



The energy model of metals seizure for processes of joint deformation of homogeneous and heterogeneous metals is offered on the basis of known hypotheses of metals seizure.

А. В. АЛИФАНОВ, ФТИ НАН Беларуси

УДК 621.73.043.0163

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СХВАТЫВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

В [1] А. С. Гельманом приведены существующие гипотезы схватывания металлов, многие из которых не потеряли актуальности и на сегодняшний день.

Однако ни одна из рассмотренных гипотез, взятая в отдельности, не в состоянии объяснить все явления, составляющие механизм схватывания металлов, но каждая из них связана с определенными свойствами и отвечает на какие-то конкретные вопросы с помощью теоретического анализа и соответствующих экспериментов и, таким образом, вносит свою лепту в обобщенные представления о механизме схватывания.

После рассмотрения и анализа различных гипотез схватывания металлов при совместном пластическом деформировании можно сделать следующие выводы.

- Для образования металлических связей необходим контакт чистых, свободных от оксидных и других адсорбированных пленок, поверхностей металлов.

- Твердые и хрупкие поверхностные пленки, которые разрушаются при совместном пластическом деформировании и обнажают нижележащие слои металла, более благоприятны для схватывания. Значительно труднее соединить металлы, имеющие вязкие оксидные пленки, которые препятствуют прямому контакту чистых металлических поверхностей.

- В зоне контакта чистых металлических поверхностей следует приложить сжимающие усилия определенной величины, которые обеспечили бы сближение этих поверхностей на расстояние, равное или близкое межатомному. Сближение обеспечивается нормальным давлением, сдвигом, изменением локальных прочностных свойств.

- Для проявления схватывания необходимо, чтобы уровень поверхностной энергии контактируемых металлов достиг определенного критического уровня.

- Уровень поверхностной энергии, необходимой для начала схватывания, можно повысить с помощью подвода тепловой, механической и радиационной энергии.

- Схватывание возникает первоначально в отдельных точках контактной поверхности, а затем при возникновении определенных условий стремится распространиться по всей площади нормального контакта.

- Способность различных металлов к схватыванию зависит от напряженно-деформированного состояния и физико-химических свойств. Соединение более вязких, а также взаимно растворимых друг в друге в твердой фазе металлов и сплавов происходит легче.

- При горячем совместном деформировании значительное влияние на характер и прочность сцепления оказывают диффузионные процессы. Термическая обработка сварных соединений, как правило, повышает прочность сцепления.

- Схватывание металлов при горячем совместном деформировании происходит при меньших сжимающих усилиях и степенях деформации, чем при холодном совместном деформировании.

Практически все исследователи отмечают большее значение высоких температур для активации схватывания. Кроме того, одним из самых эффективных факторов для осуществления схватывания является комбинирование нормальной и касательной нагрузки.

Учитывая выводы многих исследователей о необходимости достижения поверхностных энергий контактирующих металлов какого-то порогового значения для осуществления схватывания [1–8], можно записать энергетическое условие для схватывания металлов в виде:

$$A_{П1} + A_{П2} \leq A_{схв}, \quad (1)$$

где $A_{П1}$ и $A_{П2}$ – поверхностные энергии соединяемых тел; $A_{схв}$ – энергия, необходимая для осуществления схватывания соединяемых тел.

В общем виде с учетом положений и выводов различных гипотез схватывания $A_{схв}$ можно записать таким образом:

$$A_{схв} = A_{пл} + A_{фк} + A_{мет} + A_{хим} + A_{диф}, \quad (2)$$

где $A_{пл}$ – энергия, необходимая для разрушения оксидных и других адсорбированных пленок; $A_{фк}$ – энергия, необходимая для смятия шероховатостей на контактных поверхностях и сближения этих поверхностей на расстояние межатомных взаимодействий, т. е. для установления физического контакта; $A_{мет}$ – энергия, необходимая для установления металлических (в случае однородных металлов) связей; $A_{хим}$ – энергия, необходимая для установления химических (в случае неоднородных металлов) связей; $A_{диф}$ – энергия диффузионных процессов.

Естественно предположить, что в зависимости от свойств соединяемых металлов и условий, в которых происходит их контактирование, будут меняться составляющие $A_{схв}$.

С целью упрощения и конкретизации формулы (2) воспользуемся представлениями исследователей трения [9, 10], в которых процесс трения рассматривается как непрерывный процесс установления и разрывов адгезионных или металлических связей. Е. М. Макушок [9] на примере осадки полосы предлагает воспользоваться формулой для определения удельной мощности теплового источника q_0 , вызываемого силами трения $\tau_k = k_0$:

$$q_0 = \frac{k_0 V_\tau}{I}, \quad (3)$$

где k_0 – сопротивление сдвигу на контакте поверхностей в условиях шероховатости; V_τ – скорость относительного скольжения контактных поверхностей; I – механический эквивалент теплоты.

