

Проектиране на нагревателен модул за изпитване на материалите при продължително въздействие на високи температури

Николай Николов, Веселин Цонев, Ленин Лазов, Валентин Георгиев

В тази статия е описан процесът на конструиране на специализиран нагревателен модул за изпитване на материалите при продължително въздействие на високи температури. Дадени са основните параметри и изисквания. С помощта на числени симулации на температурното поле и натрупан опит от предишни разработки е направен проект и е изработен необходимия нагревателен модул. Установено е, че той отговаря заложените в проекта параметри.

Design of a heating device for long material testing at high temperature

The process of a heating device for long testing at high temperature design is explained in this paper. The main parameters and requirements are given. With the help of computer simulations and previous experience, the needed heating device is designed and produced. It is established that the heating device meets the necessary requirements.

Въведение

Съществуват редица конструкционни елементи, които работят продължително време при високи температури, като в същото време са подложени на значителни натоварвания. Характерен пример са тръбите в реформинговите инсталации, които се използват в химическата промишленост, например при производството на амоняк. Тези тръби работят при температури $400\div 900^{\circ}\text{C}$ и налягания $30\div 100$ МПа. Към това натоварване се добавя собственото тегло на тръбата, захваната във вертикално положение в горния си край и част от теглото на колектора в долния ѝ край. Тези производства са непрекъснати, а експлоатационния срок на тръбите е от порядъка на няколко години.

С увеличаване на работната температура намаляват якостните и еластичните свойства на материалите, а се увеличава тяхната пластичност. Когато конструкционен елемент понася продължително време механично натоварване при високи температури, са налице условия за протичане на пълзене. При този процес в материала се натрупват значителни пластични деформации, които лесно могат да надвишат допустимите стойности. Може да се стигне и до разрушаване при напрежения, значително по-ниски от допустимите за материала при кратковременно натоварване при същата температура.

При проектирането на конструкционни елементи, работещи продължително при високи температури и натоварвания, е важно да се познава добре поведението на използвания материал при тези условия на експлоатация. Основни материални характеристики в случая са границата на пълзене и границата на продължителна якост. Наличието на експериментални данни за тях позволява на конструктора да работи с ниски стойности на коефициента на сигурност, което намалява габаритите и цената на изделието.

За експерименталното определяне на якостно-деформационните характеристики на материалите при продължително въздействие на високи температури (над 700°C) е необходимо да се използва специфично оборудване. Основен компонент в това оборудване е нагревателният модул. Към този модул се предявяват редица изисквания, като например хомогенност на температурното поле и надеждност при продължителна работа.

В настоящата работа се поставя задачата да се проектира нагревателен модул (пещ) с максимална работна температура 1100°C , за продължителни изпитвания при високи температури. Нагревателният модул трябва да бъде конструиран така, че да позволява смяна на изгорял нагревател по време на експеримент, без изключване на хранващото напрежение и прекъсване на експеримента.

Особености при проектирането на нагревателен модул

Проектирането на една пещ започва с избор на конструкцията и размерите ѝ. Те трябва да осигурят желаната производителност при най-икономични експлоатационни

параметри. Пещите с по-големи размери имат по-висок КПД, но не винаги са подходящи. При избора на вътрешните размери трябва да се има предвид, че нагревателните елементи трябва да са разположени на определено разстояние от нагриваните пробни тела [1]. Материалът и размерите на стените на пещта трябва да осигурят минимален разход на електроенергия за компенсиране на топлинните загуби. При това трябва да се има в предвид, че с увеличаване дебелината на стените растат стойността и габаритните размери. От друга страна, температурата по външната повърхност на стените на електрическите съпротивителни пещи за температури до 1100°C не бива да надвишава 60°C. Обикновено съпротивителните пещи се облицоват отвън със стоманени листи, които предпазват стените от механично повреждане. Често за намаляване на повърхностната температура е целесъобразно използването на метални капаци [2]. За постигане на по-хомогенно температурно поле в работния обем на пещта, нагревателите се разполагат на отделни групи (секции) със самостоятелно захранване и управление.

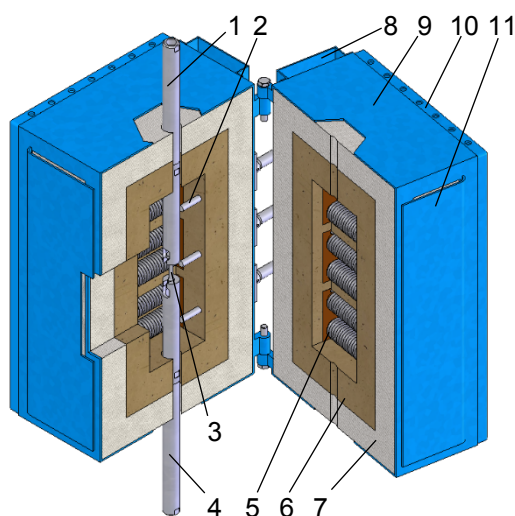
При проектирането на електрически нагреватели се избира захранващо напрежение, материал и размери на нагревателите. Напрежението трябва да има достатъчно малка стойност, за да позволи смяна на изгорял нагревател без изключване на пещта. Изборът на материал се извършва съобразно работната температура и условията за работа. При този избор трябва да се отчете, че по време на работа температурата на нагревателя е с 50÷100°C по-висока от температурата в работния обем. Размерите на нагревателя (сечение и дължина) се подбират съгласно следните изисквания:

