

## Обеспечение механической прочности сварной металлокерамической конструкции

В измерительной технике широко применяют датчики с пьезокерамикой (ПК) — акселерометры, датчики пульсации давления, датчики силы и др. Их применение обусловлено высокой стабильностью изделий и широким диапазоном эксплуатационных характеристик. Имеются пьезодатчики, работающие при температуре до 500 °С. В таких изделиях используют ПК на основе титаната висмута ТВ-2, ТВ-3.

Особенностью высокотемпературной ПК является наличие в составе легкоплавкого металла — висмута, достигающее до 70 %. При диффузионной сварке ПК с металлом висмут легирует его поверхностный слой. Это сопровождается появлением жидкой фазы в контакте между свариваемыми материалами и разрушением сварного соединения. Диффузионную сварку ПК такого типа с металлом можно проводить через барьерную прослойку хрома толщиной 0,1—1,5 мкм [1, 2].

В данной работе исследованы особенности технологического процесса диффузионной сварки пьезокерамики с металлом с целью определения режима, обеспечивающего максимальную прочность сварной конструкции.

Технологический процесс изготовления неразъемных металлокерамических конструкций включает ряд последовательно выполняемых операций, каждая из которых наряду с параметрами процесса влияет на механическую прочность сварной конструкции. Так, для соединения из материалов ТВ-2 + Сг + Си + + ХН67МВТЮ — это поляризация и стабилизация, толщина компенсирующей медной прокладки, шероховатость поверхности ПК, температура сварки, давление сжатия, время, толщина прослойки хрома.

Зависимость механической прочности сварной конструкции от параметров технологического процесса оценивали в режиме однофакторного эксперимента.

Стабилизированные параметры технологического процесса фиксировали при значениях, обеспечивающих максимальную прочность сварной конструкции. Один из параметров процесса изменяли в исследуемом диапазоне, что сопровождалось изменением прочности. Измерения производили на конструкции сварного узла, совпадающего по

габаритным размерам с реальной конструкцией датчика пульсации давления. Диаметр свариваемой поверхности 5 мм. Высота пьезокерамической детали 3—6 мм. Механическую прочность сварной конструкции измеряли при испытаниях на растяжение с постоянной скоростью нагружения по методике, изложенной в работе [3].

На пьезокерамическую деталь в процессе сварочного цикла воздействуют давление сжатия и температура сварки, что может изменить ее исходный стехиометрический состав и приводит к деполяризации. Результаты измерений показали, что интенсивные потери массы (более 1 %) ПК на основе ТВ-2, обуславливающие изменение стехиометрического состава, начинаются выше температуры  $T = (1213 \pm 10)$  К. Данная ПК выдерживает термическую обработку в вакууме  $V = 1,33 \cdot 10^{-2}$  Па при  $T = 1153$  К, статическом давлении сжатия до 20 МПа в течение 600 с. Эти данные превышают известные параметры режима диффузионной сварки керамики с металлом через медную прокладку [3—5]. Поляризация и стабилизация пьезокерамической детали по стандартному циклу поляризации [6] в составе сварной конструкции незначительно изменяют механическую прочность сварного изделия. Увеличение прочности не превышает 10—15 %. Последующая термическая стабилизация до максимальной рабочей температуры изделия (773 К) несколько снижает механическую прочность сварной конструкции. Общее увеличение прочности от поляризации и стабилизации не превышает 6—10 %.

Результаты оценки влияния механической обработки ПК показали, что при использовании шлифованных поверхностей с параметром шероховатости  $Rz = 0,4 \div 0,6$  мкм прочность сварной конструкции максимальна. Увеличение  $Rz$  свариваемой поверхности до 1,5—2 мкм (при шлифовке микропорошком № 3) сопровождается увеличением интервала значений прочности сварных конструкций до  $\sigma = 19$  МПа (рис. 1). Снижение  $Rz$  до 0,1—0,3 мкм (при полировке алмазными пастами) сопровождается снижением разрушающей нагрузки. Это может быть связано с наличием микротрещин на свариваемой поверхности, полученных при полировке. Максимальные

значения и минимальный интервал прочности  $\sigma = 28 \div 35$  МПа сварные конструкции имеют при шлифовке свариваемых поверхностей микропорошком М10 на стекле. При этом  $Rz = 0,4 \div 0,6$  мкм.

