

Г. П. УШИТ

ОБ УСЛОВИЯХ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ СЦЕПЛЕНИЕ ЮВЕНИЛЬНЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТАЛЛОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ
НОРМАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ

(Представлено академиком П. А. Ребиндером 25 III 1970)

Исследования сцепления ювенильных поверхностей твердых тел (¹⁻⁵), которые позволили изучать явление в чистом виде, без влияния поверхностных пленок, показали, что чистота поверхности — условие необходимое, но недостаточное для возникновения сцепления. Прочность сцепления ювенильных поверхностей зависит от многих факторов, каждый из которых по-разному проявляется в зависимости от условий опыта.

В этой работе на примере температурной зависимости когезионных свойств цинка, кадмия и свинца рассмотрены условия, в которых ювенильные поверхности металлов не сцепляются.

Влияние температуры на способность к сцеплению исследовалось на поликристаллических образцах трех металлов с близкими температурами

плавления, но существенно различающихся по структуре и механическим свойствам: на свинце — пластичном металле с кубической решеткой, цинке — хрупком металле с гексагональной решеткой и кадмии — пластичном металле с гексагональной решеткой.

Исследования проводились на ювенильных поверхностях, полученных методом управляемого внутреннего разрыва (⁴), в варианте разрыва стержня в пластичной оболочке (Zn) и экструзии замкнутой трубки (Cd, Pb). Образцами в первом случае служили сами разорванные стержни, в втором — капсулы, приготовленные из экструдированных трубок с ювенильной внутренней поверхностью (²).

В качестве материалов были взяты переплавленные в вакууме металлы марки в.ч.

Характеристикой способности к сцеплению служил условный «коэффициент нормальной когезии» K , определяемый как отношение силы сцепления к приложенной нормальной нагрузке P . Прикладываемая к образцу нагрузка, за исключением специально описанных опытов, выбиралась с таким расчетом, чтобы нагруженность контакта, $\alpha = P/H_0$, при любой температуре оставалась постоянной ($\alpha \sim 0,1$) и не превышала предела текучести образца. Время действия нагрузки составляло 15 сек. Все значения K , кроме особо описанных опытов на свинце, были получены при первом цикле испытания: K зависит от числа циклов повторного контактирования (³).

Результаты исследования показали, что в условиях описываемых опытов гексагональные металлы (рис. 1, кривые 3, 4), в отличие от кубических (кривая 1), плохо сцепляются при низкой температуре. Существенно иным является для этих металлов и характер зависимости $K(T/T_s)$. Так,

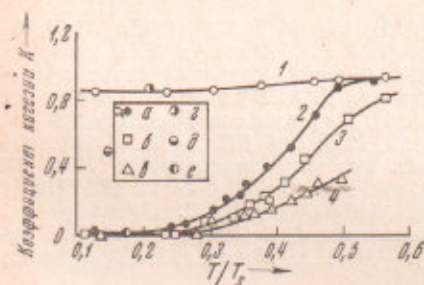


Рис. 1. Зависимость коэффициента когезии от относительной температуры. 1 — Pb, 2 — Zn, 3 — Cd, 4 — Cu, 5 — Ti, 6 — Co

при изменении температуры опыта от комнатной до азотной K свинца меняется всего от 0,95 до 0,85, тогда как K цинка и кадмия при понижении температуры резко падает — практически до нуля при $0,23 T_s$. При этом следует отметить, что несцепляющийся при комнатной температуре ($0,17 T_s$) кобальт ($K < 0,05$)⁽⁴⁾ попадает в диапазон относительных температур, в котором не сцепляются также кадмий и цинк, титан же, занимающий по своей структуре промежуточное положение между типично гексагональными и кубическими металлами ($c/a = 1,593$), имеет примерно при той же относительной температуре и промежуточное значение коэффициента когезии $K \sim 0,5$ ⁽⁵⁾, а K меди⁽³⁾ совпадает с K свинца (рис. 1).

Из описанных опытов следует, что при действии нормальных нагрузок, не превышающих предел текучести образца, способность к сцеплению кубических и гексагональных металлов существенно различна. При этом существуют две области относительных температур: одна, где экспериментально наблюдаемые значения K цинка и кадмия близки к нулю, а K свинца, оставаясь очень большим (0,85), не зависит от температуры, и вторая — где K растет с ростом температуры, причем сильно для цинка и кадмия и очень слабо — для свинца. Переход из одной температурной области в другую лежит в районе $0,23 T_s$.

