

ВЛИЯНИЕ ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА СПОСОБНОСТЬ К ИЗГИБУ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛОС, ПОЛУЧЕННЫХ ПЛАКИРОВАНИЕМ ВЗРЫВОМ

Загорянский В. Г.

В работе проведены анализ и уточнение закономерностей, связывающих пластические свойства биметаллических композиций, полученных плакированием взрывом, с прочностью соединения слоев. Предложена методика нахождения оптимальных энергетических параметров процесса, определяющих прочность соединения слоев биметаллической композиции. Сильное влияние наклепа при получении плакированием взрывом медно-алюминиевых биметаллических заготовок обуславливает их проверку на пластичность (путем испытания на изгиб). В случае значительного снижения пластических свойств биметалл следует подвергать термообработке (отжигу). Проведен анализ влияния на пластические свойства композиций температур их нагрева. В качестве оптимального режима отжига медно-алюминиевого биметалла (для повышения деформационной способности биметалла без ухудшения его электрофизических свойств) предлагается использовать нагрев до 200...250 °С и выдержку в течение 0,5 часа.

У роботі проведені аналіз та уточнення закономірностей, що зв'язують пластичні властивості біметалічних композицій, отриманих плакуванням вибухом, з міцністю з'єднання шарів. Запропоновано методику знаходження оптимальних енергетичних параметрів процесу, що визначають міцність з'єднання шарів біметалічної композиції. Сильний вплив нагартування при отриманні плакуванням вибухом мідно-алюмінієвих біметалічних заготовок обумовлює їх перевірку на пластичність (шляхом випробування на вигин). У разі значного зниження пластичних властивостей біметал слід піддавати термообробці (відпалу). Проведено аналіз впливу на пластичні властивості композицій температур їх нагрівання. В якості оптимального режиму відпалу мідно-алюмінієвого біметалу (для підвищення деформаційної здатності біметалу без погіршення його електрофізичних властивостей) пропонується використовувати нагрівання до 200...250 °С і витримку протягом 0,5 години.

In the paper analyzes and clarification of laws, linking the plastic properties of bimetallic compositions prepared by coating the explosion, with the strength of the connection layers is developed. The method of finding the optimal energy parameters of the process, determining the strength of the connection layer bimetallic compositions is proposed. The strong influence of hardening in the preparation of the explosion cladding copper-aluminum bimetal blanks makes them tested for ductility (by bending test). In the event of a significant reduction of the plastic properties of the bimetal should be subjected to a heat treatment (annealing). The effect on the plastic properties of the compositions of the heating temperature. In an optimum mode annealing copper-aluminum bimetallic (to increase the deformability of the bimetal without deteriorating its electrical properties) proposes to use heating to 200...250 °C and holding for 0,5 hours.

Загорянский В. Г.

канд. техн. наук, докторант каф. ТМ КрНУ
zagor_vlad@ukr.net

КрНУ – Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского,
г. Кременчуг.

УДК 621.791.13: 62-419.4

Загорянский В. Г.

ВЛИЯНИЕ ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА СПОСОБНОСТЬ К ИЗГИБУ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛОС, ПОЛУЧЕННЫХ ПЛАКИРОВАНИЕМ ВЗРЫВОМ

Эксплуатационная надежность соединений, включающих узлы и детали из биметаллических материалов, определяется в том числе и предотвращением разрушения в процессе обработки биметаллов давлением [1].

В многочисленных публикациях о свойствах биметаллов, полученных плакированием давлением, отмечается, что эксплуатационная надежность полученных из биметаллов изделий при их деформации в процессе изготовления и эксплуатации во многом определяется прочностью соединения слоев металлов композиции, и, в более широком аспекте, минимальной возможностью разрушения по границе сварного соединения между слоями (расслоения).

Трыковым А. Ю. с сотрудниками (Волгоградский политехнический институт) проанализировано напряженно-деформированное состояние биметаллических образцов при изгибе, в результате чего получена расчетная зависимость [2], позволяющая теоретически оценивать предельные (критические) радиусы изгиба $R_{кр}$ биметаллических полос в плоскости действия изгибающего момента M , совпадающей с плоскостью соединения металлов.

