

Н. В. ПЕРЦОВ, В. Т. КРУЧИНИН, В. С. ЮЩЕНКО, Е. Д. ЩУКИН

ВЛИЯНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕРМАНИЯ

(Представлено академиком П. А. Ребиндером 13 I 1971)

Характерной особенностью германия, как и других ковалентных кристаллов, является его чрезвычайная хрупкость, сохраняющаяся вплоть до относительно высоких температур. Прочность германия при температурах до начала его заметной пластичности определяется целиком наличием на поверхности дефектов — концентраторов напряжений. При специальной обработке образцов прочность германия возрастает от 10—20 кГ/мм для обычных образцов до 200—300 кГ/мм² (1). При высоких температурах, когда германий делается пластичным, роль поверхностных дефектов уменьшается и разрушение происходит, по-видимому, так же как в металлах — путем зарождения и развития в процессе пластической деформации трещин разрушения.

Возможность на одном и том же материале реализовать и высокую хрупкость и пластичность делает германий ценным объектом для изучения влияния исходных механических свойств твердого тела на проявления эффекта адсорбционного понижения прочности. Как следует из диаграмм плавкости соответствующих бинарных систем и экспериментальных данных, полученных Вествудом с сотрудниками (2, 3), легкоплавкие металлы вызывают снижение прочности германия. Однако результаты работ (2, 3) носят лишь качественный характер, поскольку применяемая схема испытания образцов на изгиб не позволяет вычислить истинные разрывные напряжения в пластической области; в хрупкой же области обнаруженное этими авторами снижение прочности связано, видимо, с растрескиванием поверхности расплавленным металлом. Наиболее надежные и воспроизводимые экспериментальные данные о механических свойствах монокристаллов, по нашему мнению, можно получить лишь проводя испытания на растяжение.

В связи с этим нами была разработана методика испытания образцов монокристаллического германия в широком диапазоне температур методом одноосного растяжения. Специально сконструированная установка с фотоэлектрической схемой регистрации напряжений и деформаций позволяла растягивать монокристаллы германия со скоростью 10^{-1} сек⁻¹ в токе инертного газа при температурах до 800°С. Основная сложность в такого рода испытаниях хрупких материалов состоит в закреплении их в зажимах прибора. Применение жестких захватов и различного рода замазок не дало положительных результатов — разрушение из-за трудноустраняемых перекосов и неравномерности приложения усилия всегда происходило в месте закрепления образцов. Удовлетворительные результаты дало применение в качестве захватов петель из молибденовой проволоки диаметром 1,5 мм; в эти захваты вставлялись образцы в виде брусочков длиной 15 мм и сечением 0,7 × 1,5 мм, на концы которых в восстановительном пламени газовой горелки наваривались шарики из германия. Образцы вырезались из массивного монокристалла алмазной пилой так, чтобы ось (111) составляла с осью образца угол около 30°, шлифовались и полировались в горячем травителе СП-4 (1 часть плавиковой и 3 части азотной кислот).

Были проведены исследования влияния на механические свойства германия, галлия, меди и золота (два последних металла часто применяются для приготовления токопроводящих контактов в германиевых приборах). Галлий наносился электролитически, медь и золото — приплавлением перед растяжением в самом приборе кусочков эвтектики или фольги. Относительно низкая температура плавления эвтектик медь — германий и золото — германий (640 и 356° соответственно) позволили исследовать

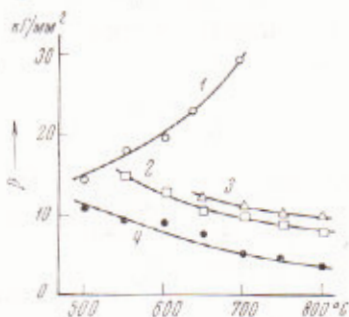


Рис. 1. Температурная зависимость прочности германия в инертной среде (1) и в расплавах галлия (2), меди (3), золота (4)

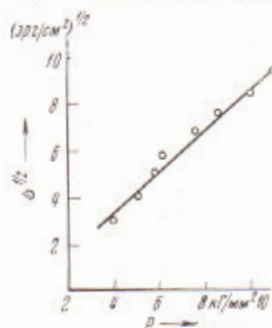


Рис. 2. Составление свободной поверхностной энергии и прочности германия в расплаве золота

влияние этих расплавов на прочность германия в широком диапазоне температур.

Полученные результаты, представленные на рис. 1, показывают, что металлические расплавы вызывают резкое снижение прочности и пластичности германия, причем наибольшее влияние оказывает золото. При температурах ниже 400° разрыв монокристаллов носит макроскопически совершенно хрупкий характер, и не наблюдается влияние металлических расплавов на прочность. Отсутствие действия заведомо активной среды на прочность хрупких монокристаллов (характерное, например, для ионных кристаллов) связано, видимо, с кинетическими и стерическими препятствиями проникновению активного вещества в узкую вершину трещины разрушения, развивающейся с большой скоростью.

