

УДК 621.365.4.001.57

Математическое моделирование процесса контролируемого охлаждения загрузки в вакуумно-компрессионной печи сопротивления

А.К. Парфенов, М.Я. Погребисский

Сведения об авторах

Парфенов Антон Константинович — аспирант кафедры автоматизированных электротехнологических установок и систем НИУ «МЭИ», e-mail: ParfenovAK@mpei.ru

Погребисский Михаил Яковлевич — кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных электротехнологических установок и систем НИУ «МЭИ»

Представлена математическая модель нестационарного процесса сложного теплообмена при контролируемом охлаждении изделия (загрузки) в потоке газа в вакуумно-компрессионной печи, приведены результаты исследования на модели. Выбран вариант конфигурации газораспределительной системы, обеспечивающий наилучшее качество процесса контролируемого охлаждения.

Печи, в которых термические процессы могут проводиться как в вакууме, так и при избыточном давлении, называются вакуумно-компрессионными. Нагрев в вакуумно-компрессионных печах сопротивления необходим для проведения многих технологических процессов, в частности, пайки как твердыми припоями, так и с применением флюсов с целью получения надежных паяных соединений деталей для ракетостроения, атомной, аэрокосмической и других отраслей промышленности.

Технологический процесс большинства вакуумно-компрессионных печей включает в себя нагрев изделия, выдержку и контролируемое охлаждение в защитной среде. Одним из важных условий успеха (например, получения качественных паяных соединений) является равномерность температурного поля в изделии как при нагреве, так и при охлаждении. Однако не менее важно поддержание заданной скорости охлаждения.

Обеспечить сочетание высокой равномерности температурного поля и точного соответствия скорости охлаждения заданию позволяет правильный выбор конструкции и параметров системы обдува загрузки. Сюда входят конфигурация газопроводящих отверстий, требуемый расход охлаждающей среды, пространственное размещение входных и выходных отверстий, соответствующее геометрии печной камеры и расположению загрузки.

Процесс контролируемого охлаждения крупной загрузки в вакуумно-компрессионной печи для пайки исследован методом математического моделирования с использованием конечно-элементного расчетно-программного комплекса ANSYS. С учетом принятых допущений моделирование процесса контролируемого охлаждения загрузки в потоке газа сведено к решению задачи нестационарной теплопроводности с граничными условиями III рода, учитывающими конвективную и излучательную составляющие сложного теплообмена.

На модели получены поле скоростей газа и картина температурного поля в загрузке при различных вариантах конфигурации газопроводящих отверстий и различном расходе охлаждающего газа. Найдена предпочтительная, с точки зрения сочетания высокой равномерности температурного поля и оптимальной скорости охлаждения, конфигурация с четырьмя выходными отверстиями, определен необходимый расход охлаждающего газа.

Ключевые слова: вакуумно-компрессионная печь сопротивления, температурный режим, теплообмен, контролируемое охлаждение, равномерность температурного поля, математическое моделирование.

Mathematical modeling of controlled charge cooling in a vacuum-compression resistance furnace

А.К. Parfenov, M.Ya. Pogrebissky

Information about authors

Parfenov Anton K. — Ph.D.-student automated electrical technology installations and systems dept., MPEI, e-mail: ParfenovAK@mpei.ru

Pogrebissky Mikhail Ya. — Ph.D. (Techn.), assistant professor of automated electrical technology installations and systems dept., MPEI

The article presents the mathematical model of an unsteady complex heat transfer process in subjecting a product (charge) to controlled cooling in the gas stream formed inside a vacuum-compression furnace. The results obtained from studying the process on the model are given, and the gas distribution system configuration version ensuring the best quality of controlled cooling process has been selected.

Furnaces the thermal processes in which can be carried out both in vacuum, and at excess pressure are called vacuum-compression furnaces. Heating in vacuum-compression resistance furnaces is necessary for carrying out many production processes, in particular, soldering operations performed using solid solders and with the use of fluxes in order to obtain reliable soldered joints of parts in the rocket, nuclear, aerospace, and other industries.

The technological process realized in the majority of vacuum-compression furnaces includes heating of a product, its holding, and controlled cooling in protective medium. One of important conditions for achieving a successful result (for example, obtaining high-quality soldered joints) is to set up a uniform temperature field in the product---both in heating and cooling it. Another no less important condition consists in maintaining a preset cooling rate.

