а величины первых пиков на термограммах увеличиваются.

Интегрирование термограмм, представленных на рис. 4 по методике [8], позволило определить тепловые эффекты процесса взаимодействия  $Q_{\Sigma}$ , а также найти составляющие, соответствующие низкотемпературной  $Q_I$  и высокотемпературной  $Q_{II}$  стадиям. Данные, приведенные в таблице, свидетельствуют, что с ростом  $p$  эффект  $Q_I$  действительно сильно возрастает, а тепло, выделяющееся во второй стадии, заметно уменьшается. Последний результат представляется закономерным, поскольку величина  $Q_{\Sigma}$  лишь незначительно растет с повышением  $p$ .

Плавнохарактер низкотемпературных участков термограмм, сильное влияние на них давления прессования, наконец, отсутствие жидких продуктов на диаграмме состояния системы Ni—Al при  $T < 640^\circ\text{C}$  — все это свидетельствует о твердофазном характере низкотемпературной стадии превращения. Вторую (высокотемпературную) стадию следует связать с плавлением при температуре  $640^\circ\text{C}$  эвтектики Al—NiAl<sub>3</sub>, содержащей ~6% Ni [9].

Образование жидкофазного продукта вблизи границы контакта реагентов может интенсифицировать взаимодействие, поскольку при близ-

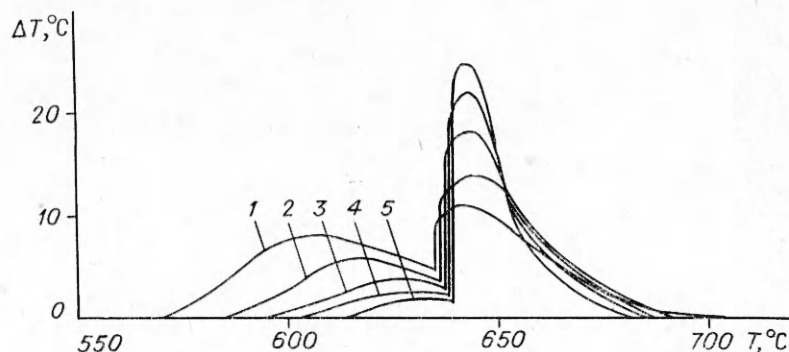


Рис. 4. Влияние явления прессования на термограммы процесса при  $\omega = 4$  град/мин в условиях теплового разбавления ( $M = 5$  г,  $m = 0,2$  г),  $p$ , МПа: 1 — 240, 2 — 180, 3 — 115, 4 — 50, 5 — 20.

ких температурах диффузионные процессы в жидкостях (расплавах), как правило, протекают значительно быстрее, чем в соответствующих твердых телах. Однако гораздо более существен фактор, ускоряющий при плавлении эвтектики макрокинетический процесс, — резкое увеличение поверхности контакта вследствие эффекта капиллярного растекания. Ранее капиллярное растекание наблюдалось в экспериментах по горению порошкообразной смеси  $Ti + C$ , когда подвижным («текущим») компонентом являлся исходный металл (титан) [10—12]. В рассматриваемом случае отличительная особенность состоит в том, что по порам системы растекается промежуточный продукт реакции взаимодействия — эвтектика. По достижении в системе температуры плавления алюминия ( $660^\circ C$ ) последний также вовлекается в капиллярное растекание, однако начало интенсивного процесса взаимодействия и связанного с ним резкого ускорения тепловыделения следует связывать с растеканием эвтектики.

Рентгенофазовый анализ образцов показал, что в зависимости от условий проведения опыта состав получаемых продуктов взаимодействия меняется. В низкотемпературных экспериментах, в процессе проведения которых максимальные температуры вещества  $T_{max} < 640^\circ C$  (что достигалось тепловым разбавлением или принудительным прерыванием опыта), на рентгенограммах регистрируются  $Ni_2Al_3$  (доминирует) и  $NiAl_3$  (заметные количества), а также свободные  $Ni$  и  $Al$ . В образцах, температура которых в результате сильного саморазогрева (теплового взрыва) достигала  $1100—1200^\circ C$ , образуется однофазный продукт  $Ni_2Al_3$  и остается избыточный  $Ni$ . В промежуточной области по величинам максимальных температур наряду с фазой  $Ni_2Al_3$  фиксируются следы фазы  $NiAl_3$ . Количество последней тем меньше, чем выше  $T_{max}$ .

