

УДК 66.017

*И.Р. Асланян<sup>1</sup>, Л.И. Рассохина<sup>1</sup>, О.Г. Оспенникова<sup>1</sup>***ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ФАКТОРОВ,  
СУЩЕСТВЕННО ВЛИЯЮЩИХ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДЕЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-3-13

*Изучено влияние количественных составляющих основных компонентов модельных композиций (взаимного растворителя, полимера, упрочняющего компонента и наполнителя) на их технологические свойства (температуру каплепадения и теплоустойчивость). Установлено, что основным параметром, оказывающим значимое влияние на температуру каплепадения, является упрочняющий компонент, а основным параметром, значимо влияющим на теплоустойчивость, является полимер. Регулируя количественное соотношение основных компонентов, выявленных с помощью планирования полного факторного эксперимента методом «крутого восхождения», можно получать модельные композиции с заданными технологическими свойствами.*

**Ключевые слова:** факторный эксперимент, матрица планирования, уравнение регрессии, модельные композиции, температура каплепадения, теплоустойчивость.

*I.R. Aslanyan<sup>1</sup>, L.I. Rassokhina<sup>1</sup>, O.G. Ospennikova<sup>1</sup>***DEFINITION OF QUANTITATIVE FACTORS,  
SIGNIFICANTLY INFLUENCING ON TECHNOLOGICAL  
CHARACTERISTICS OF MODEL COMPOSITIONS**

*In work it is studied influence of quantitative making basic components of model compositions (the mutual solvent, the polymer, strengthening component and filler) on them technological properties (dropping temperature and heat stability). It is established that the key parameter making significant impact on dropping temperature, is strengthening component, and the key parameter which is significantly influencing on heat stability, polymer is. Regulating quantitative ratio of the main the components revealed by means of planning of complete factor experiment method of «abrupt ascension», it is possible to receive model compositions with the set technological properties.*

**Keywords:** factorial experiment, planning matrix, regression equation, model compositions, dropping temperature, heat stability.

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

**Введение**

Известно, что современные модельные композиции (МК) [1–12] для литья по выплавляемым моделям представляют собой сложносоставные смеси, обладающие разнородными свойствами. Это обусловлено наличием большого числа исходных компонентов в их составе. Причем каждый компонент в составе МК на основе синтетических материалов выполняет определенную функциональную роль: взаимный растворитель, пластификатор, упрочняющий компонент, полимер, наполнитель, краситель, поверхностно-активные вещества и добавки.

Все вместе исходные компоненты формируют определенный уровень технологических и физико-механических характеристик МК в целом. Одними из основных показателей, характеризующих технологические свойства МК при изготовлении моделей отливок, являются температура каплепадения и теплоустойчивость. Выявление общих закономерностей изменения технологических характеристик МК в зависимости от количественного состава даже основных исходных компонентов, а следовательно, и сама разработка современных МК, предназначенных для изготовления моделей отливок ответственных деталей, представляет собой довольно сложную задачу количественного и качественного выбора исходных компонентов.

Для увеличения результативности научно-практических исследований при разработке МК целесообразно применять математико-статистические методы планирования экспериментов, которые позволяют существенно сократить сроки решения, снизить затраты на исследования и повысить качество полученных результатов.

Данная работа посвящена исследованию влияния основных компонентов (взаимного растворителя, полимера, упрочняющего компонента и наполнителя) на некоторые технологические свойства МК с целью выявления определяющих факторов при помощи математических методов планирования эксперимента.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 9.6. «Технологии изготовления лопаток ГТД с высокоэффективным охлаждением, включая керамические формы и стержни для лопаток из новых перспективных сплавов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [13].

### **Материалы и методы**

Численное моделирование осуществляли с помощью планирования полного факторного эксперимента методом «крутого восхождения» [14, 15]. При этом изучали зависимость температуры каплепадения и теплоустойчивости МК от количественного состава основных компонентов (взаимного растворителя, полимера, упрочняющего компонента и наполнителя).

