

ДАВИДЕНКО А.А. (ДОННТУ), БЕЙГЕЛЬЗИМЕР Я.Е., ДУГАДКО А.Б. (ДОНФТИ НАН УКРАИНЫ)

РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ БИМЕТАЛЛА ПРИ ГИДРОПРЕССОВАНИИ

Проведен расчет прочности соединения компонентов биметаллического прутка при гидропрессовании и определена вытяжка, при которой начинают формироваться металлические связи между составляющими композита.

Существует множество способов получения слоистых металлических композиций, все они имеют свои преимущества и недостатки. К преимуществам методов ОМД, среди всего прочего, можно отнести то, что при сварке давлением, подбирая режим обработки, можно пытаться управлять процессом формирования соединения, придавая ему требуемые свойства.

Одним из таких методов является прессование жидкостью высокого давления — гидропрессование, которое эффективно не только для осуществления процесса формоизменения металлов и сплавов, но и оказывает одновременно положительное наследственное влияние на их физико-механические и эксплуатационные свойства. Благодаря использованию высоких давлений рабочей среды и деформаций, обеспечивающих хорошее сцепление между металлическими материалами, гидропрессование оказалось весьма перспективным методом для получения биметаллических изделий из различных металлов [1].

Однако, несмотря на достигнутые успехи в технологиях получения металлических композитов методами обработки давлением, в практике разработки таких технологий существенная роль пока принадлежит интуитивным подходам, количественные оценки весьма ограничены. Это резко снижает эффективность использования методов обработки давлением для управления показателями качества слоистых композитов.

В данной работе предложен подход к расчету прочности соединения составляющих композита при гидропрессовании биметаллов электротехнического назначения.

Схема совместного пластического течения составляющих биметаллического прутка при гидропрессовании показана на рис. 1.

Для прогнозирования характеристик качества сварки давлением необходимо рассчитывать прочность полученных соединений на отрыв, сдвиг и другие виды нагружения.

Для прутковых биметаллических материалов наиболее важной характеристикой является прочность соединения на сдвиг, которую можно определить как:

$$\tau = ml\tau_s, \quad (1)$$

где ml — коэффициент прочности сцепления слоев биметалла; τ_s — предел текучести на сдвиг более мягкой компоненты биметалла.

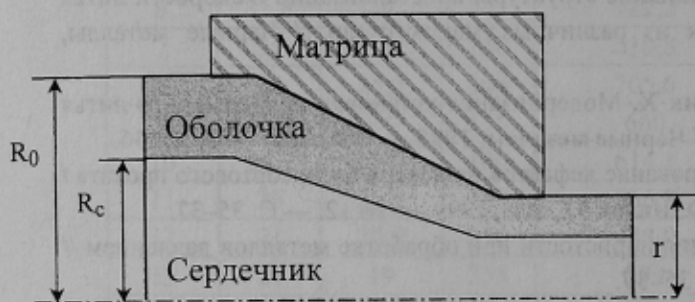


Рис. 1. Схема течения металла при гидропрессовании биметаллического прутка

В данной зависимости параметр ml может принимать значения от нуля до единицы ($0 \leq ml \leq 1$): $ml=0$, когда связь между оболочкой и сердечником отсутствует вообще, $ml=1$, когда эта связь идеальна; все промежуточные значения этого параметра характеризуют некую связь между составляющими композита. Проведение количественной оценки параметра ml возможно только на основе знаний о физической природе и механизме образования соединения металлов в твердой фазе в процессе совместной пластической деформации.

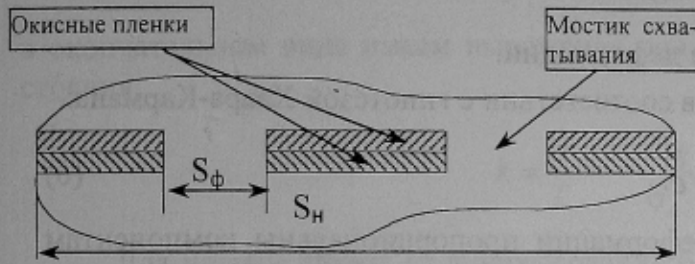


Рис. 2. Участок контакта металлов

Физическую природу схватывания объясняют целым рядом гипотез, одной из которых является пленочная [2]. Согласно этой гипотезе схватывание происходит после разрушения оксидных пленок на поверхности соединяемых металлов, последующего затекания ювенильного металла в образовавшиеся щели и соединения ювенильных поверхностей (рис. 2).

