

Estructuras sándwich de panel de abejas Honeycomb Sandwich structures (agosto 2017)

Figueredo W. Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales - ABAE

Abstract—Honeycomb sándwich structures are composite structures, hexagonal geometric form joined together by means of and adhesive, their dimensions will be determined by the design requirements and the standards dimensions of manufacture. The honeycomb structures have as main feature a low density and high stiffness compared to pure and / or allowed materials. Sandwich structures are composed of two layers and a panel core of bees joined together by an adhesive. This configuration allows to increase the mechanical properties of the composite material or structure; usually the core and the outer layers are different materials. These structures have great applications in the field of the construction of trains, the automotive sector, aerospace and the fabrication of space structures. This paper will describe the structure of bees panels, their characteristics, physical, thermal, electrical and mechanical properties to be considered in structural analysis. Applications in the manufacture of satellites and manned ships. The Graphene structures and the application of 3D printing in the manufacture of core structures of bees panels and their applications in the space field.

Resumen -Las estructuras de panel de abejas o honey-comb, son estructuras compuestas, de forma geométrica hexagonal unidas entre sí por medio de un adhesivo, sus dimensiones estarán determinadas por los requerimientos de diseño y dimensiones estándares de fabricación. Las estructuras de panel de abejas tienen como característica principal una baja densidad y una elevada rigidez en comparación con los materiales puros y/o aleados. Las estructuras tipo sándwich están compuestas por dos capas exteriores y un núcleo de panel de abejas unidas entre sí por un adhesivo. Esta configuración permite aumentar las propiedades mecánicas del material compuesto y/o estructura; por lo general el núcleo y las capas exteriores son de materiales diferentes. Estas estructuras tienen grandes aplicaciones en el ámbito de construcción de trenes, sector automotriz, aeroespacial y en la fabricación de estructuras espaciales. En el presente documento se describirá la estructura de los paneles de abejas, sus características y propiedades físicas, térmicas, eléctricas y mecánicas a considerar en el análisis estructural. Aplicaciones en la fabricación de satélites y naves tripuladas. Estructuras de Grafeno y las aplicaciones de la impresión 3D en la fabricación de estructuras de núcleo de panel de abejas y sus aplicaciones en el área espacial.

Terms — 3D printer, adhesive, Graphene, honeycomb, hardness, insert, nanotube, panel, sandwich, stiffness.

Terminos — adhesivo, dureza, Grafeno, honeycomb, inserto, impresión 3D, panel, nanotubo, rigidez, sándwich.

I. INTRODUCTION

Las estructuras de panel de abejas son materiales compuestos formados por un núcleo y dos cubiertas exteriores unidas entre sí por medio de un material adhesivo o pegamento, por lo general el material del núcleo y cubiertas exteriores son diferentes, lo cual permite mejorar las propiedades mecánicas de la estructura de panel de abejas. Tienen como característica principal una baja densidad relativa.

ASTM[3] define una construcción estructural de panel de abejas como, una construcción laminar compuesta o combinada por materiales compuestos ensamblados o fijados en relación a uno con otro de modo que se puedan utilizar las propiedades de cada uno y de esta manera maximizar las propiedades estructurales de todo el ensamblaje. Las capas exteriores poseen un elevado módulo de Young, transfiriendo el momento flector, las capas actúan como membranas de pequeño espesor. Las fuerzas de cizallamiento son transferidas por el núcleo. Adicionalmente el núcleo estabiliza las capas exteriores previniendo el pandeo. La elevada rigidez del núcleo, incrementa el apoyo a las caras exteriores, como resultado incrementa el esfuerzo al pandeo. La unión de las caras exteriores y el núcleo supone un aumento en la resistencia a la tracción y a la resistencia a la cizalladura del núcleo, lo cual se verifica en la fase de diseño. Sus características principales son: una elevada rigidez a la flexión combinada con una masa reducida, superficies lisas, buen comportamiento a la fatiga, buen aislamiento térmico, buena capacidad de amortiguamiento y una elevada absorción de energía en caso de impacto. Sus desventajas son: introducción de carga local, uniones complejas con estructuras metálicas, peligro de absorción de agua in caso de panel de abejas y celdas de panel abierto y materiales de espuma, insuficiente comportamiento al fuego de ciertos materiales, altos costos de manufactura relativos a ciertos materiales.

Desde el punto de vista natural las estructuras tipo sándwich más comunes son los huesos, el bambú y las estructuras celulares.

Para efecto de esta investigación se hará referencia en particular a las estructuras con núcleo tipo hexagonal, sus designaciones está basada en las normas DIN[4][5] Ver **Error! Reference source not found.**

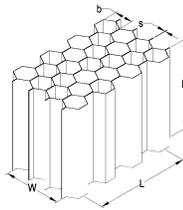


Figura 1 Núcleo de sección transversal hexagonal

Como se indicó anteriormente las estructuras tipo sándwich, Figura 2 están compuestas por una cara o cubierta superior, una cara o cubierta inferior y un núcleo.