A highly uniform temperature field in combination with the cooling rate exactly complying with the preset schedule can be achieved by properly choosing the design and parameters of a charge blowing system. This involves the configuration of gas-passage bores, the necessary cooling medium flow rate, and the spatial arrangement of inlet and outlet holes corresponding to the furnace chamber geometry and charge layout.

Controlled cooling of a bulky charge in the vacuum-compression furnace for soldering is investigated using the mathematical modeling method with the aid of the ANSYS finite-element computation software package. The simulation of a controlled charge cooling process in a gas stream is reduced, subject to the adopted assumptions, to solving the problem of unsteady heat conductivity with the boundary conditions of the 3rd kind that take into account the convective and radiating components of complex heat transfer.

The field of gas velocities and the temperature field pattern in the charge for different configurations of gas-passing bores and at different cooling gas flow rates are obtained on the model. The configuration with four outlet holes, preferable from the viewpoint of obtaining a highly uniform temperature field in combination of the optimal cooling rate, has been found, and the necessary cooling gas flow rate has been determined.

Key words: vacuum-compression resistance furnace, temperature operating conditions, heat transfer, controlled cooling, temperature field uniformity, mathematical modeling.

Электropечи, в которых термические процессы могут проводиться как в вакууме, так и при избыточном давлении, называются вакуумно-компрессионными [1]. В вакуумно-компрессионных печах проводятся различные технологические процессы, в частности, нагрев под пайку, как твердыми припоями, так и с применением флюсов, с целью получения надежных паяных соединений деталей в ракетостроении, атомной, аэрокосмической и других отраслях промышленности. Ярким примером изделий, изготавливаемых с применением пайки, могут служить камеры сгорания жидкостных реактивных двигателей (КС ЖРД).

Технологический процесс большинства вакуумно-компрессионных печей включает в себя нагрев изделия, выдержку при постоянной температуре и контролируемое (с заданной скоростью) охлаждение. Нагрев, выдержка и охлаждение проводятся в защитной (бескислородной) среде.

Одним из важных условий достижения высокого качества изделий является равномерность температурного поля на поверхности загрузки при нагреве, что в дальнейшем обеспечивает лучшие физические и механические свойства изделия. Однако это условие является необходимым, но не достаточным. Важнейшим этапом технологического процесса является охлаждение загрузки. Неравномерность этого процесса приводит к возникновению внутрискруктурных напряжений и ухудшению механических свойств. Таким образом, возникает необходимость обеспечения равномерного температурного поля в изделии не только при его нагреве, но и при охлаждении. Кроме того, существенную роль играет скорость охлаждения. Обычно значение этого параметра задается технологами, но на практике крайне редко обеспечивается с должной точностью.

Обеспечить сочетание высокой равномерности температурного поля и точного соответствия скорос-

ти охлаждения заданию позволяет правильный выбор конструкции системы обдува загрузки (конфигурации газопроводящих отверстий, пространственного размещения входных и выходных проемов, соответствующего геометрии печной камеры и расположению изделия) и расхода охлаждающей среды. Какие-либо рекомендации по выбору такого комплексного решения в литературе отсутствуют.

В предлагаемой статье исследуется процесс контролируемого охлаждения крупной загрузки в вакуумно-компрессионной печи методами математического моделирования с использованием конечно-элементного расчетно-программного комплекса ANSYS [3].

Рассматривается печь с нагревателями из углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ) (рис. 1), в которой изделие нагревается до 1600°C в инертном газе при избыточном давлении, достигающем при конечной температуре нагрева значения 1,5 МПа. После выдержки при постоянной температуре 1600°C осуществляется контролируемое охлаждение загрузки потоком газа до температуры 900°C. Согласно технологическим требованиям, скорость охлаждения должна лежать в диапазоне 40—43°C/мин, а допустимая неравномерность температурного поля по поверхности загрузки составляет 30°C.

В печи используется замкнутый цикл циркуляции охлаждающего газа с теплообменным аппаратом «газ-вода». Изменяя расход охлаждающей воды, можно регулировать температуру газа на входе в камеру печи. При моделировании эта температура принимается равной 400°C.