В качестве независимых переменных выбрали количественные составляющие: упрочняющий компонент – УК ( $X_1$ ), взаимный растворитель – ВР ( $X_2$ ), полимер – П ( $X_3$ ) и наполнитель – Н ( $X_4$ ). В качестве зависимой переменной рассматривали температуру каплепадения ( $y_1$ ) и теплоустойчивость ( $y_2$ ).

В первом приближении строили линейную модель, поэтому каждый из факторов варьировали на двух уровнях. Линейное преобразование факторного пространства, а именно: интервалы варьирования факторов и их значения в натуральном масштабе – указаны в табл. 1.

*Таблица 1*

<b>Уровни факторов</b>				
Факторы	$X_1$ (УК)	$X_2$ (ВР)	$X_3$ (П)	$X_4$ (Н)
Основной уровень ( $X_i$ )	45,1	36,15	11,9	35,5
Интервал варьирования ( $\Delta X_i$ )	2,1	1,15	1,4	5,5
Верхний уровень ( $x_i=1$ )	47,2	37,3	13,3	41,0
Нижний уровень ( $x_i=-1$ )	43,0	35,0	10,5	30,0

Кодированные значения количественных факторов ( $x_i$ ) связаны с натуральными ( $X_i$ ) соотношениями:

$$x_1 = \frac{X_1 - 45,1}{2,1}; \quad x_2 = \frac{X_2 - 36,15}{1,15}; \quad x_3 = \frac{X_3 - 11,9}{1,4}; \quad x_4 = \frac{X_4 - 35,5}{5,5}. \quad (1)$$

Для получения адекватной линейной модели интервалы варьирования стремились выполнить насколько возможно более узкими для получения более точной линейной аппроксимации. При этом учитывали, что интервал варьирования не должен превышать удвоенной среднеквадратичной ошибки в определении каждого фактора.

Для получения более полной информации об изучаемых зависимостях воспользовались полным факторным экспериментом. Количество опытов  $N$  определяли по количеству факторов  $k$  в соответствии с выражением

$$N=2^k=2^4=16. \quad (2)$$

В соответствии с выбранным планом изготовили 16 составов МК. Измерения температуры каплепадения и теплоустойчивости проводили на трех образцах каждого состава и указывали как среднее значение по трем опытам.

### Результаты и обсуждение

Математическая модель после реализации опытов полного факторного эксперимента имеет вид:

$$y=b_0+b_1x_1+b_2x_2+\dots+b_{12}x_1x_2+b_{13}x_1x_3+\dots+b_{123}x_1x_2x_3+b_{124}x_1x_2x_4+\dots+b_{1234}x_1x_2x_3x_4, \quad (3)$$

где  $b_i$  – коэффициенты регрессии.

Для расчета коэффициентов этой модели построили расширенную матрицу планирования и результатов опытов по температуре каплепадения ( $y_1$ ) (табл. 2) и по теплоустойчивости ( $y_2$ ) (табл. 3) соответственно.

Таблица 2

**Расширенная матрица плана  $2^4$  и результатов опыта по температуре каплепадения ( $y_1$ )**

Номер опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_1x_4$	$x_2x_3$	$x_2x_4$	$x_3x_4$	$x_1x_2x_3$	$x_1x_2x_4$	$x_1x_3x_4$	$x_2x_3x_4$	$x_1x_2x_3x_4$	$y_1$
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	89,0
2	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-	89,0
3	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	90,0
4	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+	91,5
5	+	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-	89,0
6	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	90,8
7	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	91,5
8	+	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	90,5
9	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-	88,0
10	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	+	91,0
11	+	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	88,0
12	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	91,5
13	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	91,0
14	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-	91,0
15	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	89,0
16	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	90,5

Коэффициенты регрессии рассчитывали по формуле

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i}{N}, \quad (4)$$

где  $i=0, 1, 2, \dots, 16$ .