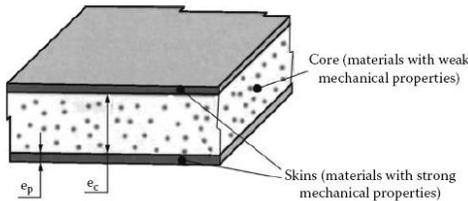


Figura 2 Sección típica de una estructura de panel de abejas [1]

Luego de ser sometida a esfuerzos la estructura tipo sándwich internamente experimenta cambios los cuales son debidos a los esfuerzos cortantes de acuerdo a las propiedades de los materiales que lo componen en Figura 3 se muestran la dirección de los esfuerzos normales y cortantes, en la Tabla 1 se hace referencia a las propiedades de algunos paneles de abejas.

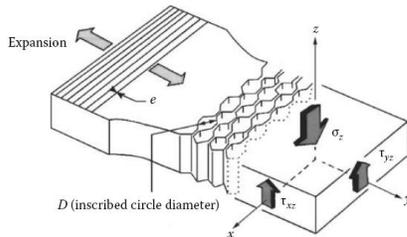


Figura 3 Propiedades mecánicas de algunas estructuras de panel de abejas [1]

Tabla 1 Propiedades mecánicas de algunas estructuras de panel de abejas [1]

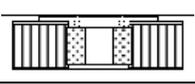
Descripción:	Hojas pegadas de poliamida: Nomex@a	Aleación ligera AA5154A (5154A)	Aleación ligera A92024 (2024)
Diámetro del círculo inscrito, D (mm)	5	4	6
espesor, e (mm)	0.08	0.05	0.04
Densidad (kg/m3)	64	80	46
Esfuerzo cortante, txz ruptura (MPa)	2.5	3.2	1.5
Modulo cortante, Gxz (MPa) . 1.5 Gmat (e/D)	70	520	280
Esfuerzo cortante, tyz ruptura (MPa)	1.1	2	0.9
Modulo cortante, Gyz (MPa)	35	250	140
Esfuerzo normal de compresión, sz ruptura(MPa)	3.8	4.4	2

II. MÉTODOS DE UNIÓN EN LAS ESTRUCTURAS SÁNDWICH FABRICADAS CON NÚCLEOS DE PANEL DE ABEJAS.

Generalmente las uniones en los materiales puros o aleados que tienen un volumen específico, se pueden utilizar medios de unión conocidos, tales con unión apernadas, remachado, soldadura, entre otros. Las estructuras tipo sándwich difieren ya que por tener un núcleo tipo hexagonal las uniones apernadas, remachadas y soldadas no garantizan un método de unión confiable utilizando métodos comunes. En las estructuras sándwich se utilizan elementos de unión del tipo insertos, las cuales por general utilizan un pegamento para ser unidas al núcleo, existen tres formas comunes los cuales son: pegados durante la fabricación del sándwich, encapsulados o mecánicamente presados o atornillados. En la Tabla 2 se detallan los insertos más comúnmente utilizados, también se puede consultar los fabricantes y las normas ASTM y DIN para una información más detallada y sus aplicaciones.

Tabla 2 Características de los insertos de acuerdo al tipo de unión

Tipo	Principio de unión	Forma	Diámetro (mm)	Material
1	Pegado durante la fabricación del sándwich		17-30	Al
2	Encapsulado		11-22	Al St Ti
3			11-12	Al St Ti
4			11-14	Al
5			6-14	St Ti
6			3-6	St Ti
7			19-70	Al
8			19-25	Inserto de Al y tuerca de Ti

Tipo	Principio de unión	Forma	Diámetro (mm)	Material
9			14-22	Al St Ti
10			14-22	Al St Ti
9	Mecánicamente prensado o atornillado		14-22	Al St Ti
10			14-22	Al St Ti

son $a_1 = (\sqrt{3}/2, -1/2)a$, $a_2 = (0, 1)a$, y la sub red están conectadas por $b_1 = (1/2\sqrt{3}/2, 1/2)a$, $b_2 = (1/2\sqrt{3}/2, -1/2)a$, $b_3 = (-1/\sqrt{3}, 0)a$

El comportamiento mecánico del grafeno depende del tamaño de la muestra. Eléctricamente el grafeno es altamente conductor y capaz de permitir una densidad de corriente muy superior a cualquier metal. Su carácter covalente permite que la capa única sea atómicamente suave y continua, características inalcanzables en los metales que se rompen en las islas cuando se reduce el espesor.

