

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В КОНТАКТНОМ СЛОЕ БИМЕТАЛЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА

С. П. Москвитин¹, С. Н. Баршутин²

*Кафедры: «Радиотехника» (1); «Энергообеспечение предприятий
и теплотехника» (2), ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия;
sergey.msk@mail.ru*

Ключевые слова: композитные материалы; пластическая деформация; прокатка с током; электропластический эффект.

Аннотация: Представлен анализ механизма взаимодействия двух разнородных материалов под воздействием пластической деформации и импульсного тока высокой плотности для оценки прочности и сплошности соединения рассматриваемых металлов. Проведена оценка энергетического взаимодействия двух металлов при воздействии импульсного тока и пластического деформирования, определена температура нагрева контактного слоя и глубина проникновения металлов друг в друга. Рассмотрена технология производства слоистых электропроводящих материалов с применением импульсного электрического тока высокой плотности, подаваемого непосредственно в зону пластической деформации.

В современной технике все большее применение находят слоистые композиционные материалы, в том числе биметаллические изделия, так как именно композиционные материалы позволяют получать изделия с высокой повышенной коррозионной стойкостью, электропроводимостью, износостойкостью и т.д. В то же время все более актуальным становится вопрос разработки и применения энерго-сберегающих технологий производства таких материалов.

Предложены пути модернизации существующих методов производства слоистых металлических материалов, позволяющих снизить энергозатраты за счет исключения операций промежуточного отжига, сократить сроки производства и повысить качество готового материала за счет повышения сплошности соединения слоев.

Выявим механизм взаимодействия двух разнородных материалов под воздействием пластической деформации и импульсного тока высокой плотности в целях определения прочности и сплошности соединения рассматриваемых металлов.

Решение поставленной задачи лежит в модернизации традиционных способов холодной совместной прокатки биметаллических материалов с одновременным воздействием импульсным током высокой плотности, что приводит к проявлению так называемого электропластического эффекта. Данный эффект был открыт еще в 1970 году и применяется, в основном, при пластической деформации одиночных материалов (волочение проволоки, прокатка листовой стали и т.п.). Предложено использование данного эффекта для прокатки биметалла, что позволит повысить прочность соединения слоев за счет временного разупрочнения материалов и повышения их пластичности под действием эффекта.

Определим необходимые параметры действующего импульсного тока для полной проработки участков деформации с учетом скорости движения полос диаметров прокатных валков и типа прокатываемого материала. Частота импульсного тока, необходимая для проработки током каждого участка биметаллической заготовки, проходящей со скоростью v через зону деформации, определяется как

$$f = \frac{v}{l}, \quad (1)$$

где l – длина очага деформации.

Область деформации – хорда сегмента AB (рис. 1).

С учетом коэффициента обжатия $\varepsilon = (b_n - b_k)/b_n$ и радиуса валков R_B получим

$$l = \sqrt{R_B \varepsilon b_n}, \quad (2)$$

где b_n, b_k – начальная и конечная толщина биметалла соответственно.

Тогда минимальная частота следования импульсов определяется по выражению

$$f = \frac{v}{\sqrt{R_B \varepsilon b_n}}. \quad (3)$$

Импульсы действующего тока ускоряют движение дислокаций и одновременно инициируют работу их источников. Напряжение начала работы источников Франка–Рида определено формулой

$$\sigma_c = \frac{2\mu b}{L} = \frac{2\tau}{Lb}, \quad (4)$$

где μ – модуль сдвига (для металлов принимают $\mu = 10^{10} \dots 10^{11}$ дин/см²); b – вектор Бюргера (обычно принимают $b/L = 10^{-5}$); L – расстояние между точками закрепления дислокаций; τ – линейное напряжение дислокационной петли.

В свою очередь напряжения, создаваемые в кристалле током, определяются формулой В. Б. Фикса

$$\sigma(J_m) = \frac{J_m}{e} m v_F, \quad (5)$$

где J_m – плотность тока; e – заряд электрона; m – число импульсов на участке деформации; v_F – фермиевская скорость электронов.