Отметим, что в данном случае речь идет не о плакировании одного металла другим, то есть не о слоистой композиции в ее традиционном понимании, когда слои соединяются по плоскостям их наибольших габаритов, а о стыковом соединении пластин разнородных материалов, осуществляемом сваркой, а не плакированием взрывом. Также предполагается, что пластины одинаковой толщины. Данные соединения рациональны для металлов, сварка встык которых затруднена традиционными видами сварки, таких как сталь+титан, сталь+алюминий, медь+алюминий [3].

Сделаем также предварительное замечание, что для этих сочетаний одной из основных трудностей при изготовлении и эксплуатации этих биметаллов является то, что нагрев биметалла или увеличение температурного воздействия во время сварки слоев вызывает снижение сопротивления отрыву слоев $\sigma_{отр}$ и увеличение разброса измеренных значений сопротивления отрыву [4].

В работе [2] получена зависимость для предельного радиуса изгиба $R_{кр}$ таких сваренных встык пластин. Здесь возможны два случая. В первом случае

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

Полученная в работе [2] зависимость для предельного радиуса изгиба $R_{кр}$ таких сваренных встык пластин в дальнейших работах [1] аппроксимируется на возможные случаи изгиба. Так, для прямолинейной полосы данная зависимость выглядит так (рис. 1, а):

$$R_{кр\infty} = \frac{\delta E_{T1} \left(1 - \frac{E_{T2}}{E_{T1}} \right)}{2 \left[\sigma_{отр} - \sigma_T \left(\frac{E_{T2}}{E_1} - \frac{E_{T1}}{E_1} \right) \right]}, \quad (2)$$

где δ – толщина пластины; $\sigma_{отр}$ – прочность сварного соединения на отрыв; σ_T – предел текучести менее прочного из металлов композиции; E_1, E_2 – модули упругости металлов композиции; E_{T1}, E_{T2} – модули пластичности металлов композиции.

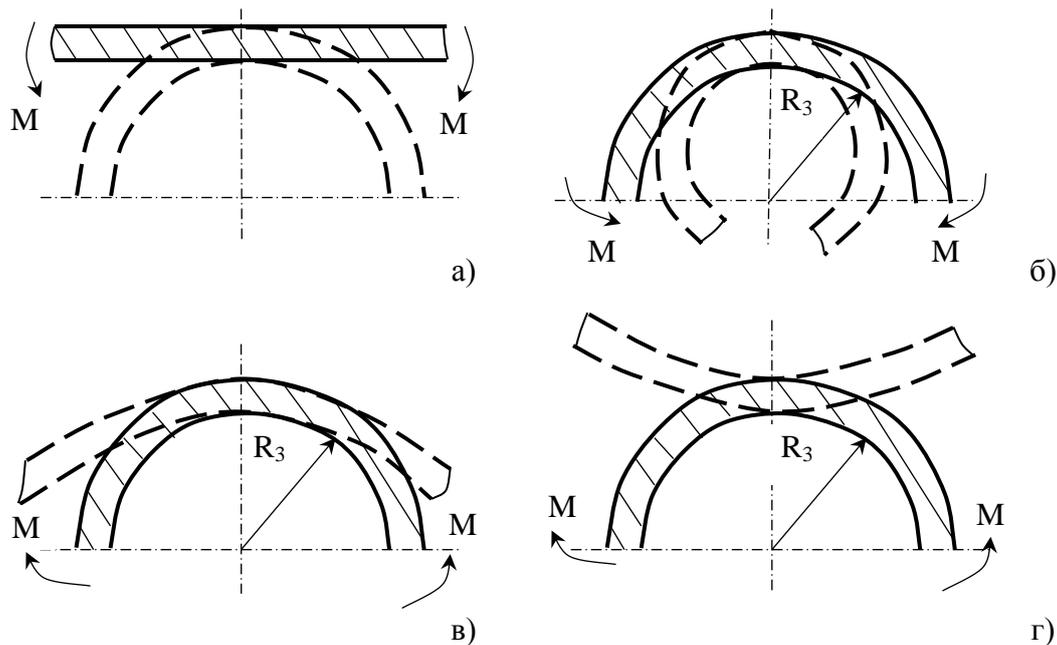


Рис. 1. Схемы к определению радиуса кривизны изгибаемой биметаллической полосы [1]

