

ОБЩЕИНЖЕНЕРНЫЕ ВОПРОСЫ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

УДК 621.73.043.016.3:621.762.4

А. В. Алифанов, д-р техн. наук, зав. отделом,
А. М. Милюкова, аспирант, ГНУ «ФТИ НАН Беларуси»

ВЛИЯНИЕ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ НА КАЧЕСТВО СОЕДИНЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

The paper presents the basic factors affecting adhesion of metals. The energy criterion is derived for adhesion of metals. The consideration is made of the role played by normal and tangential loads in ensuring the physical contact between joined surfaces. It is shown that significant decrease in normal pressure is possible when bonding is formed due to applying tangential shear.

Введение. В настоящее время во многих отраслях машиностроения, в том числе станкоинструментальной отрасли, растет спрос на биметаллические изделия, т. к. они позволяют экономить дорогостоящие высоколегированные стали. В деревообрабатывающей промышленности широко применяют биметаллические изделия (различные виды инструмента, зубчатые колеса, направляющие и др.). Однако к качеству и стойкости биметаллических изделий предъявляются высокие требования, удовлетворение которых напрямую связано с механизмом схватывания разнородных металлов.

Качество биметаллических изделий, получаемых с применением нормальных и тангенциальных нагрузок, определяется процессом схватывания соединяемых металлических поверхностей, который, в свою очередь, зависит от многих факторов, рассматриваемых в настоящей статье. Механизму схватывания металлов посвящено много различных гипотез, однако ни одна из этих гипотез, взятая в отдельности, не в состоянии объяснить все явления, составляющие механизм схватывания металлов, но каждая из них отвечает на какие-то конкретные вопросы и таким образом вносит свою лепту в обобщенные представления о механизме схватывания.

Основные факторы, влияющие на схватывание металлов. Анализ различных гипотез схватывания металлов при совместном пластическом деформировании позволил сделать следующие выводы:

– для образования металлических связей необходим контакт чистых, свободных от окисных 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 окисные пленки, которые препятствуют прямому контакту чистых металлических поверхностей;

– в зоне контакта чистых металлических поверхностей необходимо 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.

Большое значение для активации схватывания имеют высокие температуры, а одним из

самых эффективных факторов для осуществления схватывания является комбинирование нормальной и касательной нагрузок.

Критерий схватывания соединяемых металлических поверхностей. С учетом необходимости достижения поверхностных энергий контактирующих металлов какого-то порогового значения для осуществления схватывания 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 процесс 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 окисных 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 $A_{схв}$ (2).

С целью упрощения и конкретизации формулы (2) воспользуемся представлениями исследователей трения [1, 2], по которым оно рассматривается как непрерывный процесс установления и разрывов адгезионных или металлических связей. Е. М. Макушок [1] 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 тел, находящихся в контакте. Примем также, что на части контактной поверхности $F_{фк} = \eta F_{нк}$ (где $F_{фк}$ – площадь физического контакта двух поверхностей, $F_{нк}$ – площадь номинального кон-

такта, 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 окисные 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. 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

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

Преобразовав формулу (6) с учетом (7), получим:

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

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 $F_{\text{фк}} \geq 0,7F_{\text{нк}}$, т. е. площадь соединенной поверхности должна составлять не менее 70% от площади номинальной поверхности контакта [3].

Образование физического контакта при соединении металлических материалов обработкой давлением. Из ранее представленных формул (4)–(8), определяющих вероятность схватывания металлов, видно, что одним из важных факторов, влияющих на качество сварного соединения, является площадь физического контакта $F_{\text{фк}}$ соединяемых поверхностей.

Формирование физического контакта при совместной деформации металлов обычно является очень важной стадией процесса твердофазной сварки [4], в значительной степени влияет на протекание последующих стадий активации и объемного взаимодействия. Именно эта стадия определяет механические условия соединения – давление, сдвиг, температуру, свойства.

Взаимная деформация микронеровностей соединяемых поверхностей приводит к образованию общей границы, ориентированной вдоль плоскости раздела (рис. 1, а). Деформация каждого отдельного микровыступа l определяется условиями его сопряжения с профилем микро рельефа контртела, которые для реальных поверхностей носят случайный характер. Последующее пластическое течение вдоль контакта происходит под воздействием системы напряжений и скоростей, вызванных наложением внешних связей. Усредняя соответствующие величины для большого числа выступов со стороны каждой поверхности и обеспечивая условия их сопряжения в интегральном смысле, введем среднестатистический микровыступ, с которым связан минимальный представительный участок контакта $2A$ (рис. 1, б). Схема нагружения микровыступа тела l соответствует его смятию и сдвигу вдоль плоской поверхности контртела 2 – общей границы раздела, вследствие чего пластическая деформация локализуется в тонком поверхностном слое $2h$.

