

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПРОЧНОСТЬ КОНТАКТНОГО СОЕДИНЕНИЯ AL-CU

Представлены результаты экспериментальных исследований на сдвиг биметаллических соединений с двойной нахлесткой при одноосном растяжении. Проанализировано влияние температуры и времени нагрева на величину максимального касательного напряжения, разрушающего адгезионный слой, скрепляющий составляющие композита. Выполнен микроанализ химического состава на границе раздела фаз при комнатной температуре и измерены изменения толщины диффузионных слоев в зависимости от температуры. Установлено, что вследствие структурных изменений на границе раздела металлов образуется интерметаллидная зона. Поэтому прочность на сдвиг биметаллического соединения существенно зависит от температуры и времени нагрева.

1. Введение. Исследования прочности биметаллических соединений, работающих в разных эксплуатационных условиях, имеют большое практическое значение. Использование в энергетике слоистых металлических композитов на основании алюминия и меди для производства соединителей, корневых проволок и других элементов, проводящих электрический ток, обеспечивает идеальный электрический контакт, а также значительно уменьшает вес установки при существенном снижении себестоимости.

Деформационное соединение металлов в твердом состоянии – исключительно сложный физико-химический процесс, осуществляющийся во время проката биметаллического листа Al-Cu. Он состоит во взаимном наложении соответственно приготовленных поверхностей листов меди и алюминия и скреплении их под давлением. В результате происходит соединение этих поверхностей, сопровождающееся большими пластическими деформациями [6, 7]. Необходимое давление для получения прочного соединения в случае алюминия и меди составляет около 14.5 ГПа [9]. Следует отметить, что деформационное соединение лучше происходит при повышенной температуре, ускоряющей процесс крепления и вызывающей диффузию атомов металлов на границе контакта. Вследствие этого физические и химические свойства переходной зоны изменяются. Известно, что при произвольных условиях работы предел прочности границы биметаллического соединения обычно выше, чем у самого «слабого» составляющего металла [10]. Нарушение адгезионных связей приводит к разрушениям на границе соединения металлов [3, 4].

Методика исследования на прочность биметаллических соединений, полученных путем деформационного соединения, обычно подобна соответствующим методикам для клеевых соединений, использующих чаще всего упругую модель соединения. Другая ситуация имеет место в случае биметаллов. Обычно малая по толщине промежуточная зона биметалла обладает механическими свойствами, не отличающимися существенно от средних значений упругопластических свойств составляющих и их диффузионных фаз. Поэтому адаптация методики исследования на прочность клеевых соединений на случай биметаллов возможна только при известных механических свойствах переходной зоны и использовании упругопластической модели. С помощью такой модели биметаллического соединения, учитывающей свойства переходной зоны, можно определить величину и изменение касательных напряжений по длине участка двойной нахлестки [2, 5].

Целью этой работы является исследование влияния температуры и времени нагрева на сдвиговую прочность биметаллического соединения алюминий – медь (Al-Cu).

2. Эксперимент. Композит Al-Cu был получен путем горячего проката при температуре 450°C листов из алюминия А1 и меди М1Е. Процентное

соотношение металлов в соединении составляло: Al – 48.8% и Cu – 51.2%. Химический состав биметалла перед нагревом, определенный с помощью сканирующего электронного микроскопа, представлен в табл. 1. Линейный микроанализ химического состава на границе раздела фаз при температуре 293 К показан на рис. 1.

Табл. 1. Химический состав слоев биметалла Al-Cu

Медь (Cu)	Cu+Ag	Bi	Pb	Sb	As	Fe	Ni	Sn	Zn	S
	%									
	99.98	0.001	0.003	0.001	0.001	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001
Алюминий (Al)	Al	Fe	Si	Ti	Zn	Cu				
	%									
	99.76	0.21	0.10	0.009	0.004	0.001				

На плоских образцах, вырезанных из плоскости биметаллического листа в направлениях 0°, 45° и 90° относительно направления проката, сначала были проведены испытания на одноосное растяжение. С помощью вырезывания из образца соответствующего слоя металла, определены механические свойства компонентов биметаллического листа. Результаты этих опытов представлены в табл. 2. Помимо определения основных механических свойств испытываемых металлов, целью этих опытов было получение оценки уровня предварительной анизотропии композита, а также параметров упрочнения.

