

ВНУТРЕННИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ПОЛЯ И ИХ РОЛЬ ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ СВАРКЕ МАТЕРИАЛОВ В ТВЕРДОЙ ФАЗЕ

Н. Н. ХОМЕНКО, д-р техн. наук, Е. В. БАЛАКИРЕВА, С. В. ОЛЕКСЕЕНКО, инженеры (Черниг. гос. технол. ун-т)

Рассмотрены вопросы образования внутренних электрических полей в контактной зоне кремния со стеклом. Показано влияние различных факторов на образование этих полей. Представлены исследования переходной зоны сварных соединений.

Ключевые слова: электрохимическая сварка в твердой фазе, свариваемые материалы, электростатические поля, переходная зона, миграция ионов

Метод электрохимической сварки позволяет соединять ионопроводящие стекла с полупроводниковыми материалами, металлами или металлическими сплавами*. Такие стекла при высоких температурах ведут себя как твердые электролиты, в которых подвижными являются положительные ионы Na^+ , образующиеся при диссоциации Na_2O . Хотя омическое поведение стекла, как твердого электролита, было изучено во всех деталях, эффектам поляризации смежных с анодом областей уделялось относительно малое внимание. При приложении постоянного электрического напряжения в процессе сварки постепенно образуется прианодный слой стекла, в котором происходит истощение натрия и как следствие образование электростатического поля большой напряженности. Электростатические поля, образованные в прианодной области стекла, создают ряд эффектов: образуют внутренние сдавливающие силы, позволяющие максимально сблизить свариваемые контактируемые поверхности материалов; создают условия миграции ионов кислорода к поверхности металла (полупроводника), при которой образуется переходной связующий оксид; снижают энергию контактной поверхности стекла. Как будет показано ниже, ширина истощенной (заполяризованной) зоны имеет небольшое значение и не позволяет экспериментально исследовать распределение потенциала в точках этой области, определить ширину этой зоны и электростатическое поле внутри этой области.

Сборочный узел, включающий металлический и стеклянный элементы, и к которому прикладывается постоянное напряжение (анодом является металл), можно представить в виде простой эквивалентной электрической цепи (рис. 1), в которой прианодная область стекла является чисто емкост-

ным сопротивлением (C_0, R_0), а $R1$ и $C1$ параллельно соединенные — область стекла, примыкающая к катоду. Переходные процессы и их качество можно легко интерпретировать, используя кривые зависимости тока от времени (рис. 2). Такие кривые можно записывать с помощью экспериментальной установки, схема которой приведена на рис. 3.

Количественным параметром электростатического поля является его напряженность, которая достаточно сложно зависит от ряда параметров, включающих сварочное напряжение и его полярность, шероховатость контактируемых поверхностей, воздушный зазор, натриевый состав стекла, диэлектрическое свойство стекла, температуру и время сварки, ширину заполяризованной области стекла.

При приложении электрического напряжения к сборочному узлу, нагретому до температуры сварки, происходит сближение контактируемых поверхностей в результате электростатической силы, уменьшение воздушного зазора до нуля, увеличение ширины поляризуемой зоны стекла, формирование и рост оксидной связующей пленки между стеклом и металлом.

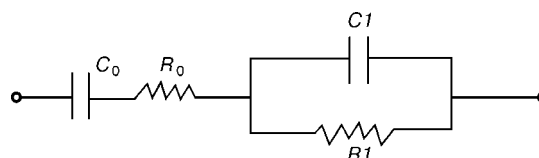


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема цепи свариваемых материалов

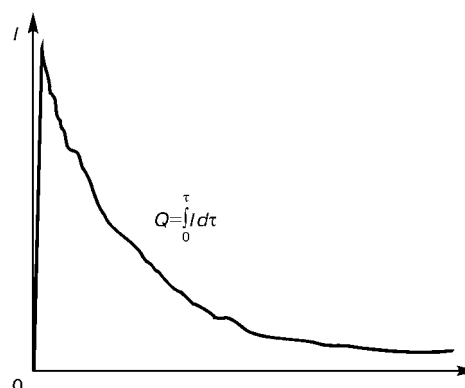


Рис. 2. Зависимость сварочного тока от времени

Балакирева Елена Станиславовна — выпускница ЧГТУ 2001 г.
Олексенко Сергей Владиславович — выпускник ЧТИ 1988 г., аспирант кафедры сварочного производства.

* Хоменко Н. Н. Промышленное применение сварки диэлектриков с нагревом в электрическом поле // Автомат. сварка. — 1986. — № 3. — С. 55–56.