Принимая данный подход, рассчитаем прочность сцепления между составляющими композита при гидропрессовании биметаллического прутка.

В работе [3] показано, что сопротивление сдвигу в контактном слое можно определить следующим выражением, полученным на основе модели [4]:

$$\tau = \tau_s \left(1,5 - \exp \frac{\Lambda_{рпл} - \Lambda}{2} \right), \quad (2)$$

где $\Lambda_{рпл}$ — предельная степень деформации сдвига той оксидной пленки, в которой позже исчерпан ресурс пластичности; Λ — степень совместной пластической деформации сдвига разнородных металлов.

Под пластичностью понимается величина полной пластической деформации или степени сдвига, накопленной частицей к моменту разрушения.

Принимая во внимание (1) имеем коэффициент прочности соединения слоев биметалла или относительную прочность соединения слоев:

$$ml = \left(1,5 - \exp \frac{\Lambda_{рпл} - \Lambda}{2} \right). \quad (3)$$

Расчет параметра ml проведем для случая гидропрессования биметаллической заготовки с железоникелевым сердечником и медной оболочкой $R_c/R_0=0,8$ (рис. 1). В этой паре более пластичной является оболочка, поэтому $\Lambda_{рпл}$, входящую в (3), необходимо брать для окисла меди.

Экспериментальные значения $\Lambda_{рпл}$ для оксидных пленок меди различной толщины h в зависимости от показателя жесткости напряженного состояния σ/T приведены в работе [5] в виде аналитической зависимости:

$$\Lambda_{рпл} = (2 - 0,1h) \exp \left(-0,5 \frac{\sigma}{T} \right). \quad (4)$$

Показатель жесткости напряженного состояния $k=\sigma/T$ определим следующим способом.

Деформированное состояние пленки определяется тремя главными скоростями деформации:

$$\begin{cases} \dot{e}_l = \frac{\dot{l}}{l}, & \dot{e}_h = \frac{\dot{h}}{h}, & \dot{e}_t = \frac{\dot{t}}{t}, \end{cases} \quad (5)$$

где \dot{e}_l, \dot{e}_h — скорости деформации соответственно по длине l и по толщине h пленки; \dot{e}_t — тангенциальная компонента скорости деформации.

При осесимметричной деформации, в соответствии с гипотезой Хаара-Кармана:

$$\dot{e}_h = \dot{e}_t. \quad (6)$$

Поскольку компоненты скоростей деформации пропорциональны компонентам тензора девиатора напряжений S_l, S_h, S_t (согласно соотношениям Леви-Мизеса) в итоге получаем следующее равенство:

$$\sigma_h = \sigma_t, \quad (7)$$

где σ_h, σ_t — нормальные напряжения по направлениям h и t , соответственно.

Принимая во внимание вышесказанное, имеем условие текучести пленки для принятых условий:

$$\sqrt{2(\sigma_h - \sigma_l)^2 + 6\tau_{hl}^2} = \sqrt{2}\sigma_s, \quad (8)$$

где σ_l — нормальное напряжение по направлению l ; τ_{hl} — напряжение сдвига; σ_s — напряжение текучести для окисла меди CuO.

Учитывая (7), из определения гидростатического напряжения выразим σ_l в (8) через σ_h и получим:

$$\sqrt{2(\sigma_h - 3\sigma + 2\sigma_h)^2 + 6\tau_{hl}^2} = \sqrt{2}\sigma_s, \quad (9)$$

где σ — гидростатическое напряжение.

Представив напряжение сдвига в виде:

$$\tau_{hl} = m\sigma_s, \quad (10)$$

где m — коэффициент сдвига.

После преобразований (9) получим:

$$(\sigma_h - \sigma)^2 = \frac{\sigma_s^2(1 - 3m^2)}{9}. \quad (11)$$

Поскольку при гидропрессовании σ_h является наибольшей по абсолютной величине и отрицательной по знаку, то его алгебраическое значение будет минимальным, т.е. можно записать, что $\sigma_h < \sigma$.