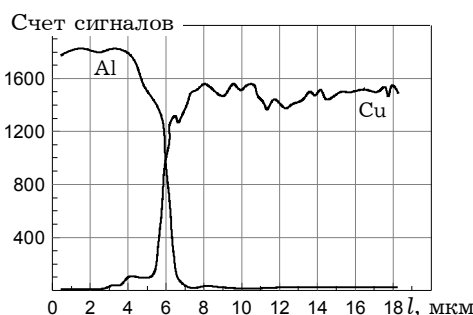


Рис. 1. Микроанализ химического состава на границе раздела фаз Al-Cu.

Табл. 2. Средние значения механических свойств, полученных для биметалла Al-Cu и его составляющих элементов

Параметр	Вид материала								
	Биметалл Al-Cu			Алюминий			Медь		
	0°	45°	90°	0°	45°	90°	0°	45°	90°
E , ГПа	107.4			76.5			155.5		
$R_{0.05}$, МПа	190.0	182.5	228.0	90.0	94.0	105.5	279.0	278.5	332.5
$R_{0.2}$, МПа	234.0	234.5	261.0	117.0	118.5	124.5	344.0	343.5	383.0
R_m , МПа	249.5	246.5	266.0	125.0	122.5	127.5	366.0	364.5	391.0
n	0.027	0.026	0.013	0.052	0.025	0.025	0.021	0.029	0.013
K , МПа	285.9	289.4	289.3	171.2	147.0	149.4	409.3	428.6	423.3
$\epsilon_0 \cdot 10^3$	-4.1	-4.3	-4.2	-3.2	-3.3	-2.9	-4.0	-4.2	-4.1

Для трех выбранных направлений определены модуль упругости E , пределы упругости $R_{0.05}$ и текучести $R_{0.2}$, соответствующие непропорциональным деформациям 0.05% и 0.2%, предел прочности на растяжение R_m и параметры K , n , ϵ_0 кривой упрочнения. Последние параметры характеризуют степень деформационного упрочнения после проката в результате которого происходила адгезия при соединении меди и алюминия. Для описания процесса упрочнения использовалось модифицированное уравнение Свифта [8]:

$$\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n, \quad (1)$$

где σ и ε – полученные экспериментально действительные напряжения и деформации соответственно; K , n , ε_0 – экспериментальные параметры. Обоснованность применения уравнения (1) к рассматриваемым материалам подтверждает работа Парса [12].

Прочность на сдвиг биметаллического соединения Al–Cu исследовали на основании испытания одноосного растяжения плоского образца в виде двойной нахлестки (рис. 2). Образцы имели форму полосы с продольным направлением, совпадающим с направлением проката биметаллического листа. Форму и размеры испытательного образца выбирали в соответствии с техническими стандартами [1, 11]. Во время исследований производилась регистрация значения растягивающей силы, приложенной к концам образца. Деформацию в зоне сдвига измеряли с помощью продольного тензометра перемещений. Одновременно с помощью видеокамеры CCD регистрировали изображение рабочей части образца. Обладающее высокой разрешающей способностью видеоизображение использовалось при компьютерном анализе перемещений в зоне контакта. Образцы крепились в захватах универсальной испытательной машины MTS Mini Bionix 858, сохраняя неизменной длину рабочей части образца. Скорость приращения деформации во время испытаний была одинаковой и равнялась $\dot{\varepsilon} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Для четырех серий образцов, предварительно нагретых до температур 523 К, 623 К, 723 К, 823 К с выдержками $t = 40$ мин, 90 мин, 150 мин соответственно, опыты по одноосному растяжению проводились при комнатной температуре. Аналогичные тесты были проведены также для контрольной серии образцов, которые предварительно не нагревались.

Приложенная растягивающая нагрузка вызывала в зоне соединения касательные напряжения и изгибающий момент.

При испытаниях исследовано также влияние длины рабочей части образца на значения максимальной силы, разрушающей соединение компонент. Наконец, изучалась толщина интерметаллидного слоя в диффузионной зоне, возникшей вследствие нагрева выше упомянутых температур.