Таблица 3

Расширенная матрица плана 2<sup>4</sup> и результатов опыта по теплоустойчивости (y<sub>2</sub>)

Номер опыта	x <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>4</sub>	x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>2</sub> x <sub>4</sub>	x <sub>3</sub> x <sub>4</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> x <sub>4</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>3</sub> x <sub>4</sub>	x <sub>2</sub> x <sub>3</sub> x <sub>4</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> x <sub>3</sub> x <sub>4</sub>	y <sub>2</sub>
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	42,0
2	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	42,0
3	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	43,0
4	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+	44,0
5	+	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-	44,0
6	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	44,0
7	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	44,0
8	+	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	44,0
9	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-	40,0
10	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	+	43,0
11	+	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	43,0
12	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	44,0
13	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	45,0
14	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-	44,0
15	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	45,0
16	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	44,0

В результате произведенных вычислений получили следующий общий вид линейных уравнений регрессии:

$$\begin{aligned}
 y_1 = & 90,08 - 0,6438x_1 - 0,2313x_2 - 0,3313x_3 + 0,0813x_4 + \\
 & + 0,0438x_1x_2 - 0,3563x_1x_3 + 0,3563x_1x_4 - 0,2688x_2x_3 - \\
 & - 0,4813x_2x_4 + 0,0438x_3x_4 + 0,2063x_1x_2x_3 - 0,2063x_1x_2x_4 + \\
 & + 0,2688x_1x_3x_4 + 0,1063x_2x_3x_4 + 0,3313x_1x_2x_3x_4;
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 y_2 = & 43,44 - 0,1875x_1 - 0,4375x_2 - 0,8125x_3 - 0,0625x_4 - \\
 & - 0,0625x_1x_2 - 0,4375x_1x_3 + 0,0625x_1x_4 - 0,4375x_2x_3 + \\
 & + 0,0625x_2x_4 + 0,1875x_3x_4 - 0,0625x_1x_2x_3 + 0,1875x_1x_2x_4 + \\
 & + 0,3125x_1x_3x_4 + 0,0625x_2x_3x_4 + 0,1875x_1x_2x_3x_4.
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

В дальнейшем определили статистическую значимость каждого из 16 коэффициентов регрессии уравнения (5). Поскольку в данном случае использовали равномерное дублирование опытов, дисперсию оценок коэффициентов рассчитали по формуле

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{n \cdot N},
 \tag{7}$$

где n=3 – количество повторений каждого опыта; S<sub>y</sub><sup>2</sup> – дисперсия опыта, рассчитанная по известным методикам [14].

Дисперсия опыта S<sub>y</sub><sup>2</sup>=0,9868 – для температуры каплепадения и S<sub>y</sub><sup>2</sup>=0,8253 – для теплоустойчивости соответственно. Отсюда дисперсия оценок коэффициентов S<sub>b<sub>i</sub></sub><sup>2</sup>=0,0206, а среднеквадратичная ошибка S<sub>b<sub>i</sub></sub>=0,1434 для температуры каплепадения; для теплоустойчивости дисперсия оценок коэффициентов S<sub>b<sub>i</sub></sub><sup>2</sup>=0,0172, а среднеквадратичная ошибка S<sub>b<sub>i</sub></sub>=0,1311 соответственно.

Табличное значение t-критерия Стьюдента t<sub>0,05;32</sub>=2,04 в обоих рассматриваемых случаях [14] при уровне значимости α=0,05 и числе степеней свободы f<sub>1</sub>=N(n-1)=32.

Отсюда доверительный интервал коэффициентов регрессии  $\Delta_{b_i}$  для температуры каплепадения равен

$$\Delta_{b_i} = t_{\alpha; f_1} \cdot S_{b_i} = 0,2925. \quad (8)$$

Коэффициенты считаются статистически значимыми, если их абсолютная величина равна доверительному интервалу или больше его, т. е.  $b_i \geq \Delta_{b_i}$  [14]. В данном случае  $b_i \geq 0,2925$ , т. е. это  $b_1, b_3, b_{13}, b_{14}, b_{24}, b_{1234}$ .