Анализ рентгенограмм показал, что к возрастанию в продуктах взаимодействия доли  $Ni_2Al_3$  и соответствующему уменьшению содержания  $NiAl_3$  (в опытах без теплового разбавления) приводят увеличение исходной навески смеси и повышение темпа нагрева. Поскольку общее в этих случаях — увеличение максимально достигаемой температуры вещества, с влиянием последней следует связывать указанные изменения фазового состава. Образование фазы  $Ni_2Al_3$  в высокотемпературных опытах количественно подтверждается близостью экспериментально найденной величины  $Q = 225$  кал/г смеси (см. таблицу) при максимальном давлении прессования  $p = 250$  МПа и теоретического значения, рассчитанного с использованием табличной величины теплоты образования фазы  $Ni_2Al_3$ , равной  $232$  кал/г [13]. Расчет выполнялся в предположении, что реакция в эквимолярной смеси  $Ni—Al$  идет с образованием  $Ni_2Al_3$  до полного исчерпания алюминия. Косвенно указывает на наличие фазы  $Ni_2Al_3$  в продуктах высокотемпературного превращения оплавленный вид образцов, максимальная температура которых ( $T = 1200^\circ C$ ) превышала температуру, соответствующую плавлению этой фазы ( $1132^\circ C$ ).

### Тепловой взрыв порошковой смеси $Ni—Al$

Количественные исследования закономерностей теплового взрыва в твердофазных системах ранее не проводились. При изучении макрокинетических процессов тепловыделения и теплового взрыва в соответствующих смесях основные трудности связаны с особенностями высокотемпературного калориметрического опыта — необходимостью исключения неучитываемых теплотерь, требованиями защиты внутренних частей реакционного объема от окисления кислородом воздуха и т. п. В единст-

$p$ , МПа	Количество тепла (кал/г), выделившееся на разных стадиях		$Q_{\Sigma}$ , кал/г
	$Q_I$	$Q_{II}$	
20	34	148	182
50	45	140	185
115	65	125	190
180	89	109	198
240	124	101	225

венной, известной авторам работе [14] критические условия теплового взрыва железоалюминиевого термита определялись путем помещения в расплавленное олово образцов в виде таблеток различной толщины. К недостаткам этой методики относятся сравнительно малая информативность, связанная с невозможностью получения термограмм разогретого вещества, трудности подбора сред для высокотемпературной области, возможность реагирования исследуемого вещества с расплавленным металлом-теплоносителем и т. д.

Описанная выше термографическая установка оказалась удобной для проведения опытов по тепловому взрыву рассматриваемых систем в статических и динамических условиях при  $T \leq 1000^\circ\text{C}$ . Эксперимент по тепловому взрыву в динамических условиях (при линейном нагреве печи) практически ничем не отличается от термографического опыта без теплового разбавления реагирующей смеси<sup>3</sup>. Во всех экспериментах такого рода, включая опыты с вариацией величины  $\alpha = 2,8 \div 5,9 \times 10^{-4}$  кал/(см<sup>2</sup> · с · град), тепловой взрыв смеси Ni—Al при линейном нагреве печи происходил в момент достижения в веществе температуры плавления эвтектики (640°C). Изменение  $\alpha$  достигалось специальным зачернением (окислением) внешней поверхности капсулы для получения  $\alpha_{\text{max}}$  и методом обертывания капсул зеркальной никелевой фольгой для снижения  $\alpha$ . Относительно большой уровень теплопотерь связан с высокой интенсивностью радиационного теплообмена между ячейками и блоком термографа.