При охлаждении изделия потоком газа изменение температуры загрузки происходит, главным образом, за счет отвода тепла с газом, при этом влияние тепловых потерь через теплоизоляцию печи очень незна-

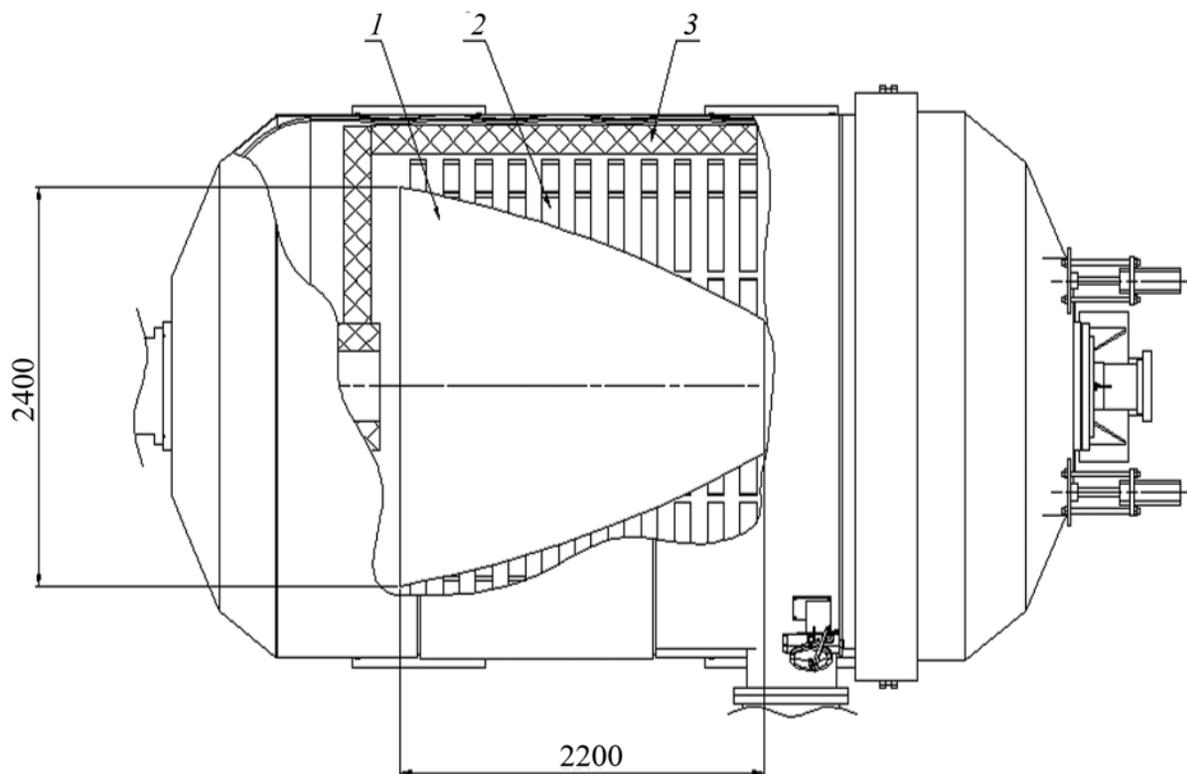


Рис. 1. Конструкция вакуумно-компрессионной печи для нагрева под пайку:

1 — паяемое изделие; 2 — нагреватели; 3 — теплоизоляция

чительно. Кроме того, процесс остывания загрузки в потоке газа происходит существенно быстрее, чем остывание теплоизоляции, весьма массивной и аккумулировавшей значительное количество теплоты при нагреве. Поэтому можно считать, что процессы передачи тепла теплопроводностью через теплоизоляцию и конвективного теплообмена кожуха печи с окружающей средой не оказывают существенного влияния на ход остывания загрузки. Исходя из этого, эти процессы при моделировании возможно не учитывать.

Процессы теплообмена в печи при наличии охлаждающего потока газа являются сложными, включают излучательную и конвективную составляющие [2].

Также необходимо отметить, что внутреннее пространство печи является неоднородным (в ней имеются нагреватели, различные элементы конструкций, оснастка и т.д.). Однако в силу близкого расположения плоской поверхности нагревателей к стенкам печи, а также схожего материала нагревателей и стенок (УУКМ разных модификаций), неоднородностью поверхности камеры печи, участвующей в теплообмене с загрузкой, можно пренебречь. Температуру этой поверхности $t_{\text{п}}$ (температуру печи), вследствие значительной тепловой инерционности теплоизоляции, можно считать неизменной в ходе охлаждения загрузки в потоке газа.