Обозначим через k_1 и k_2 – сопротивления сдвигу более (k_1) и менее (k_2) прочного тела, находящихся в контакте. Примем также, что на части контактной поверхности $F_{фк} = \eta F_{нк}$ ($F_{фк}$ – площадь физического контакта двух поверхностей, $F_{нк}$ – площадь номинального контакта, η – коэффициент, выражаемый соотношением $\eta = F_{фк}/F_{нк}$) в результате трения произошло схватывание металлов и сопротивление сдвигу на контакте τ_0 стало равно сопротивлению сдвигу менее прочного тела, т. е. $k_0 = k_2$. Тогда работу $A_{рс}$, необходимую для разрыва связей по контактной поверхности $F_{фк}$, можно выразить соотношением:

$$A_{рс} = \frac{k_2 V_\tau F_{фк} t_{рс}}{I}, \quad (4)$$

где $t_{рс}$ – время, необходимое для разрыва связей по контактной поверхности.

Учитывая, что $t_{рс} = S_{рс}/V_\tau$, где $S_{рс}$ – расстояние, на которое должно переместиться одно из контактируемых тел в направлении скорости V_τ для полного разрыва связей, формулу (4) можно представить в виде:

$$A_{рс} = \frac{k_2 S_{рс} F_{фк}}{I}. \quad (5)$$

С некоторой долей приближения можно считать, что $A_{рс} = A_{схв}$. Действительно, для разрыва связей между поверхностями по площади $F_{фк}$ необходимо преодолеть сопротивление сдвигу k_2 менее прочного материала, а для осуществления схватывания поверхностей на площади $F_{фк}$ также необходимо преодолеть сопротивление сдвигу k_2 менее прочного материала за счет пластического деформирования шероховатостей на его поверхности. Причем в процессе пластической деформации сдвигом оксидные пленки разрушаются. Характер установившихся связей не имеет значения, так как в данном случае нас интересуют усилия по разрыву связей, которые не могут быть меньше, чем усилия для их восстановления в условиях абсолютно чистых поверхностей, сближенных на расстояние межатомных взаимодействий. Об этом говорят эксперименты, проведенные Н. Д. Голего [10].

В таком случае формулу (5) можно записать в виде:

$$A_{схв} = \frac{k_2 S_{рс} F_{фк}}{I}, \quad (6)$$

и соотношение (1) примет вид:

$$A_{П1} + A_{П2} \leq \frac{k_2 S_{рс} F_{фк}}{I}. \quad (7)$$

Преобразуем формулу (6) с учетом (7):

$$\frac{A_{П1} + A_{П2}}{(k_2 S_{рс} F_{фк})/I} \leq 1. \quad (8)$$

Выражение (8) можно считать критерием схватывания соединяемых поверхностей.

Следует отметить, что площадь физического контакта $F_{фк}$, на которой осуществлялось схватывание, в реальных процессах обработки металлов давлением может иметь и небольшие размеры, тогда речь идет о локальных очагах схватывания, которые, например, приводят к образованию наростов на деформирующем инструменте. При осуществлении сварки давлением соединение металлов можно считать качественным, прочным только в том случае, если $F_{фк} \geq 0,7 F_{нк}$, т. е. площадь соединенной поверхности должна составлять не менее 70% от площади номинальной поверхности контакта [2].

Из обобщенных представлений о схватывании, изложенных выше, обратим внимание на большое значение локального давления, сдвига и температуры на процессы соединения металлов. Для реальных процессов обработки металлов давлением, осуществляемых в условиях очень больших давлений, значительных сдвиговых деформаций и при достаточно высоких температурах, известно, что при разрыве смазочной прослойки на контакте инструмента и заготовки, как правило, на поверхности инструмента образуется нарост.

Рассмотрим влияние этих факторов на схватывание металлов с учетом обобщенных представлений о схватывании.

Для удобства преобразуем формулу (8):

$$\frac{A_{П1} + A_{П2}}{A_{СХВ}} \leq 1. \quad (9)$$

На рисунке по горизонтали расположена ось температур (T , К), а по вертикали – ось удельных давлений (P , МПа) или степеней деформации (ε , %), или касательных сдвиговых напряжений, зависящих от нормального давления $\tau_k(\sigma)$, МПа. Пожалуй, степени деформации и сдвиговые напряжения больше отвечают характеру исследуемых процессов (сварка давлением, трением или обработка давлением), однако в большинстве проанализированных литературных источников речь идет о давлении, поэтому и в наших рассуждениях будем вести речь о давлении и температуре.