Для пластины с заданным (первоначальным) радиусом R_3 , кривизна которой увеличивается под действием изгибающего момента M (рис. 1, б):

$$R_{кр} = \frac{1}{K_{кр}} = \frac{1}{K_{кр0} + K_3} = \frac{1}{1/R_{кр\infty} + 1/R_3}, \quad (2)$$

где $K_{кр} = K_{кр0} + K_3$ – критическая кривизна полосы; K_3 – заданная кривизна;

$$K_{кр0} = \frac{1}{R_{кр\infty}} \quad (3)$$

Для пластины с заданным (первоначальным) радиусом R_3 , кривизна которой уменьшается под действием изгибающего момента M (рис. 1, в):

$$R_{кр} = \frac{1}{K_{кр}} = \frac{1}{K_3 - K_{кр0}} = \frac{1}{1/R_3 - 1/R_{кр\infty}}. \quad (4)$$

Случай (4) то же, что и случай (3), но при прохождении деформируемой пластины через нулевую кривизну (рис. 1, г) $R_{кр} < 0$, поскольку $K_{кр} > K_3$.

Также важной является задача определения закономерностей изменения деформационной способности биметаллической композиции в процессе ее пластического деформирования при изготовлении изделий из биметаллических заготовок, последующей обработки и при дальнейшей эксплуатации от прочности соединения слоев композиции, которая, в свою очередь, определяется параметрами процесса образования соединения.

Цель работы – анализ и уточнение закономерностей, связывающих пластические свойства биметаллических композиций, полученных плакированием взрывом, с прочностью соединения и другими факторами, а также анализ влияния на пластические свойства биметаллических полос температуры при их нагреве.

Для случая изгиба прямолинейных титано-стальных образцов (BT1-0 + 08X18H10T) Трыковым А. Ю. с сотрудниками, на основе полученных по выражению (1) значений и экспериментальных данных, построена трехмерная диаграмма зависимости предельного радиуса изгиба $R_{кр}$ от толщины δ биметаллической полосы и прочности на отрыв соединения $\sigma_{отр}$ [1]. На диаграмме приведены две поверхности – применительно к испытаниям на изгиб при нормальной температуре и при температуре 400 °С.

Известно [5], что прочность σ_{OTP} , полученного плакированием взрывом соединения на отрыв слоев зависит от энергетических параметров сварки взрывом. В работах по сварке взрывом, например, [6], приводится зависимость для расчета W_2 – энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию металла в зоне соединения свариваемых элементов (речь идет об удельной (отнесенной к единице площади сварного соединения) кинетической энергии):

$$W_2 = \frac{m_1 + m_2}{2(m_1 + m_2)} v_c^2 \left[1 - \left(\frac{v_k}{C_0} \right)^2 \right], \quad (5)$$

где m_2 – масса неподвижной пластины, $m_2 = \rho_2 \delta_2$; m_1 – масса метаемой пластины; $m_1 = \rho_1 \delta_1$; v_k – скорость точки контакта; v_c – скорость соударения пластин; C_0 – скорость звука в металле; принимается меньшее значение из двух для сочетания свариваемых металлов.

Известно [6], что уравнение (5) позволяет преобразовать экспериментально-расчетные зависимости прочности сварных соединений на отрыв слоев титановых сплавов со сталями, то есть, $\sigma_{отр} = f(v_c)$, приведенные в работе [7], в кривую $W_2 = f(v_c)$. Эта кривая показывает, что для сварки взрывом с оптимальной прочностью соединения слоев любых заданных толщин режимы процесса должны рассчитываться из условий обеспечения определенных значений W (для соединений сталь+титановые сплавы составляет 170...200 Дж/см²). Некоторый разброс прочности (400...570 МПа) Седых В. С. объясняет различной прочностью вошедших в композицию сталей (Ст3, 10Г2СД и 12Х18Н10Т) и титановых сплавов (ВТ6, ОТ4), так как при механических испытаниях полученные на оптимальных режимах сварные соединения обычно разрушаются по основному металлу.

Отсюда следует, что можно воспользоваться приведенным в работе [8] условием разрушения по основному металлу двухслойного металла с интерметаллидной прослойкой, которое в первом приближении выглядит так:

$$(\sigma_m)_{\max} \left(1 + \frac{0,083}{\chi} \right) > (\sigma_2)_{\max}, \quad (6)$$

где $(\sigma_m)_{\max}$ – предел прочности материала прослойки; χ – ширина прослойки; $(\sigma_2)_{\max}$ – предел прочности основного металла.