Введем статистические характеристики состояния на контакте с помощью макроскопических переменных и используем для их описания соответствующие континуальные уравнения. Это позволяет рассматривать область реального контакта как пористый пластический слой, переменная пористость которого задается эволюцией микровыступа.

Система уравнений, описывающая пластическое состояние пористого тела, включает кинетическое уравнение изменения пористости,

которое устанавливает закон изменения пор, соизмеримых в начальном состоянии с размером исходных частиц материала [5].

Однако при расчете параметров, обеспечивающих пластическую сварку при совместной деформации несвязанных материалов (листов, порошков, гранул, волокон и матрицы), кинетическое уравнение должно быть дополнено условием соединения компонент, которое определяется их реальной поверхностью контакта. В частности, формирование контакта при пластической деформации определяется микро- и субмикрочастицами второго порядка, которые не учитываются кинетическим уравнением изменения пористости. В общем виде такая задача возникает во всех случаях соединения металлов в твердой фазе [4].

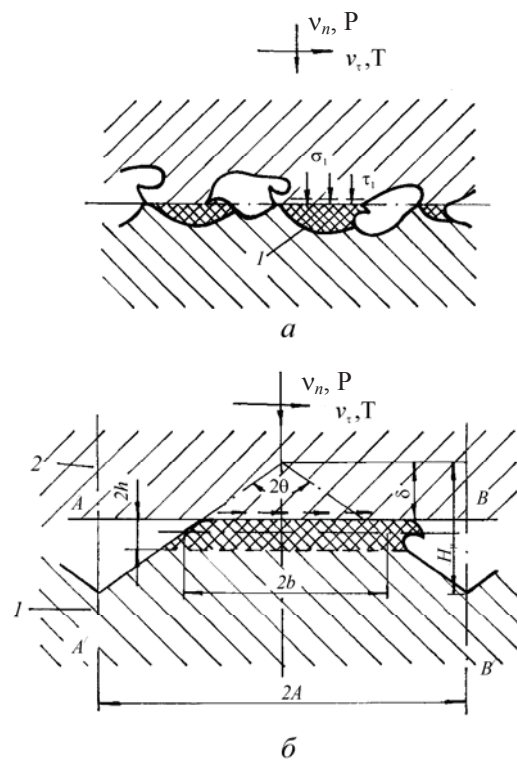


Рис. 1. Формирование пластического контакта:
а – схема локальных очагов деформации вдоль общей границы;
б – модель пластического течения при сжатии со сдвигом отдельного микровыступа

Для элементарной структурной ячейки (рис. 1, б) пористого материала нормальное σ и касательное τ напряжения на границах должны удовлетворять уравнению нагружения [6]:

$$f = \beta(\vartheta)\tau^2 + \alpha(\vartheta)\sigma^2 - \sigma_s^2 = 0, \quad (9)$$

где ϑ – текущая пористость ячейки; $\beta(\vartheta)$, $\alpha(\vartheta)$ – функции пористости поверхностного слоя; σ_s – предел текучести.

Предельные случаи (9) соответствуют линейному сжатию ($\sigma = \sigma^*$, $\tau = 0$) и чистому

сдвигу ($\sigma = 0, \tau = \tau_*$) поверхностного слоя, вследствие чего $\alpha(\vartheta) = (\sigma_s / \sigma_*)^2, \beta(\vartheta) = (\sigma_s / \tau_*)$. Это позволяет представить (9) в каноническом виде:

$$f = \left(\frac{\tau}{\tau_*} \right)^2 - \left(\frac{\sigma}{\sigma_*} \right)^2 - 1 = 0. \quad (10)$$

Определим величины σ_*, τ_* для широко используемой модели плоских прямолинейных гребешков с текущими размерами, равными:

$$2h = \delta; \quad 2b = 4\delta \cdot \operatorname{tg}\theta,$$

где δ – величина смятия; 2θ – угол при вершине (рис. 1, б). При чистом сдвиге слоя $2h$ вдоль границы реального контакта $2b$ действуют максимальные силы трения $\tau_{\max} = \sigma_s / \sqrt{3}$, что дает

$$\tau_* = \frac{2\sigma_s}{A\sqrt{3}} \delta \operatorname{tg}\theta. \quad (11)$$

С другой стороны, при использовании известной формулы Р. Хилла для напряжений при плоской осадке [7], в случае смятия имеем:

$$\sigma_* = B\delta; \quad B = \frac{\sigma_s}{A\sqrt{3}} \operatorname{tg}\theta(3 + 4 \operatorname{tg}\theta). \quad (12)$$