Учитывая последнее обстоятельство, а также полагая, что до момента начала разрушения пленки трение между компонентами мало и представляя радиальное напряжение σ_h как

$$\sigma_h = -q, \quad (12)$$

где q — среднее контактное напряжение по очагу деформации.

После подстановки и соответствующих преобразований (11) имеем:

$$\sigma = -q + \frac{\sigma_s}{3}. \quad (13)$$

Представляя T в виде:

$$T = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}, \quad (14)$$

в окончательном виде имеем выражение для показателя жесткости напряженного состояния:

$$k = \frac{\sigma}{T} = -\frac{\sqrt{3}q}{\sigma_s} + \frac{1}{\sqrt{3}}. \quad (15)$$

Для нашего случая гидропрессования биметаллической заготовки с тонкой медной оболочкой выражение (4) можно преобразовать, используя известную зависимость для среднего контактного напряжения q по очагу деформации [6]:

$$q = P \frac{\lambda}{\lambda - 1}, \quad (16)$$

где P — давление выдавливания; λ — вытяжка.

Давление выдавливания при гидропрессовании определим из закона сохранения энергии:

$$P = \frac{j}{\pi R_0^2 V_0}, \quad (17)$$

где j — общая рассеиваемая мощность при прессовании биметалла; R_0 — внешний радиус заготовки до деформации; V_0 — входная скорость заготовки.

Общую рассеиваемую мощность определим, используя модель Б. Авицура [7].

Предел текучести на сдвиг для окисной пленки меди определим согласно методике указанной в работе [5], в которой приведена графическая зависимость микротвердости окислов меди от их толщины на металлической основе.

Согласно [5]:

$$\sigma_s = 0,333 H_\mu, \quad (18)$$

где H_μ — микротвердость окисной пленки.

Степень совместной пластической деформации сдвига разнородных металлов Λ определим следующим образом — выразим компоненты скоростей деформации (5) через текущий радиус сердечника R .

Из закона постоянства объема имеем:

$$l = l_0 \frac{R_0^2}{R}. \quad (19)$$

Отсюда:

$$\dot{l} = -2l_0 \frac{R_0^2}{R^3} \dot{R}; \quad (20)$$

$$\dot{e}_l = \frac{\dot{l}}{l} = -2 \frac{\dot{R}}{R} \quad (21)$$

Очевидно:

$$\dot{e}_r = \frac{\dot{R}}{R} \quad (22)$$

Запишем выражение для интенсивности скорости деформации сдвига:

$$\dot{\Lambda}_{сдв} = \sqrt{3} \left(\frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\dot{e}_l - \dot{e}_r)^2 + (\dot{e}_l - \dot{e}_h)^2 + (\dot{e}_r - \dot{e}_h)^2} \right) \quad (23)$$

Подставив (21) и (22) в (23) после соответствующих преобразований получим:

$$\dot{\Lambda}_{сдв} = 2\sqrt{3} \left| \frac{\dot{R}}{R} \right| \quad (24)$$

Проинтегрировав последнее выражение, получим:

$$\Lambda_{сдв} = \int_0^l \dot{\Lambda}_{сдв} dt = \sqrt{3} \ln \lambda \quad (25)$$

К полученной деформации сдвига в очаге деформации $\Lambda_{сдв}$ необходимо еще добавить деформацию на входе в очаг Λ_0 .

Согласно [8]:

$$\Lambda_0 = tg \alpha, \quad (26)$$

где α — полуугол конуса матрицы.

В окончательном виде степень совместной пластической деформации сдвига разнородных металлов:

$$\Lambda = \sqrt{3} \ln R + tg \alpha \quad (27)$$

По описанной выше схеме расчета была составлена программа для ЭВМ, позволяющая рассчитывать прочность соединения составляющих композита при различных параметрах процесса гидропрессования. На рис. 3 представлена зависимость прочности соединения слоев биметалла от вытяжки при гидропрессовании указанного композита.