Отметим, что в этом случае решение осложняется необходимостью знания достоверных диапазонов значений ширины прослойки между слоями и ее предела прочности.

Так, по данным [4] и других авторов, толщина слоя интерметаллидов описывается уравнением

$$\chi = M\tau^{0,5} = m_0 \exp\left(\frac{\Delta E_2}{RT}\right), \quad (7)$$

Там же приводится зависимость относительной прочности β после отжига при температуре T и длительности τ

$$\beta = \frac{\sigma_{OTP}(T, \tau)}{\sigma_{OTP \max}}, \quad (8)$$

где $\sigma_{OTP \max}$ – фактическая прочность на отрыв на участке не занятой расслоем, от ширины интерметаллидной прослойки χ .

Типичная идеализированная зависимость относительной прочности сварного соединения σ_β , равной отношению прочности соединения к прочности основного металла, от величины реализованной в околошовной зоне энергии пластической деформации W_2 , приводимая во многих работах (например, [9]), показана на рис. 2.

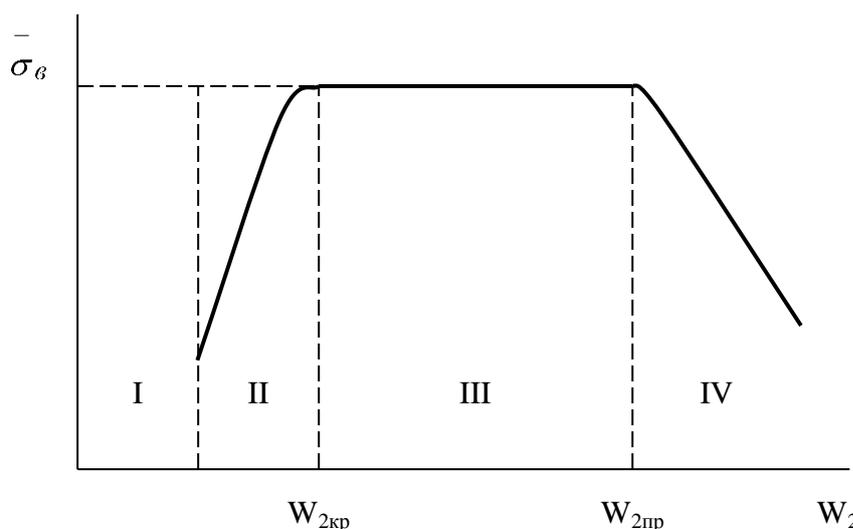


Рис. 2. Типичная зависимость относительной прочности сварного соединения от величины энергии W_2 , затраченной на пластическую деформацию металла [9]

Аналогичный однотипный вид имеют зависимости относительной прочности сварного шва и от скорости соударения v_c , угла соударения γ , массовых характеристик свариваемых элементов m_i .

Значение энергии W_2 , полученное по зависимости (5), сопоставляется со значениями критической и предельной энергии пластической деформации:

$$W_{2кр} \leq W_2 \leq W_{2пр} \quad (9)$$

Критическое значение удельной энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию металла в зоне соединения свариваемых элементов $W_{2кр}$, МДж/мм² (определение критических границ):

$$W_{2кр} = 0,606 + 0,184 \ln \left(\frac{HB}{\delta} \right), \quad (10)$$

где HB/δ – критерий Астрова – отношение твердости металла по Бринеллю к его относительному удлинению, %.

Захаренко И. Д. в своей монографии [3], тем не менее, утверждает, что соотношение (10) мало отражает физические процессы, происходящие при сварке металлов. Также он ссылается на экспериментальные данные, приведенные в работе [10], в которой установлено, что режимы соударения, обеспечивающие качественную сварку, не зависят от толщины свариваемых пластин. Любопытно, что Конон с сотрудниками в своей книге [10], также приводят зависимость (10), ссылаясь на работу [11].

В работе [10] указывается, что для сварки взрывом стали со сталью $W_{2кр}$ составляет 0,8...0,9 МДж/мм². При сварке разнородных металлов $W_{2кр}$ приблизительно равно его значению для более «мягкого» (более пластичного [12]) металла пары.