© Н. Н. Хоменко, Е. В. Балакирева, С. В. Олексенко, 2001

Отмеченные процессы связаны с количеством электричества, переносимого ионным током в процессе сварки, и может быть выражен следующими формулами:

ширина заполяризованной зоны

$$h_{3c}^i = \frac{Q_i}{qNS}, \quad (1)$$

где Q_i — количество электричества; q — заряд иона; N — количество ионов в единице объема; S — площадь контакта;

напряженность электростатического поля

$$E_{3c}^i = \frac{U}{h_{3c}^i}, \quad (2)$$

где U — сварочное напряжение;
сила электростатического поля

$$F_n^i = 0,5E_{3c}E_0(E_{3c}^i)^2; \quad (3)$$

толщина оксидной пленки

$$h_n^i = \frac{QM}{4SpF_\phi}, \quad (4)$$

где M — молекулярная масса оксида; ρ — плотность оксида кремния; F_ϕ — число Фарадея.

Единственный параметр, который можно легко определить экспериментально — это количество электричества, который определяется площадью, ограниченной кривой ионный ток — время (см. рис. 2).

Естественно, что напряженность и ионный ток являются функцией времени и в рационализованной системе единиц выражаются следующей формулой:

$$\frac{\partial E(h, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{EE_0} [I - j(h, \tau)], \quad (5)$$

где $E(h, \tau)$ — напряженность поля в оксиде или поляризованной области стекла на расстоянии h от металла в момент времени τ ; I — плотность начального тока; $j(h, \tau)$ — плотность тока для данных значений h и τ .

Это уравнение можно рассматривать как следствие теоремы Гаусса. Как можно заметить, важным параметром является диэлектрическая проницаемость стекла, которая может изменяться от температуры, количества оксида натрия. Согласно ана-

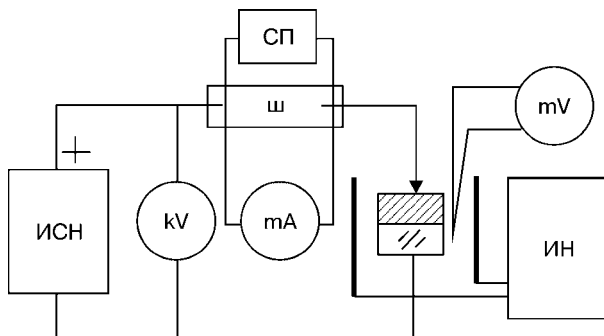


Рис. 3. Схема электрической цепи сварочной установки: СП — самописец; ИН — источник нагрева; ИСН — источник сварочного напряжения

лизу двух стекол «Пирекс» и С 48-3 она составляет значение равное 7. Изменения E в пределах $\pm 30\%$ влечет за собой отклонения в процентном отношении ширины поляризованной зоны стекла и электростатического поля.

Все указанные выше параметры могут быть определены расчетно на основе косвенных исследований, к которым можно отнести интегральный метод.

Расчеты ширины заполяризованной зоны стекла «Пирекс» в контакте с кремнием ($T = 400^\circ\text{C}$, $U = 1000\text{ В}$, $\tau = 30\text{ с}$) по (1) показали, что она составляет $(210...2364) \cdot 10^{-3}$ мкм. Электростатическое поле составляет $(4,7...0,4) \cdot 10^6$ В/мм. Сила внутреннего сжатия образцов составляет 628...495 МПа.

Образование связующих оксидных пленок можно рассматривать исходя из представлений об ионной проводимости оксида при высокой напряженности поля, усложненной процессами, происходящими на границах раздела металлооксид и оксид-стекло.

Расчеты показали, что толщина оксидной пленки, образующейся на протяжении 30 с сварки, увеличивается с 2 до $23 \cdot 10^{-6}$ мм.

Интерес представляет влияние электростатического поля на подвижность положительных и отрицательных ионов, которая может оказать положительное или отрицательное влияние на образование связующего продукта (оксида). Выдвинутая гипотеза о роли ионов кислорода стекла была подтверждена двумя экспериментами, в которых в качестве анода был использован ковар, а в качестве катода — стекло «Пирекс». Нагрев такой сборки в нейтральной среде до $T = 400^\circ\text{C}$ не выявил образования оксидной пленки железа. Сварка указанной пары в той же среде с приложением сварочного напряжения показало, что в контактной зоне ковар приобрел серую окраску, в то время как остальная поверхность коварового образца имела исходную блестящую окраску.