- нагревателят трябва да има електрическо съпротивление, позволяващо отделянето на необходимата електрическа топлинна мощност;
- повърхността на нагревателя трябва да бъде достатъчна за отделяне на необходимата топлина без температурата да надвишава допустимата за изборения за него материал.

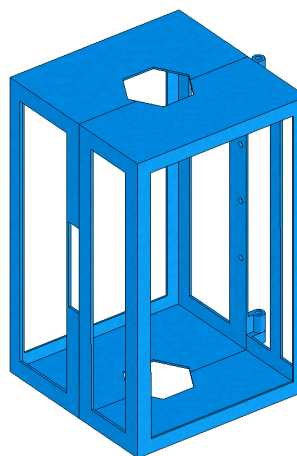
Конструиране на нагревателния модул

На базата на опита, натрупан в предишни разработки [2,3] и данни от специализираната литература, е избрана конструкцията, показана на фиг.1. За нея е характерно следното:

- Форма – правоъгълен паралелепипед;
- Пещта е двуделна. Тя може да се разтваря около изпитваното пробно тяло 3, което е захванато вертикално в средата на работното пространство, с помощта на тръбни захвати 1 и 4.
- Двата дяла на пещта не са симетрични. По-големият е неподвижен, а по-малкият - подвижен.
- Отворът, през който ще минава системата за измерване на деформации и отворите за управляващите термодвойки 3 са разположени в неподвижната част, в средната равнина на пещта.

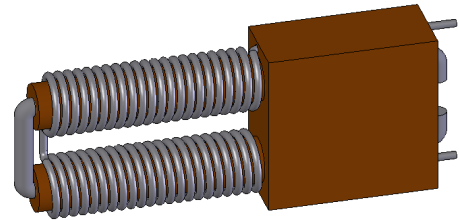


Фиг.1 Конструкция на нагревателен модул



Фиг. 2 Стоманена обшивка на нагревателен модул

- Външният слой изолация е обхванат от стоманена обшивка 9. Обшивката представлява носещата конструкция на печта (фиг.2). Към нея са захванати и три вида капаци, с цел намаляване на повърхностната температура – предни капаци 11, странични капаци 10 и задни капаци 8 (фиг.1). Задните капаци покриват отворите за монтаж на нагревателите. Те са захванати с винтове и могат да се демонтират.
- Стени – съставени са от два слоя изолационен материал: лекотегловни тухли 6 и огнеупорна вата 7. Лекотегловните тухли имат по-голям коефициент на топлопроводност от ватата, но и по-голяма механична здравина и запазват в по-голяма степен свойствата си при температури от порядъка на 1000 °С. За това от тях е изграден вътрешният слой изолация.
- Нагреватели 5, изработени от кантал с диаметър на телта 4 мм. Нагревателите са навити около тръби от силициев карбид (фиг.3). Полученият блок може лесно да се подмени при прекъсване на нагревателя, като се издърпа от леглото си в задната стена на печта. Мощността на един нагревател е 440 W. Тази мощност е подбрана по технологични съображения и е проверена със симулациите, описани по-долу. Захранващото напрежение на нагревателите е ~ 12V.
- За постигане на по-равномерно температурно поле, нагревателите 5 (фиг.1) са разположени в три секции, всяка от които се управлява от отделна термодвойка 3 и отделен терморегулатор. Всяка секция се състои от два нагревателни блока (единият разположен в лявата стена на модула, а другия – в дясната).
- Термодвойките 3 са тип “S”. Всяка подава сигнал до програмируем контролер RT 384, снабден със сериен интерфейс RS485.
- Специална система следи нагревателите за прекъсване. Ако някой нагревател прекъсне, температурата на съответното ниво се поддържа определено време, достатъчно за смяна на повредения, от другия нагревател в двойката.
- Смяната на прекъснал нагревател се извършва в следната последователност:
 1. Изключва се напрежението към съответния нагревател;
 2. Сваля се задния капак;
 3. С подходящи предпазни средства се изважда блокът с повредения нагревател;
 4. Поставя се нов нагревател, свързва се електрически, затваря се капак.



