КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАССОПЕРЕНОСА АЛЮМИНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЗАЩИТНЫХ СЛОЕВ НА ДЕТАЛЯХ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Мухамедов А.А. доц., Гузашвили К.В. 2-курс баз. докт. (PhD)
Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, г. Ташкент

Цифровизация технологических процессов в машиностроении требует создания прогностических моделей для управления качеством поверхностного слоя. В геофизическом приборостроении наконечники кабельные (например, типа НКБМ 3-36) работают при температурах до 120°С и гидростатическом давлении до 80 МПа. Традиционно такие детали изготавливаются из импортных коррозионностойких сплавов [2]. Эффективной альтернативой является применение стали 40Х с термодиффузионным алитированием, что значительно повышает ресурс элементов в агрессивных средах.

Для обеспечения надежности узла критически важно контролировать равномерность покрытия на деталях сложной формы. На рис. 1 представлен общий вид наконечника [1].



Рис. 1. Общий вид кабельного наконечника НКБМ 3-36: *1 - защитный кожух; 2 – корпус наконечника; 3 – наконечник; 4 - резиновое кольцо; 5 - фторопластовое кольцо; 6 - свечной мост; 7 - вилка контакта с никелевым покрытием; 8 - розетка контакта с золотым покрытием; 9 - резиновый изолятор; 10 - конусы для зажатия проволок кабеля; 11 - гнездо; 12 -стопор*

Конструкция включает следующие ключевые элементы: корпус (поз. 2), свечной мост (поз. 6) с контактами (поз. 7, 8) и систему герметизации. Особое внимание при химико-термической обработке уделяется узлу крепления кабеля, где фиксация проволок брони осуществляется конусами (поз. 10) в специальном гнезде (поз. 11). Данные элементы работают в условиях высоких растягивающих нагрузок (до 40 кН) и прямого контакта с агрессивной скважинной средой, что делает моделирование процесса насыщения этих зон приоритетной задачей.

Математическая модель массопереноса алюминия базируется на решении нестационарного уравнения диффузии (второй закон Фика) [4]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \qquad (1)$$

где C - концентрация алюминия, t - время, x - глубина слоя, D - коэффициент диффузии, определяемый по зависимости Аррениуса:

$$D = D_0 exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

Для реализации модели в среде MATLAB разработан алгоритм, позволяющий рассчитывать профиль распределения концентрации Al в критических узлах наконечника: на конусах зажатия проволок (поз. 10) и в гнезде корпуса (поз. 11) (см. рис. 1). Результаты моделирования процесса при $T = 1050℃$ и $t = 6$ ч (Рис. 2) демонстрируют формирование градиентного слоя толщиной до 250–300 мкм, что подтверждается данными фазового анализа на оборудовании AL 27 Mini.

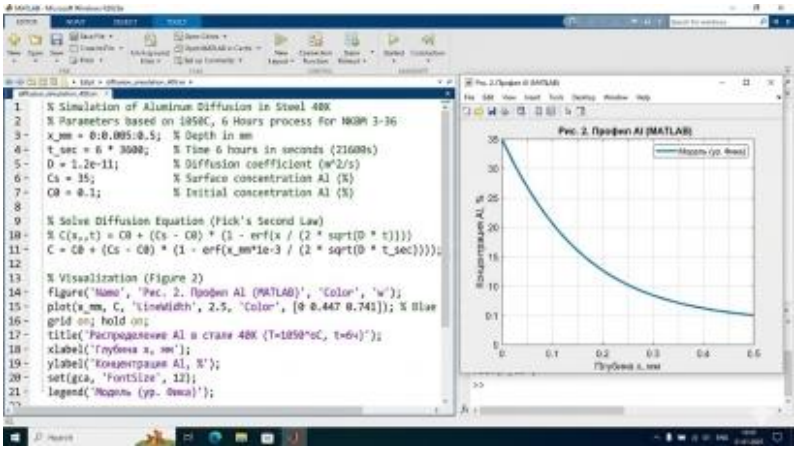


Рис. 2. Расчетное распределение концентрации алюминия в стали 40Х (MATLAB)

Анализ теоретической кривой показывает формирование градиентного слоя с концентрацией алюминия на поверхности до 30-35%. Это обеспечивает создание системы интерметаллидных фаз ($FeAl$, Fe_3Al), повышающих коррозионную стойкость стали 40Х до уровня высоколегированных сплавов [3]. Моделирование подтверждает, что выбранный режим (6 часов) достаточен для получения защитного слоя глубиной 250–300 мкм даже в труднодоступных зонах гнезда наконечника (поз. 11).

Таким образом, интеграция цифровых моделей в технологический цикл позволяет оптимизировать параметры термодиффузионного алитирования, обеспечивая импортозамещение критически важных узлов геофизического оборудования.

Список использованной литературы:

1. Технические характеристики кабельных наконечников НКБМ 3-36. Документация производителя.

2. Guzashvili K.V., Muxamedov A.A., Inagamov U.Sh. Анализ материалов и технологий для упрочнения элементов геофизического каротажного оборудования в агрессивных средах // Конференция «MASHINASOZLIKDA FAN...», Ташкент, 2025. С. 419-420.

3. Бокштейн Б. С. Диффузия в металлах. — М.: Металлургия, 1978.