На рисунке проведены прямые 1–5, характеризующие склонность к схватыванию определенных

металлов. Точки пересечения этих прямых с осью температур (T , К) являются точками плавления для соответствующих металлов. Для наглядности рассуждений и безотносительно к значениям координат принимаем, что углы наклона β прямых к оси температур характеризуют отношение суммы поверхностных энергий контактирующих металлов к энергии, необходимой для осуществления схватывания:

$$\cos \beta = \frac{A_{П1} + A_{П2}}{A_{СХВ}} \leq 1. \quad (10)$$

Из (10) следует, что при $\cos \beta = 1$ угол $\beta = 0^\circ$, а при $\cos \beta = 0$ угол $\beta = 90^\circ$.

Зная температуру плавления металла и решая уравнение (10) относительно $\cos \beta$, можно (см. рисунок) провести из точки $T_{П1}$ на оси температур прямую, например, прямую 1 под углом β_1 . В случае сварки давлением однородных металлов, для того чтобы выбрать необходимые для сварки температуру и давление (степень деформации), надо, исходя из технологических соображений, выбрать определяющий параметр, например температуру $T_1 > T_K$, где $T_K = 300$ К – комнатная температура.

Из точки T_1 на оси температур проведем перпендикуляр к последней и точку ее пересечения K_1 с наклонной прямой 1 спроектируем на ось давлений (деформаций).

Например, для металла, соответствующего прямой 1, при температуре T_1 необходимо приложить давление P_2 , а при комнатной температуре

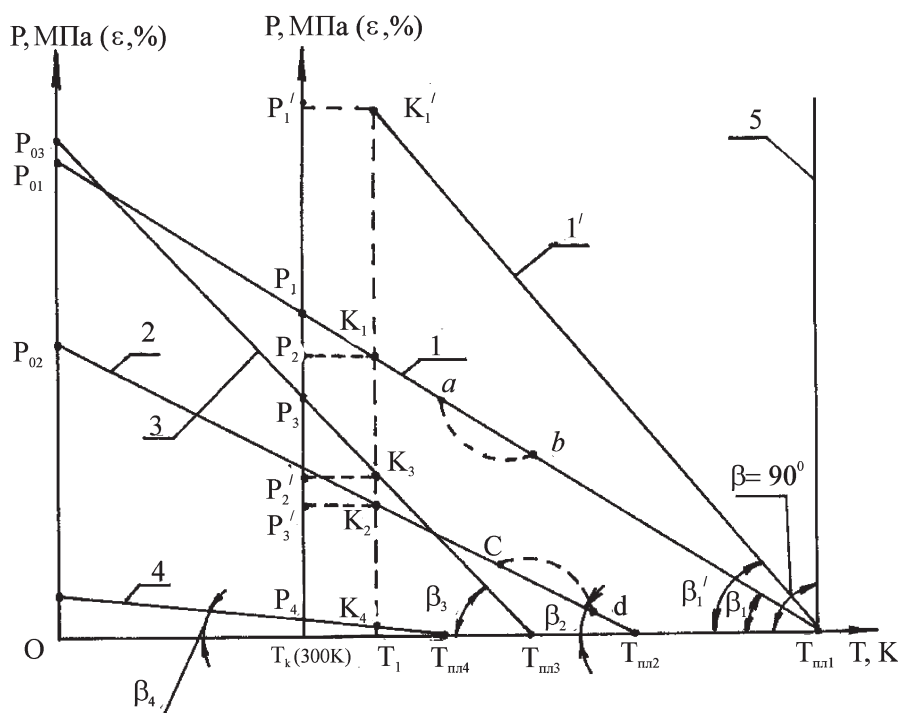


Схема для определения температурно-силовых параметров схватывания металлов

($T_K \approx 300$ K) – давление $P_1 > P_2$. Соответственно и для заданного давления можно определить необходимую температуру.

Следует отметить, что применяемые для холодной сварки металлов давления и температуры (кстати, температура может значительно повыситься в процессе деформации или трения) и являются той дополнительной энергией $A_{\text{доп}}$, активизирующей поверхностную энергию, благодаря которой выполняется условие равенства (8):

$$\frac{A_{\text{П1}} + A_{\text{П2}} + A_{\text{доп}}}{A_{\text{схв}}} = 1 \quad (11)$$

и происходит процесс схватывания (сварки) металлов. Это утверждение находится в согласии и с результатами работ [1, 11, 12].