С учетом принятых допущений моделирование процесса контролируемого охлаждения загрузки в потоке газа сводится к решению задачи нестационарной

теплопроводности с граничными условиями III рода, учитывающими конвективную и излучательную составляющие сложного теплообмена.

Суммарный тепловой поток конвекции и излучения удобно выражать по закону Ньютона:

$$q = \alpha(t_{\text{п}} - t_{\text{изд}}), \text{ Вт/м}^2,$$

где $t_{\text{изд}}$ — температура изделия, °С; α — общий коэффициент теплоотдачи, равный сумме коэффициентов теплоотдачи излучением и конвекцией, Вт/(м²·°С),

$$\alpha = \alpha_{\text{изл}} + \alpha_{\text{конв}}, \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

Коэффициент теплоотдачи излучением определяется как:

$$\alpha_{\text{изл}} = \frac{q_{\text{изл}}}{t_{\text{п}} - t_{\text{изд}}} = \frac{\epsilon_{\text{пр}} C_s \left[(T_{\text{п}} / 100)^4 - (T_{\text{изд}} / 100)^4 \right]}{t_{\text{п}} - t_{\text{изд}}}, \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)},$$

где $T_{\text{п}} = t_{\text{п}} + 273$, $T_{\text{изд}} = t_{\text{изд}} + 273$ — абсолютные (в Кельвинах) температуры печи и изделия; $C_s = 5,67 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К}^4)$ — коэффициент теплового излучения абсолютно черного тела; $\epsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$ — приведенная степень черноты,

рассчитывается как для плоскопараллельных поверхностей.

Граничное условие III рода запишем как:

$$\alpha(t_{\text{пов}} - t_{\text{ср}}) = -\lambda \frac{dt_{\text{пов}}}{dn}.$$

Процесс контролируемого охлаждения загрузки моделируется при трех различных вариантах пространственной конфигурации газопроводящих отверстий.

Рассматривается тонкостенная чашеобразная загрузка, расположенная внутри цилиндрической печной камеры. В первом варианте конфигурации (рис. 2, а) используются входное и выходное газопроводящие отверстия диаметром, равным 1/9 диаметра рабочего пространства камеры печи, при этом входное отверстие располагается на торце цилиндрической печной камеры таким образом, чтобы при поступлении охлаждающий поток газа омывал внутреннюю поверхность загрузки. Выходное отверстие при этом находится на боковой поверхности цилиндрической камеры на максимально возможном удалении от входного. Такое расположение и конфигурация газопрово-

дящих отверстий используется в существующих подобных установках.

Во втором варианте (рис. 2, б) используются отверстия увеличенного в 2 раза диаметра при таком же их пространственном положении.

В третьем варианте (рис. 2, в) используются 4 выходных отверстия, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга с шагом 90°, при этом суммарная площадь выходных отверстий такая же, как в первом варианте.

В результате исследования на модели получены зависимости (таблица):

скорости охлаждения загрузки от расхода газа $V_{\text{охл}}(\Omega)$ при разной конфигурации газопроводящих отверстий (рис. 3, а);

величины неравномерности температурного поля на поверхности загрузки от расхода газа $\Delta T(\Omega)$ при разной конфигурации газопроводящих отверстий (рис. 3, б);

величины неравномерности температурного поля на поверхности загрузки от скорости охлаждения $\Delta T(V_{\text{охл}})$ при разной конфигурации газопроводящих отверстий (рис. 4).

