

## ВОЗМОЖНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВАРНЫХ ТРЕХСЛОЙНЫХ СОТОВЫХ ПАНЕЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Л. В. ПЕТРУШИНЕЦ, Ю. В. ФАЛЬЧЕНКО, В. Е. ФЕДОРЧУК, В. С. ШИНКАРЕНКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В самолето-, судостроении, строительстве и других отраслях промышленности широко применяются трехслойные сотовые панели, которые конструктивно состоят из сотового заполнителя и двух обшивок. При относительно небольшой массе эти конструкции отличаются высокими прочностными характеристиками, звуко- и теплоизоляционными свойствами. Основной проблемой при изготовлении трехслойной конструкции является приварка верхней и нижней обшивки к торцевым поверхностям сотового заполнителя. В работе представлены результаты по разработке технологии изготовления трехслойных сотовых панелей из алюминиевых сплавов размером 150×150 мм. Сотовый заполнитель из алюминиевого сплава АД1 толщиной 0,150 мм был получен путем соединения гофрированных полос в блоки при помощи точечной сварки. Плоскопараллельность торцевых поверхностей сотового заполнителя получали шлифовкой. При этом жесткость конструкции обеспечивали за счет заполнения ячеек канифолью. Соединение заполнителя с обшивками из сплава АМг2 толщиной 1,0 мм выполняли способом диффузионной сварки в вакууме. Процесс проводили в приспособлении, состоящем из нижнего, верхнего фланцев и втулки. Фланцы обеспечивали прижатие обшивок к торцевым поверхностям сотового заполнителя по всей площади контакта, а втулка позволяла выровнять температурное поле в изделии и контролировать величину его деформации в процессе сварки. Библиогр. 8, табл. 1, рис. 6.

*Ключевые слова:* трехслойная сотовая панель, тонколистовые алюминиевые сплавы, точечная сварка, диффузионная сварка в вакууме

В настоящее время в самолето-, судостроении, строительстве и других отраслях промышленности широко применяются трехслойные панели. При относительно небольшой массе эти конструкции имеют высокие прочностные характеристики и жесткость. Несущие слои, подкрепленные заполнителем, воспринимают высокие напряжения сжатия, превышающие предел упругости материала. Данный вид конструкций отличается хорошими вибрационными и радиотехническими характеристиками, звуко- и теплоизоляционными свойствами [1, 2].

Для соединения элементов сотовых заполнителей применяется ряд методов: склеивание, контактная сварка, пайка и диффузионная сварка. Наиболее распространенным способом изготовления является склеивание (около 95 %). При этом трехслойные сотовые панели из алюминиевых сплавов в современной промышленности изготавливают преимущественно склеиванием. Панели, полученные пайкой, контактной и диффузионной сваркой, применяют в конструкциях, работающих при высоких температурах или в агрессивных средах [1]. Соответственно, материалами для таких панелей служат нихром, титановые сплавы или нержавеющие стали.

Получение сотовых заполнителей выполняется одним из двух методов: растяжение пакета и изготовление из профилированных лент. При втором

методе, кроме склеивания, также возможно применение сварки или пайки. Метод растяжения пакета применяется для изготовления заполнителей, соты которых состоят только из шести граней. При этом толщины металлических материалов не превышают 80 мкм. Сотовые заполнители, изготовленные из предварительно профилированной ленты в виде фольги, имеют более правильную геометрию сот, чем заполнители, полученные путем растяжения пакетов. Данный технологический процесс занимает больше времени, чем метод растяжения пакета, следовательно, заполнители, полученные из профилированных лент, обычно дороже [1].

Трехслойная панель по своей конструкции состоит из двух обшивок и сотового заполнителя, которые существенно отличаются как своей геометрией, так и механическими свойствами в разных плоскостях. Данный вид конструкции требует разработки отдельных подходов как к сварке профилированных лент в блок сотового заполнителя, так и формирования таврового соединения обшивок с заполнителем.

Целью данной работы было разработать технологию получения трехслойных сотовых панелей из алюминиевых сплавов способом диффузионной сварки в вакууме.