Из рисунка видно, что схватывание возможно и при очень низких температурах: чем меньше угол β (т. е. чем ближе значение $\cos \beta$ к единице), тем меньше разница необходимых давлений при положительных и отрицательных (относительно 0°C) температурах (прямая 4). Такая возможность подтверждается результатами работ по сварке очень чистого серебра [1] в диапазоне температур 293–103 K. Согласно экспериментам, степень деформации, необходимая для схватывания в этом диапазоне температур, увеличивается незначительно.

Кстати, если $\beta = 0^\circ$, все прямые, характеризующие способности металлов к схватыванию, сольются с осью температур, из чего можно сделать вывод, что схватывание в этом случае произойдет без приложения давлений. Теоретически и это возможно. Известны опыты И. В. Обреимова по расщеплению и сращиванию слюды [13], Н. Д. Голего – по схватыванию в вакууме электролитически осажденных на стеклянные палочки металлов [10] практически без приложения нагрузки. Это доказывает, что при абсолютно чистых и ровных контактирующих поверхностях однородных металлов (материалов) их соединение (схватывание) может быть получено только за счет поверхностной энергии без приложения нагрузок. В этих случаях выполняется условие Б. Я. Пинеса [14] в несколько преобразованном виде:

$$\frac{\alpha_A + \alpha_B}{\alpha_{AB}} > 1,$$

согласно которому, адгезия двух тел A и B (а в нашем случае схватывание) возможна только тогда, когда сумма поверхностных энергий тел A и B больше поверхностной энергии образовавшегося контакта AB , т. е. любая система стремится принять такое состояние, при котором свободная энергия минимальна.

Как следует из рисунка, один металл, имеющий температуру плавления меньшую, чем другой (например, прямые 2 и 3, у которых ($T_{\text{пл2}} > T_{\text{пл3}}$), требует для сварки, тем не менее, большего давления ($P_2 < P_3$), хотя принято считать, что легкоплавкие металлы легче схватываются, чем тугоплавкие. Это можно объяснить большей прочностью (например, у алюминия) или, наоборот, вязкостью оксидных пленок у металла 2 по сравнению с металлом 3, строением кристаллических решеток и другими факторами.

Для реальных металлов зависимости между давлением и температурой будут отображаться не в виде прямых, а более сложными кривыми. Например, «горб» cd на прямой 2 соответствует интервалу температур, при которых увеличивается статистический вес атомных стабильных конфигураций (СВАСК) [6] и ухудшается способность к схватыванию несмотря на повышение температуры. А «впадина» ab на прямой 1 соответствует температуре рекристаллизации и скачкообразному уменьшению необходимого для схватывания давления.

Учитывая большое разнообразие современных представлений о способности к схватыванию разнородных металлов и сплавов, в данной схеме способность к схватыванию пары металлов (сплавов) определяется свойствами более тугоплавкого металла (сплава), что не противоречит взглядам известных ученых [1, 2]. Таким образом, необходимое давление (степень деформации) для свариваемых металлов, характеризуемых, например, прямыми 1 и 3 (см. рисунок), при выбранной температуре T_1 определится согласно прямой 1, соответствующей более тугоплавкому металлу; но в случае соединения металлов 2 и 3 – по прямой 3, так как температуре T_1 для схватывания металла 3 требуется большее давление ($P_3' > P_2'$), хотя металл 2 более тугоплавкий, чем металл 3.

Можно попытаться (для рассмотренных случаев) уменьшить углы β_1 и β_2 совмещения точек K_1 с K_2 и K_3 с K_2 путем активации поверхностей одним из известных способов: очисткой поверхностей от оксидных пленок и загрязнений, наклепом, обезуглероживанием поверхностей и т. п.

Из рисунка можно сделать вывод о том, что если один из металлов находится в жидком состоянии (точка K совпадает с $T_{\text{пл}}$ на оси температур), то он приварится к другому металлу, находящемуся в твердом состоянии, при значительно меньших давлениях, чем в твердой фазе, если только температуры плавления обоих металлов не слишком различаются. Если же оба металла находятся в расплавленном состоянии, то они образуют соедине-

ние даже без приложения каких-либо давлений, т. е. это дает основание утверждать, что, повышая температуру соединяемых металлов (или их поверхностей) до температуры плавления, можно добиться схватывания практически любых металлов и сплавов. Однако нельзя забывать, что, как отмечал А. С. Гельман [1], принципиальная возможность схватывания тех или иных металлов еще не означает, что всегда можно получить их работоспособное сварное соединение.