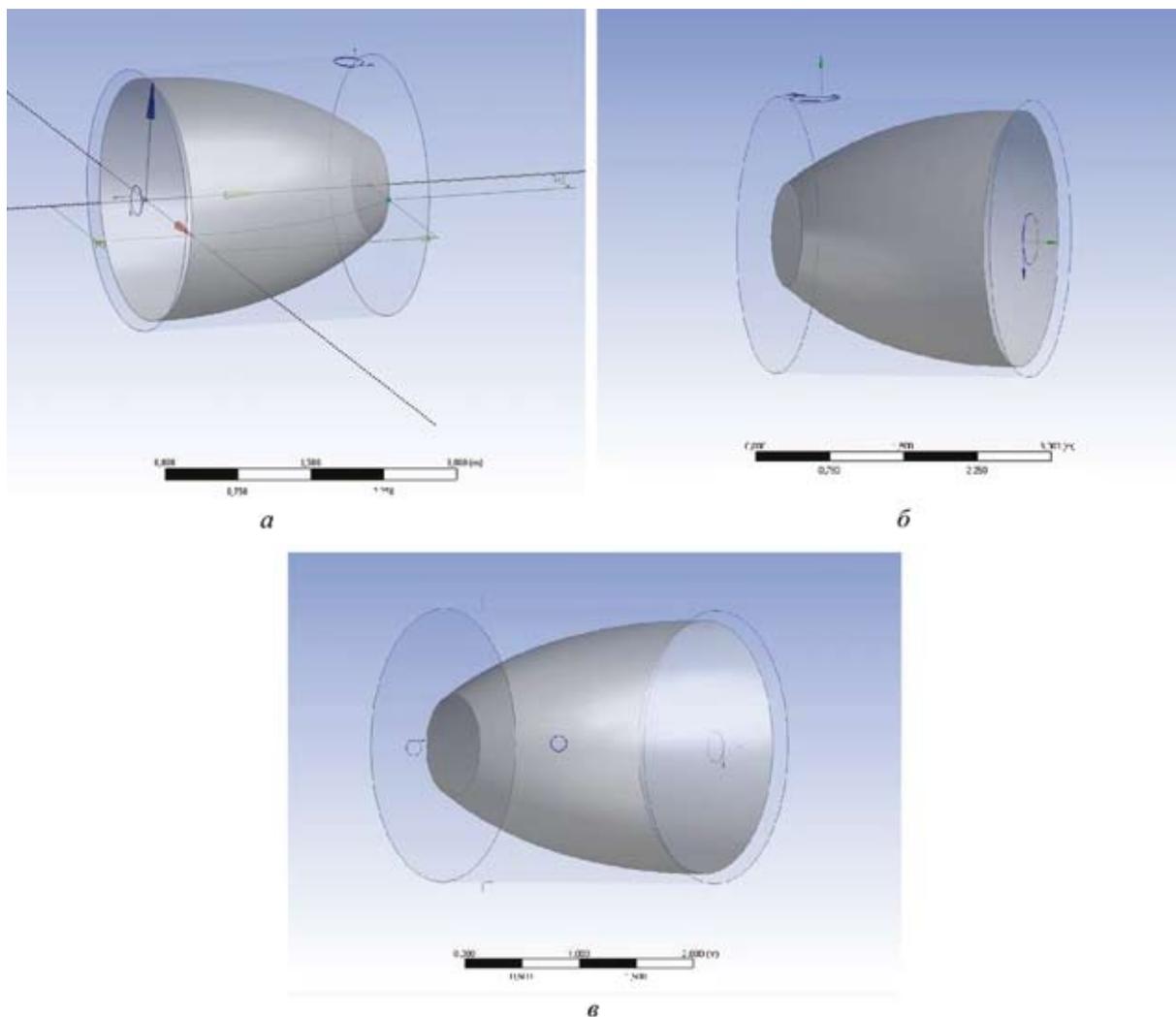


Рис. 2. Варианты конфигураций газопроводящих отверстий

Скорость охлаждения и неравномерность температурного поля при различном расходе охлаждающего газа

Вариант конфигурации	Расход газа, кг/с	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
	Расход газа, м ³ /ч	7,2	14,4	21,6	28,8	36	43,2
Рисунок 2, а	Скорость охлаждения, °С/мин	35	40,2	42	43	44,5	45,9
	Макс. температурный перепад, °С	28	27	27	38	43	58
Рисунок 2, б	Скорость охлаждения, °С/мин	34,9	40,5	42,5	44,9	46	46,1
	Макс. температурный перепад, °С	17	26	27	25	35	36
Рисунок 2, в	Скорость охлаждения, °С/мин	36,5	39	41	42,4	44,4	45,7
	Макс. температурный перепад, °С	19	23	23	22	22	21