При оценке диапазона толщины медной прокладки установили, что использование прокладки толщиной 0,1 мм приводит к необходимости увеличения  $p_{сж}$  (см. рис. 1). Применение прослойки меди толщиной  $\delta = 0,5 \div 1,0$  мм приводит к уменьшению прочности. Наибольшая прочность изделия обеспечивается при использовании прокладки в диапазоне толщин от 0,2 до 0,35 мм. Снижение прочности сварной конструкции при толщине медной прокладки менее 0,2 мм, вероятно, связано со значительной деформацией относительно тонких медных прокладок вследствие недостаточной плоскостности свариваемых деталей. Это приводит к неравномерному качеству сварного соединения по всей свариваемой поверхности и увеличивает общее время процесса. Увеличение  $\delta$  более 0,35 мм сопровождается снижением прочности, что, вероятно, связано с появлением несоосности сварной конструкции. Предпочтительный диапазон  $\delta$  медной прокладки 0,2—0,35 мм.

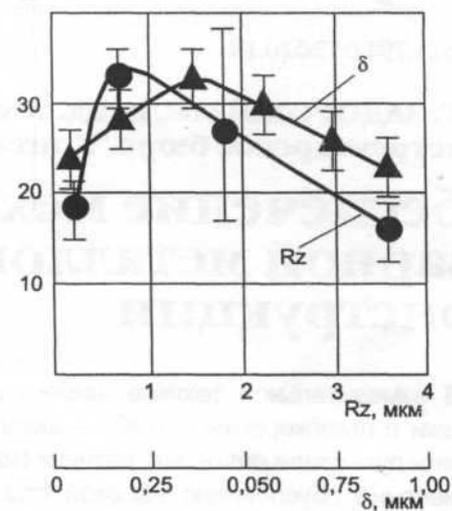
При исследовании влияния толщины барьерной прослойки хрома установили, что она существенно влияет на механическую прочность сварной конструкции. При диффузионной сварке ПК на основе ТВ-2 с медью прочность полученного сварного шва пренебрежимо мала. Разрушение сварной конструкции проходит при разборке приспособления для сварки по поверхности контакта материалов. Результаты измерений показали, что использование барьерной прослойки хрома между ПК и медью повышает прочность сварного соединения (рис. 2). Увеличение толщины прослойки хрома  $\delta_{\text{хр}}$  до 0,09 мкм сопровождается увеличением прочности сварного соединения с медью. При этом разрушение сварной конструкции проходит по поверхности контакта свариваемых материалов. Увеличение  $\delta_{\text{хр}}$  более 0,09 мкм сопровождается изменением характера разрушения. Разрушение сварной металлопъезокерамической конструкции проходит по пьезокерамической детали.

Пористость ПК на основе ТВ-2 составляет 8 %. Средний размер пор ПК находится в пределах 0,2—1 мкм.

При напылении хрома на свариваемую поверхность ПК прослойка хрома будет иметь дефекты, связанные как с особенностями процесса напыления, так и с пористостью ПК. При толщине прослойки, сравнимой с размером микропор, блокирование влияния висмута в соединении будет проходить более интенсивно. Это объясняет рост прочности

соединения при увеличении толщины прослойки хрома.

В процессе диффузионной сварки прослойка хрома взаимодействует со свариваемыми материалами. При этом толщина ее уменьшится. Диффузионное растворение хрома в ПК сопровождается появлением оксидных слоев хрома, которые также имеют блокирующие свойства и ограничивают диффузию висмута в медь [2]. Диффузионное растворение прослойки хрома в свариваемых материалах ограничивает нижний предел диапазона толщины прослойки. Для сочетания свариваемых материалов ТВ-2 + Си нижний предел диапазона толщины прослойки хрома составляет 0,09 мкм и ограничивается изменением характера разрушения свариваемых материалов и резким снижением величины нагрузки, разрушающей сварное соединение (см. рис. 2). Результаты исследования сварного соединения с прослойкой хрома толщиной  $\delta = 0,09 \div 0,5$  мкм показали, что прочность сварной конструкции не увеличивается. В диапазоне толщин  $\delta = 0,9 \div 1,5$  мкм величина нагрузки, разрушающей сварную конструкцию, уменьшается. Разрушение при этом проходит по ПК. При толщине прослойки хрома порядка 2 мкм напыленный слой имеет тенденцию к отслаиванию и шелушению.

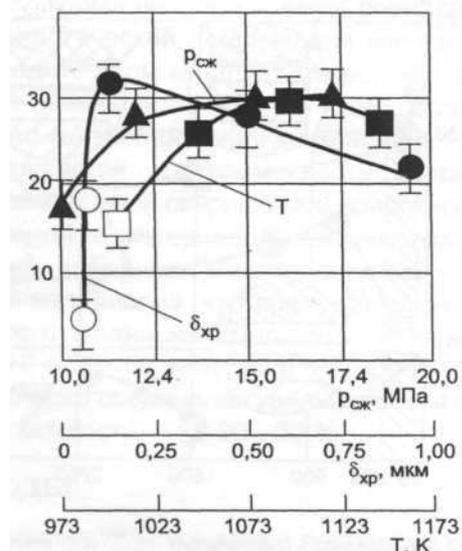


**Рис. 1.** Зависимость прочности сварной конструкции из материалов ТВ-2 + Сг + Си + ХН67ВМТЮ (диаметр свариваемых поверхностей 5 мм) от параметра шероховатости поверхности пьезокерамики и толщины компенсирующей медной прокладки при  $\Gamma = 1073$  К,  $p_{сж} = 10$  МПа,  $B < 10^{-2}$  Па,  $t = 300$  с,  $\delta = 0,5$  мкм

