

# О ПОВЫШЕНИИ ИНФОРМАТИВНОСТИ БАЗ ДАННЫХ ПО ЖАРОПРОЧНЫМ СПЛАВАМ ДЛЯ МОНОКРИСТАЛЬНОГО ЛИТЬЯ

А.А. Ганеев, П.Н. Никифоров

При создании баз данных (БД) по никелевым жаропрочным сплавам (ЖС) используются сведения из отечественных и зарубежных источников, где значения жаропрочностей приводятся при различных температурах испытания (ТИ). Анализ показал, что свойства ЖС группируются по ТИ в зависимости от страны-производителя (ЖС, у которых значения жаропрочности приводятся для ТИ 816, 926, 982, 1038 °С – исключительно производства США) и поэтому объёмы выборок ЖС при различных ТИ резко различаются (см. рис. 1). Возникает необходимость повышения информативности БД, т.е. пополнения БД путём интерполяции значениями жаропрочностей при ТИ, по которым отсутствует информация в первоисточниках.

Существует три подхода к подбору интерполирующей функции  $z(x)$  по набору  $N$  значений  $Z_1, Z_2, \dots, Z_N$ :

1) интерполяция полиномами степени  $(N-1)$  (полиномиальная);

2) интерполяция сплайнами (кусочно-полиномиальная);

3) интерполяция по методу наименьших квадратов (МНК).

При полиномиальной и кусочно-полиномиальной интерполяции на исходные данные накладывается условие однозначности интерполируемой функции  $\psi(x)$ :

$$\psi(x_1) \neq \psi(x_2): x_1 \neq x_2. \quad (1)$$

Анализ информации из БД показал, что у целого ряда ЖС одним и тем же значениям ТИ и приложенного напряжения соответствуют несколько экспериментальных точек, т.е. условие однозначности (1) не выполняется. Т.о., применение полиномиальной и кусочно-

полиномиальной интерполяции для повышения информативности БД невозможно и в данной работе будет применяться интерполяция по МНК.

Улучшить качество интерполяции из-за «выравнивания» интерполирующей функции может правильный выбор шкал измерения. Изменение шкалы измерения, например, аргумента в системе координат «Время до разрушения – Жаропрочность сплава», означает переход к системе координат «Параметр  $P$ , характеризующий время до разрушения – Жаропрочность сплава», где параметр  $P$  является функцией времени до разрушения, т.е.  $P = f(\tau)$ . Аналогично производится и преобразование шкалы измерения любой другой величины (ТИ и др.).

Для сглаживания зависимости жаропрочности от времени до разрушения применяются полулогарифмические шкалы  $P = \lg(\tau)$ . Однако преобразование типа  $P = \lg(T)$ , для большинства ЖС приводит лишь к незначительному «выравниванию». Показано, что набор шкал, обеспечивающий наибольшее сглаживание интерполяционной кривой зависимости жаропрочности от ТИ, для никелевых ЖС с поликристаллической структурой следует определять индивидуально для каждого ЖС. Это связано с тем, что поликристаллические никелевые ЖС неоднородны по химическому и фазовому составу и на их свойства оказывает сильное влияние наличие границ зёрен.

Никелевые ЖС с направленной и монокристаллической структурой имеют сходный химический и фазовый состав, а влияние границ зёрен на их свойства сведено до мини-

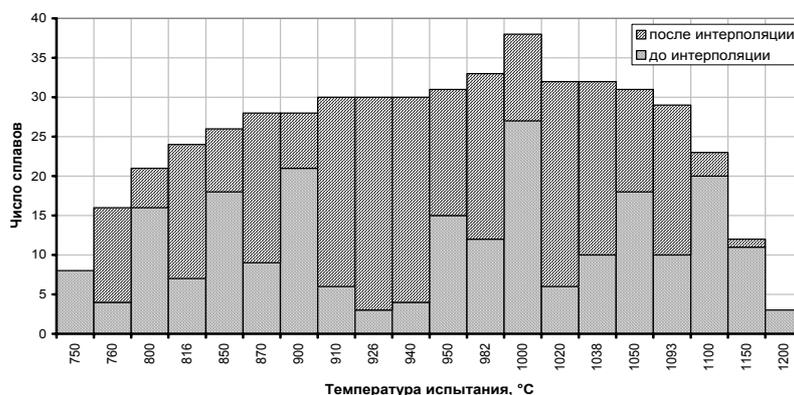


Рисунок 1 – Распределение числа ЖС по ТИ до и после интерполяции

Данное исследование частично поддержано Грантом РФ Т02-05.1-2750 «Фундаментальные исследования в области технических наук»