При изготовлении трехслойных панелей для сотового заполнителя применяли сплав алюминия

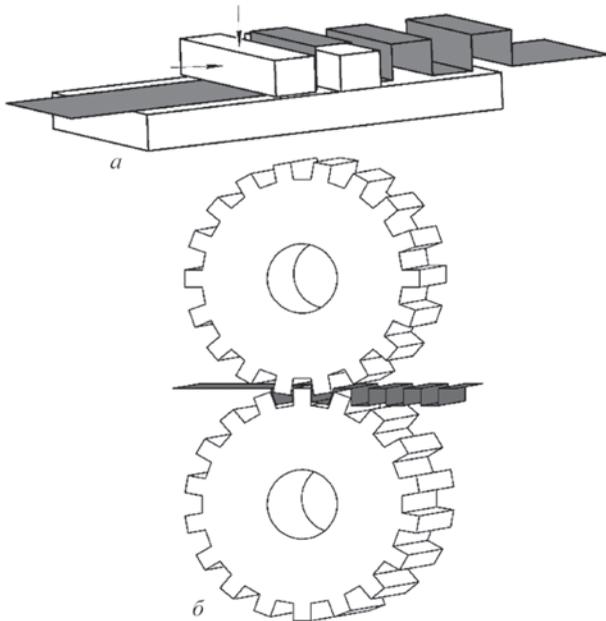


Рис. 1. Схема формирования полос сотового заполнителя с помощью прямоугольных вкладышей (а) или зубчатой передачи (б)

АД1 с толщиной фольги 0,15 мм, а для обшивок сплав АМг2 толщиной 1,0 мм.

На основе ранее проведенного литературного обзора [3] было показано, что профилированные ленты для сотового заполнителя могут быть получены путем последовательного формирования фольги с заданным шагом в виде половинок сот на оснастке, состоящей из прямоугольных вкладышей (рис. 1, а) или с помощью зубчатой пары (рис. 1, б).

Первый вид оснастки прост в изготовлении, но формирование профилированных лент требует значительных затрат времени. Оснастка, состоящая из зубчатой пары, более дорогостоящая в изготовлении, но целесообразна при изготовлении больших партий профилированной ленты.

Для соединения элементов профилированных полос в блок сотового заполнителя применяли способ точечной и диффузионной сварки. Точечную сварку проводили на опорной планке, изготовленной из стали в виде «гребенки» (рис. 2). Для диффузионной сварки использовали, соответственно, оснастку, состоящую из набора «гребенок».

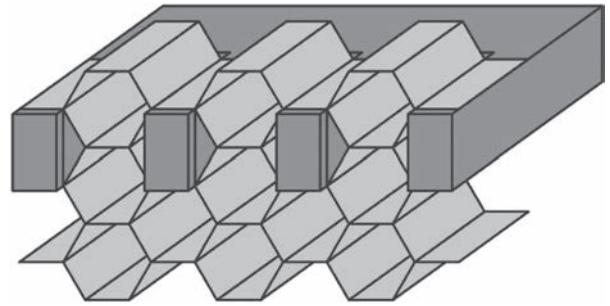


Рис. 2. Вид оснастки «гребенка» для сварки сотового заполнителя

Для проведения механических испытаний сварных соединений из фольги на растяжение была использована универсальная машина МТС 810. При исследовании механических характеристик сотовой конструкции на сжатие использовали цифровой контроллер давления фирмы «КОЛ» марки ХК3118Т1 и датчик давления фирмы «CAS» марки МNC-1 с рабочим интервалом от 0 до 1000 кг.

Диффузионную сварку в вакууме проводили в установке П-115 по методике, подробно описанной в работе [4].

Исследование микроструктуры сварного соединения проводили на поперечных шлифах с помощью сканирующего электронного микроскопа, оснащенного энергодисперсионным спектрометром ENERGY 200 и оптического металлографического микроскопа ММТ-1600В.

Диффузионную сварку в вакууме алюминиевого сплава АД1 выполняли при температуре  $T_{св} = 480...600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , давлении  $P_{св} = 10...40\text{ МПа}$ , продолжительности процесса  $t_{св} = 10...20\text{ мин}$ , вакуум в камере поддерживали на уровне  $1,33 \cdot 10^{-3}\text{ Па}$ . Оксидную пленку удаляли путем механической зачистки, после чего свариваемые поверхности обезжиривали в спирте. Размер нахлеста свариваемых образцов составлял 10 мм.