El grafeno está disponible en una amplia gama de acuerdo a su calidad, dependiendo de si producen en monocristales desde varios micrómetros hasta una mayor escala lo cual define su costo. El bajo coste de las formas del grafeno se encuentra como aditivo, para mejorar la conductividad eléctrica y aumentar la flexibilidad y la resistencia de materiales compuestos. El grafeno es complemento de la fibra de carbono y nanotubos de carbono como aditivo, donde existe un gran mercado. El proceso para la obtención del grafeno se realiza mediante el método de deposición química en fase de vapor (CVD).

III. GRAFENO

Recientemente se han realizado avances y estudios sobre nuevos materiales tales como los nanotubos de carbono y el grafeno este último descubierto en 2004, generando mayor aplicación de las estructuras hexagonales o tipo panel de abejas; estas estructuras son de bajo espesor y presentan buenas propiedades mecánicas, pero por su reducido espesor en la actualidad poseen muy pocas aplicaciones en el área mecánica, su aplicación está reservada al campo de la optoelectrónica, micro-electromecánica y electrónica; el grafeno, es el nombre dado a una rejilla hexagonal de una sola capa de átomos de carbono, también se conoce como una red bidimensional extendida del anillo de benceno, desprovista de átomos de hidrogeno[6]. Debido a que la estructura microscópica de los nanotubos de carbonos es bastante parecida a la del grafeno, los tubos son usualmente etiquetados en términos del vector de la red de grafeno[7]. El Modulo de Young del grafeno es de aproximadamente 1TPa

IV. IMPRESIÓN 3D

La impresión 3D, desde sus inicios ha generado gran aceptación en el modelado y fabricación de piezas utilizando resinas y polvos que facilitan el proceso de secado, así como en la impresión en papel el proceso de la impresión en 3D es bastante similar realizando el proceso por extrusión o deposición de capas de resina, inicialmente el acabado superficial de las piezas era demasiado rugoso, lo cual se ha reducido en la actualidad dependiendo de las tolerancias y acabado final. La impresión 3D se ha expandido a tal nivel que es posible imprimir en 3D con polvos metálicos también conocido como fabricación de aditivos metálicos (Metal AM), lo cual permite utilizar procedimientos de manufactura de control numérico computarizado (CNC), para mejorar la calidad en la manufactura de piezas y componentes impresos en 3D. Para la impresión 3D se emplean tubos o filamentos de resinas de plástico u otros para su fusión y producción de los productos impresos. En el caso de la impresión de piezas metálicas se emplea polvo de metal el cual se funde y/o se combina con adhesivos o pegamentos para su producción final. En vista de esto se pueden integrar para la manufactura de estructuras tipo hexagonales de panel de abejas y otras formas utilizando, así como en la manufactura de metales materiales de mayor resistencia como los nanotubos de carbono, grafeno y otros materiales con la finalidad de reducir los costos de fabricación y facilitar los procesos de fabricación de piezas y componentes de mayor tamaño a las dimensiones actuales. Por ejemplo, existen impresoras utilizadas para la fabricación de prótesis dentales impresas en 3D EvoDent DLP 3D Printer (UnionTech), cuyas dimensiones de impresión máxima pueden alcanzar los 110x62x85 mm³ con resolución de 1920x1080, empleando una fuente de luz UV LED, espesores de capa de 50 micrómetros y 100 micrómetros, velocidad de impresión 40mm/h empleando archivos en formato STL.

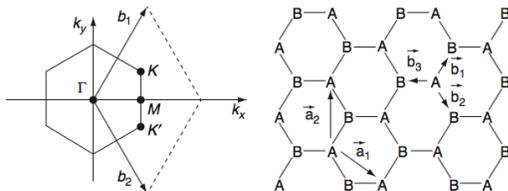


Figura 4 Estructura de hexagonal del grafeno[10]

La figura de la izquierda Es la zona hexagonal Brillouin de estructura de panel de abejas, es el resultado desde A y B en la red de inter penetración triangular. Si la distancia del elemento cercano es $a = 142 \text{ pm}$, la constante de la red es $3^{1/2}a$ y el entorno de la zona M (la mitad de los vectores reticulares recíprocos b_1 y b_2), es $2\pi/3a$. La coordenada del punto K son $(2\pi/3a, \pi/3\sqrt{3}a)$ así la distancia desde el origen al punto K es $4\pi/(3\sqrt{3}a)$. Desde la banda de conducción y valencia toca precisamente a K, tenemos que $k_F = |K|$ y la longitud de onda de Fermi $\lambda_F = 2\pi/k_F = 3\sqrt{3}a/2 = 369 \text{ pm}$. En la figura 4 derecha, para la red de panel de abejas, resultante desde A y B en la red de inter penetración triangular. Si la distancia del elemento cercano es $a = 142 \text{ pm}$, la constante de la red es $3^{1/2}a = 246 \text{ pm}$. Las bases de los vectores de la red triangular