Однако существуют условия, в которых перестает сцепляться и свинец. Опыт ставился следующим образом. Две ювенильные поверхности создавались и приводились в первичный контакт при -196° . Как видно из рис. 1 (кривая 1), для них $K = 0,85$. При повторном контактировании в тех же условиях K было меньше и, постепенно уменьшаясь, приближалось к нулю с ростом числа циклов n .

Если для таких несцепляющихся поверхностей свинца снять зависимость $K(T/T_s)$ (кривая 2) и полученный результат сравнить с соответствующим результатом для цинка и кадмия, то можно видеть, что в результате повторного контактирования поверхностей свинца при низкой температуре его когезионные свойства становятся подобны тем, какие имеют цинк и кадмий при первом контакте. Особо отметим, что падение K с ростом n не связано с наклепом свинца, так как металл еще до создания внутреннего разрыва был предельно наклепан при -196° . О том, что падение K обусловлено определенными физическими условиями в зоне контакта, а, например, не влиянием загрязнений, свидетельствует и полная обратимость эффекта по температуре и его многократная повторяемость. Образец — капсулу можно снова нагреть до комнатной температуры и получить $K = 0,95$, затем охладить до -196° , получить $K = 0,85$ и последующим многократным контактированием снова перевести в несцепляющееся состояние.

Из исследований в атмосферных условиях известно, что первый контакт шероховатых поверхностей пластичных металлов пластичен. Повторный контакт ($n \geq 2$) той же нагрузкой на той же фактической площади становится чисто упругим⁽⁶⁾. В отличие от этого, исследования на ювенильных поверхностях свинца показали, что исходный микрорельеф из-за сильного сцепления полностью восстанавливается после каждого цикла испытания, и характер взаимодействия поверхностей при комнатной температуре все время остается пластическим. При низкой температуре микрорельеф после каждого последующего цикла испытания полностью не восстанавливается, и контакт, постепенно сглаживаясь, из пластического при $n = 1$ переходит в преимущественно упругий при $n = 20 \div 30$. В отличие от свинца, контакт ювенильных поверхностей цинка и кадмия при низкой температуре носит преимущественно упругий характер уже при первом цикле испытания, что, видимо, связано с тем, что гексагональные металлы при низкой температуре имеют всего одну плоскость скольжения.

В описанных выше опытах приложенная нагрузка не превышала предела текучести образца. В связи с этим для выявления условий, определяю-

щих сцепление ювенильных поверхностей, были поставлены опыты на свинце и кадмии при азотной температуре, но нормальных нагрузках, равных и больших предела текучести образца. Исследования показали, что всякий раз, как только был превышен предел текучести образца, возникало полное сцепление поверхностей кадмия. Пластическая деформация образцов при этом не превышала 1%, и для возникновения полного сцепления фактически было необходимо только достичь предела текучести. Аналогичные исследования на несцепляющихся поверхностях свинца показали, что при достижении предела текучести образца на них также возникало полное сцепление.

Таким образом, незначительная пластическая деформация образцов при азотной температуре приводила к возникновению полного сцепления. Из этого можно заключить, что в возникновении прочного сцепления ювенильных поверхностей при низкой температуре решающую роль играет пластическое течение. С такой точки зрения прочное остаточное сцепление не будет возникать как для хрупких при низкой температуре металлов, например цинка при -196° , так и для вполне пластичных металлов, таких как кадмий, свинец или медь независимо от их химической природы и кристаллографических свойств в условиях, исключающих пластическое течение зоны контакта. Сказанное, конечно, не относится к геометрически и кристаллографически идеально совпадающим поверхностям, возникающим, например, в устьях трещин хрупких тел (⁷).

Отсутствие остаточного сцепления ювенильных поверхностей при нормальных нагрузках, не превышающих предела текучести образца, в принципе может быть обусловлено тремя причинами: 1) отсутствием сил сцепления на фактическом контакте, 2) разрушением возникшего под нагрузкой сцепления силами упругого восстановления, 3) малостью площади фактического контакта.