Как показали исследования, при сварке фольги на режиме, который согласно литературным данным соответствует оптимальному [5], в зоне соединения образцов наблюдаются отдельные участки схватывания. Установлено, что увеличение давления до 40 МПа и продолжительности процесса до 20 мин обеспечивает формирование физического контакта по всей поверхности образцов. При повышении температуры сварки с 480 до 600 °С количество дефектов в зоне соединения уменьшается.

Механические свойства на растяжение определяли как для алюминиевой фольги в исходном состоянии, так и для сварных соединений (таблица). Установлено, что прочность исходного металла из сплава АД1 составляет  $\sigma_{в} = 68,0\text{ МПа}$ . Средняя прочность сварных образцов равна  $\sigma_{в} =$

**Прочность соединений на растяжение**

Образец	Режим сварки			Место разрушения	$\sigma$ , МПа	$\sigma_{ср}$ , МПа
	$T_{св}$ , °С	$P_{св}$ , МПа	$t_{св}$ , мин			
ОМ	-	-	-	-	67,9	68,0
				-	58,9	
				-	77,3	
Сварное соединение	600	40	20	Захваты	59,7	64,0
				-»-	56,1	
				Зона соединения	76,1	

64,0 МПа, т. е. коэффициент прочности соединений составляет 0,94 уровня исходного материала.

Точечную сварку проводили при комнатной температуре на воздухе. Перед сваркой контактные поверхности фольги зачищали механическим путем и обезжировали. Процесс вели на следующих режимах: напряжение  $U_{св} = 3$  В, сила тока  $I_{св} = 270...300$  А. Интенсивность нагрева при сварке определяли продолжительностью процесса, которая задавалась реле времени в диапазоне  $t_{св} = 0,2...5,0$  с. Визуальный контроль поверхности и испытание соединений на растяжение показали, что оптимальным является продолжительность цикла сварки  $t_{св} = 0,5...1,0$  с.

В образцах, полученных при продолжительности импульса менее 0,5 с, наблюдается частичное плавление соединяемых поверхностей под электродом с формированием сварных точек малого диаметра (рис. 3, а). Увеличение времени сварки до 1 с позволяет повысить качество соединения и

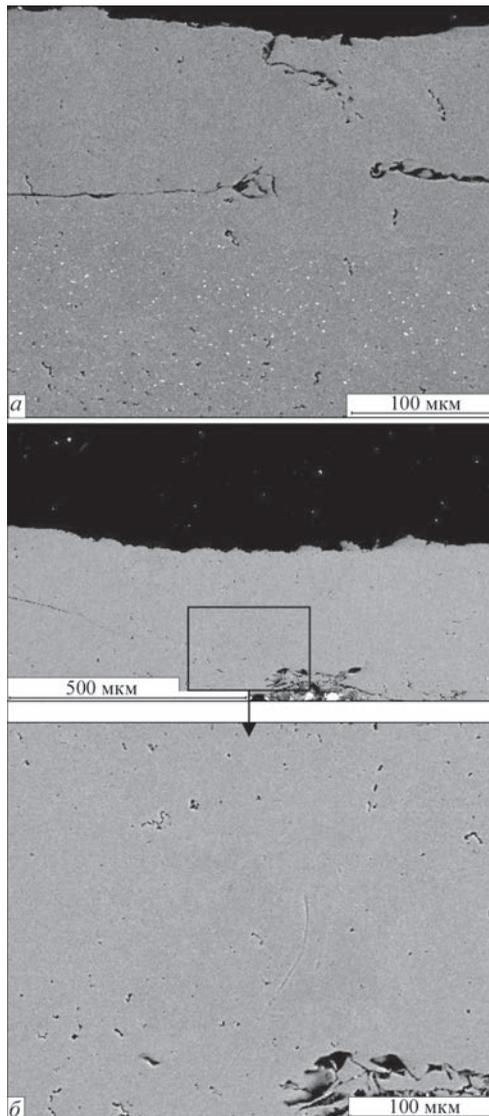


Рис. 3. Микроструктура соединений, полученных точечной сваркой при продолжительности процесса 0,2 (а) и 1 с (б)

способствует формированию плотного соединения под всей поверхностью электрода (рис. 3, б).

С учетом того, что процесс диффузионной сварки является более трудоемким, в дальнейшем для сварки элементов сотового заполнителя применяли точечную сварку.