Исходя из выражений (4) и (5), определим необходимую плотность тока для генерирования дислокаций

$$J_m = \frac{2e\mu b}{m v_F L}. \quad (6)$$

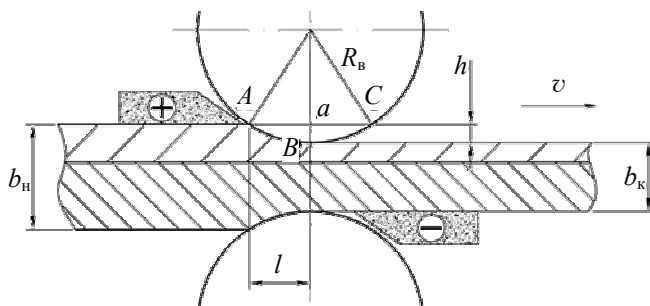


Рис. 1. Схема прокатки биметалла с током

Импульсный ток высокой плотности приводит к «размытию» границ структуры, возрастанию плотности дислокации в зернах при умеренных деформациях, появлению участков с элементами очень мелкой сетчатой структуры, значительной подвижностью дислокаций в зоне воздействия. Под действием импульсного тока происходит отпуск деформационного материала с образованием мелкодисперсных частиц размером 20...100 Å [1, 3]. Материал в зоне деформации с током приобретает более высокую пластичность по сравнению с холодной прокаткой с увеличением прочности, при этом активизируется процесс проскальзывания по межзеренным границам, лежащим в плоскости прокатки. Использование импульсного тока большой плотности при холодной прокатке позволяет исключить последующую операцию термообработки биметалла, что несомненно повышает производительность. Рассмотрим процессы теплообразования в результате воздействия импульсов тока при прокатке двух разнородных материалов (рис. 2).

Известно, что при изменении температуры вещества его энергия увеличивается в соответствии со следующим законом [2, 3]

$$Q = cm\Delta T, \quad (7)$$

где c – теплоемкость; ΔT – изменение температуры в контактном слое.

С другой стороны, при воздействии импульса тока на вещество энергия увеличивается по следующей зависимости

$$Q = P_{\text{им}} t_{\text{им}} = UI t_{\text{им}} = UJS t_{\text{им}}, \quad (8)$$

где $P_{\text{им}}$ – мощность импульса; $t_{\text{им}}$ – время импульса; U – напряжение импульсного тока; I – ток; J – плотность тока; S – площадь, через которую протекает ток.

Объединим оба выражения, в результате получим

$$\Delta T = \frac{UJS t_{\text{им}}}{cm}. \quad (9)$$

В нашем случае в формуле (9) массу можно выразить через плотность, толщину и площадь контакта

$$\Delta T = \frac{UJS t_{\text{им}}}{c_{\text{ср}} d_{\text{с}} S \rho_{\text{ср}}}, \quad (10)$$

где $c_{\text{ср}}$, $\rho_{\text{ср}}$ – средние теплоемкость и плотность контактного слоя соответственно; $d_{\text{с}}$ – толщина контактного слоя.

Если площадь, через которую протекает ток и по которой определяется масса взаимодействующего слоя численно равны, то формула приобретает вид

$$\Delta T = \frac{UJ t_{\text{им}}}{c_{\text{ср}} d_{\text{с}} \rho_{\text{ср}}}. \quad (11)$$

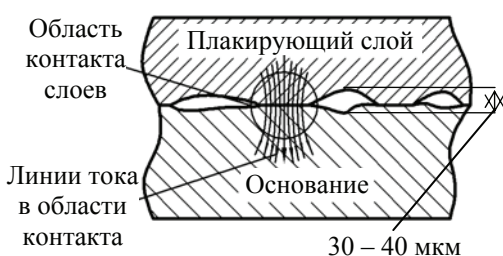


Рис. 2. Несовершенство контакта двух слоев биметалла

Далее проведем оценку толщины диффузионного слоя для одномерного случая по следующей формуле [4]

$$p(x, t) = \sqrt{\frac{1}{4\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}}; \quad D = D_0 e^{-\frac{E_a}{RT}}, \quad (12)$$

где D – коэффициент диффузии; t – время взаимодействия; x – глубина проникновения диффундирующей материи; D_0 – предэкспоненциальный множитель; E_a – энергия активации; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура.