Статистически незначимые коэффициенты  $b_2, b_4, b_{12}, b_{23}, b_{34}, b_{123}, b_{124}, b_{134}, b_{234}$  из уравнения (5) исключили, и после реализации полного факторного эксперимента  $2^4$  уравнение регрессии для температуры каплепадения приняло вид:

$$y_1 = 90,08 - 0,6438x_1 - 0,3313x_3 - 0,3563x_1x_3 + 0,3563x_1x_4 - 0,4813x_2x_4 + 0,3313x_1x_2x_3x_4. \quad (9)$$

Доверительный интервал коэффициентов регрессии  $\Delta_{b_i}$  для теплоустойчивости равен

$$\Delta_{b_i} = t_{\alpha; f_1} \cdot S_{b_i} = 0,2675. \quad (10)$$

Статистически значимые коэффициенты, т. е.  $b_i \geq 0,2675$  – это  $b_2, b_3, b_{13}, b_{23}, b_{134}$ .

После исключения из уравнения (6) статистически незначимых коэффициентов  $b_1, b_4, b_{12}, b_{14}, b_{24}, b_{34}, b_{123}, b_{124}, b_{234}, b_{1234}$  и после реализации полного факторного эксперимента  $2^4$  уравнение регрессии для теплоустойчивости приняло вид:

$$y_2 = 43,44 - 0,4375x_2 - 0,8125x_3 - 0,4375x_1x_3 - 0,4375x_2x_3 + 0,3125x_1x_3x_4. \quad (11)$$

Гипотезу об адекватности модели проверяли с помощью  $F$ -критерия Фишера. Для этого с помощью уравнений (9) и (11) определяли расчетные значения температуры каплепадения  $y_{1\text{расч}}$  и теплоустойчивости  $y_{2\text{расч}}$  модельных составов и сопоставляли их с экспериментальными значениями  $y_{1\text{эксп}}$  (табл. 4) и  $y_{2\text{эксп}}$  (табл. 5) соответственно.

Таблица 4

Сопоставление экспериментальных и расчетных данных температуры каплепадения

Номер опыта	$y_{\text{эксп}}$	$y_{\text{расч}}$	$\Delta y$	$\Delta y^2$
1	89,0	89,0	0	0
2	89,0	89,6	0,6	0,36
3	90,0	89,4	0,6	0,36
4	91,5	91,2	0,3	0,09
5	89,0	89,8	0,8	0,64
6	90,8	90,0	0,8	0,64
7	91,5	91,4	0,1	0,01
8	90,5	90,4	0,1	0,01
9	88,0	88,6	0,6	0,36
10	91,0	92,0	1,0	1,0
11	88,0	88,2	0,2	0,04
12	91,5	90,4	1,1	1,21
13	91,0	90,6	0,4	0,16
14	91,0	91,2	0,2	0,04
15	89,0	89,0	0	0
16	90,5	90,8	0,3	0,09

Сопоставление экспериментальных и расчетных данных теплоустойчивости

Номер опыта	$U_{\text{экс}}$	$U_{\text{расч}}$	$\Delta y$	$\Delta y^2$
1	42,0	41,7	0,3	0,09
2	42,0	41,9	0,1	0,01
3	43,0	43,3	0,3	0,09
4	44,0	43,5	0,5	0,25
5	44,0	44,3	0,3	0,09
6	44,0	44,1	0,1	0,01
7	44,0	44,3	0,3	0,09
8	44,0	44,1	0,1	0,01
9	40,0	41,1	1,1	1,21
10	43,0	43,3	0,3	0,09
11	43,0	42,7	0,3	0,09
12	44,0	44,1	0,1	0,01
13	45,0	44,9	0,1	0,01
14	44,0	44,3	0,3	0,09
15	45,0	44,9	0,1	0,01
16	44,0	43,5	0,5	0,25

Поскольку дублирование опытов было равномерным, дисперсию неадекватности определяли по формуле

$$S_{\text{неад}}^2 = \frac{n \sum_{i=1}^N (y_{i\text{расч}} - \bar{y}_{i\text{экс}})^2}{f_2}, \quad (12)$$

где  $f_2 = N - k'$  – число степеней свободы,  $k'$  – число оставленных коэффициентов уравнения (включая  $b_0$ ).