Для ювенильных поверхностей одноименных металлов первая причина отпадает. Относительно возможности разрушения возникшего под нагрузкой сцепления силами упругого восстановления можно сказать следующее. Существует точка зрения (⁸), что площадь фактического контакта, а следовательно и относительная прочность сцепления под нагрузкой в первом приближении должны быть пропорциональны приложенной нагрузке, и при $\alpha = \text{const}$ одинаковы для различных металлов и температур ниже температуры рекристаллизации. Но в процессе снятия внешней нагрузки возникшее сцепление может быть частично или полностью разрушено силами упругого восстановления особенно если металл склонен к хрупкому разрушению. Применительно к описанным опытам это означает, что под нагрузкой и при $T < 0,23 T_c$ должно возникать относительно прочное сцепление цинка, кадмия и свинца, которое, однако, затем полностью разрушается силами упругого восстановления. Относительно хрупкого при низкой температуре цинка полученный результат вполне согласуется с изложенной точкой зрения, что, однако, нельзя сказать о пластичном кадмии и, тем более о свинце. Кроме того, если и принять, что при $n = 20 \div 30$ относительно прочное сцепление свинца разрушается силами упругого восстановления, то неясно, почему в таком случае оно не разрушается при $n = 1$. Наконец, на несцепившихся поверхностях не было обнаружено и характерных следов разрушенного сцепления. Следовательно, если под нагрузкой при низкой температуре и возникает сцепление цинка, кадмия и свинца, разрушаемое затем силами упругого восстановления, то прочность такого сцепления должна быть очень мала, и попытка объяснить отсутствие прочного остаточного сцепления ювенильных поверхностей действием сил упругого восстановления наталкивается на трудности.

Остается третья причина — низкая площадь фактического контакта. Из наших предыдущих работ следует, что предел текучести микрошероховатостей должен превосходить предел текучести макроскопического образца, причем тем значительно, чем меньше размер шероховатости (⁹, ¹⁰).

В пределе он должен стремиться к теоретическому, характерному для механических свойств микрообъектов. Поэтому, если шероховатости достаточно малы, деформация их будет преимущественно упругой, а площадь фактического контакта, обусловленная высоким микроскопическим пределом текучести микрошероховатостей, на один-два порядка меньше площади, рассчитанной по макросвойствам. Однако это будет справедливо только для достаточно низких температур ($< 0,23 T_s$), когда такими термическими активируемыми процессами как спекание, рекристаллизация и крип можно пренебречь, и внешних нагрузок, не превышающих предел текучести образца. При нагрузке, равной или большей предела текучести образца, возникшее в образце пластическое течение распространится на упруго напряженную шероховатость, что приведет к снижению ее предела текучести до предела текучести макроскопического образца. В результате резко возрастают площадь фактического контакта⁽¹¹⁾ и прочность остаточного сцепления. Описанные выше экспериментальные факты не противоречат такой точке зрения.

Итак, пластическое течение, обеспечивая резкий рост площади фактического контакта, играет решающую роль в возникновении прочного остаточного сцепления ювенильных поверхностей при относительно низких температурах. При $T > 0,23 T_s$ существенную роль начинают играть тепловые процессы.

В заключение пользуюсь случаем выразить благодарность Я. Е. Манику и С. А. Варченко за большую помощь в работе.

Институт физики
Академии наук ЛатвССР
Рига

Поступило
4 II 1970

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Г. П. Упит, ДАН, 179, 4318 (1968). ² Г. П. Упит, Изв. АН ЛатвССР, сер. физ. техн. наук, № 5, 40 (1968). ³ G. Upit, J. J. Manik, Wear, 11, 333 (1968). ⁴ D. H. Bukly, R. L. Johnson, Wear, 11, 405 (1968). ⁵ K. J. Johnson, D. V. Keller, J. Vacuum. Sci. Technology, 4, 115 (1967). ⁶ Н. Б. Демкин, Изв. высш. учебн. зав., Машиностроение, № 11, 50 (1968). ⁷ П. А. Ребиндер, Юбилейный сборник, посвященный 30-летию Великой Октябрьской Социалистической революции, ч. 1, Изд. АН СССР, 1947, стр. 533. ⁸ С. Б. Айнбидер, Холодная сварка металлов, Рига, 1957. ⁹ Г. П. Упит, С. А. Варченко, ДАН, 178, 834 (1968). ¹⁰ Г. П. Упит, С. А. Варченко, Изв. АН СССР, Металлы, № 2, 137 (1969). ¹¹ Д. К. Булычев, Б. И. Береснев и др., Физика мет. и металловед., 18, 437 (1964).