Устойчивость сотового заполнителя к воздействию внешних нагрузок в соответствии с методиками, приведенными в работах [6, 7], определяли с помощью испытаний на сжатие. Установлено, что деформирование сотового заполнителя из сплава АД1 происходит при среднем значении усилия сжатия, равном 23,3 МПа. Анализ элементов сотового заполнителя после испытания на сжатие показал, что в процессе деформации отслоения стенок не происходит.

При изготовлении трехслойной панели необходимо соединить сотовый заполнитель с обшивками, обеспечив формирование тавровых соединений. Диффузионная сварка в вакууме наиболее подходит для этих целей, так как позволяет максимально точно контролировать все параметры процесса.

Одним из основных требований при диффузионной сварке является плоскопараллельность свариваемых поверхностей. Однако технология получения сотового заполнителя из профилированных полос не обеспечивает этого. Вследствие возникающих в ходе точечной сварки напряжений происходит коробление блока сотового заполнителя. Поэтому нами была разработана технология шлифовки его контактных поверхностей. С учетом того, что сотовый заполнитель изготавливается из алюминиевого сплава толщиной 0,15 мм, непосредственная механическая обработка последнего невозможна из-за его высокой пластичности. Для обеспечения устойчивости стенок ячеек необходимо обеспечить их жесткость за счет заполнения их другим материалом. При этом материал для заливки сот должен соответствовать следующим требованиям:

- иметь низкую температуру плавления;
- быть достаточно жестким и прочным;
- быть инертным по отношению к материалу сотового заполнителя — алюминию;
- хорошо обрабатываться методом шлифования;
- легко удаляться.

В качестве материала для заливки сотового заполнителя исследовалась возможность применения канифоли, серы, парафина.

При использовании серы ( $T_{пл} = 115$  °С) необходимо учитывать, что выше 160 °С она имеет повышенную вязкость, что делает ее использование нетехнологичным. Наибольшую вязкость расплав серы приобретает при температуре 190 °С, дальнейшее повышение температуры сопровождается

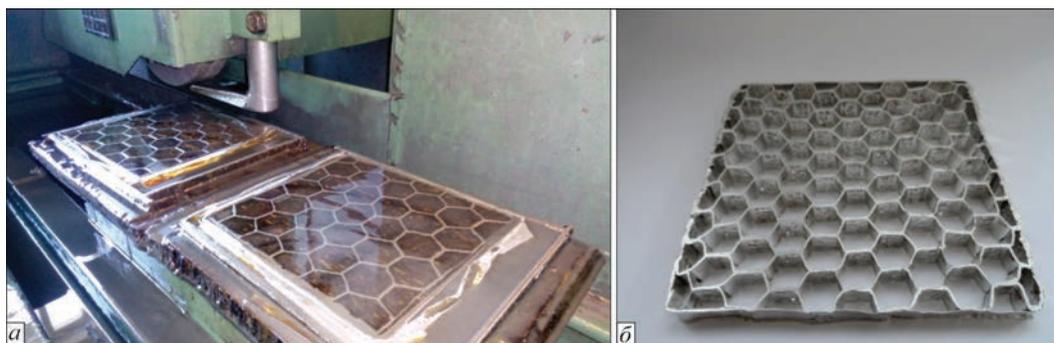


Рис. 4. Вид сотового заполнителя во время шлифования (а) и после удаления канифоли (б)

ся уменьшением вязкости и выше 300 °С жидкотекучесть расплавленной серы снова повышается. Поэтому заливку ячеек сот необходимо проводить при температуре 300...350 °С.

Парафин имеет температуру плавления  $T_{пл} = 45...65$  °С, но при затвердевании дает значительную усадку, поэтому заливку требуется проводить в несколько этапов.

Канифоль плавится при температуре  $T_{пл} = 100...130$  °С. В расплавленном состоянии имеет достаточно низкую вязкость, что положительно влияет на технологичность (заполняемость формы). Кроме того, усадка при затвердении канифоли минимальна.

Образцы сотового заполнителя заливали соответствующим веществом (канифоль, сера, парафин) в расплавленном виде, после чего оставляли для отверждения в течение 20...30 мин, далее проводили шлифование контактных поверхностей (рис. 4, а).

Как показали проведенные эксперименты, наилучшую обрабатываемость при шлифовании имеют образцы, залитые канифолью. При использовании парафина происходит его налипание на абразивный инструмент, что затрудняет процесс шлифования. При применении серы наблюдаются участки поверхности, где она отслоилась, что приводит к деформированию стенок заполнителя.