Полученные модели (9) и (11) включали 7 и 6 коэффициентов соответственно, поэтому число степеней свободы  $f_2 = 9$  – для температуры каплепадения и  $f_2 = 10$  – для теплоустойчивости, а дисперсия неадекватности для температуры каплепадения  $S_{\text{неад}}^2 = 1,67$  и для теплоустойчивости  $S_{\text{неад}}^2 = 0,72$  соответственно.

Расчетное значение  $F$ -критерия Фишера определяли по формуле

$$F_{f_2; f_1}^{\text{расч}} = \frac{S_{\text{неад}}^2}{S_y^2}. \quad (13)$$

$F$ -критерий Фишера равен отношению дисперсии неадекватности к дисперсии опыта. Его физический смысл заключается в том: во сколько раз модель предсказывает хуже по сравнению с опытом.

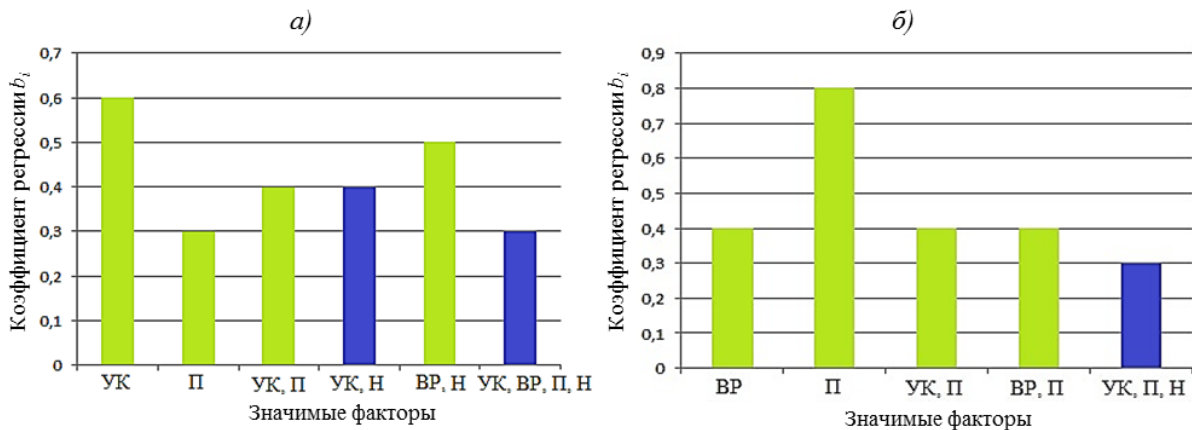
Математическая модель считается адекватной, если рассчитанное значение  $F$ -критерия не превышает табличного при выбранном уровне значимости, т. е. когда  $F^{\text{расч}} \leq F^{\text{табл}}$ . Уровень значимости в обоих случаях –  $\alpha = 0,05$ . Для температуры каплепадения расчетное значение  $F$ -критерия Фишера составляет  $F_{9;32}^{\text{расч}} = 1,69$ , табличное значение –  $F_{0,05;9;32}^{\text{табл}} = 2,21$ . Для теплоустойчивости расчетное значение  $F$ -критерия Фишера составляет  $F_{10;32}^{\text{расч}} = 0,87$ , табличное значение –  $F_{0,05;10;32}^{\text{табл}} = 2,16$ .

Поскольку  $F^{\text{расч}} < F^{\text{табл}}$  в обоих случаях, гипотеза об адекватности математических моделей (9) и (11) при 5%-ном уровне значимости не отвергается.

