

## ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Д. М. Казикаев

*Московский государственный горный университет*

В. Г. Бондарев

*Белгородский государственный университет*

Во многих отраслях народного хозяйства при создании композиционных материалов, возникает задача определения объемного соотношения исходных материалов в смеси, которое должно удовлетворять определенным требованиям. В таких случаях необходимо проводить поиск оптимального решения задачи на основе выбора наилучшего критерия оптимизации. Если целевая функция и параметры, описывающие ограничения, задаются в виде аналитических выражений, то задачу определения состава композиционного материала можно решить путем математического моделирования процесса структурообразования многокомпонентной системы [1]. Данная работа посвящена решению задачи оптимизации выбора составов композиционного материала на примере твердеющей закладочной смеси.

Основной задачей оптимизации состава закладочной смеси является достижение минимального расхода связующего при получении требуемой прочности формируемого искусственного массива. Следовательно, в качестве оптимизируемого параметра, можно выбрать удельное содержание  $v_{св}$  связующего в твердеющей закладочной смеси [2].

В закладочной смеси связующее, в основном, идет на заполнение пустот, а также на обмазку частиц. В этом случае объем связующего  $V_{св}$  в системе можно определить как сумму объема пустот  $V_{пуст}$  и объема связующего, идущего на обмазку частиц

$$V_{св} = V_{пуст} + \sum_{i=1}^m \delta_i S_i, \quad (1)$$

где  $\delta_i$  – толщина обмазки частиц  $i$ -того компонента заполнителя системы;

$S_i$  – площадь поверхности частиц  $i$ -того компонента;

$m$  – количество компонентов заполнителя в системе.

Из уравнения для плотности упаковки частиц  $\eta$ , для объема пустот в системе  $V_{пуст}$  имеем следующее выражение

$$V_{пуст} = V_p \frac{1-\eta}{\eta}, \quad (2)$$

где  $V_p$  – объем частиц в системе.

Площадь поверхности частиц  $i$ -того компонента  $S_i$  выразим через удельную поверхность частиц  $s_i$

$$S_i = V_i s_i, \quad (3)$$

где  $V_i$  – объем частиц  $i$ -того компонента системы.

Помножив и разделив правую часть этого равенства на объем частиц  $V_p$  и учитывая, что содержание частиц  $i$ -того компонента в системе  $c_i = V_i/V_p$ , имеем

$$S_i = V_p s_i c_i. \quad (4)$$

Подставляя выражения (2) и (4) для объема пустот и площади поверхности частиц  $i$ -того компонента в формулу (1) получим

$$V_{св} = V_p \left( \frac{1-\eta}{\eta} + \sum_{i=1}^m \delta_i c_i s_i \right). \quad (5)$$

По определению объем  $V_{св}$  связующего связан с удельным объемом  $v_{св}$  выражением

$$V_{св} = \frac{v_{св} V_p}{1-v_{св}}. \quad (6)$$

Приравняв правые части выражений (5) и (6) и решая полученное уравнение относительно удельного объема связующего  $V_{св}$ , получим

$$v_{св} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\frac{1-\eta}{\eta} + \sum_{i=1}^m \delta_i c_i s_i}}. \quad (7)$$

Анализ формулы (7) для удельного объема связующего  $v_{св}$  показывает, что наиболее

целесообразно в качестве целевой функции  $Y$  выбрать выражение

$$Y = \frac{1-l}{\eta} + \sum_{i=1}^m \delta_i c_i s_i. \quad (8)$$

Оптимизация целевой функции  $Y$  позволила нам определить то минимальное значение удельного объема связующего  $v_{св}$ , которое необходимо для получения требуемой прочности формируемого искусственного массива.

Для получения закладочной смеси с заданными технологическими свойствами – подвижностью закладочной смеси и прочностью  $R_z$ , искусственного массива – необходимы уравнения связи этих свойств с содержанием составляющих закладочной смеси. В качестве составляющих закладочной смеси будем рассматривать такие материалы, как цемент  $Ц$ , вода  $В$ , щебень  $Щ$  и песок  $П$ . В формулу (8) для определения целевой функции  $Y$  входит толщина обмазки частиц песка  $\delta_n$ . Данная характеристика при неизменной вязкости цементного теста практически полностью определяет подвижность закладочной смеси. Поэтому для твердеющих закладочных смесей значение толщины обмазки  $\delta_n$  частиц песка, при заданных стандартной подвижности и вязкости цементного теста, принято считать равным 0,013 мм. Зная толщину обмазки частиц  $\delta_n$  и определив экспериментально плотности упаковки щебня и песка, а также удельную поверхность песка, можно перейти к оптимизации целевой функции  $Y$ .

Определим вид целевой функции для какого-либо конкретного закладочного материала. Для этого, в качестве примера, выберем двухкомпонентную систему частиц, состоящую только из щебня и песка. Причём будем считать, что частицы щебня раздвинуты частицами песка, то есть непосредственно не контактируют друг с другом. В этом случае необходимо учитывать лишь обмазку связующим частиц песка. Если считать, что толщина обмазки частиц песка одинакова для всех частиц, то уравнение, описывающее целевую функцию  $Y$ , примет следующий вид

$$Y = \frac{1-\eta}{\eta} + \delta_n c_n s_n, \quad (9)$$

где  $c_n$  – содержание песка в системе;  
 $s_n$  – удельная поверхность песка.