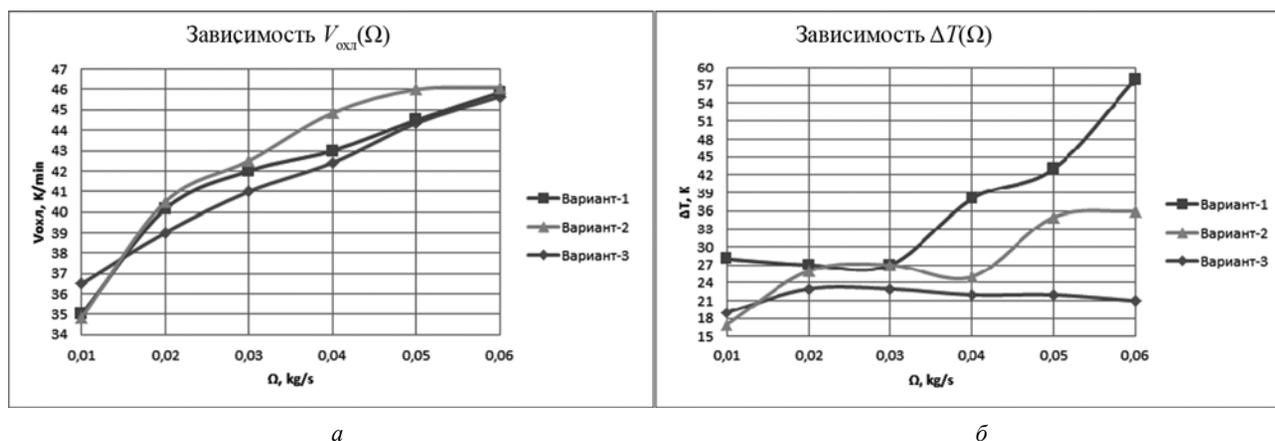


Рис. 3. Зависимость скорости охлаждения (а) и неравномерности температурного поля (б) от расхода охлаждаемого газа

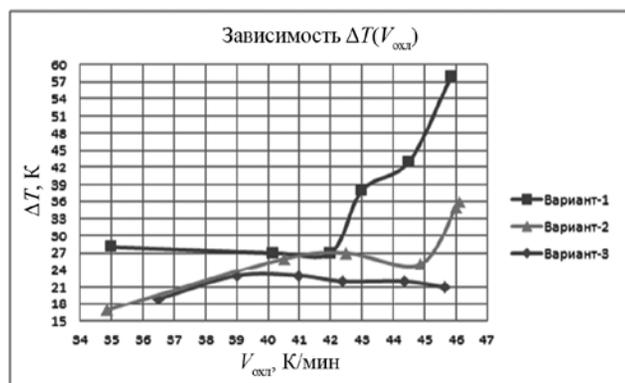


Рис. 4. Связь скорости охлаждения с неравномерностью температурного поля

Предписанные технологическими требованиями скорости охлаждения (40 – 43) °С/мин обеспечиваются (см. рис. 3, а) при расходе газа в пределах:

- 14,4 — 28,8 м³/ч — вариант 1;
- 14,4 — 21,6 м³/ч — вариант 2;
- 21,6 — 28,8 м³/ч — вариант 3

Из условия допустимого перепада температур, не превышающего 30К, видно, что подходящий диапазон расхода газа для первого варианта ограничивается 14,4 — 21,6 м³/ч.

Для второго и третьего вариантов в вышеуказанных диапазонах расхода газа (14,4 — 21,6 и 21,6 — 28,8 м³/ч соответственно), выбранных из условия требуемой скорости охлаждения, ограничение по не-

равномерности температурного поля (20°С) выполняется.

Очевидно, что наилучшая равномерность температурного поля при оптимальной скорости охлаждения достигается в третьем варианте (рис. 2, в).

В результате анализа технологических требований к процессам термообработки тонкостенных изделий из нержавеющей стали и титана в вакуумно-компрессионных печах сопротивления сформированы указания к температурно-временному режиму охлаждения изделий в печах подобного типа.

Разработана математическая конечно-элементная модель процесса контролируемого охлаждения, по результатам вычислительного эксперимента получены следующие зависимости:

скорости охлаждения загрузки от расхода газа $V_{\text{охл}}(\Omega)$ при различной конфигурации газопроводящих отверстий;

неравномерности температурного поля на поверхности загрузки от расхода газа $\Delta T(\Omega)$ при различной конфигурации газопроводящих отверстий;

неравномерности температурного поля на поверхности загрузки от скорости охлаждения $\Delta T(V_{\text{охл}})$ при различной конфигурации газопроводящих отверстий.

