

УДК 539.375: 621.791.13

В. Г. ЗАГОРЯНСКИЙ, канд. техн. наук, доц., КрНУ им. М. Остроградского, Кременчуг

РАСЧЕТНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ДЕФОРМАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛОС ПО ИХ ПРЕДЕЛЬНОМУ ИЗГИБУ

Статья посвящена созданию уточненной расчетной методики, позволяющей оценивать по значению предельного радиуса изгиба деформационную способность биметаллических полос, полученных сваркой взрывом. На основании этой методики для основных пар соединенных в биметалл материалов рассчитана матрица коэффициентов, позволяющая автоматизировать расчет значений предельно допустимого радиуса изгиба.

Ключевые слова: биметаллическая полоса, предельно допустимый радиус изгиба, расчетная методика.

Вступление. В настоящее время многие изделия и элементы конструкций из биметаллов изготавливают с помощью сварки. Биметаллы в ряде случаев используют для изготовления переходных элементов плоской или цилиндрической конфигурации для сварки конструкций из разнородных металлов и сплавов, что успешно решает проблему создания таких конструкций [1].

Анализ последних исследований и литературы. Отмечается [1, 2], что применение сваренных взрывом биметаллических и композиционных переходников снижает металлоемкость конструкций из разнородных металлов и сплавов при одновременном улучшении технических характеристик и повышении их эксплуатационной надежности.

Так, например, в КБ "Южное" разработана технология получения переходников расходящихся магистралей систем питания ракетных двигателей, заготовки для которых с сочетанием слоев нержавеющей стали 12Х18Н10Т+алюминий А6+алюминиевый сплав АМг6 с толщиной слоев 40-2-40 мм; 15-2-20 мм; 10-2-10 мм получают сваркой взрывом. Прочность соединения слоев не менее 80 МПа. Диаметр переходников – 20...1500 мм.

Полученные сваркой взрывом биметаллические полосы подвергаются гибке для получения переходников определенного радиуса. Известно [1], что слоистые металлы достаточно хорошо поддаются пластической деформации при гибке как в горячем, так и в холодном состоянии. Минимально допустимые радиусы гибки, зависящие от механических свойств металла, его толщины, а также расположения плакирующего слоя (в сжатой или растянутой зонегиба), можно определить опытным путем или с помощью аналитических расчетов с использованием положений теории пластичности [2, 3].

Цель исследования, постановка проблемы. Ставилась задача разработать расчетную методику оценки предельных деформаций биметаллических полос (при получении биметаллических переходников заданного радиуса) для предотвращения их разрушения по границе разнородных металлов слоистой композиции в процессе гибки, вальцовки или штамповки.

Материалы исследований. При решении задачи о предельно допустимом радиусе загиба биметаллической полосы будем использовать схему, приведенную на рисунке [2].

© В. Г. Загорянский, 2012

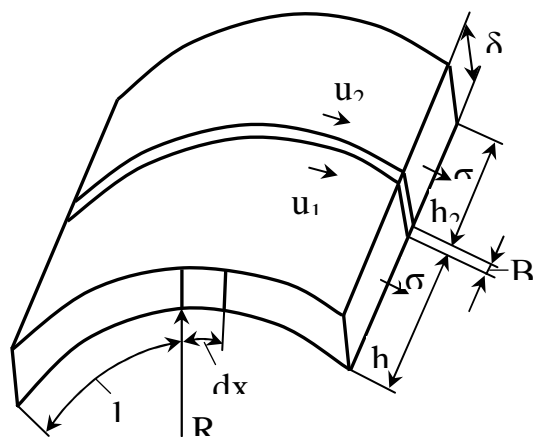


Рис. – Расчетная схема изгиба биметаллической полосы

На рисунке обозначены: u_1, u_2 – радиальные перемещения элементов полосы первого и второго металла в биметаллической полосе соответственно; σ_1, σ_2 – нормальные напряжения; h_1, h_2 – ширина полос первого и второго металла соответственно; B – ширина зоны соединения первого и второго металла соответственно; δ – толщина биметаллической полосы; R – радиус загиба биметаллической полосы.

Интенсивность угловых деформаций Γ совпадает с величиной наибольшей угловой деформации при чистом сдвиге γ . С учетом принятых обозначений интенсивность угловых деформаций Γ определяется как [3]:

$$\Gamma = \frac{u_1 - u_2}{B} \quad (1)$$

Известно, что напряженному состоянию чистого сдвига, при котором по двум взаимно ортогональным площадкам действуют только касательные напряжения τ , соответствует модуль сдвига G . По величине он равен отношению касательного напряжения τ к величине угла сдвига γ , определяющего искажение прямого угла между плоскостями, по которым действуют касательные напряжения: $G = \tau / \gamma$ и представляет способность материала сопротивляться изменению формы при сохранении его объема.

С учетом этого величина касательных напряжений

$$\tau = G\Gamma = \frac{G(u_1 - u_2)}{B}, \quad (2)$$

где G – модуль сдвига зоны соединения первого и второго металла в биметаллической полосе [4].