В ряде случаев условие (9) не всегда выполнимо. Возможны два случая [5]:

- значение энергии пластической деформации, реализуемой в зоне соединения, может быть меньше критической;
- энергия пластической деформации, реализуемой в зоне соединения, может быть больше предельной величины.

В первом случае выполняется увеличение скорости метания v_m (в зависимости от свойств свариваемых материалов на 10...50 %), если же условие (9) не выполняется, то уменьшается скорость контакта v_k , если при $v_m = \max$ и $v_k = \min$ условие (9) не выполняется, предусматривается сначала увеличение массы неподвижного элемента до своего максимального значения с постоянной проверкой условия (9), а если этого недостаточно,

то и массы метаемого элемента (за счет применения фальшпластин) до выполнения условия (9), если же при $v_m = \max$ и $v_k = \min$ $\sigma_1 = \max$, $\sigma_2 = \max$, то это условие не выполнимо, предлагается изменить входные параметры и начать расчет сначала.

Во втором случае предусматривается увеличение скорости точки контакта v_k до своей максимальной величины, и, если при $v_k = \max$ условие (9) не выполняется, то уменьшается масса метаемого элемента за счет дробления его толщины (послойная сварка) до выполнения условия (9). В случае невыполнения условия (9) предлагается изменить исходные данные и произвести новый расчет.

Влияние на прочность соединения слоев биметалла диффузии при его нагреве также исследовалось в отдельных работах, например, [4].

Приведенный в работе [1] вид трехмерной диаграммы показывает, что, хотя деформирование в нагретом состоянии несколько улучшает деформационную способность титано-стального биметалла, но проблему безопасной обработки давлением полностью не решает, так как отношения величин модулей упругости к модулям пластичности материалов композиции изменяется при нагревании незначительно.

Изгиб биметаллических полос шириной 3 мм при 400 °С показал, что $R_{кр}$ уменьшается до 45...50 мм по сравнению с 55...60 мм при нормальной температуре, то есть на 17...18%.

Предложенный в работе [1] подход к определению предельных радиусов изгиба биметаллов в зависимости от толщины биметалла, предела прочности на отрыв соединения и, опосредованно, механических свойств соединяемых металлов, вполне приемлем для разнообразных комбинаций соединяемых металлов, изделия из которых подвергаются изгибу, в процессе которого возможно разрушение биметалла. Также приведенная в работе [1] форма трехмерной диаграммы вполне приемлема для скорее качественной оценки предельной деформационной способности биметалла и определения безопасных условий его деформирования, при которых не будет происходить разрушение по границе разнородного соединения.

Медно-алюминиевый биметалл, полученный плакированием взрывом, необходимо проверить на пластичность (путем испытания на изгиб), в связи с сильным влиянием наклепа при плакировании взрывом.

В случае значительного снижения пластических свойств, биметалл следует подвергать термообработке (отжигу).

Кроме того, отжиг может быть необходим с той точки зрения, что, кроме того, что деформирование меди повышает ее прочность, снижая пластичность (по сравнению с отожженным металлом), также снижаются значения электропроводности меди (при повышении степени деформации ϵ до 65% удельная электропроводность ρ меди снижается на 4% [13]).

Как следует из монографии [14] со ссылкой на работу [15], установлено, что при изгибе на оправке медным слоем наружу при нормальной температуре медно-алюминиевого биметалла толщиной 10 мм, полученного плакированием взрывом, «предельный угол изгиба» (здесь, видимо, речь идет о испытании на изгиб до появления первой трещины, в соответствии с терминологией межгосударственного стандарта ГОСТ 14019-2003 (ИСО 7438:1985) «Материалы металлические. Метод испытания на изгиб») лежит в диапазоне 20°...40°.

К сожалению, эта информация имеет небольшую ценность, показывая скорее качественную сторону процесса, так как ни в последующих работах, повторяющих этот результат [16, 17], ни в обобщающих монографиях [14] авторы не приводят ни марок меди и алюминия композиции, ни соотношения слоев в биметалле, ни его механических свойств. Установить эту информацию проблематично, так как издававшиеся в Волгограде издания не попадают с середины 90-х годов прошлого века в библиотеки Украины, и в сети Интернет их число весьма ограничено (в частности [16]).