Из уравнения (9) видно, что наиболее значимое влияние на температуру каплепадения МК из рассмотренных компонентов оказывают: упрочняющий компонент и сочетания взаимного растворителя и наполнителя, упрочняющего компонента и полимера, упрочняющего компонента и наполнителя. Менее значимое влияние оказывают: полимер и совместное влияние всех четырех рассмотренных факторов – упрочняющего компонента, взаимного растворителя, полимера и наполнителя. Остальные факторы и их совместное взаимодействие оказывают незначительное влияние на температуру каплепадения МК.

Из уравнения (11) видно, что наиболее значимое влияние на теплоустойчивость МК из рассмотренных компонентов оказывает полимер. Менее значимое влияние оказывают: взаимный растворитель; совместное влияние упрочняющего компонента и полимера; совместное влияние взаимного растворителя и полимера; тройное взаимодействие упрочняющего компонента, полимера и наполнителя. Остальные факторы и их совместное взаимодействие оказывают незначительное влияние на теплоустойчивость МК.

Для анализа полученных математических моделей построили диаграммы влияния значимых факторов на температуру каплепадения (см. рисунок, а) и теплоустойчивость (см. рисунок, б) МК.



Влияние значимых факторов и их взаимодействий (■ – положительное значение коэффициентов, ■ – отрицательное) на температуру каплепадения (а) и теплоустойчивость (б) МК (УК – упрочняющий компонент; ВР – взаимный растворитель; П – полимер; Н – наполнитель)

Видно (см. рисунок, а), что с увеличением количества упрочняющего компонента и полимера в МК температура ее каплепадения уменьшится. Взаимный растворитель и наполнитель (как отдельные факторы) не влияют на температуру каплепадения, но в сочетании друг с другом их взаимодействие оказывает значительное влияние на эту характеристику и по значимости превосходит влияние полимера. Таким образом, совместные взаимодействия исследуемых компонентов оказывают неоднозначное влияние на температуру каплепадения МК: их сочетания могут приводить как к увеличению, так и к уменьшению температуры каплепадения.

Видно (см. рисунок, б), что с увеличением количества полимера и взаимного растворителя в МК ее теплоустойчивость уменьшится. В то время как упрочняющий компонент и наполнитель не оказывают значительного влияния на теплоустойчивость МК. Совместные сочетания исследуемых компонентов также оказывают неоднозначное влияние на теплоустойчивость МК.

Представляет практический интерес решение задачи определения оптимальных температуры каплепадения и теплоустойчивости МК, обеспечивающих наилучшие технологические свойства. Эту задачу решали методом «крутого восхождения».

Основной принцип этого метода следующий: движение из некоторой точки внутри изученной области в направлении градиента, т. е. в сторону наибольшей производной функции отклика, является кратчайшим путем к экстремуму. Для осуществления этого движения по градиенту значения рассматриваемых факторов необходимо изменять пропорционально величинам коэффициентов  $b_1, b_2, b_3, b_4$  с учетом их знака.

При этом шаги в изменении факторов рассчитывали в натуральном масштабе. Для этого сначала определили произведения коэффициентов на соответствующие интервалы варьирования факторов, т. е.  $b_i \Delta X_i$ , затем пропорционально этим произведениям назначили шаги.

Согласно рисунку, *a*, основными непарными факторами, значимо влияющими на температуру каплепадения МК, являются содержание упрочняющего компонента и полимера. При увеличении количества упрочняющего компонента и полимера в МК температура ее каплепадения уменьшается. Эффект влияния наполнителя и взаимного растворителя признан статистически незначимым, хотя их совместное действие оказывает влияние на температуру каплепадения МК (см. рисунок, *a*), поэтому в первом приближении для простоты эксперимента их учитывать не будем. За основной фактор, подлежащий изменению, приняли содержание упрочняющего компонента.

Шаги в изменении факторов определяли исходя из технологических соображений. Последовательность реализации этапов «крутого восхождения» представлена в табл. 6.