В то же время другой автор исследований в области сварки металлов давлением Е. И. Астров утверждает, что два металла, один из которых находится в жидком состоянии, а другой – в твердом, и которые практически нерастворимы ни в твердом, ни в жидком состоянии, тем не менее образуют сварные соединения [15].

Величину необходимого для схватывания металлов давления можно во всех случаях соединения однородных и разнородных металлов существенно уменьшить путем применения различных методов активации поверхностной энергии [11, 12], что на рисунке отразится уменьшением углов наклона β соответствующих прямых 1–5.

В случае разработки процессов холодного деформирования металлов, в которых схватывание играет отрицательную роль, для определения вероятности схватывания инструмента и заготовки приведенную на рисунке схему можно использовать следующим образом (наличие смазочных прослоек в данном случае не учитывается): из точек плавления на оси температур, соответствующих материалам инструмента и заготовки, необходимо провести прямые, например 1 и 3 под углами β_1 и β_3 , определенными из формулы (10). Далее из

точки на оси давлений, соответствующей расчетному удельному давлению на инструмент (или степени деформации заготовки), провести перпендикуляр до пересечения с перпендикуляром, проведенным из точки на оси температур, соответствующей расчетной температуре на контактной поверхности. Если точка пересечения перпендикуляров лежит выше прямой 1, соответствующей инструменту, то схватывание неизбежно. Если же искомая точка находится в пространстве, ограниченном прямой 1 (инструмент) и прямой 2 (заготовка), можно считать схватывание вероятным. А в случае расположения точек пересечения перпендикуляров ниже прямой 2, соответствующей заготовке, схватывания скорее всего не произойдет.

Увеличивая твердость инструмента (на рисунке прямая 1 занимает положение прямой 1'), можно уменьшить вероятность схватывания [1].

Прямая 5 на рисунке соответствует случаю, когда отношение $\cos \beta = (A_{П1} + A_{П2})/A_{схв} \rightarrow 0$. Для процессов холодного деформирования металлов это означает, что инструмент и заготовка в течение всего процесса деформирования надежно разделены смазочной прослойкой [16].

Конечно, изложенный материал носит теоретический характер и требует дополнительных исследований, касающихся прежде всего свойств контактируемых металлов. Однако для решения практических задач можно упростить формулу (8) до соотношения нормальных и касательных нагрузок, сопротивления сдвигу и площади фактического контакта. Этим вопросам посвящена глава 7.6 «Образование физического контакта при твердофазном соединении металлов» в [17].

Литература

1. Гельман А. С. Основы сварки давлением. М.: Машиностроение, 1970.
2. Семенов А. П. Исследование схватывания металлов при совместной пластической деформации. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1953.
3. Семенов А. П. Теория трения и износа. М.: Наука, 1965. С. 164–170.
4. Самсонов Г. В. // Порошковая металлургия. 1966. № 12. С. 49–60.
5. Самсонов Г. В., Бурыкин А. Л., Евтушенко О. В. // Автоматическая сварка. 1966. № 10. С. 30–34.
6. Самсонов Г. В., Прядко И. Ф., Прядко Л. Ф. Конфигурационная модель вещества. Киев: Наукова думка, 1971.
7. Семенов А. П. Трение и адгезионное взаимодействие тугоплавких материалов при высоких температурах. М.: Наука, 1972.
8. Аметов М. Ю. О природе трения твердых тел. Минск: Наука и техника, 1971. С. 109.
9. Макушок Е. М. Механика трения. Минск: Наука и техника, 1974.
10. Голего Н. Д. // Автоматическая сварка. 1965. № 3. С. 18–20.
11. Рыкалин Н. Н., Шоршоров М. Х., Красулин Ю. Л. // Изв. АН СССР. Сер. неорганические материалы. 1965. Т. 1. № 1. С. 29–36.
12. Семенов А. П. // Автоматическая сварка. 1964. № 5. С. 4–9.
13. Обреимов И. В. Сопротивление слюды раскалыванию // Тр. Королевского общ-ва. Лондон, 1930. Т. 127. № 805. С. 35–39.
14. Пинес Б. Я. // Журнал технической физики. 1956. Вып. 9. № 26. С. 2086–2107.
15. Астров Е. И. Плакированные многослойные материалы. М.: Металлургия, 1965.
16. Алифанов А. В. // Металлургия. Минск: Выш. шк., 1983. Вып. 17. С. 60–63.
17. Алифанов А. В. Обработка давлением компактных и дискретных материалов. Минск: Экоперспектива, 2004.