Малость критерия  $V_i$  позволяет изучать тепловой взрыв СВС-систем подобного рода в классической (семеновской) постановке подобно тому, как это сделано в работе [15] по исследованию теплового взрыва порохов и ВВ при слабом внешнем теплообмене вещества с окружающей средой. Более глубокое вакуумирование при проведении опытов по калориметрии и тепловому взрыву СВС-систем не всегда может быть приемлемо в связи с возможным (и, естественно, крайне нежелательным) испарением таких конструкционных материалов, как медь<sup>4</sup>.

Эксперимент по тепловому взрыву системы Ni—Al в статических условиях проводился следующим образом. Вакуумированный (без образца) термограф выводился на заданный тепловой режим, характеризующийся постоянной температурой внутренних стенок печи, и отключался от вакуумированной магистрали, а его внутренний объем заполнялся инертным газом — аргоном. При непрерывной медленной продувке полости печи аргоном, препятствующим поступлению воздуха в прибор, снималась нижняя торцевая технологическая заглушка и капсула с образцом быстро вводилась в полость печи. Подача аргона прекращалась, а термограф соединялся с вакуумной магистралью. Рабочее разрежение в приборе успевало установиться за время  $\tau \approx 20$  с, что существенно меньше периода прогрева образца при  $\alpha_{\text{max}}$ .

На диаграммах разогрев — время (рис. 5) видно, что максимальный предвзрывной разогрев, достигнутый при  $T = 572^\circ\text{C}$ , равен  $36^\circ\text{C}$ . На рис. 6 представлена диаграмма Семенова, полученная расчетным путем по величинам температур печи и максимальным разогревам вещества под пределом теплового взрыва и соответствующим значениям  $\alpha = \alpha(T)$ . Поскольку температуры вещества под пределом теплового взрыва не

<sup>3</sup> Как указывалось выше, в настоящей работе смесь запрессовывалась непосредственно в полость цилиндрических термографических капсул, в связи с чем последние по соображениям прочности делались из пержавающей стали и имели относительно толстые стенки ( $\delta = 1$  мм). Даже в опытах без дополнительного теплового разбавления вес капсулы был соизмерим с навеской реагирующего вещества, т. е. имело место заметное тепловое балластирование реагирующего вещества теплоемкой капсулой. Это способствовало увеличению критерия  $\gamma = RT^2CM/EQ_c$  до значений 0,1—0,15 (для системы Ni—Al).

<sup>4</sup> На стадии отработки методики, когда полости в блоке термографа еще не были снабжены трубками из нержавеющей стали, на поверхности капсул уже при  $T = 800^\circ\text{C}$  появлялся тонкий медный налет, что сильно влияло на интенсивность теплообмена.

достигали  $640^{\circ}\text{C}$  (начало плавления эвтектики), можно полагать, что эти данные соответствуют процессу твердофазного реагирования. Энергия активации, определенная из графика (см. рис. 6, б),  $E = 37 \pm \pm 1$  ккал/моль. Значение расчетного критического семеновского разогрева  $\Delta T = RT_0^2/E = -38^{\circ}\text{C}$ , что находится в хорошей сходимости с экспериментальной величиной ( $36^{\circ}\text{C}$ ).

Применительно к рассматриваемому процессу количественными данными о температурной зависимости скорости взаимодействия, развивающегося с участием жидкой фазы, авторы не располагают. Однако можно отметить, что критические условия при  $T < 640^{\circ}\text{C}$  определяются кинетикой реакции твердофазного реагирования. В случае же, если процесс в твердой фазе развивается под пределом теплового взрыва, но разогрев вследствие твердофазной реакции доведет температуру смеси до  $640^{\circ}\text{C}$ , взрыв произойдет в результате взаимодействия, протекающего с участием жидкой эвтектики.