Выше 500°, когда при выбранных режимах деформирования наблюдается заметная пластическая деформация, жидкие металлические расплавы вызывают значительное понижение прочности и пластичности монокристаллов германия, причем это влияние проявляется практически вплоть до плавления германия, и тем сильнее, чем выше исходная пластичность германия.

Результаты измерения прочности монокристаллов германия, находящегося в контакте с золотом при различных температурах, были сопоставлены с расчетными значениями поверхностной энергии на границе германий — золото (σ_{st}). Для оценки величины σ_{st} мы исходили из локально-координационного приближения для бинарных регулярных растворов замещения, развитого Б. Я. Пинесом (*). Для упрощения вычислений дискретное распределение концентрации по слоям * заменялось непрерывным и предполагалось, что структура жидкости на межфазной границе «подстраивается» к структуре твердого тела. При этом было получено соотно-

* Граница раздела фаз рассматривается как совокупность параллельных атомных слоев, причем концентрация компонентов может меняться от слоя к слою. Из общего числа z соседей у каждого атома z_c лежат в том же слое и по z_1 в двух соседних.

шение

$$\sigma_{sl} = 2n' \sqrt{\frac{z'_\Gamma}{z'}} U'_0 \int_{x'}^{x_0} \left\{ \frac{kT}{U'_0} x \ln \frac{x}{x'} + (1-x) \ln \frac{1-x}{1-x'} \right\} - (x-x')^2 \Big\}^{1/2} dx + \\ + 2n'' \sqrt{\frac{z''_\Gamma}{z''}} U''_0 \int_{x''}^{x_0} \left\{ \frac{kT}{U''_0} [x \ln \frac{x}{x''} + (1-x) \ln \frac{1-x}{1-x''}] - (x-x'')^2 \right\}^{1/2} dx, \quad (1)$$

где n — поверхностная плотность атомов; U_0 — энергия смещения; величины с одним штрихом относятся к жидкой фазе, с двумя к твердой; x — концентрация компонентов, которым обогащена твердая фаза (м.д.); x_0 — концентрация на границе раздела фаз, определяемая уравнением:

$$\frac{z'_\Gamma}{z'} U'_0 \left\{ kT \left[x_0 \ln \frac{x_0}{x'} + (1-x_0) \ln \frac{1-x_0}{1-x'} \right] - U'_0 (x_0 - x')^2 \right\} = \\ = \frac{z''_\Gamma}{z''} U''_0 \left\{ kT \left[x_0 \ln \frac{x_0}{x''} + (1-x_0) \ln \frac{1-x_0}{1-x''} \right] - U''_0 (x_0 - x'')^2 \right\}. \quad (2)$$

Уравнение (1) отличается от соотношений, полученных в работах Кана и Хиллиарда (5), наличием двух областей интегрирования, отвечающих двум фазам с различной структурой и различными энергиями межатомных взаимодействий. Если растворимость в твердой фазе мала ($x'' \approx 1$), то $x_0 \approx 1$ и уравнение (1) упрощается:

$$\sigma_{sl} = 2n' \sqrt{\frac{z'_\Gamma}{z'}} U'_0 \int_{x'}^1 \left\{ \frac{kT}{U'_0} \left[x \ln \frac{x}{x'} + (1-x) \ln \frac{1-x}{1-x'} \right] - (x-x')^2 \right\}^{1/2} dx. \quad (3)$$

По уравнению (3) численным интегрированием были рассчитаны значения σ_{sl} при различных температурах на границе твердого германия с расплавом германий — золото. Сопоставление величин прочности и межфазной поверхностной энергии (рис. 2) позволяет заключить, что при разрушении германия в контакте с металлическим расплавом в широком интервале температур (и соответственно прочности образцов) выполняется соотношение Гриффитса: прочность оказывается пропорциональной корню из величины межфазной поверхностной энергии. Этот результат хорошо согласуется с представлением о том, что облегчение разрушения германия при нанесении на его поверхность расплава обусловлено именно снижением поверхностной энергии.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

Поступило
30 XII 1970

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ О. Джонсон, П. Гиббс, Сборн. Разрушение твердых тел, 1967, стр. 76.
² E. N. Pugh, A. R. C. Westwood, T. T. Hitch, Phys. Stat. Sol., 15, 291 (1966).
³ А. Вествуд, Сборн. Чувствительность механических свойств к действию среды, М., 1969, стр. 52. ⁴ В. Я. Пинес, Очерки по металлофизике, Харьков, 1961. ⁵ J. W. Hilliard, J. E. Hilliard, J. Chem. Phys., 28, 258 (1958).