Из ее анализа видно, что соединение начинает формироваться при вытяжке $R=3$, при дальнейшем увеличении вытяжки прочность сцепления слоев растет и при $R \approx 10$ достигает своего максимума.

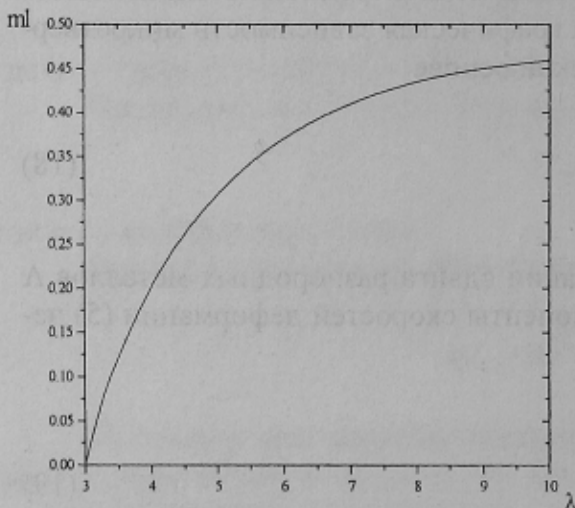


Рис. 3. Зависимость прочности соединения слоев биметалла от вытяжки при гидропрессовании

Таким образом, используя данный подход можно прогнозировать прочность сцепления составляющих биметалла при гидропрессовании и выбирать оптимальные режимы процесса.

Список литературы

1. **Высокие** давления в современных технологиях обработки материалов / Б.И. Береснев, К.И. Езерский, Е.В. Трушин, Б.И. Каменецкий. — М.: Наука, 1988. — 245 с.
2. **Айнбиндер С.Б.** Новые способы сварки давлением. — Рига: Изд-во АН Латв. ССР, 1960. — 115 с.
3. **Давиденко А.А., Орлов Д.В., Сарры Е.А., Бейгельзимер Я.Е.** Прогноз прочности соединения составляющих при гидропрессовании биметаллов // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії / Краматорськ-Слов'янськ, 2000. — С. 227–233.
4. **Некоторые** актуальные задачи теории обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров. — М.: ВИЛС, 1979. — 124 с.
5. **Колмогоров В.Л., Щеголев Г.А.** Уточненная методика экспериментального определения диаграмм пластичности окисных пленок // Изв. вуз. Черная металлургия, 1979. — № 12. — С. 47–51.
6. **Механические** свойства материалов под высоким давлением / Под ред. Х.Л. Пью. — М.: Мир, 1973. — Т. 2 — 372 с.
7. **Авицур Б., Ву Р.-С., Талберт С., Чжоу Е.** Критерий разрушения сердечника при прессовании биметаллических прутков // Конструирование и технология машиностроения, 1982. — № 3. — С. 186–196.
8. **Обработка** материалов жидкостью высокого давления, исследование и проектирование технологий / Я.Е. Бейгельзимер, Б.М. Эфрос. — Донецк, ДонФТИ, 1992. — 53 с.

© Давиденко А.А., Бейгельзимер Я.Е., Дугадко А.Б., 2002

НОВИКОВА Е.В., КУРБАТОВ Ю.Л. (ДонНТУ)

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВА СТАЛИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Определено влияние постоянного электрического поля на окисление металла при высокотемпературном нагреве. Получены коэффициенты для расчета константы окалинообразования с различными напряжениями электрического поля.

Качественный высокотемпературный нагрев стальных изделий — одна из важнейших задач металлургического производственного процесса. Для этого необходимо выполнить два основных условия — обеспечить заданные конечные температурные параметры и свести брак металла к минимуму. Окисление стали при ее нагреве приводит не только к потере до 3% металла, но и как следствие, к ухудшению поверхности изделий. При этом все технологии, применяемые для снижения угара металла в промышленных печах, весьма дороги.

Предлагается технология нагрева стали с наложением постоянного внешнего электрического поля, что обеспечивает снижение окисления металла в печи на 30–50% [1]. За счет подвода к нагреваемому образцу отрицательного потенциала, происходит торможение реакции окисления и уменьшается скорость диффузии кислорода через слой окисла.