Проведя минимизацию целевой функции с использованием уравнения для определения плотности упаковки для бинарных систем частиц [4], можно определить, при каком содержании песка  $c_n$  достигается минимум удельного объема цементного теста  $v_{ц.т.}$ . Если этот расчет производить для одного кубометра закладочной смеси, то удельный объем совпадает по величине с объемом цементного теста, который, если считать воду несжимаемой, равен сумме объемов цемента и воды

$$v_{ц.т.} = \frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{В}{\rho_{в}}. \quad (10)$$

Для учета прочностных свойств бетона воспользуемся эмпирической формулой Болломея [3], описывающей связь водоцементного отношения  $В/Ц$  с прочностью закладки  $R_z$

$$\frac{В}{Ц} = \frac{a}{\frac{R_z}{R_{ц}} + b}, \quad (11)$$

где  $R_{ц}$  – активность цемента;

$a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты (для двухкомпонентной смеси:  $a=0,64$ ;  $b=0,26$ ).

Формулы (9) – (11) составляют полную систему уравнений, необходимых для определения содержания составляющих такого композиционного материала, как твердеющая закладочная смесь. По результатам проведенного исследования был разработан проект расчета оптимального состава композиционного материала, реализованный на основе пакета символьных вычислений Maple.

#### Библиографический список

1. Монахов В. М., Беляева Э. С., Краснер Н. Я. Методы оптимизации. – М.: Просвещение, 1978. – 175 с.
2. Ржевский В. В., Новик Г. Я. Основы физики горных пород - М.: Недра, 1978. - 390 с.
3. Воробьев В. А., Голованов В. Е., Голованова С. А. Математическое моделирование в разработке методов и средств контроля и исследования компо-

УДК 620.19

## НЕКОТОРЫЕ УРОКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ ТРУБЫ ГЛАВНОГО ПАРОПРОВОДА КРЕЙСЕРА «ПЕТР ВЕЛИКИЙ»

Г. Н. Филимонов, В. Н. Павлов, И. А. Повышев  
ЦНИИ конструкционных материалов «Прометей», С.-Петербург

В настоящей работе выполнен комплекс научных исследований по анализу и оценке причин разрушения трубы главного трубопровода в носовом машинно-котельном отделении крейсера «Петр Великий» во время сдаточных ходовых испытаний. Наряду с проведенными экспертными материаловедческими исследованиями был выполнен тщательный анализ всей конструкторской, нормативно-технической, технологической и отчетно-контрольной (паспортной) документации на изготовление и сдачу полуфабрикатов (трубы и поковки фланцев), трубных элементов (гибка труб и приварка фланцев), монтаж паропровода, условия работы и сдаточные испытания трубных элементов в период постройки корабля, а также анализ обстоятельств сварки и осмотр состояния трубной системы после аварии и демонтажа разрушенного участка на месте.

Кроме того, специалисты ЦНИИ КМ «Прометей» принимали участие в работе Межведомственной комиссии, а также ряде совещаний, в частности, по изменению конфигурации, размеров и согласованию материалов труб для замены снятых с корабля (рис.1), по осуществлению дополнительных мероприятий, обеспечивающих выявление причин аварии и недопущение их впредь.

Анализ полученных результатов показывает, что трубные элементы были выполнены из кондиционных материалов, проконтролированы предписанными методами, испытаны внутренним давлением, более, чем вдвое превышающим проектное давле-

ние, но тем не менее трубопровод разрушился при ходовых испытаниях.

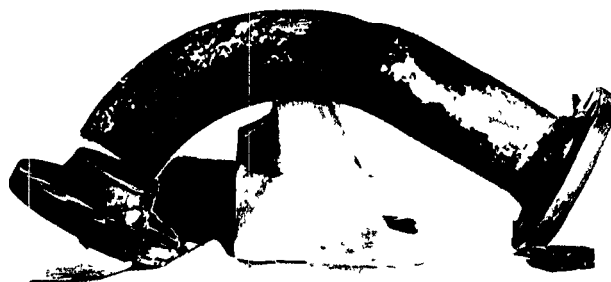


Рис. 1. Общий вид разрушившейся трубы (Ø 135x5) системы главного пара.

И здесь прежде всего следует обратить внимание на тот факт, что разрушение трубопровода произошло в системе, специально предусмотренной для предотвращения аварий. Если бы в системе главного паропровода не было трубопровода отвода избыточного пара в атмосферу на случай превышения давления в коллекторе главного пара, то не было бы и специального трубного элемента, а следовательно, и его разрушения. Отсюда следует заключить, что нужно очень ответственно подходить к проектированию судовых систем безопасности. В данном случае рассматриваемый трубопровод, входящий в систему оборудования второго контура, необходимо было проектировать в соответствии с требованиями «Правил устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов АЭУ» [1,2], а не по обычным (неатомным) правилами на судовые энергоустановки.

При этом следует отметить, что по правилам судостроения был спроектирован