Таблица 6

Этапы «крутого восхождения» для температуры каплепадения

Факторы	$X_1$	$X_3$	$y$
$b_i$	-0,6	-0,3	–
$b_i \Delta X_i$	-1,26	-0,42	–
Шаг	-1,0	-0,25	–
Шаг после округления	-1,0	-0,25	–
$X_{i0}$	42,0	10,25	–
Запланированный опыт		10,5	–
Запланированный опыт	43,0	10,75	–
Реализованный опыт		11,0	91,0
Запланированный опыт		11,25	–
Запланированный опыт	44,0	11,5	–
Запланированный опыт		12,0	–
Запланированный опыт		12,25	–
Запланированный опыт		12,5	–
Реализованный опыт	45,0	12,75	89,5
Запланированный опыт		13,0	–
Реализованный опыт		13,25	90,0
Запланированный опыт		10,5	–
Запланированный опыт	46,0	11,75	–
Запланированный опыт		13,25	–
Реализованный опыт		10,5	89,0
Запланированный опыт	47,0	11,75	–
Запланированный опыт		13,25	–

Согласно рисунку, б, основными непарными факторами, значимо влияющими на теплоустойчивость МК, являются содержание количества полимера и взаимного растворителя. При увеличении количества полимера и взаимного растворителя в МК ее теплоустойчивость уменьшается. Эффект влияния упрочняющего компонента и наполнителя был признан статистически незначимым, хотя их совместное действие с полимером оказывает влияние на теплоустойчивость МК (см. рисунок, б), поэтому для простоты эксперимента их учитывать не будем. За основной фактор, подлежащий изменению, приняли содержание полимера.

Шаги в изменении факторов определяли исходя из технологических соображений. Последовательность реализации этапов «крутого восхождения» представлена в табл. 7.

Таблица 7

Этапы «крутого восхождения» для теплоустойчивости

Факторы	$X_2$	$X_3$	$y$
$b_i$	-0,4	-0,8	–
$b_i \Delta X_i$	-0,46	-1,12	–
Шаг	-1,0	-0,25	–
Шаг после округления	-1,0	-0,25	–
$X_{i0}$	34,0	10,25	–
Реализованный опыт		11,0	42
Запланированный опыт	35,0	12,0	–
Реализованный опыт		13,25	40
Реализованный опыт		10,5	43
Запланированный опыт	36,0	11,5	–
Запланированный опыт		12,5	–
Запланированный опыт		11,0	–
Запланированный опыт	37,0	12,0	–
Реализованный опыт		13,0	41

Планирование эксперимента с использованием метода «крутого восхождения» показало, что на технологические свойства МК, такие как температура каплепадения и теплоустойчивость, влияние оказывают упрочняющий компонент, полимер и взаимный растворитель, причем полимер оказывает влияние в обоих случаях. Это влияние не равноценно, хотя и имеет одинаковый знак, т. е. в обоих случаях увеличение содержания полимера будет приводить к понижению как температуры каплепадения, так и теплоустойчивости. Однако если температуру каплепадения увеличение содержания полимера понижает со значением коэффициента, равным 0,3, то в случае теплоустойчивости этот коэффициент больше в 2,7 раза и равен 0,8.

В обоих случаях эффект влияния наполнителя на рассматриваемые свойства также признан статистически незначимым, несмотря на то, что его содержание в МК превышало 30%. Это свидетельствует о том, что рассматриваемые технологические свойства МК (хотя последние и представляют собой сложносоставные смеси) определяют компоненты, взаимно растворяющиеся друг в друге и образующие в основе МК гомогенный раствор. Известно, что наполнитель при введении его в МК не растворяется в ней, а находится во взвешенном состоянии в растворе. Основу такого раствора составляет взаимный растворитель и упрочняющий компонент. Проведенные исследования показали, что вторым по значимости фактором, оказывающим влияние на температуру каплепадения, является парное взаимодействие взаимного растворителя и наполнителя. Таким образом, количество наполнителя и его распределение в растворе оказывает влияние на температуру каплепадения в совокупности с компонентами раствора.