Характерные особенности развития теплового взрыва при таком немономтонном виде температурной функции тепловыделения детально проанализированы в работе [16], посвященной механизму теплового самовоспламенения магния. В этой связи отметим, что установленное скачкообразное возрастание скорости тепловыделения при окислении Mg, происходящее в момент плавления металла, имеет по механизму много общего с явлениями, рассмотренными в настоящей работе<sup>5</sup>.

В заключение приведем некоторые соображения о макрокинетике процесса взаимодействия в системе Ni—Al. Полученные результаты целесообразно сопоставить с данными работы [4]. Согласно металлографическим исследованиям, проведенным в [4] на биметаллических образцах Ni и Al, энергия активации процесса роста слоя  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  равна 38 ккал/моль, что находится в хорошей сходимости с найденным выше значением. Напротив,  $E = 24$  ккал/моль, полученная в [4] для макрокинетики брутто-процесса в порошковой смеси, представляется менее

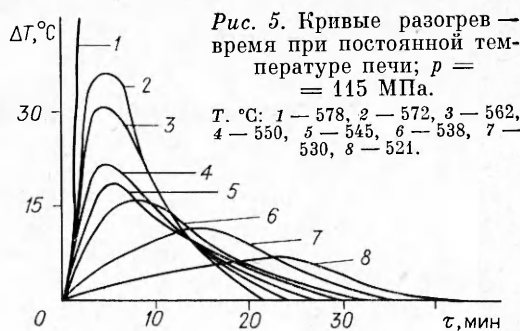


Рис. 5. Кривые разогрев — время при постоянной температуре печи;  $p = 115$  МПа.  
 $T, ^{\circ}\text{C}$ : 1 — 578, 2 — 572, 3 — 562, 4 — 550, 5 — 545, 6 — 538, 7 — 530, 8 — 521.

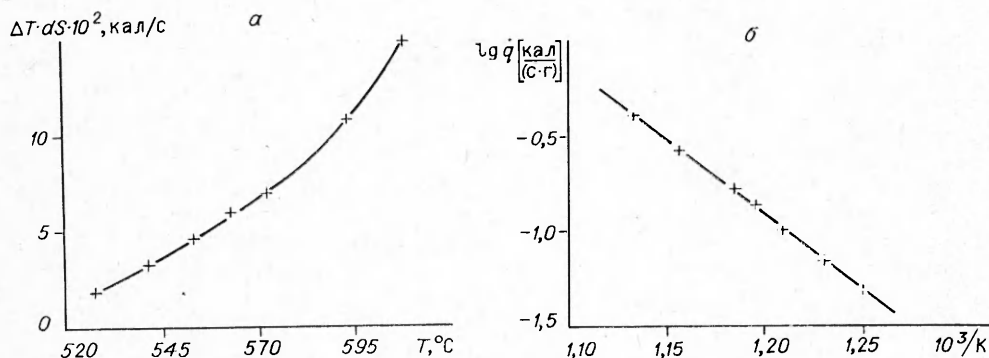
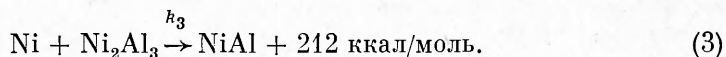
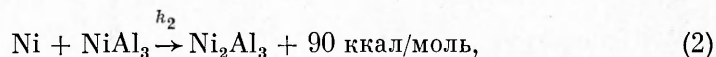
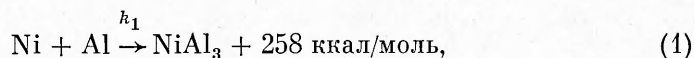


Рис. 6. Диаграмма Семенова для процесса взаимодействия в системе Ni—Al (а) и ее аррениусовская обработка (б).

<sup>5</sup> Применительно к механизму воспламенения Mg представляется весьма достоверной следующая картина процесса. При плавлении Mg под действием сил поверхностного натяжения растекается по поверхности микроигл окиси, слагающих пористую (незащитную) пленку продукта. В результате резко (на порядки) увеличивается поверхность окисления и соответственно интенсифицируется макрокинетика процесса. Данный механизм представляется наиболее важным, хотя он не исключает другой механизм, связанный со скачкообразным возрастанием диффузии кислорода в металле при переходе через температуру плавления.