3. Результаты и обсуждение. Деформационные диаграммы для биметаллических образцов, выдержанных при температуре 723 К, представлены на рис. 3. Из испытаний на сдвиг при растяжении определяли значения максимальных сил, вызывающих разрушение соединения путем срезания слоя, связывающего компоненты биметалла. Средние касательные напряжения определяли по формуле $\tau = F/(bl)$, где F – растягивающая сила; l , b – длина и ширина срезанного слоя соответственно.

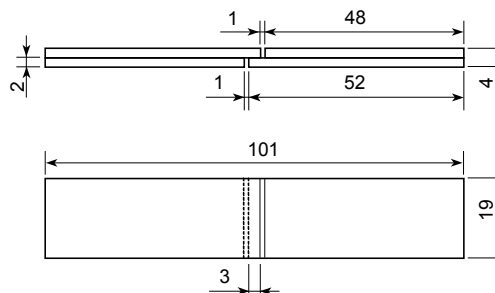


Рис. 2. Испытательный биметаллический образец.

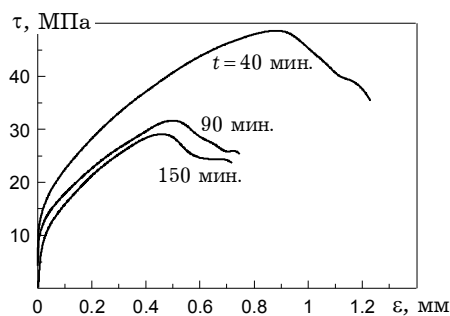


Рис. 3. Кривые испытаний на сдвиг при растяжении биметаллических образцов, выдержанных при температуре 723 К.

Наблюдались два вида разрушения испытываемых образцов. Образцы, которые не подвергались температурному воздействию, разрушались путем разрыва «слабой» компоненты – алюминия при напряжении 105 МПа (декагезионное разрушение алюминиевого слоя) (рис. 4а). Серия образцов, нагретых выше температуры 523 К, разрушалась путем срезывания слоев, соединяющих компоненты. Кроме того, под действием изгибающего момента наблюдался их значительный изгиб (рис. 4б). Разрушение происходило согласно адгезионному механизму, приводящему к расслоению составляющих. По-видимому, причиной такого вида разрушения вдоль границы соединения (при температуре, выше 523 К) является восстановление диффузионной зоны с низкими механическими свойствами.

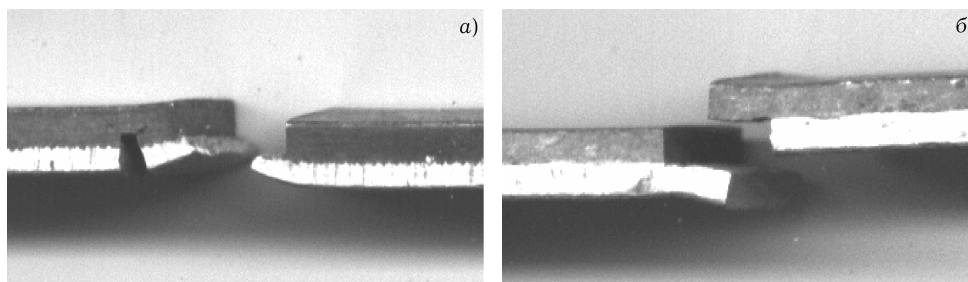


Рис. 4. Два вида разрушения образцов:
а) вследствие разрыва одной компоненты (алюминия),
б) вследствие среза промежуточного слоя.

Анализ результатов экспериментов показал, что с увеличением температуры в диапазоне 523–823 К происходит заметное (приблизительно на 55–58%) снижение значений касательного напряжения, необходимого для разрушения соединения (рис. 5). Если время нагрева превышает 90 минут, то при достижении температурой значения 823 К происходит интенсивное образование фаз Al–Cu на границе раздела металлов, что вызывает снижение температуры плавления медно-алюминиевого соединения и его переход в жидкое состояние.

