

## Влияние ускоренной диффузии на эксплуатационные свойства медных проводов с никелевым покрытием

*А.Г. Захаров, С.А. Богданов, Ю.Б. Какурин, Н.А. Какурина*

*Южный федеральный университет, Таганрог*

**Аннотация:** В данной работе предпринята попытка количественно описать процесс диффузии атомов никеля в медную подложку, принимая в расчет ускоренную диффузию по границам зерен. Модельный эксперимент позволяет выработать рекомендации по выбору оптимальной толщины никелевого покрытия, обеспечивающей стабильную работу провода с заданными характеристиками

**Ключевые слова:** никелевое покрытие, оптимальная толщина, медный провод, ускоренная диффузия, коэффициент диффузии, диффузионное распределение атомов, граница зерен, моделирование, задача Фишера

Медная проволока используется для изготовления некоторых типов нагревостойких проводов. С целью повышения долговечности надежной эксплуатации таких проводов применяют никелирование. Как было сказано в [1], толщина никелевого покрытия зачастую определяется эмпирически. Возможно это связано с тем, что не так давно в литературе трудно было найти информацию о коэффициентах диффузии атомов никеля в меди при относительно низких температурах 200 – 250 °С. Производители проводов с целью выполнения оценочных расчетов проводили экстраполяцию данных по диффузии при известных высоких температурах к низким, используя закон Аррениуса. Несомненно, такая оценка может быть только приближенной и дает количественную характеристику коэффициента диффузии атомов примеси только по объему зерна. Известно, что при низких температурах на первый план выходит диффузия атомов по границам зерен (ГЗ), величина энергии активации которой меньше объемной. В настоящее время, в связи с разработкой и широким внедрением технологий субмикро - и нанокристаллических и наноструктурированных материалов [2 – 4], в

---

литературе появилось много экспериментальных работ на тему диффузии по ГЗ, которая вследствие большой протяженности и проницаемости последних имеет исключительное влияние на свойства материалов. В [4] приводятся данные о коэффициентах взаимной диффузии атомов никеля и меди в пленочных структурах в зависимости от характеристических размеров пленок в широком диапазоне температур. Эта информация позволяет провести моделирование низкотемпературной диффузии атомов никеля в медную подложку с целью решения вышеуказанной проблемы.

Решение предполагает проведение вычислительного эксперимента, моделирующего двумерную задачу диффузии атомов никеля из пленки толщиной  $h$  (с поверхности  $x=0$ ) в медную подложку (вдоль  $x$ ) с учетом ее зернистой структуры. Реализацию эксперимента проведем с использованием численного решения задачи Фишера [5], описанного в работах [6-8]. В вычислениях используем выражения закона Аррениуса для коэффициентов диффузии никеля: по границам зерен –  $D'=10^{-7}\exp(-1,25\cdot e/kT)$  м/с<sup>2</sup>; по объему (зернам) –  $D=6,5\cdot 10^{-9}\exp(-1,17\cdot e/kT)$ . Числовые значения предэкспоненциальных множителей и величин энергий активаций были взяты или рассчитаны с использованием результатов работ [1, 4, 9,10].

На рис. 1 приведены изоконцентрационные линии распределения атомов никеля при диффузии из слоя (пленки) толщиной 1 мкм в медную подложку по истечении времени  $t = 7\cdot 10^7$  с ( $\approx 2,2$  года) при температуре  $T=250$  °С.