Para la impresión 3D en plástico se utilizan filamentos, y los materiales[8][9] más comunes son: Policarbonato (PC) [265°C +], Mezcla de poliamida alifática (Nylon) [240-250°C], Butadieno estireno (ABS) [215-250°C], Formula de ABS Modificada (BLENDLAY) [215-240°C], Poli estireno de alto impacto (HIPS) [220-230°C], tereftalato de polietileno (PET) [212-224°C], ácido poli láctico (PLA) [160-220°C], alcohol de polivinilo (PVA) [180-200°C], policaprolactona (PCL) [120-150°C], En la Figura 5 se muestra un extrusor para la producción de piezas en plástico. La Figura 6 se muestra una impresión 3D de una transmisión automática. Como se puede notar la impresión 3D permite mayor libertad para la fabricación de piezas utilizando un reducido tiempo de fabricación, así como la reducción de herramientas de corte y otros equipos como los utilizados en el proceso de manufactura con arranque de virutas.



Figura 5 Extrusor de una impresora 3D



Figura 6 Impresión de un modelo de transmisión automática[9]

En el proceso de impresión de polvo metálico la impresión se realiza bajo el mismo principio por capas delgadas y un láser para fundir el polvo metálico mediante el proceso denominado Tecnología de cama de fusión de polvo metálico proceso estandarizado por ASTM, tiene como ventaja principal fabricación de formas complejas difíciles o imposibles de fabricar mediante fundición u otros procesos de manufactura convencionales, consolidación de múltiples partes, reducción o eliminación de costos de herramientas, bajo peso, mayor velocidad en la iteración de diseños.

Estas características permiten aumentar el proceso de fabricación de partes y componentes utilizados en la industria.

Actualmente las empresas del área aeroespacial se encuentran manufacturando partes y componentes para ser utilizados en aviones, así como parte de motores de cohetes ya que es posible controlar y monitorear el proceso de fabricación de las partes durante el diseño 3D, simulaciones y fabricación debido a que las impresoras emplean dispositivos de control numérico computarizado (CNC). Este avance permite su futura aplicación en la fabricación de estructuras, soportes y componente de satélites, dado que las piezas fabricadas poseen gran exactitud, bajo peso, resistencia requerida y mayor velocidad en la fabricación permitiendo reducir los lapsos de entrega.

REFERENCIAS

- [1] D. Gay, S.V Hoa and S.W. Tsai, "Sandwich Structures," in *COMPOSITE MATERIALS Design and Applications*, 1st ed. New York, NY, USA: CRC Press, 2015, 4ch, pp. 69–83.
- [2] J. Njuguna, "Sandwich composites," in *Lightweight Composite Structures in Transport Design, Manufacturing, Analysis and Performance*, 3th ed. Cambridge, MA, USA: Elsevier, 2016, 1ch, pp. 26–32.
- [3] Standard Terminology of Structural Sandwich Constructions, ASTM Standard C274 – 2007.
- [4] Honeycomb cores, of polyamide paper, phenolic resin coated; technical specification, DIN Standard 29970, 1998
- [5] Honeycomb cores, hexagonal expanded, in wrought aluminium alloy - corrosion protected, unperforated or perforated; technical specification, DIN Standard 29970, 1994
- [6] Wolf E. L, "Graphene", 1st ed. OXFORD University Press, New York, USA, 2014, pp-
- [7] Reich S, Thomsen, C and Maultzsch J., "Carbon Nanotubes: Basic Concepts and Physical properties" 1st ed. WILEY-VCH, Germany, 2004, pp-
- [8] Make: ultimate guide to 3D printing. Plastics for 3D printing Pp-36. 2014. www.makezine.com
- [9] Kaziunas Anna "Make: 3D Printing" 1st ed. Maker Media Sebastopol CA, Canada, 2014, pp-159
- [10] Semenov, G. (1984). Phys. Rev. Lett. 53, 2449^[1]_{sep}



WILLIAM GUSTAVO FIGUEREDO VILLEGAS

Ingeniero Mecánico, Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional, 2011. **Diplomado "Programa de Formación de Talentos para el Diseño Manufactura y Ensamblaje de Satélites de Órbita Baja"**, Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional, 2014. **Curso de Formación en Tecnología Satelital**, Shen Zhou Institute, Beijing, China, 2013. Participante en los proyectos Centro de Investigación y Desarrollo Espacial (CIDE) y Venezuelan Remote Sensing Satellite VRSS-2.

Actualmente se desempeña como **Investigador**, en el Centro de Investigación y Desarrollo Espacial, Unidad de Desarrollo e Innovación Tecnológica (UDIT), adscrito la Dirección de Investigación e Innovación Espacial (DIIE), Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales (ABAE).