Совместное влияние наполнителя и упрочняющего компонента также оказывает влияние на температуру каплепадения, хотя и в меньшей степени. Причем, если увеличение совместного содержания наполнителя и взаимного растворителя приводит к уменьшению температуры каплепадения, то увеличение совместного содержания наполнителя и упрочняющего компонента приводит к увеличению температуры каплепадения.

Несмотря на то, что проведенные исследования показали, что для повышения теплоустойчивости необходимо снизить содержание полимера в МК, корректировка их составов требует дальнейшего изучения таких свойств, как прочность, зольность и усадка МК.

### Заключения

Использование полного факторного эксперимента при разработке МК с заданными технологическими свойствами позволило определить степень влияния количественных факторов (основных компонентов, входящих в состав МК) на температуру каплепадения и теплоустойчивость МК. В результате проведенных экспериментов установлено, что на температуру каплепадения основное влияние оказывает упрочняющий компонент и полимер, а на теплоустойчивость – полимер и взаимный растворитель. С увеличением количества упрочняющего компонента и полимера в МК температура ее каплепадения уменьшится. Теплоустойчивость МК будет уменьшаться с увеличением количества полимера и взаимного растворителя в ее составе. При этом содержание наполнителя (как отдельный фактор) не оказывает значительного влияния на температуру каплепадения и теплоустойчивость МК, но оказывает влияние в сочетании с другими компонентами, входящими в состав МК.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // Наука и жизнь. 2010. №4. С. 2–7.
2. Перов Н.С. Конструирование полимерных материалов на молекулярных принципах. I. Создание полимерных материалов с дополнительными механизмами диссипации механической энергии при низких температурах // Авиационные материалы и технологии. 2017. №3 (48). С. 50–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-50-55.
3. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2018. №2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
4. Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Попков О.В. Способ вычисления эффективных параметров периодической среды // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №6 (54). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.11.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-9-9.
5. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // Вестник Российской академии наук. 2002. Т. 72. №1. С. 3–12.
6. Филин В.Ю., Артемьев Д.М., Ильин А.В., Ларионов А.В. О проблемах перехода к количественным оценкам энергоемкости разрушения при испытаниях падающим грузом образцов натурной толщины // Авиационные материалы и технологии. 2017. №4 (49). С. 87–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-87-94.
7. Тимошков П.Н., Хрульков А.В., Язвенко Л.Н. Композиционные материалы в автомобильной промышленности (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №6 (54). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.11.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-7-7.

8. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технология, покрытия / под общ. ред. Е.Н. Каблова. 2-е изд. М.: Наука, 2006. 632 с.
9. Каблов Е.Н. Материалы и технологии ВИАМ для «Авиадвигателя» // Пермские авиационные двигатели. 2014. №31. С. 43–47.
10. Каблов Е.Н. Разработки ВИАМ для газотурбинных двигателей и установок // Крылья Родины. 2010. №4. С. 31–33.
11. Оспенникова О.Г., Аслаян И.Р. Направления развития технологии изготовления модельных композиций для лопаток и других деталей ГТД // Литейное производство. 2018. №3. С. 20–24.
12. Аслаян И.Р., Оспенникова О.Г. Современные тенденции развития технологии изготовления модельных композиций для литья жаропрочных сплавов // Сб. докл. Всерос. науч.-технич. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования в области создания литейных жаропрочных никелевых и интерметаллидных сплавов и высокоэффективных технологий изготовления деталей ГТД». М.: ВИАМ, 2017. С. 49–58.
13. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
14. Славутский Л.А. Основы регистрации данных и планирования эксперимента: учеб. пособие. Чебоксары: Изд-во ЧГУ, 2006. 200 с.
15. Аслаян И.Р., Шустер Л.Ш., Семенов В.И. Определение факторов, существенно влияющих на фреттинг-изнашивание электролитических NiP покрытий // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16. №1 (46). С. 57–61.