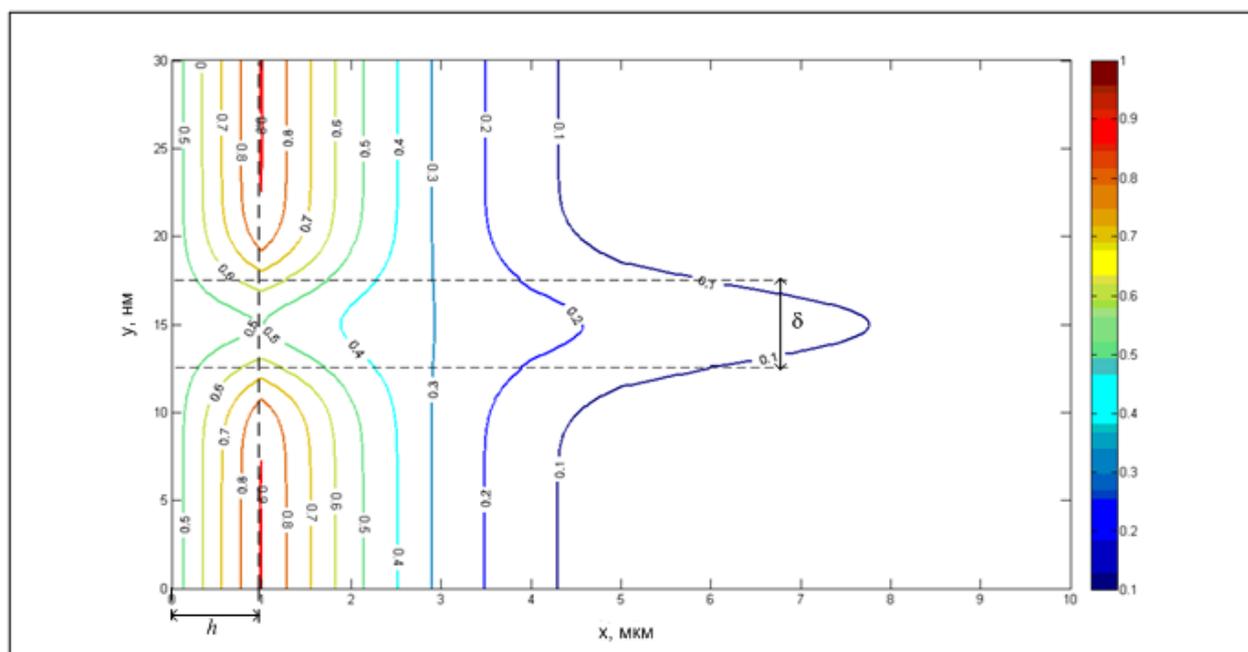


Рис. 1

Область границ зерен показана на рисунке горизонтальными пунктирными линиями, ее ширина обозначена  $\delta$  и предполагалась равной 5 нм [10]. В этой области изоконцентрационная линия никеля со значением 0,5 находится на грани исчезновения, расчеты показывают, что в следующий момент времени в области ГЗ останется только линия 0,4. Это значит, что концентрация никеля на поверхности уменьшилась на 50% (т.е. в составе пленки 50% никеля и 50% меди). В то же время в области зерен содержание никеля в пленке еще составляет порядка 80-90%.

Результаты моделирования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации. Во-первых, используя предположение автора [1], что при относительной концентрации никеля 0,5 в пленке проволока может стать хрупкой (как следствие при ее изгибании эмаль будет растрескиваться), нахождение времени исчезновения линии 0,5 в области ГЗ может служить критерием оценки потери пленкой функциональных свойств. Согласно этому критерию время наработки на отказ медного эмалированного провода с никелевым покрытием толщиной 1 мкм в нашем эксперименте составляет  $\approx$

2,2 года. Тогда как в расчетах [1], проведенных с использованием коэффициента диффузии никеля в меди, найденного путем экстраполяции данных от высоких температур к низким, для такой же толщины покрытия получены значительно большие времена. В связи с этим, второй вывод: учет процессов ускоренной диффузии по ГЗ в расчетах времени деградации свойств защитной пленки, как минимум, целесообразен.

Имея информацию о коэффициентах диффузии, подобные исследования можно провести для покрытий и подложек из разных материалов. Таким образом, предлагаемый модельный эксперимент позволяет: 1) рассчитать диффузионные профили атомов покрытий в подложки, учитывая зернистую структуру последних; 2) оценить время потери функциональных свойств покрытий, обусловленной ускоренной диффузией по границам зерен, и подобрать оптимальную толщину покрытия, обеспечивающую надежную работу провода в течение базового ресурса эксплуатации.