достоверной в связи с очевидными методическими трудностями надежной регистрации кинетики роста слоев по шлифам, изготовленным из спеченных образцов.

Полученные в настоящей работе данные не дают возможности однозначно установить последовательность образования фаз в смеси Ni—Al. Однако в предположении о стадийном развитии процесса можно записать такую последовательность реакций:



Реакция (1) протекает с  $E = 37-38$  ккал/моль. Реакция (2) уже при  $T \simeq 550^\circ\text{C}$  идет со скоростями, соизмеримыми со скоростями процесса (1), а с повышением  $T$  до  $640^\circ\text{C}$  и выше  $k_2 > k_1$  и протекание (2) лимитируется скоростью  $k_1$ . На возможность такой последовательности указывают не только приведенные результаты рентгенофазового анализа, но также отмеченное в [4] после отжига в биметалле Ni и Al при  $560^\circ\text{C}$  наличие двух фаз (одна из них расшифрована ( $\text{Ni}_2\text{Al}_3$ ), а другая, по-видимому,  $\text{NiAl}_3$ ). При повышении температуры до  $620^\circ\text{C}$  осталась только фаза  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$ , т. е.  $k_2$  стала выше  $k_1$ . При сохранении лимитирующей стадии (1) в макрокинетике процесса возрастание  $k_2$  могло остаться незамеченным, так как в калориметрических опытах (и в опытах по тепловому взрыву) оно должно было сопровождаться лишь относительно небольшим (на 30%) увеличением теплового эффекта при сохранении неизменным выражения для константы скорости грунто-процесса, соответствующей  $k_1$ .

Авторы благодарны А. Г. Мержанову за внимание к работе и полезные обсуждения и О. А. Кочетову за помощь в отладке методики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Третьяков Ю. Д. Твердофазные реакции.— М.: Химия, 1978.
2. Мержанов А. Г., Барзыкин В. В., Штейнберг А. С. и др. Методологические основы изучения кинетики химических реакций в условиях программированного нагрева. Препринт.— Черноголовка, 1977.
3. Гончаров Е. П., Дриацкая Г. И., Мержанов А. Г. и др. Докл. АН СССР, 1971, 197, 2, 385.
4. Найбороденко Ю. С., Итин В. И., Белозеров Б. П. и др. Изв. вузов. Физика, 1973, 11, 34.
5. Найбороденко Ю. С., Итин В. И., Савицкий К. В. Там же, 1968, 10, 103.
6. Подергин В. А., Неронов В. А., Яровой В. Д. и др.— В кн.: Процессы горения в химической технологии и металлургии/Под ред. А. Г. Мержанова.— Черноголовка, 1975.
7. Гончаров Е. П., Мержанов А. Г., Штейнберг А. С. и др.— В кн.: Катализаторы основного органического синтеза. Тр. ГИИХ, вып. 68.— Л., 1973.
8. Андрианова З. С., Вольперт А. И., Гончаров Е. П. и др. ФГВ, 1973, 9, 3, 409.
9. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов.— М.: Металлургия, 1979.
10. Шкиро В. М., Боровинская И. И. ФГВ, 1976, 12, 6, 945.
11. Некрасов Е. А., Максимов Ю. А., Знатдинов М. Х. и др. ФГВ, 1978, 14, 5, 26.
12. Некрасов Е. А. Канд. дис., Новосибирск, 1980.
13. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочник.— М.: Наука, 1981.
14. Максимов Э. И., Мержанов А. Г., Шкиро В. М. ЖФХ, 1966, 40, 2, 468.
15. Барзыкин В. В., Мержанов А. Г. ЖФХ, 1964, 38, 11, 2649.
16. Блошенко В. П., Мержанов А. Г., Хайкин Б. И. ФГВ, 1976, 12, 5, 682.

Поступила в редакцию 24/1 1986,  
после доработки — 4/VIII 1987