Фиг. 3 Нагревателен блок

Числено моделиране на температурното поле в нагревателния модул

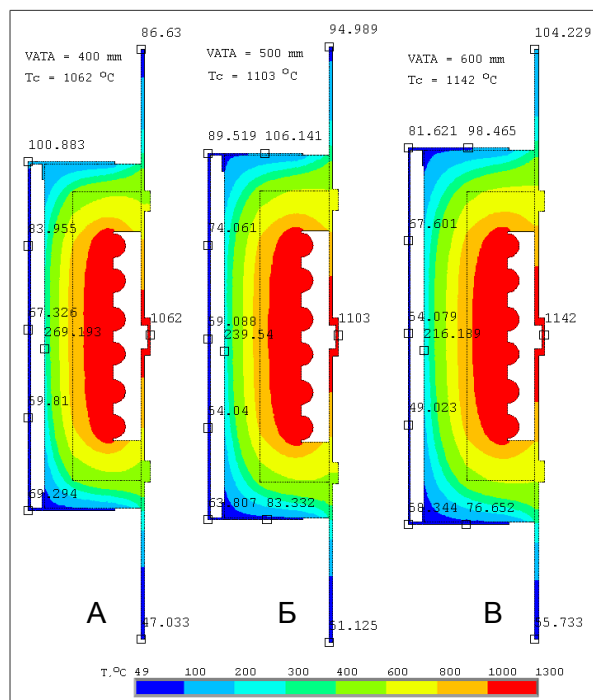
Численото моделиране на температурното поле значително подпомага процеса на проектиране. Компютърната симулация позволява бързо и без разход на средства да се визуализира циркулацията на флуида в нагревателната камера и разпределението на температурата по отделните детайли на модула.

За численото моделиране на температурното поле в нагревателния модул е използван универсален софтуерен продукт за инженерни анализи по метод на крайните елементи ANSYS [4]. Подробности за използвания компютърен модел са дадени в [2].

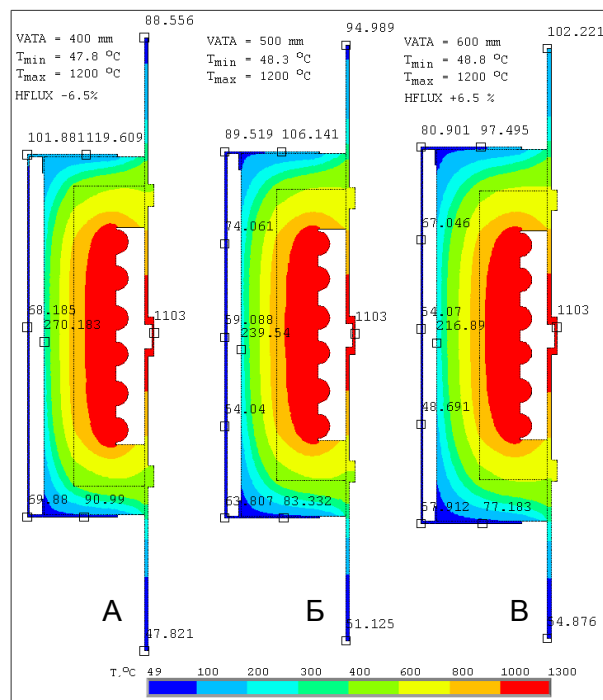
С помощта на компютърна симулация са направени следните анализи:

- Определяне на необходимата дебелина на изолацията. Размерите на работното пространство, както и размерите на слоя лекотегловни тухли са избрани по конструктивни и технологични съображения. За доуточняване дебелината на изолацията, е подходящо да се варира с размерите на слоя от вата. Направени са пресмятания с дебелина на ватата 40, 50 и 60 мм, при активна мощност на нагревателната система 2600 W. Проследено е как се отразява промяната на дебелината на изолацията върху температурата на опитния образец и температурите по външните повърхности на нагревателния модул и захватите.
- Определяне на необходимата мощност на нагревателите за поддържане на работна температура 1100°C.
- Проверка на хомогенността на температурното поле в работното пространство на модула.

На фиг. 4 и 5 са показани резултати от двумерни симулации с дебелина на изолацията 40, 50 и 60 мм – съответно пресмятане А, Б и В.



Фиг. 4 Вариране с дебелината на ватата при постоянна нагревателна мощност



Фиг. 5 Вариране с нагревателната мощност за достигане на работна температура 1100 °C

На фиг.4 са показани резултати от пресмятанията, при които е варирано с дебелината на ватата, при постоянна нагревателна мощност. От фигурата се вижда, че температурата в областта на опитния образец при 40 мм изолация е 1062°C, при 50 мм изолация е 1103°C, а при 60 мм изолация е 1142°C. С намаляване дебелината на изолацията топлинните загуби нарастват. Увеличават се температурите по стените на печта, а намаляват температурите в работното пространство, което е нежелателно. С увеличаване на дебелината на изолацията загубите намаляват, но се увеличават габаритните размери и себестойността на печта.