С учетом условий и ограничений технологического процесса определен диапазон расхода охлаждающего газа, обеспечивающий должное сочетание скорости охлаждения и равномерности температурного поля в изделии при различных конфигурациях газопроводящих отверстий.

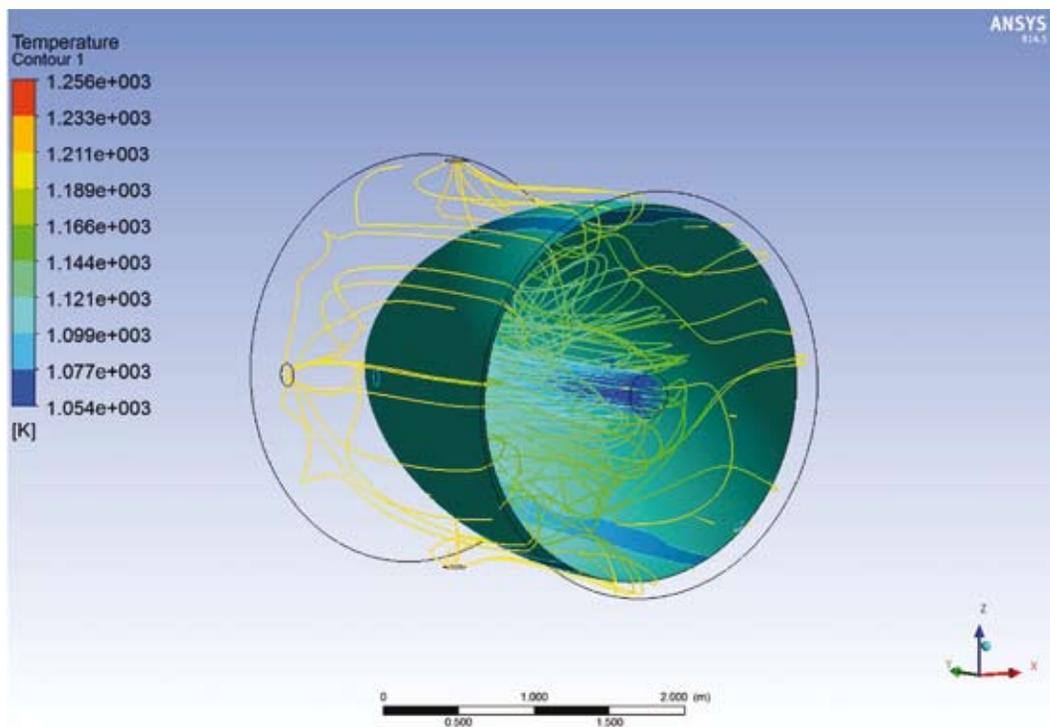


Рис. 5. Поле скоростей потока охлаждающего газа

Показано, что наилучшая равномерность температурного поля на поверхности изделия достигается при использовании четырех симметричных выходных отверстий круглого сечения. При отсутствии муфеля газовый поток равномерно обтекает внутреннюю поверхность чашеобразной загрузки. Через каждое из отверстий отводится практически одинаковое количество теплоты, что подтверждается исследованием динамического процесса охлаждения (рис. 5).

По результатам исследования разработаны рекомендации по проектированию вакуумно-компрессионных печей для пайки с контролируемым охлаждением. С точки зрения сочетания высокой равномерности температурного поля и оптимальной скорости охлаждения, предпочтение следует отдать варианту с четырьмя выходными отверстиями (рис. 2, в).

Для печи на температуру 1600°C, массу изделия 900 кг получены следующие значения основных параметров потока охлаждающего газа:

- расход газа (вход/выход) — 28,8 м³/ч
- температура охлаждающего потока газа на входе — 400°C;
- диаметр сечения входного отверстия — 0,3 м (1/9 диаметра рабочего пространства);
- диаметр сечения каждого выходного отверстия — 0,075 м

Литература

1. Лейканд М.С., Мальгер В.Л., Матковский К.А. Вакуумно-компрессионные электрические печи. М.: Энергия, 1971.
2. Погребисский М.Я., Киренская О.К., Батов Н.Г. Теплопередача в электрических печах сопротивления. М.: Издательский дом МЭИ, 2009.
3. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера. М.: Едиториал УРСС, 2009.

Статья поступила в редакцию 25.04.2016