Технологическую операцию удаления материала, залитого в ячейки сотового заполнителя, проводили с помощью повторного нагрева образцов. Эксперименты показали, что остатки парафина легко удаляются из ячеек, если окончательное промывание осуществлять в кипящей воде. В образцах, залитых серой, после ее удаления на поверхности ячеек остается небольшой налет, который с трудом удаляется после промывки в бензоле. В случае применения канифоли ее остатки легко удаляются промывкой в органических растворителях: спирте, бензоле, скипидаре.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что наиболее целесообразно для материала заливки ячеек сотового заполнителя применять канифоль. Она позволяет качественно провести

механическую обработку и последующую очистку всех граней сотовых ячеек (рис. 4, б).

Диффузионную сварку трехслойной сотовой панели размером 150×150 мм проводили в специализированном приспособлении, которое конструктивно состоит из нижнего, верхнего фланцев и ограничивающей втулки (рис. 5, а). Фланцы обеспечивают в процессе сварки прижатие по всей площади контакта обшивок к сотовому заполнителю. Назначение ограничивающей втулки заключается в том, чтобы выровнять температурное поле и обеспечить заданный уровень общей пластической деформации на изделии [8]. Режим сварки соответствовал следующим параметрам:  $T_{св} = 540$  °С,  $P_{св} = 5$  МПа,  $t_{св} = 20$  мин. Внешний вид трехслойной сотовой панели, полученной по разработанной методике, приведен на рис. 5, б.

Как показали результаты оптической микроскопии в зоне соединений стенка сотового заполнителя — обшивка дефекты в виде трещин и пор отсутствуют (рис. 6, а).

Для оценки прочности соединения элементов трехслойной панели проводили их испытание на сжатие. Для этого из трехслойной панели вырезали отдельные элементы, соответствующие по размерам единичной шестигранной ячейке.

Размер ячеек сотового заполнителя составлял 10×10 мм, высота 11 мм, толщины обшивок из сплава алюминия АМг2 — 1 мм, а толщина сотового заполнителя из сплава АД1 — 0,15 мм. Общая площадь поверхности образцов составляла около 670 мм<sup>2</sup>, площадь поперечного сечения сотового заполнителя 12 мм<sup>2</sup>.

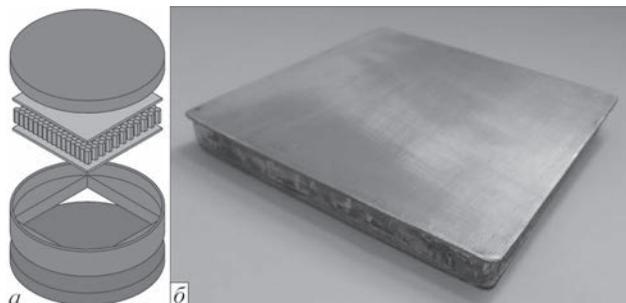


Рис. 5. Схематическое изображение оснастки с элементами панели (а) и вид трехслойной сотовой панели после сварки (б)

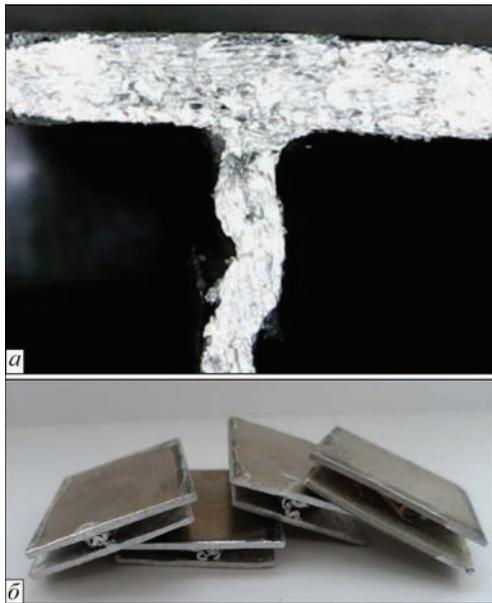


Рис. 6. Макрошлиф таврового соединения стенки сотового заполнителя с обшивкой панели (а) и вид образцов, вырезанных из трехслойной панели после их испытания на сжатие (б)

Как видно из рис. 6, б, при сжатии со степенью деформации порядка 50 % происходит деформация вертикальных стенок заполнителя без разрушения участков сварки сотового заполнителя с обшивками панели. Среднее значение усилия сжатия, при котором происходит деформирование сотового заполнителя в трехслойных панелях, составляет 58,12 МПа.