Приравняв нулю одно из радиальных перемещений (например, u_2) и применяя принцип независимости действия сил, получим выражения для действующих в соединении касательных напряжений:

$$\tau_1 = \frac{u_1 G}{B}, \quad (3)$$

$$\tau = \tau_1 - \tau_2 \quad (4)$$

Условия равновесия элементарного участка dx биметаллической полосы при изгибе (рис. 1) определяются взаимосвязью касательных напряжений сдвига τ и нормальных напряжений σ :

$$d\sigma\delta h = dx\delta\tau, \quad (5)$$

где $h = h_1 + h_2$ – ширина биметаллической полосы. Откуда

$$\frac{d\sigma}{dx} = \frac{\tau}{h}, \quad (6)$$

При отсутствии площадки текучести ($\varepsilon_{iT}^* = \varepsilon_{iT}$) для несжимаемого материала ($H_T = E_T$) имеем при $\varepsilon_i \geq \varepsilon_{iT}$ [3]

$$\sigma_i = \lambda \sigma_T + E_T \varepsilon_i, \quad (7)$$

где ε_{iT}^* – интенсивность деформаций, при которой на диаграмме деформирования кончается площадка текучести и начинается область упрочнения; ε_{iT} – интенсивность деформаций, при которой в материале возникают пластические деформации; H_T – модуль упрочнения; E_T – модуль текучести материала; $\lambda = 1 - E_T/E$ – параметр упрочнения; σ_T – предел текучести материала.

Продифференцировав (7) по x и подставив в (6) и учитывая (3), получим:

$$\frac{d^2 u_1}{dx^2} E_{T1} = \frac{u_1 G}{Bh} \quad (8)$$

Обозначив

$$\frac{G}{BhE} = \lambda^2, \quad (9)$$

получим:

$$\frac{d^2 u}{dx^2} - \lambda^2 u = 0 \quad (10)$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$u_1 = A \operatorname{sh} \lambda x + B \operatorname{ch} \lambda x \quad (11)$$

Постоянные A и B определяем из граничных условий:

- 1) $x = 0, \sigma = 0$;
- 2) $x = 1, \sigma = \sigma_1$.

Полагая $u_1 = 0$, находим подобные решения для u_2 и τ_2 .

Общее решение будет иметь вид:

$$\tau = \tau_1 - \tau_2 = \frac{\sigma_1 h}{l} \frac{\lambda_1 l}{\operatorname{sh} \lambda_1 l} \operatorname{ch} \lambda_1 x - \frac{\sigma_2 h}{l} \frac{\lambda_2 l}{\operatorname{sh} \lambda_2 l} \operatorname{ch} \lambda_2 x \quad (12)$$

Упростим выражение (12), рассмотрев два крайних случая:

- 1) λ велико ($\lambda = 1$ или немного меньше);
- 2) λ мало.

В первом случае касательные напряжения растут от середины полосы к краям по закону гиперболического косинуса, а их максимальная величина достигается при $x = 1$.

$$\tau_{\max} = h(\sigma_1 \lambda_1 - \sigma_2 \lambda_2) \quad (13)$$

Поскольку при больших λ $\operatorname{ch} \lambda l = \operatorname{sh} \lambda l$, то, полагая $hl \approx 1$, имеем $\tau_{\max} = \sigma_1 - \sigma_2 \leq \sigma_{\text{опр}}$ ($G \approx E, h^2 \approx Bh$).

Принимая линейный закон упрочнения и считая $\varepsilon = \delta/2R$ (см. рисунок), получаем расчетную формулу:

$$R \geq \frac{\delta E_{T1} \left(1 - \frac{E_{T2}}{E_{T1}} \right)}{2 \left[\sigma_{OTP} - \sigma_T \left(\frac{E_{T2}}{E_2} - \frac{E_{T1}}{E_1} \right) \right]} \quad (14)$$

Во втором случае, когда λ мало, $sh\lambda_1 l \approx \lambda_1 l$; $sh\lambda_2 l \approx \lambda_2 l$; $ch\lambda x \approx 1$.
Таким образом

$$\tau = \frac{h}{l} (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (15)$$

Расчетная формула в этом случае:

$$R \geq \frac{\delta h E_{T1}}{2 \sigma_{OTP} l} \quad (16)$$

В табл. 1 приведены необходимые для расчетов механические свойства некоторых сталей и сплавов, применяемых в биметаллах, и прочность на отрыв слоев биметаллов (в скобках со знаком плюс – материал плакирующего слоя в соответствии с колонкой "№") [5-8].

Таблица 1. – Механические свойства некоторых сталей и сплавов, применяемых в биметаллах, и прочность на отрыв слоев биметаллов

№	Материал	σ_T , МПа	σ_{OTP} , МПа	E, ГПа	E_T , ГПа
1	Сталь Ст3	210...240	330...350 (+2) 300...400 (+3) 250...350 (+4) 350...550 (+5) 90...110 (+6)	200...210	14
2	12X18H10T	200...220	250...350 (+4) 350...550 (+5) 90...110 (+6) 250...350 (+7)	147...198	12
3	BT1-1	350...500	-	110...120	7
4	Медь	70	-	110...130	9
5	Латунь	170	-	102...105	8
6	Алюминий	35	-	69...72	5,5
7	Алюм. сплав	170	110...130 (+6)	70...72,5	5,6

В табл. 2 приведены рассчитанные автором коэффициенты, представляющие собой правые части зависимости (14) без величины толщины биметалла, необходимые для расчетов радиуса R. В строках таблицы 2 приведены материалы основного слоя, в столбцах – материалы плакирующего слоя.