На фиг. 5 са показани резултатите от пресмятанията при различни стойности на топлинния поток от нагревателите. Търсена е такава стойност на топлинния поток, при която да се получи желаната работна температура – 1100°C в областта на опитния образец. От фигурата се вижда, че намаляването на дебелината на изолацията от 50 на 40 мм трябва да бъде съпроводено с увеличаване на стойността на топлинния поток с 6,5 % за получаването на желаната температура. Аналогично, увеличаването на дебелината от 50 на 60 мм води до намаляване на необходимия топлинен поток с 6,5%. Промяната на топлинния поток е свързана с промяна на мощността електрическите нагреватели.

Като оптимално решение по отношение на съотношението дебелина на ватата/мощност на нагревателите/повърхностна температура, е решено нагревателният модул да има дебелина на ватата 50 мм. В този случай температурата в областта на опитния образец е 1100°C при мощност на нагревателите 2600 W.

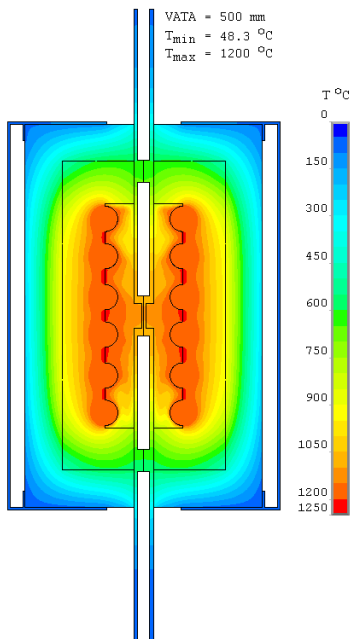
На фиг. 6 е показано разпределението на температурата в работното пространство на избрания вариант, с отчитане свойствата и циркулацията на нагорещения въздух. Вижда се, че поради голямата височина и малката дебелина на работното пространство, температурното поле в широка околност около опитния образец има необходимата хомогенност. Тази област е оцветена с един и същи нюанс, на който съгласно скалата съответства температура 1100-1150°C. Температурата в самото пробно тяло е 1103±2 °C. Градиентът на температурата е значително по-малък, отколкото във въздуха или ватата, поради по-голямата топлопроводност на метала. Той е достатъчно малък, за да се гарантира регламентираната в стандарта точност по отношение на температурата, която за този род изпитвания и температури над 1000 °C е ±5 °C. Съществена неравномерност на температурата в работното пространство на нагревателния модул възниква само в

близост до горната и долната стени на пещта, поради значителното отвеждане на топлина през захватите.

Изработване на нагревателния модул

След като с помощта на компютърни симулации са доуточнени, проверени и потвърдени предвидените в заданието и проекта параметри на нагревателния модул, той е изработен.

На фиг.7 е показана обща снимка на готовия нагревателен модул. Виждат се двата му дяла и заключалките, които ги притискат един към друг, двупластовата изолация, обшивката и капациите. На фиг.8 е показана снимка на вътрешността на модула. Вижда се отворът, през който ще преминават измервателните прибори (лостове на системата за измерване на деформации, контролни термодвойки и др.), трите нагревателни блока на левия дял, както и трите управляващи термодвойки. По време на работа отворът за измервателните прибори се уплътнява с мека вата.



Фиг.6 Температурно поле в работното пространство и останалите елементи



Фиг.7 Общ вид на изработения нагревателен модул



Фиг.8 Снимка на отвора за измерителната апаратура, нагревателите и термодвойките

Заклучение

Тъй като изработката на нагревателния модул беше възложена на специализирана фирма, готовото съоръжение много точно съответства на проекта (виж фиг.1 и фиг.7). Първоначалните тестове показват, че модулет бързо достига и лесно поддържа зададената работна температура, а температурите по външните повърхности съответстват добре на стойностите, получени с компютърна симулация (фиг.4,5,6).

References

1. Ковачев Г., Прангов Л., *Електротермия*, Техника, Sofia, Bulgaria, 1982.
2. Nikolov N., Tsonev V., "Reconstruction of a heating device for brief material testing at high temperature". "Fundamental Sciences and Applications" - Journal of the Technical University Sofia, branch Plovdiv, Vol. 14, pp. 215-219, 2009.
3. Tsonev V., Nikolov N., "Experimental determination of test piece temperature intended for strength testing at increased temperatures", Bulgarian Journal of Engineering Design, Vol. 3, pp.12-15, 2009.
4. ANSYS Release 9.0 Documentation, 2004.