Таким образом, проведенные исследования показали принципиальную возможность изготовления сварных трехслойных панелей из алюминиевых сплавов. Разработанная технология шлифовки сотового заполнителя позволила обеспечить формирование соединения по всем контактным поверхностям трехслойной панели. Анализ результатов механических испытаний показал, что панели с сотовым заполнителем в виде шестигранных ячеек выдерживают сжимающее нагружение со степенью деформации порядка 50 % без разрушения тавровых сварных соединений.

## МОЖЛИВОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗВАРНИХ ТРЬОХСЛОЙНИХ СОТОВИХ ПАНЕЛЕЙ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

Л. В. ПЕТРУШИНЕЦЬ, Ю. В. ФАЛЬЧЕНКО, В. Є. ФЕДОРЧУК, В. С. ШИНКАРЕНКО

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

У літако-, суднобудуванні, будівництві та інших галузях промисловості широко застосовуються тришарові стільникові панелі, які конструктивно складаються із стільникового заповнювача і двох обшивок. При відносно невеликій масі ці конструкції мають високі характеристики міцності, звуко- і теплоізоляційні властивості. Основною проблемою при виготовленні тришарової конструкції є приварка верхньої і нижньої обшивки до торцевих поверхонь стільникового заповнювача. В роботі представлені результати з розробки технології виготовлення тришарових стільникових панелей з алюмінієвих сплавів розміром 150×150 мм. Стільниковий заповнювач з алюмінієвого сплаву АД1 товщиною 0,150 мм був отриманий шляхом з'єднання гофрованих смуг в блоки за допомогою точкового зварювання. Плоскопаралельність торцевих поверхонь стільникового заповнювача отримували шліфуванням. При цьому жорсткість конструкції забезпечували за рахунок заповнення комірок каніфоллю. З'єднання заповнювача з обшивками зі сплаву АМг2 товщиною

### Список литературы

1. Bitzer T. (1997) *Honeycomb Technology. Materials, Design, Manufacturing, Applications And Testing*. Springer-Science+Business Media Dordrecht.
2. Панин В.Ф., Гладков Ю.А. (1991) *Конструкции с наполнителем: Справочник*. Москва, Машиностроение.
3. Фальченко Ю. В., Петрушинец Л. В. (2018) Современные способы получения трехслойных панелей из алюминиевых сплавов (Обзор). *Автоматическая сварка*, **6**, 38–46.
4. Ustinov A. I., Falchenko Yu. V., Melnichenko T. V. et al. (2013) Diffusion welding of aluminium alloy strengthened by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles through an Al/Cu multilayer foil. *Journal of Materials Processing Technology*, **213**, 543–552.
5. Козаков Н. Ф. (1968) *Диффузионная сварка в вакууме*. Москва, Машиностроение.
6. Heimbs S., Schmeer S., Middendorf P., Maier M. (2007) Strain rate effects in phenolic composites and phenolic-impregnated honeycomb structures. *Composites Science and Technology*, **67**, 2827–2837.
7. Xu S., Beynon J. H., Ruan D., Lu G. (2012) Experimental study of the out-of-plane dynamic compression of hexagonal honeycombs. *Composite Structures*, **94**, 2326–2336.
8. Фальченко Ю. В., Устинов А. И., Петрушинец Л. В. та ін. (2017) *Пристрій для дифузійного зварювання тришарових стільникових панелей*. Україна, Пат. 113424. В23К 20/00, В23К 20/14.