Таблица 2. – Матрица коэффициентов для вычисления радиуса R

	Сталь Ст3	12X18H10T	BT1-1	Медь	Латунь	Алюминий	Алюм. сплав
Сталь Ст3		2,94	9,96	8,36	6,69	43,3	нет данных
12X18H10T	-		нет данных	5,02	4,46	33,1	10,7
BT1-1	-	-		-	-	нет данных	нет данных
Медь	-	-	-		-	-	-
Латунь	-	-	-	-		-	-
Алюминий	-	-	-	-	-		-
Алюм. сплав	-	-	-	-	-	0,42	

Результаты исследований. Проверкой полученных значений может служить полученный в работе [2] результат расчета предельно допустимого радиуса R для биметаллической полосы Ст3+ВТ1 толщиной 5 мм. Механические характеристики приведены следующие: $E_1 = 2 \cdot 10^5$ МПа, $E_{T1} = 0,07E_1 = 1,4 \cdot 10^4$ МПа, $E_{T2}/E_{T1} = 0,5$, $E_{T2} = 7 \cdot 10^3$ МПа. В результате расчета по формуле (14) получено, что $R \geq 88$ мм. Проведенные авторами работы [2] опыты подтвердили удовлетворительную сходимость расчетных и опытных значений.

Используя результаты, полученные в данной работе (табл. 1), для данной толщины биметалла рассчитываем R : коэффициент, приведенный в табл. 2 для данного биметалла (9,96), умножаем на толщину биметаллической полосы (0,005 м). Получаем 0,05 м. Таким образом, $R \geq 50$ мм. Некоторая разница в результатах в работе [2] (88 мм) и в данной работе (50 мм) связана с разницей в принятых значениях прочности на отрыв слоев – $\sigma_{отр} = 200$ МПа в работе [2] и 350 МПа [5] в данной работе (табл. 1).

Выводы. 1. Для определения деформационной способности сваренного взрывом биметалла разработана уточненная расчетная методика оценки предельного радиуса загиба с учетом прочности соединения, геометрических размеров и механических свойств соединяемых металлов.

2. Рассчитана матрица коэффициентов, позволяющая для пар соединенных в биметалл материалов получать значения предельно допустимого радиуса загиба путем умножения этих коэффициентов на толщины соответствующих биметаллических полос.

Список литературы: 1. Технология слоистых металлов: Учебн. пособие / А.Г. Кобелев, И.Н. Потапов, Е.В. Кузнецов. – М.: Металлургия, 1991. – 248 с. 2. Особенности изготовления изделий из сваренных взрывом слоистых композиций / Ю.П.Трыков, А.С.Краев, В.А.Сурков и др. // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Сб. науч. тр. ВПИ. – Волгоград: ВПИ, 1985. – С. 100-111. 3. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. Учебник для студентов вузов. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с. 4. Ржаницын А.Р. Строительная механика: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1982. – 400 с. 5. Обработка металлов взрывом / А.В. Крупин, В.Я. Соловьев, Г.С. Попов, М.Р. Кръстев. – М.: Металлургия, 1991. – 496 с. 6. Физические величины: Справочник/А. П. Бабищев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с. 7. Осинцев О.Е., Федоров В.Н. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: Справочник. – М.: Машиностроение, 2004. – 336 с. 8. Свойства сталь-алюминиевого биметалла, полученного сваркой взрывом / Б.С. Злобин, И.Д. Захаренко, А.И. Котляр // Автоматическая сварка. – 1985. – № 3. – С. 11-14.

Надійшла до редколегії 25.09.2012

УДК 539.375: 621.791.13

Расчетная методика оценки деформационной способности биметаллических полос по их предельному изгибу / Загорянский В. Г. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХП». – 2012.-№46(952). – С. 45-49. . Бібліогр.: 8 назв.

Стаття присвячена створенню уточненої розрахункової методики, що дозволяє оцінювати за значенням граничного радіусу вигину деформаційну здатність биметалічних стрічок, отриманих зварюванням вибухом. На підставі цієї методики для основних пар сполучених у биметал матеріалів розрахована матриця коефіцієнтів, що дозволяє автоматизувати розрахунок значень гранично допустимого радіусу вигину

Ключові слова: биметалічна стрічка, гранично допустимий радіус вигину, розрахункова методика.

Article is devoted creating of specified calculation methodology, allowing to estimate by value maximum radius of bend deformation ability of the bimetallic stripes got by explosion welding, is created. On the basis of this methodology for the basic pairs of the materials united in a bimetal the matrix of coefficients, allowing to automatize the calculation of values maximum of possible radius of bend, is calculated..

Keywords: bimetallic stripe, maximum possible radius of bend, calculation methodology.