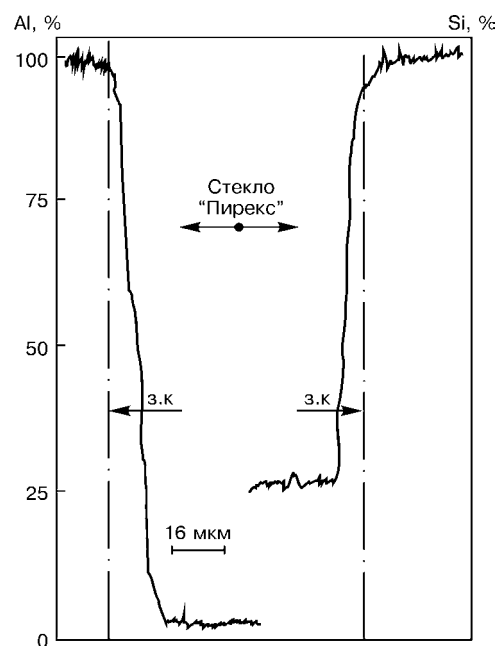


Рис. 4. Распределения алюминия и кремния в зоне соединения со стеклом «Пирекс»

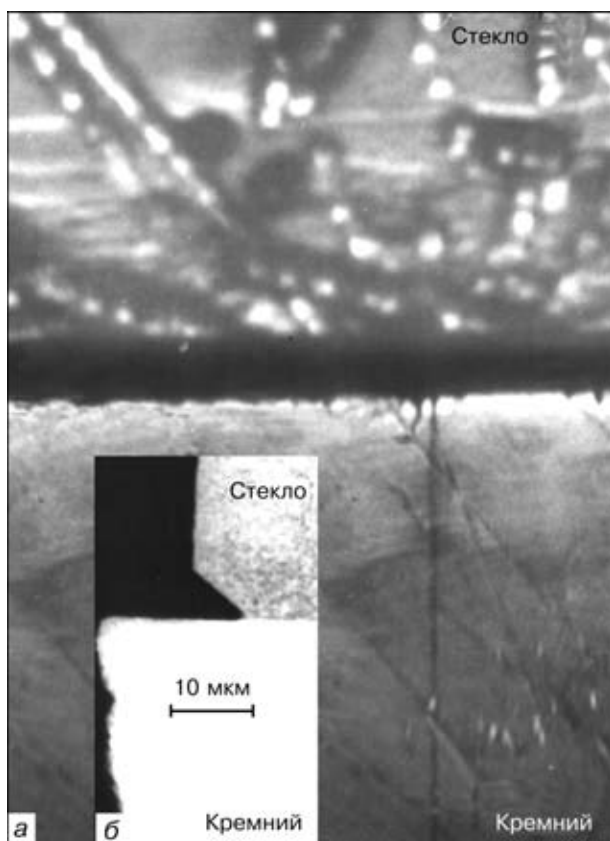


Рис. 5. Переходная зона соединения стекла «Пирекс» с кремнием $\times 200$, увел. 10: *a* — вид сверху; *б* — вид с торца

Гипотеза о нейтрализации электростатического заряда в прианодной области стекла была также подтверждена экспериментами, в которых в качестве анода использовали кремний, алюминий и серебро. Микрорентгеноструктурные исследования переходной зоны образца, включающего кремний, алюминий и стекло «Пирекс», показали, что ионы алюминия и кремния диффундируют в стекло на небольшую глубину и скапливаются у анода (рис. 4). Характерным для этих пар является резкий спад ионного тока во времени. В то же время для серебряного анода такого спада не наблюдается. Это связано с подвижностью ионов кремния и алюминия, которая немного меньше подвижности ионов натрия. Диффузия ионов кислорода и ионов металла может частично или полностью нейтрализовать заряд в прианодной заполяризованной зоне стекла.

Независимо от механизмов миграции ионов под действием электростатического поля становится очевидным, что этот процесс вызывает заметное изменение в переходной (граничной) зоне стекла с металлом. Такие изменения наблюдали при травлении шлифа стеклокремниевое образца (рис. 5).

Таким образом, расчетно-экспериментальным путем установлены значения электростатического поля в зоне контакта стекла с металлом и внутренние силы сжатия, а также роль электростатического поля в процессах миграции положительных и отрицательных ионов. Показано, что ионы кислорода стекла участвуют в образовании связующей переходной зоны между свариваемыми материалами.

Considered are the problems associated with formation of internal electric fields in the silicon to glass contact zone. The effect of different factors on formation of such fields is shown. Investigations of the transition zone in welded joints are described.

Поступила в редакцию 05.04.2001