### References

1. Bitzer, T. (1997) *Honeycomb technology: Materials, design, manufacturing, applications and testing*. Springer-Science+Business Media Dordrecht.
2. Panin, V.F., Gladkov, Yu.A. (1991) *Structures with filler: Refer. book*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
3. Falchenko, Yu.V., Petrushinets, L.V. (2018) Modern methods of manufacturing three-layer panels of aluminium alloys (Review). *The Paton Welding J.*, **6**, 38–46.
4. Ustinov, A.I., Falchenko, Yu.V., Melnichenko, T.V. et al. (2013) Diffusion welding of aluminium alloy strengthened by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles through an Al/Cu multilayer foil. *J. Materials Proc. Technology*, **213**, 543–552.
5. Kozakov, N.F. (1968) *Vacuum diffusion welding*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
6. Heimbs, S., Schmeer, S., Middendorf, P., Maier, M. (2007) Strain rate effects in phenolic composites and phenolic-impregnated honeycomb structures. *Composites Sci. and Technology*, **67**, 2827–2837.
7. Xu, S., Beynon, J.H., Ruan, D., Lu, G. (2012) Experimental study of the out-of-plane dynamic compression of hexagonal honeycombs. *Composite Structures*, **94**, 2326–2336.
8. Falchenko, Yu.V., Ustinov, A.I., Petrushinets, L.V. et al. (2017) *Device for diffusion welding of three-layer honeycomb panels*. Pat. 113424, Ukraine, Int. Cl. B23K 20/00, B23K 20/14.

1,0 мм виконували способом дифузійного зварювання у вакуумі. Процес проводили в пристосуванні, яке складається з нижнього, верхнього фланців і втулки. Фланці забезпечували притиснення обшивок до торцевих поверхонь стільникового заповнювача по всій площі контакту, а втулка дозволяла вирівняти температурне поле у виробі і контролювати величину його деформації в процесі зварювання. Бібліогр. 8, табл. 1, рис. 6.

*Ключові слова:* тришарова стільникова панель, тонколистові алюмінієві сплави, точкове зварювання, дифузійне зварювання у вакуумі

## POSSIBILITIES OF MANUFACTURING THREE-LAYER WELDED HONEYCOMB PANELS FROM ALUMINIUM ALLOYS

L.V. PETRUSHYNETS, Yu.V. FALCHENKO, V.E. FEDORCHUK, V.S. SHYNKARENKO

E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

Three-layer honeycomb panels are widely applied in aircraft construction, ship-building, construction and others industries. In terms of design they consist of honeycomb core and two skins. At relatively small weight, these structures are characterized by high strength values, sound- and heat-insulating properties. The main problem in manufacturing a three-layer structure is welding the upper and lower skins to end faces of the honeycomb core. The work presents the results of development of the technology of manufacturing three-layer honeycomb panels of 150×150 mm size from aluminium alloys. The honeycomb core from AD1 aluminium alloy 0.150 mm thick was produced by joining the corrugated strips into blocks by spot welding. Flatness of end faces of the honeycomb core was achieved by grinding. The structure rigidity was ensured by filling the cells with colophony. Joining of the core to the skins from AMg2 alloy 1.0 mm thick was performed by diffusion welding in vacuum. The process was conducted in a fixture consisting of the lower and upper flanges and bushing. The flanges provided skin pressing to the honeycomb core end faces over the entire contact area, and the bushing allowed homogenizing the temperature in the item and controlling the extent of its deformation during welding. 8 Ref., 1 Tabl., 6 Fig.

*Keywords:* three-layer honeycomb panel, sheet aluminium alloys, spot welding, diffusion welding in vacuum

Поступила в редакцію 04.06.2018



**16 - 18 October 2018**

Fair and Exhibition Centre  
**expo**silesia  
[www.exposilesia.pl](http://www.exposilesia.pl)

**60<sup>th</sup>**  
International  
Welding Conference  
Organizer:  
Institute of Welding

**ExpoWELDING**

**IWS**

**International Welding Fair**

ul. Braci Mieroszewskich 124 | 41-219 Sosnowiec | [expowelding@exposilesia.pl](mailto:expowelding@exposilesia.pl)

Международная Ассоциация «Сварка» (г. Киев) организует участие украинских компаний на коллективном стенде в международной сварочной выставке «ExpoWELDING 2018», г. Сосновец, Польша, 16-18 ноября 2018 г. Выставка проводится один раз в два года и является крупнейшей сварочной выставкой в Восточной Европе. По вопросам участия в выставке «ExpoWELDING 2018» на коллективном стенде просьба обращаться: тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-81-45, E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua). Статья, посвященная предыдущей выставке «ExpoWELDING 2016» и участию в ней украинских компаний на коллективном стенде, была опубликована в журнале «Автоматическая сварка» № 12, 2016, стр. 63-67 и находится в открытом доступе по ссылке: <http://patonpublishinghouse.com/as/pdf/2016/as201612part.pdf>.