Далее введем кинематические параметры контакта – скорости тангенциального сдвига v_τ и нормального смятия v_n . Так как величины σ, τ и v_n, v_τ имеют смысл обобщенных переменных (в последнем нетрудно убедиться, вычисляя мощность пластической работы на участке контакта $2A$), а (9) определяет поверхность пластического потенциала, то из ассоциированного закона течения следует:

$$v_n = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma} = \lambda \frac{\sigma}{\sigma_*^2}; \quad v_\tau = \lambda \frac{\partial f}{\partial \tau} = \lambda \frac{\tau}{\tau_*^2} \quad (\lambda \geq 0). \quad (13)$$

Используя полученные выражения совместно с (11), (12), находим

$$\frac{\tau_*}{\sigma_*} = C = \frac{2}{3 + 4 \operatorname{tg}\theta}; \quad \tau = C \sqrt{\sigma_*^2 - \sigma^2}. \quad (14)$$

Переход от скоростей v_n, v_τ к соответствующим смещениям – смятию δ и тангенциальному сдвигу S на контакте соединяемых поверхностей

$$v_n = \frac{d\delta}{dt}; \quad v_\tau = \frac{dS}{dt}, \quad (15)$$

позволяет получить дифференциальное уравнение

$$\frac{1}{\sigma} \sqrt{B^2 \delta^2 - \sigma^2} d\delta = C dS, \quad (16)$$

интегрирование которого может быть выполнено для различных режимов комбинированного на-

гружения на контакте, задаваемых зависимостями вида $\sigma = f(\delta)$. Наибольший практический интерес представляет случай, когда вначале к контакту прикладывается нормальное давление σ , вызывающее начальное смятие $\delta_0 = \sigma/B$, а затем сообщается тангенциальный сдвиг S при сохранении величины нормального давления $\sigma = \operatorname{const}$. При этом полный физический контакт соединяемых поверхностей достигается при такой величине сдвига S^* , когда устраняется пористость поверхностного слоя, а величина смятия изменяется от δ_0 до $\delta_{\max} = \frac{A}{2} \operatorname{tg}\theta$. Интегрирование (16) в указанных пределах дает выражение

$$S^* = \frac{\delta_{\max}}{C} \left[\left(\frac{\delta_{\max}}{\delta_0} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} - \frac{\delta_0}{2C} \ln \left[\frac{\delta_{\max}}{\delta_0} + \sqrt{\left(\frac{\delta_{\max}}{\delta_0} \right)^2 - 1} \right]. \quad (17)$$

Зависимость значений S^* , подсчитанных по уравнению (17) и отнесенных к средней высоте микронеровностей соединяемых поверхностей в исходном состоянии $H_\mu = 2\delta_{\max}$, показана на рис. 2, а в виде функции относительного нормального давления на контакте для гребешков с углами $\theta = 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ и 80° (линии 1–4 соответственно). Характер зависимости показывает, что при $\sigma \rightarrow 0$ величина сдвига $S^* \rightarrow \infty$, тогда при $\sigma \geq B\delta_{\max}$ $S^* \rightarrow 0$ и полный контакт обеспечивается только за счет нормального давления. Очевидна возможность значительного снижения давления, обеспечивающего полный физический контакт соединяемых поверхностей, при наложении тангенциального сдвига S . Следует отметить большую зависимость последнего от угла θ , характеризующего поперечный профиль микрорельефа контактной поверхности, что подтверждает трудности соединения чисто обработанных поверхностей, когда угол θ приближается к $\pi/2$, по сравнению с грубо обработанными, когда он достаточно мал [8].

Применим настоящий анализ к расчету процесса сварки при совместной пластической деформации разнородных материалов (листов, порошков, гранул и др.). Для простоты ограничимся случаем однородных компонент, когда физическое состояние контакта описывается статистическими характеристиками $\sigma_s, \theta, A, H_\mu$, а механическое задается решением соответствующей краевой задачи для макроскопических напряжений и скоростей деформации. Относя интенсивность деформаций сдвига γ вблизи контакта к толщине слоя h , для эквивалентного смещения вдоль границы имеем:

$$dS = hd\gamma, \quad (18)$$

что позволяет выполнить интегрирование (16) для различных путей нагружения. При простом нагружении $\sigma/\sigma_s = \sigma_B = \text{const}$ предельная величина интенсивности деформаций сдвига, обеспечивающая полное сопряжение соединяемых поверхностей, равна

$$\gamma^* = \frac{2}{C^2\sigma} \left[\sqrt{1 - C^2\sigma_6^2} - C\sigma_6 \arccos(C\sigma_6) \right], \quad (19)$$

где σ_6 – безразмерная величина нормального напряжения.