мума. Показано, что зависимость жаропрочности сплава от ТИ и времени до разрушения имеет вид

$$\lg[\sigma(T, \tau)] = \varphi(P), \quad (2)$$

где  $P$  – некоторый параметр, являющийся функцией ТИ  $T$  и времени до разрушения образца  $\tau$ .

Предложено несколько вариантов параметра  $P$ :

1) параметр Ларсона-Миллера

$$P_{LM} = T[C + \lg(\tau)];$$

2) параметр Менсона-Хеферда

$$P_{MH} = [\lg(\tau) - \lg(\tau_A)](T - T_A)^{-1};$$

3) параметр Менсона-Саккопа

$$P_{MS} = \lg(\tau) - BT;$$

4) параметр Орра-Шерби-Дорна

$$P_{OSD} = \tau \exp(-B/T);$$

5) параметр Голдхофа-Шерби

$$P_{GS} = [\lg(\tau) - \lg(\tau_A)](T^{-1} - T_A^{-1}),$$

где константы материала сплава  $B$ ,  $C$ ,  $T_A$  и  $\tau_A$  определяются для каждого ЖС индивидуально. Поскольку данные параметры одновременно являются функциями и ТИ, и времени до разрушения образца, возможна интерполяция значений жаропрочности ЖС для различных ТИ и времени до разрушения.

Сравним эффективность интерполяции зависимости жаропрочности сплава от ТИ для никелевого ЖС в системах координат « $P_{LM} - \lg(\sigma)$ », « $P_{MH} - \lg(\sigma)$ », « $P_{MS} - \lg(\sigma)$ », « $P_{OSD} - \lg(\sigma)$ » и « $P_{GS} - \lg(\sigma)$ ». Лучшей считали ту систему координат, которой соответствует минимальное среднее значение точностей интерполирования жаропрочности:

$$\overline{\Delta Z}_j = \frac{1}{N-2} \sum_{k=2}^{N-1} \left| \frac{Z_k - z_k(P_{jk})}{Z_k} \right|, \quad (3)$$

где  $Z_k$  – значение жаропрочности сплава в  $k$ -м узле интерполяции;  $z_k(x)$  – интерполирующая функция, рассчитанная по выборке с исключённым  $k$ -м узлом интерполяции;  $P_k$  – значение параметра  $P$  в  $k$ -м узле.

Сравнение точности интерполяции значений жаропрочности для ТИ в диапазоне от 750 до 1200 °С производили на примере никелевых ЖС типа ЖС32, РВА-1480 и СМСХ-10, применяемых для производства лопаток ГТД с направленной и монокристалльной структурой. В соответствии с критерием (3) наиболее эффективной системой координат для интерполяции жаропрочности никелевых ЖС для отливок с направленной и монокристалльной структурой является система координат «Параметр Менсона-Саккопа – Логарифм жаропрочности сплава». Используя интерполяцию по МНК в данной системе координат, определили значения жаропрочности ЖС из БД для промежуточных значений ТИ и времени до разрушения. Результаты применения данной процедуры повышения информативности БД приведены на рис. 1.

Интерполяция свойств ЖС позволяет преобразовать информацию в БД, добавив значения жаропрочности по отсутствующим ТИ, что увеличивает количество рассматриваемых ЖС в 2...3 раза (см. рисунок. 1), а успешный подбор нелинейных шкал повышает точность и эффективность применения процедуры интерполяции. Появляется возможность одновременного анализа ЖС, полученных из разных первоисточников, свойства которых приведены при различных ТИ, исчезает нежелательное разделение БД на выборки по странам-производителям.