### Литература

1. Чайко В.Ю. Диффузия в тонких металлических покрытиях на медной проволоке // Наука и техника, 2006, № 5. – С. 3 – 9.
2. О.Е. Положенцев, В.В. Шаповалов и др. Динамика наноразмерной атомной структуры новых наноструктурированных конденсированных материалов для возобновляемых источников тока на основе нанокompозита V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/Fe/LiF в цикле зарядка-разрядка // Инженерный вестник Дона, 2012, № 4, ч. 2 URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1465](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1465).
3. Колобов Ю.Р., Липницкий А.Г. и др. Роль диффузионно-контролируемых процессов в формировании структуры и свойств металлических наноматериалов // Композиты и наноструктуры, 2009, №2. – С. 5–24.

4. Миненков А.А., Богатыренко С.И., Сухов Р.В., Кришталь А.П. Размерная зависимость энергии активации диффузии в слоистой пленочной системе Cu-Ni // Физика твердого тела, 2014, том 56, вып.4. – С. 790 – 793.
5. Fisher J.C. Calculation of diffusion penetration curves for surface and grain boundary diffusion // J.Appl. Phys., 1951, Vol. 22, no. 1. – P. 7477.
6. Какурин Ю.Б., Захаров А.Г., Котов В.Н. Моделирование массопереноса в неоднородных полупроводниковых структурах // Нано- и микросистемная техника, 2008, №6. – С. 22 – 25.
7. Какурин Ю.Б., Захаров А.Г., Филипенко Н.А. Моделирование процессов массопереноса в неоднородных твердых телах с учетом электродиффузии // Известия вузов. Северо-Кавказский регион, 2009, № 2. – С. 35 –41.
8. Какурин Ю.Б., Какурина Н.А., Захаров А.Г. Методика оценки величины коэффициента зернограницной диффузии примеси в металлах на основе численного решения задачи Фишера // Инженерный вестник Дона, 2013, № 3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1811.
9. H. Lefakis, J.F. Cain, P.S. Ho. Thin Solid Films 101, 207, 1983. – P. 207 – 218.
10. Бокштейн Б.С., Копецкий Ч.В., Швиндлерман Л.С. Термодинамика и кинетика границ зерен в металлах. М.: Металлургия, 1986. 224 с.

### References

1. Chajko V.Ju. Nauka i Tehnika, 2006, № 5. P. 3 – 9.
  2. O.E. Polozhencev, V.V. Shapovalov i dr. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №4, ch.2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1465.
  3. Kolobov Ju.R., Lipnickij A.G. i dr. Kompozity i nanostrukтуры, 2009, №2. P. 5 – 24.
  4. Minenkov A.A., Bogatyrenko S.I., Suhov R.V., Krishtal' A.P. Fizika tverdogo tela, 2014, tom 56, vyp.4. pp. 790 – 793.
-



5. Fisher J.C. Calculation of diffusion penetration curves for surface and grain boundary diffusion. J.Appl. Phys., 1951, Vol. 22, no. 1. P. 7477.
6. Kakurin Ju.B., Zaharov A.G., Kotov V.N. Nano- i mikrosistemnaja tehnika, 2008, №6. pp. 22 – 25.
7. Kakurin Ju.B., Zaharov A.G., Filipenko N.A. Izvestija vuzov. Severo-Kavkazskij region, 2009, № 2. pp.35 –41.
8. Kakurin Ju.B., Kakurina N.A., Zaharov A.G. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, № 3 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1811](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1811).
9. H. Lefakis, J.F. Cain, P.S. Ho. Thin Solid Films 101, 207, 1983.
10. Bokshtejn B.S., Kopeckij Ch.V., Shvindlerman L.S. Termodinamika i kinetika granic zeren v metallah [Thermodynamics and kinetics of grain boundaries in metals]. M.: Metallurgija, 1986. 224 p.