Кроме того, не приводятся примеры использования данного композита в изогнутом состоянии для соответствующих деталей токоведущих систем или биметаллических пере-

ходников [14], неясна необходимость в повышении термической обработкой пластических свойств биметалла с сильно нагартованным медным слоем.

Возможно, что речь идет об оригинальной методике определения угла изгиба биметалла, так как в работе [16] говорится об испытаниях с помощью ударного штампа и оправке радиусом 5 мм. Вызывает сомнение адекватность такого подхода, так как в ГОСТ 14019-2003 (принят взамен аналогичного ГОСТ от 1980 года) четко указывается, что диаметр оправки должен быть равен двойной толщине образца, то есть 20 мм, а не 10, и приводятся требования к аппаратуре для определения способности металлических материалов выдерживать пластическую деформацию при изгибе (межгосударственный стандарт ГОСТ 28840-90 «Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования», который распространяется на машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб при статических режимах нагружения).

В работе [15] приводятся графические зависимости «предельного угла изгиба» (см. выше) от продолжительности выдержки образцов биметалла при отжиге с температур 200...350 °С.

В работе [15] и последующих, повторяющих ее результаты, утверждается, что при температуре нагрева 200 °С в течение 0,5...2 часов «предельный угол изгиба» увеличивается почти до 60° (более чем в 2,5 раза по сравнению с образцами без термообработки) и далее остается на этом уровне с увеличением продолжительности отжига.

С повышением температур нагрева до 350 °С «предельный угол изгиба» возрастает до 100...120°, однако при этом прочность сцепления слоев на отрыв снижается вдвое (с почти 90 МПа для образцов без термообработки до 40 МПа при нагреве до 350 °С). Также снижаются электрофизические свойства биметалла (с увеличением продолжительности выдержки повышается сопротивление биметалла при всех температурах нагрева).

Таким образом, авторы работы [15] предлагают в качестве оптимального режима отжига использовать нагрев до 200...250 °С и выдержку в течение 0,5 часа для повышения деформационной способности биметалла без ухудшения его электрофизических свойств.

Для медного слоя в данном случае экспериментально обосновывается применение отжига, который известен как отжиг I рода рекристаллизационный (для устранения наклепа), так как рекристаллизация сильно деформированной технической меди начинается при температурах 200...230 °С [18].

Здесь следует также отметить, что на процесс рекристаллизации, сопровождающийся устранением наклепа и повышением пластических свойств меди, накладывается с повышением температуры отжига снижение пластичности меди, имеющей зону пониженной пластичности, проявляющейся в интервале температур 500...600 °С [19].

Полученные закономерности повышения пластических свойств меди биметалла («предельного угла изгиба» слоя меди) с увеличением температуры отпуска [15] хорошо коррелируют с известными зависимостями влияния температуры отжига на пластичность меди М1 (оцениваемую относительным удлинением δ), показанными в работе [19]. Так, для листов толщиной 1 мм, деформированных на 50%, отжиг в течение 1 часа повысил значение δ с 5% в диапазоне от комнатной температуры и до 200 °С до 30...40% при 300 °С с некоторым дальнейшим повышением до примерно 500 °С.

ВЫВОДЫ

1. При изготовлении биметаллических изделий необходимо руководствоваться разработанными ранее рекомендациями (расчетными зависимостями) по определению предельно допустимых условий деформирования биметаллов, связывающими предельный радиус изгиба деформируемой биметаллической полосы с ее толщиной, прочностью на отрыв соединения слоев биметалла и механическими свойствами металлов слоев.