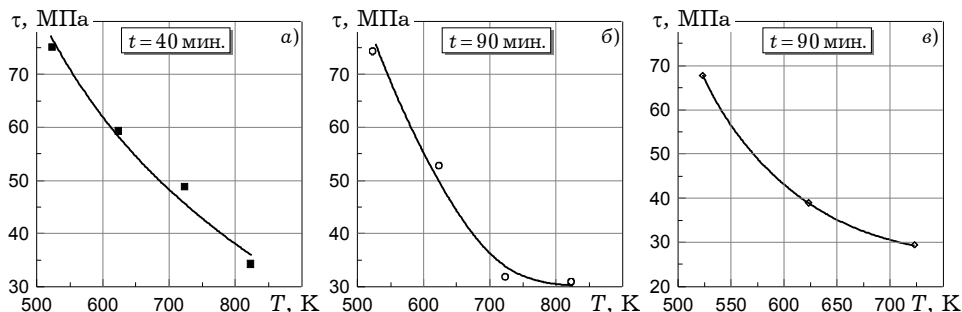


Рис. 5. Влияние температуры нагрева на сдвиговую прочность при выдержке:
а) 40 мин, б) 90 мин, в) 150 мин.

Для надежной работы соединения Al–Cu существенное значение имеет продолжительность нагрева. Так, при увеличении времени выдержки соединения от 40 до 150 минут при температуре 523 К снижение прочности на сдвиг составляет 9%, при температуре 623 К – 33%, при 723 К – 41% (рис. 6). Результаты измерений ширины диффузионного слоя в биметаллическом соединении показали, что увеличение времени нагрева при температуре

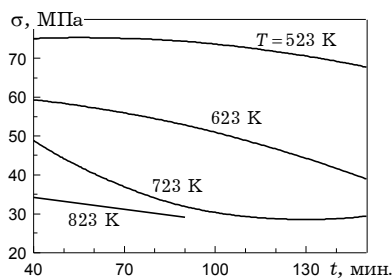


Рис. 6. Изменение прочности на сдвиг при повышении времени нагрева.

523 К вызывает уменьшение толщины интерметаллидного слоя от 40,5 мкм до 2 мкм. При температурах, превышающих 623 К, вместе с увеличением времени температурной выдержки происходит увеличение толщины этого слоя (от 2,6 мкм при 623 К до 27,9 мкм при 823 К). Изображение двухслойной диффузионной зоны на границе соединения при температуре 523 К и выдержке 40 мин. представлено на рис. 7.

Таким образом, установлено, что при температуре, превышающей 623 К, происходит резкое снижение прочности биметаллического соединения Al–Cu. Этот результат следует учитывать при эксплуатации таких соединений в энергетике, где часто происходит перегревание электропроводки.

Также исследовано влияние рабочей длины образца на величину максимальной растягивающей силы, разрушающей биметаллическое соединение. Эксперименты выполнялись на образцах, предварительно выдержанных при температуре 523 К на протяжении 40 минут. Установлено, что с увеличением рабочей длины растягиваемого образца, максимальная срывающая сила линейно увеличивается (рис. 8).

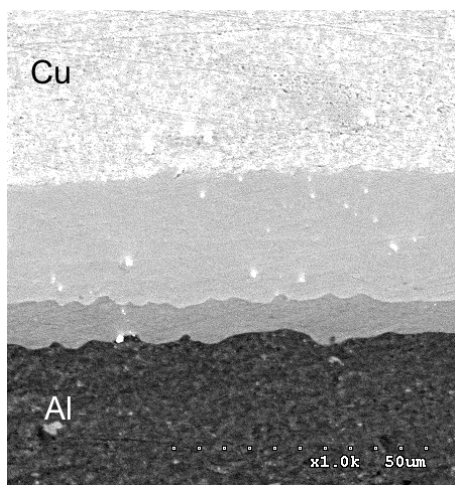


Рис. 7. Фотография интерметаллидных слоев в диффузионной зоне биметалла.

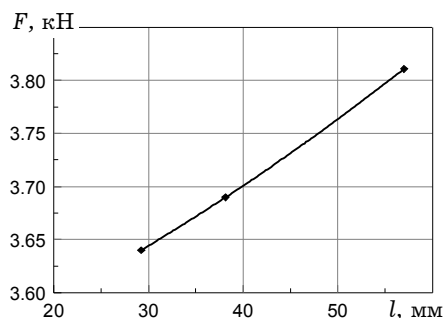


Рис. 8. Влияние длины образца на величину разрушающей силы.