Причиной этого являются механические напряжения. Снижение разрушающей нагрузки металлопьезокерамической конструкции при увеличении  $\delta_{хр}$  в диапазоне значений от 0,9 до 1,5 мкм, вероятно, связано с наложением поля напряжений самой конструкции с напряжениями прослойки хрома. Это ограничивает верхний предел диапазона значений  $\delta_{хр}$  (для соединений диаметром до 5—7 мм) не более 1,5 мкм. Максимальные значения разрушающей нагрузки достигаются при  $\delta_{хр}=0,09\div 9$  мкм

Результаты оценки влияния температуры сварки показали, что прочность сварной конструкции из материалов ТВ-2 + Cr + Si + ХН67ВМТЮ в диапазоне температур  $T=1000\div 1073$  К увеличивается с увеличением температуры сварки (см. рис. 2). До 1053 К разрушение сварной конструкции проходит по поверхности контакта материала. Результаты оценки влияния давления сжатия показали, что прочность сварной конструкции с увеличением давления в диапазоне 10—18 МПа растет с тенденцией к стабилизации (см. рис. 2). При  $p_{сж} < 10$  МПа прочность не превышает 15 МПа. При этом разрушение сварного соединения частично проходит по поверхности контакта материалов. При  $p_{сж} > 10$  МПа разрушение сварного соединения проходит по ПК на основе ТВ-2, при  $p_{сж} > 25$  МПа происходит деформирование пьезокерамической свариваемой детали. Это является браком сварной конструкции. Максимальные значения прочности достигаются в диапазоне значений  $p_w^{\wedge} = 12,4\div 17,4$  МПа.

При оценке влияния времени сварки установили, что характер кинетических кривых при изменении места барьерной прослойки хрома в сварном соединении также изменяется (рис. 3). При нанесении хрома методом термического испарения в вакууме на медную прокладку соединение диффузионной сваркой образуется между ПК и хромом. С увеличением времени сварки в интервале  $t = 60\div 600$  с прочность увеличивается (см. рис. 3, кривая 2). При  $t = 600$  с наблюдаются максимальные значения прочности. Дальнейшее увеличение времени сварки в интервале от 600 до 3600 с характеризуется снижением разрушающей нагрузки.



**Рис. 2. Зависимость прочности от температуры сварки, давления сжатия и толщины барьерной прослойки при  $T = 1073$  К,  $p = 15$  МПа,  $t = 300$  с,  $S = 0,5$  мкм (● —**

Разрушение при этом проходит по ПК. Характер полученной зависимости (при нанесении прослойки хрома на медь) аналогичен кинетике формирования сварного соединения алюмооксидной керамики с металлом [3—5]. При нанесении прослойки хрома на свариваемую поверхность ПК на основе ТВ-2 соединение диффузионной сваркой формируется между медью и хромом. Начальный контакт прослойки хрома и ПК уже сформирован в процессе вакуумного напыления. Максимальные значения прочности сварного соединения достигаются при  $t = 60\div 80$  с. Увеличение  $t$  сопровождается уменьшением прочности со снижением тенденции к стабилизации (см. рис. 3, кривая 7). Результаты оценки кинетики формирования сварного соединения Cr + Si показали, что его механическая прочность уже после 10—30 с сварки в 5—10 раз превышает прочность ПК (для ТВ-2  $\sigma = 30\div 40$  МПа; для Cr + Si  $\sigma = 250\div 400$  МПа). При  $t > 60$  с соединение Cr + Si не влияет на кинетику формирования соединения ПК с коррозионно-стойким сплавом. При использовании в качестве прослойки для блокирования диффузионного взаимодействия хрома толщиной  $\delta_{хр} = 0,2\div 0,3$  мкм механически прочное соединение формируется при  $t > 1800$  с (см. рис. 3, кривая 3). Разрушение соединения при этом проходит по хрому.

Характер зависимости — снижение прочности с тенденцией к стабилизации. Это позволяет полагать, что рост новой фазы (в зоне контакта ПК и Cr) проходит под действием диффузионного переноса реагирующих компонентов через выделенную фазу, что подтверждается результатами исследования переходной зоны сварного соединения[2].