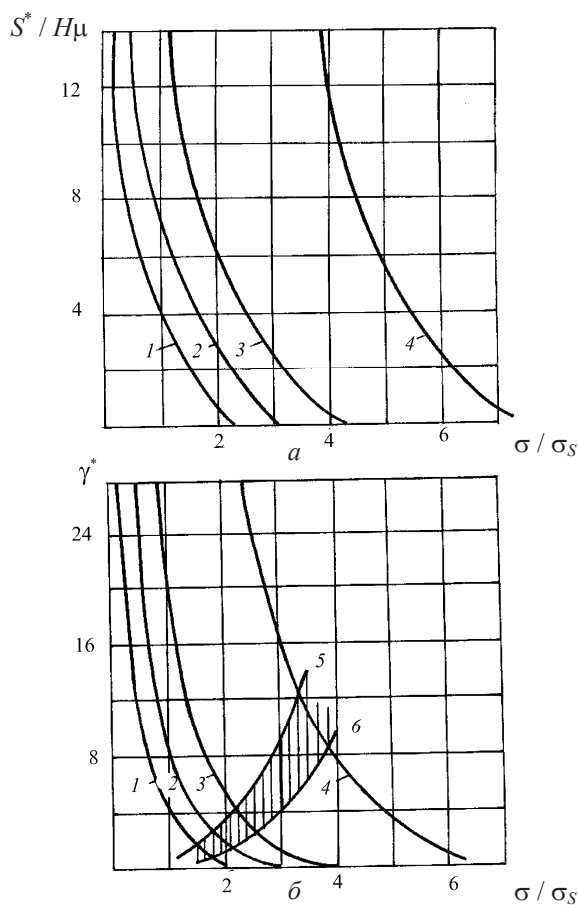


Рис. 2. Зависимость относительной величины тангенциального смещения S^*/H_μ (а) и интенсивности деформации сдвига γ^* (б) от относительного давления на контакте σ/σ_s : 1 – $\theta = 50^\circ$; 2 – $\theta = 60^\circ$; 3 – $\theta = 70^\circ$; 4 – $\theta = 80^\circ$; 5, б – область образования полного физического контакта

Формула (19) устанавливает критерий образования полного физического контакта при совместной деформации разнородных материалов и определяет механические условия, необходимые для последующего соединения на молекулярном уровне [9]. Соответствующая зависимость $\gamma^*(\sigma_6, \theta)$ (рис. 2, б, заштрихованная область между линиями 5 и б) качественно подобна описанной выше для сдвиговой дефор-

мации (17). Очевидно, такая величина дает верхнюю оценку и для конкретного процесса получения биметалла может быть установлена путем решения соответствующей задачи теории пластичности [10].

Закключение. Таким образом, в данной работе при использовании среднестатистического описания рельефа поверхности контакта в виде плоских «гребешков» и рассмотрении ее как пористый пластический слой, получено аналитическое выражение для критерия формирования физического контакта, который определяет критическую величину интенсивности деформации, обеспечивающую полное сопряжение поверхностей при совместной деформации разнородных материалов. Кроме того, показана возможность значительного снижения нормального давления при образовании биметаллического соединения за счет наложения тангенциального сдвига.

Литература

1. Адгезия и адгезионная составляющая трения / Е. М. Макушок [и др.] // Наука и техника. – 1978. – С. 52–67.
2. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. М. Добычин, В. С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
3. Гельман, А. С. Основы сварки давлением / А. С. Гельман. – М.: Машиностроение, 1970. – 312 с.
4. Каракозов, Э. С. Соединение металлов в твердой фазе / Э. С. Каракозов. – М.: Металлургия, 1976. – 264 с.
5. Скороход, В. В. Реологические основы теории спекания / В. В. Скороход. – Киев: Наукова думка, 1972. – 148 с.
6. Грин, Р. Дж. Теория пластичности пористых тел / Р. Дж. Грин // Механика: сб. переводов. – М.: Мир, 1973. – Вып. 4. – С. 109–120.
7. Хилл, Р. Математическая теория пластичности / Р. Хилл. – М.: Гостехиздат, 1956. – 407 с.
8. Шоршоров, М. Х. Клинопрессовая сварка давлением разнородных металлов / М. Х. Шоршоров, В. А. Колесниченко, В. П. Алехин. – М.: Металлургия, 1982. – 112 с.
9. Критерий образования физического контакта при твердофазном соединении металлов / А. В. Степаненко [и др.] // Доклады АН Беларуси. – 1995. – Т. 39, № 4. – С. 109–112.
10. Алифанов, А. В. Изготовление биметаллической полосы методом совместного прессования / А. В. Алифанов., А. М. Милокова // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы III Международ. науч.-техн. конф., Минск, 15–17 октября 2008 г.: в 4 кн. – Минск: ФТИ НАНБ, 2008. – Кн. III. – С. 123–125.