4. Выводы. В результате проведения экспериментальных исследований на сдвиг биметаллического соединения Al–Cu с двойной нахлесткой при одностороннем растяжении установлено, что:

- образование диффузионной зоны, а затем и интерметаллидного слоя изменяют механические свойства биметаллического соединения, а также вид его разрушения в результате среза;
- перегрев соединения свыше температуры 523 К с выдержкой, превышающей 40 минут, значительно понижает прочность соединения.

Работа выполнена в рамках научного проекта W/WM/10/05 Комитета Научных Исследований Республики Польши.

1. ASTM D5656-01 Standard Test Method for Thick-Adherend Metal Lap-Shear Joints for Determination of the Stress-Strain Behavior of Adhesives in Shear by Tension Loading. – 6 p.
2. Bay N. Cold pressure welding – a theoretical model for the bond strength // Proc. Instn. Metall. Spring Res. Conf.: Joining of Metals – Practice and Performance, Warwick. – 1981. – 2, No. 18. – P. 47–62.
3. Buckley D. H. Influence of chemisorbed films on adhesion and friction of clean iron. – NASA Center for aerospace information. NASA-TN-D-4775, 1968. – P. 14.
4. Charuhina K. Ye., Golovanienko S. A., Bimetallicheskie soedinienia. – M.: Metallurgia, 1970. – 278 s.

5. Chihdar Yang, Hai Huang, John S. Tomblin, Wenjun Sun. Elastic-plastic model of adhesive-bonded single-lap composite joints // J. Com. Mater. – 2004. – **38**, No. 4. – P. 293–309.
6. Ciupik L. F., Mstowski O., Zatorski K. // Obróbka Plastyczna. – 1985. – **XXIV**, Z. 3. – S. 127–133.
7. Ciupik L. Mechanizmy procesu spajania odkształceniowego metali na zimno. – Zielona Góra: Wyd. WSI, 1983. – 210 s.
8. Fernandes J. V., Rodrigues D. M., Menzes L. F., Vieira M. F. A modified Swift law for prestrained materials // Int. J. Plasticity. – 1998. – **14**, No. 6. – P. 537–550.
9. Kowalczyk L. Łączenie metali w stanie stałym w procesach obróbki plastycznej. – Warszawa: WNT, 1988. – 276 s.
10. Lesik L. N. Proces walcowania prętyw bimetalicznych w wykrojach wydłużających. – Częstochowa: Wyd. Politechniki Częstochowskiej. Seria Metalurgia, 1998. – 107 s.
11. Military Handbook – MIL-HDBK-17-4A. Composite Materials Handbook. V. 4 – Metal Matrix Composites. U.S. Department of Defense, 2002. – 316 p.
12. Parsa M. H., Yamaguchi K., Takakura N. Redrawing analysis of aluminum-stainless-steel laminated sheet using FEM simulations and experiments // Int. J. Mech. Sci. – 2001. – **43**, No. 10. – P. 2331–2347.

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА МІЦНІСТЬ КОНТАКТНОГО З'ЄДНАННЯ AL-CU

Представлено результати експериментальних досліджень на зсув біметалічного з'єднання Al-Cu з подвійним наклепом при одноосному розтягуванні. Проаналізовано вплив температури та часу нагрівання на величину максимального дотичного напруження, при якому руйнується адгезійний шар, що скріплює складові композиту. Проведено мікроаналіз хімічного складу на межі розділу фаз при кімнатній температурі та заміряно товщину дифузійних шарів залежно від температури. Встановлено, що внаслідок структурних змін на межі розділу металів утворюється інтерметалідна зона. Тому міцність на зсув біметалічного з'єднання Al-Cu суттєво залежить від температури та часу нагрівання.

INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE STRENGTH OF AL-CU JOINT

The results of experimental investigations of the strength of thick adhered single lap bimetallic joint during axial tension were presented in the work. Estimation of influence of temperature and time of heating on the maximal values of shear force and destroying adhesion layer bonding the components of bimetal were determined. Microanalysis of chemical composition in border of phases zoning at room temperature was performed. Measurements of thickness growth of diffusion layer dependent on temperature were done. Resistance of shear of bimetallic connection was strongly associated with a temperature and time of heating, as the result of the structural change in the zone of metallic joint.

Бялостоцк. політехніка, Бяльсток, Польща

Получено
14.07.06