Из выражения (12) выразим x

$$x = \sqrt{-4D_0 e^{-\frac{E_0}{RT}} t_{\text{им}} \ln \frac{p}{1 - \frac{E_0}{RT} t}}. \quad (13)$$

Проведем численную оценку температуры контактного слоя биметалла медь–сталь и глубину диффузионного проникновения материалов друг в друга. Исходными данными принимаем следующие значения:

$$E_a = 187000 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}; \quad R = 8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}; \quad D_0 = 1049,6 \frac{\text{см}^2}{\text{с}};$$

$$c_{\text{ср}} = 423 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \quad \rho_{\text{ср}} = 8380 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$t_{\text{им}} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad U = 20 \text{ В}; \quad J = 2 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}; \quad p(x, t) = 0,5.$$

Расчеты показали, что температура в зоне контакта слоев под действием импульсного тока достигает значений порядка 1400 К, при этом толщина слоя проникновения одного материала в другой составляет $d_c = 2,5 \cdot 10^{-5}$ м по всей площади, находящейся в зоне пластической деформации.

Приведенные расчеты могут быть применены для биметалла сталь–алюминий, при этом образуется физико-механическая смесь алюминия с железом Fe_2Al_7 . Оценка диффузионного слоя алюминий–сталь показывает, что его толщина при указанных параметрах импульсного тока находится также в пределах 35...40 мкм, что приводит к образованию в контактном слое целого ряда интерметаллических соединений с различным стехиометрическим составом, прочность которого может снижаться до прочности алюминия [5, 6]. Для увеличения прочности сцепления слоев биметалла сталь–алюминий необходимо проводить оцинкование стали, при этом алюминий будет контактировать с цинком, создавая тем самым более прочное соединение с меньшим числом интерметаллидов.

На основании проведенного анализа получены зависимости, устанавливающие связь между параметрами импульсного тока и геометрическими характеристиками контакта слоев биметалла. Приведенные расчеты показали, что в начальный момент при воздействии импульсного тока контактный слой нагревается до температуры порядка 1400 К, что приводит к плавлению слоя с образованием твердого раствора с плавным увеличением прочности от меди к железу. Кроме того, оценка диффузионного слоя показывает, что его толщина при заданных параметрах импульсного тока находится в пределах 40 мкм, что способствует прочному и надежному соединению слоев биметалла.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-00483 мол_а.

Список литературы

1. Москвитин, С. П. Разработка комплексного метода контроля характеристик качества биметалла в процессе производства : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13 / Москвитин Сергей Петрович. – Тамбов, 2009. – 133 с.

2. Москвитин, С. П. Метод и система контроля характеристик качества биметалла / С. П. Москвитин, А. П. Пудовкин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2009. – Т. 15, № 2. – С. 315 – 320.

3. Пат. 2356711 Российская Федерация, МКП В23К20/4, В32В37/10, В21В38/00. Способ изготовления биметалла / С. П. Москвитин, А. П. Пудовкин, Е. Е. Чванов, Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2007122210/02 ; заявл. 13.06.07 ; опубл. 27.05.09, Бюл. № 15. – 11 с.

4. Материаловедение : учеб. для вузов / Б. Н. Арзамасов [и др.]. – 5-е изд. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 646 с.

5. Свариваемость стали с алюминием и его сплавами [Электронный ресурс] // Профессиональный портал «Сварка. Резка. Металлообработка». – Режим доступа: http://www.autowelding.ru/publ/1/1/svarivaemost_stali_s_aljumiem_i_ego_splavami/4-1-0-171 (дата обращения: 24.10.2016).

6. Дмитриев, О. С. Влияние режимов термообработки на геометрические и механические характеристики углепластиковых трубчатых элементов / О. С. Дмитриев, И. В. Малков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 427 – 438.

Research into Power Parameters and Interaction in the Bimetal Contact Layer under the Action of the Current Pulse

S. P. Moskvitin¹, S. N. Barshutin²

Departments: “Radio Engineering” (1); “Power Supply of Enterprises and Heat Engineering” (2), “TSTU”, Tambov, Russia;
sergey.msk@mail.ru

Keywords: composite materials; electro-plastic effect; plastic deformation; rolling under current.