Скорость роста новой фазы с увеличением времени изотермической выдержки при высоких температурах будет уменьшаться, что является благоприятным условием при эксплуатации сварного соединения в области высоких температур.

Сравнение технологических приемов, применяемых при сварке ПК на основе титаната висмута, — напыления барьерной прослойки хрома на ПК или медную прокладку, показывает, что напыление хрома на свариваемую поверхность ПК позволяет сократить время сварки, необходимое для максимальной прочности сварного соединения, в 6—10 раз. Диапазон времени сварки, обеспечивающий максимальные значения прочности соединения, в этом случае равен 60—300 с.

В процессе вакуумного напыления хром из паровой фазы конденсируется на поверхности материала. Сформированная на ПК или меди вакуумным напылением металлическая пленка копирует микрорельеф поверхности. Для соединения, сформированного в процессе вакуумного напыления, образование физического контакта между прослойкой хрома и материалом проходит в процессе напыления. Это улучшает условия начального контактирования материалов. При диффузионной сварке изменение данных условий влияет на кинетику формирования соединения. При сварке с прослойкой хрома, напыленной на медную прокладку, образование физического контакта между прослойкой хрома и ПК проходит с деформированием поверхностного слоя ПК. При этом в месте контакта материалов может образоваться значительное количество дефектов, вызванных микропластической деформацией материалов. При напылении хрома на свариваемую поверхность ПК микропластической деформации материалов не происходит. Хром копирует микрорельеф свариваемой поверхности, что улучшает условия начального контактирования материалов. При этом обеспечивается одновременность процесса на всей номинальной свариваемой поверхности, и из зоны контакта материалов исключается дефектная зона, вызванная микропластической деформацией материалов, что приводит к увеличению прочности соединения. Для соединения материалов ТВ-2 + Cr + Си + ХН67ВМТЮ скорость получения прочного соединения увеличивается в 10—12 раз, а прочность — на 20—30 %.

Сокращать время сварки, что обеспечивает увеличение прочности сварного соединения.

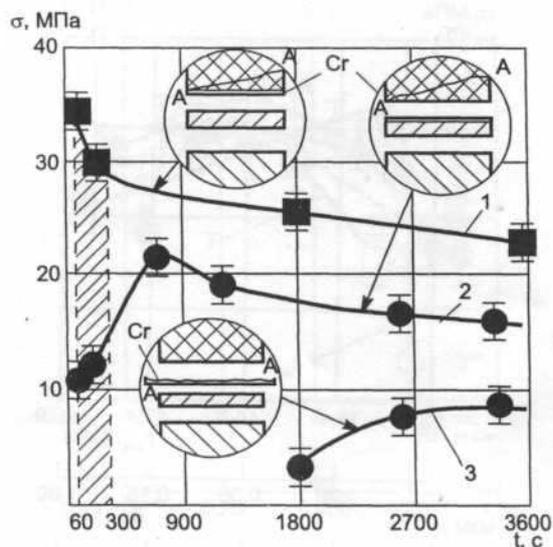


Рис. 3. Зависимость прочности сварной конструкции из материалов ТВ-2 + Cr + Си + ХН67ВМТЮ от времени сварки [А—А — поверхность разрушения сварного соединения]: 1, 2 — барьерная прослойка нанесена на ПК и медную прокладку соответственно; 3 — барьерная прослойка хрома в виде пластины толщиной 0,3 мм

2. Максимальные значения прочности сварной конструкции из материалов ТВ-2 + Cr + Си + ХН67ВМТЮ достигаются при температуре 1053—1093 К, давлении сжатия 12,4—17,4 МПа, времени сварки 60—300 с, толщине прослойки хрома 0,09—0,9 мкм, толщине прокладки из меди 0,25—0,3 мм.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Диффузионная сварка высокотемпературной пьезокерамики на основе титаната висмута с жаростойким сплавом* / Ю. Г. Задорожный, С. И. Ковтун, А. А. Россошинский, В. С. Несмих // Автоматическая сварка. 1991. № 10. С. 68—70.
2. *Задорожный Ю. Г., Гребениченко В. Я.* Исследование переходной зоны соединения высокотемпературной пьезокерамики с металлом // Автоматическая сварка. 2001. № 8. С. 54—58.
3. *Бачин В. А.* Диффузионная сварка стекла и керамики с металлами М.: Машиностроение, 1986. 184 с.
4. *Казаков Н. Ф.* Диффузионная сварка материалов М.: Машиностроение, 1981. 271 с.
5. *Конюшков Г. В., Зотов Б. М., Меркин Э. И.* Ферриты и их соединения с металлами и керамикой. М.: Энергия, 1979. 232 с.
6. *Глозман И. А.* Пьезокерамика К. М.: Энергия, 1972. 288 с. *Технология машиностроения, 2004, № 2*