2. Предложена методика нахождения оптимальных энергетических параметров плакирования взрывом, определяющих прочность соединения биметаллической композиции на отрыв слоев.
3. В качестве оптимального режима отжига медно-алюминиевого биметалла (для повышения деформационной способности биметалла без ухудшения его электрофизических свойств) предлагается использовать нагрев до 200...250 °С и выдержку в течение 0,5 часа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влияние деформации на свойства сваренных взрывом механически неоднородных соединений / А. Ю. Трыков, В. П. Белоусов, А. С. Краев, Е. А. Тарасов // Сварка взрывом и свойства сварных соединений : сб. научн. тр. ВПИ. – Волгоград : ВПИ, 1988. – С. 98–105.
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. научн. тр. ВПИ. – Волгоград : ВПИ, 1985. – С. 100–111.
3. Захаренко И. Д. Сварка металлов взрывом / И. Д. Захаренко // АН БССР, Витеб. отд-ние Ин-та физики твердого тела и полупроводников. – Минск : Навука і тэхніка, 1990. – 205 с.
4. Мастеров В. А. Влияние диффузии при нагреве на прочность соединения слоев биметалла / В. А. Мастеров, И. В. Прилепская, Г. М. Кузнецов // Известия вузов. Черная металлургия. – 1971. – № 1. – С. 101–104.
5. Смелянский В. Я. Оптимизация технологических параметров сварки взрывом на ЭВМ / В. Я. Смелянский, В. А. Хрипунов // Сварка взрывом и свойства сварных соединений : межвуз. сб. науч. тр. – Волгоград : Волгоград. гос. техн. ун-т, 1988. – С. 91–97.
6. Седых В. С. Классификация, оценка и связь основных параметров сварки взрывом / В. С. Седых // Сварка взрывом и свойства сварных соединений : сб. науч. тр. ВПИ. – Волгоград : ВПИ, 1985. – С. 3–30.
7. Седых В. С. Особенности микронеоднородности сваренных взрывом соединений / В. С. Седых // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: научные труды ВПИ. – Волгоград: ВПИ, 1975. – Вып. II. – С. 3–39.
8. Биметаллические соединения / К. Е. Чарухина, С. А. Голованенко, В. А. Мастеров [и др.]. – М. : Металлургия, 1970. – 280 с.
9. Технология производства слоистых металлических композиционных материалов и изделий из них / А. Г. Кобелев, В. И. Лысак, А. А. Быков, Е. В. Кузнецов // Энциклопедия «Машиностроение». Т. III–6 «Технология производства изделий из композиционных материалов, пластмасс, стекла и керамики». – М. : Машиностроение, 2006. – С. 464–512.
10. Конон Ю. А. Сварка взрывом / Ю. А. Конон, Л. Б. Первухин, А. Д. Чудновский. – М. : Машиностроение, 1987. – 215 с.
11. Лысак В. И. Определение критических границ процесса сварки взрывом / В. И. Лысак, В. С. Седых, Ю. П. Трыков // Сварочное производство. – 1984. – № 5. – С. 6–8.
12. Петушков В. Г. Применение взрыва в сварочной технике / В. Г. Петушков. – К. : Наукова думка, 2005. – 753 с.
13. Мальцев М. В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов / М. В. Мальцев. – М. : Металлургия, 1970. – 364 с.
14. Слоистые композиты на основе алюминия и его сплавов / Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгун. – М. : Металлургиздат, 2004. – 230 с.
15. Влияние режима термической обработки на структуру и пластические свойства медно-алюминиевого композита / А. П. Пеев, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак [и др.] // Прогрессивные методы и технологии получения и обработки конструкционных материалов и покрытий. – Волгоград : ВолгГТУ, 1999. – С. 7–8.
16. Кузьмин С. В. Исследование свариваемости взрывом, структуры и свойств медно-алюминиевого биметалла / С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, А. П. Пеев // Изв. ВолгГТУ. Серия «Сварка взрывом и свойства сварных соединений». – Волгоград : ВолгГТУ, 2006. – Вып. 2. – № 9. – С. 37–45.
17. Влияние высокотемпературной термообработки на структуру и механические свойства медно-алюминиевых и титано-стальных СКМ / В. Г. Шморгун, Ю. П. Трыков, О. В. Слаутин, Д. Ю. Донцов, С. А. Абраменко // Новые перспективные материалы и технологии их получения. НППМ-2007 : сб. науч. тр. междунар. конф., Волгоград, 9–12 окт. 2007. – Волгоград, 2007. – С. 239–240.
18. Колачев Б. А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / Б. А. Колачев, В. И. Елагин, В. А. Ливанов. – М. : МИСИС, 1999. – 416 с.
19. Осинцев О. Е. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки : справочник / О. Е. Осинцев, В. Н. Федоров. – М. : Машиностроение, 2004. – 336 с.