Abstract: The main objective of this paper is to analyze the mechanism of interaction between two different materials under the influence of plastic deformation and high pulse current density to assess the strength and continuity of the compounds of the metals. The work evaluated the interaction energy of two metals at a pulsed current and plastic deformation, the heating temperature is defined the contact layer and the penetration depth of metal each other. The technology of production of laminated conductive materials using pulsed electric current of high density fed directly into the plastic deformation zone.

References

1. Moskvitin S.P. *PhD Dissertation (Technical)*, Tambov, 2009, 133 p. (In Russ.)
2. Moskvitin S.P., Pudovkin A.P. Methods and System of Control over Bimetal Quality Characteristics, *Transactions of Tambov State Technical University*, 2009, vol. 15, no. 2, pp. 315-320. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Moskvitin S.P., Pudovkin A.P., Chvanov E.E. TSTU ; *Sposob izgotovleniya bimetallo* [A method of manufacturing a bimetal], Russian Federation, 2009, Pat. 2356711 (In Russ.)
4. Arzamasov B.N., Makarova V.I., Mukhin G.G., Ryzhov N.M. *Materialovedenie : uchebnyk dlya vuzov* [Materials science: the textbook for high schools], Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman, 2003, 646 p. (In Russ.)
5. [The weldability of steel with aluminum and its alloys], *Professional'nyi portal “Svarka. Rezka. Metalloobrabotka”* [Professional Portal “Welding. Cutting.

Metalworking”], available at: http://www.autowelding.ru/publ/1/1/svarivaemost_stali_s_aljumiem_i_ego_splavami/4-1-0-171 (accessed 24 October 2016). (In Russ.)

6. Dmitriev O.S., Malkov I.V. Influence of Heat Treatment Modes on Geometric and Mechanical Characteristics of Carbon Composite Tubular Elements, *Transactions of Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 3, pp. 427-438. (In Russ., abstract in Eng.)

Forschung der energetischen Parameter und der Wechselwirkungen in der Kontaktschicht des Bimetalles unter dem Einfluss vom Impulsstrom

Zusammenfassung: Es ist die Analyse des Mechanismus der Wechselwirkung der zwei verschiedenartigen Materialien unter der Einwirkung der plastischen Deformation und des Impulsstromes der hohen Dichte für die Einschätzung der Haltbarkeit und der Ununterbrochenheit der Vereinigung der betrachtenden Metalle dargelegt. Es ist die Einschätzung der energetischen Wechselwirkung der zwei Metalle bei der Einwirkung des Impulsstromes und des plastischen Deformierens durchgeführt, es ist die Temperatur der Erwärmung der Kontaktschicht und die Tiefe der Durchdringung der Metalle ineinander bestimmt. Es ist die Technologie der Produktion der leitfähigen Schichtmaterialien unter Ausnutzung des unmittelbar in die Zone der plastischen Deformation richtenden Impulsstromes der hohen Dichte betrachtet.

Étude des paramètres énergétiques des interactions dans la couche de contact du bimétal sous l'action du courant d'impulsion

Résumé: Est présentée une analyse du mécanisme de l'interaction de deux matériaux différents sous l'effet de la déformation plastique et du courant d'impulsion de haute densité pour une évaluation de la rigidité et de la continuation de la connexion des métaux examinés. Est effectuée l'évaluation de l'interaction énergétique de deux métaux lors de l'action du courant d'impulsion et de la déformation plastique; est déterminée la température du chauffage de la couche de contact ainsi que la profondeur de la pénétration des métaux les uns dans les autres. Est considérée la technologie de la fabrication des matériaux en couches et conducteurs d'électricité avec l'utilisation du courant d'impulsion électrique de haute densité fourni directement dans la zone de la déformation plastique.

Авторы: *Москвитин Сергей Петрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехника»; *Баршутин Сергей Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий и теплотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Чернышова Татьяна Ивановна* – доктор технических наук, профессор, директор института энергетике, приборостроения и радиоэлектроники, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.