

MATERIALES Y PROCESOS NO CONVENCIONALES PARA LA FABRICACIÓN DE TANQUERÍA ESFÉRICA Y CILÍNDRICA DE ALTA RESISTENCIA.

Luis Gerardo Saucedo Zárate

Instituto Mexicano del Espacio Exterior, A.C.
(INMEE, A. C.) - Propulsión.
Mariano Abasolo # 810, Col Centro, C.P. 78000
San Luis Potosí, S.L.P.
México.
+52 55 55607387
gsaucedoz@inmee.org

RESUMEN

“El día primero de octubre de 1960, a las afueras de la hacienda La Begoña, en el estado mexicano de Guanajuato; 13:25 Hrs., pese a las adversas condiciones del clima despegó el pesado cohete mexicano SCT2. Propulsado por alcohol etílico-agua y oxígeno líquido durante 44 segundos, el cohete alcanza un techo de más de 25000 metros y; finalmente, 180 segundos después del despegue, se estrella en la superficie de aquellas tierras de labranza [1].

Aquellos cohetes compartieron el mismo diseño básico de Porfirio Becerril Buitrón [2]; en particular:

Que los tanques de combustible y oxidante, así como la batería de presión, flusería y motor, fueron realizados en acero inoxidable 304, comercial. A decir de Porfirio, se habría decidido así, a fin de no depender de materiales de importación.

Las condiciones de la proveeduría de importación, para insumos y equipos han cambiado, pero solo para hacer más difícil aún el conseguirlos, por todas las restricciones que ahora existen, para las aplicaciones en cohetes.

A fin de continuar estos desarrollos de cohetes en México, el INMEE (modesta organización independiente) ha tomado el camino de utilizar los insumos nacionales, otra vez de aceros inoxidables, pero haciendo uso de las propiedades de transformación micro-estructural desde austenita a martensita, por deformación mecánica en nitrógeno líquido. Estos procesos incrementan las propiedades mecánicas en forma apreciable, en relación con las del material original. Por ahora las posibilidades de fabricación se reducen a esferas y cilindros con extremos hemisféricos.

INTRODUCCIÓN

La utilización de los aceros inoxidables austeníticos, criogénicamente procesados por deformación plástica concurrente, en la fabricación de tanquería para cohetes a combustible líquido, así como de carcasas para cohetes a combustible sólido [9] ha sido una práctica conocida y abundante literatura existe al respecto:

Convair Astronautics, [3], [4], [5], [6], [7], [8]; Arde Portland, Inc., [10], [11]; Martin Marietta

Corporation [12]; Lockheed Missiles [13].

Son las entidades que trabajaron este concepto a principios de los años 1960; y hasta en los 1970. La referencia más reciente es la de Air Liquide DTA en Francia (1999) [14].

METODOLOGÍA

A fin de cubrir la mayoría de las fuentes posibles de problemas que afectan la confiabilidad de la tanquería esférica y cilíndrica fabricada bajo éste proceso, se han invertido ya varios años y

recursos en la búsqueda de información técnica pertinente. Además, el proceso de manufactura se ha contemplado bajo las mejores prácticas de la industria, cuidando de no escalar la complejidad, en beneficio de los usuarios al considerar que los recursos son limitados.

El presente trabajo describe una técnica accesible a las organizaciones que no disponen de presupuestos importantes para el logro de la construcción de cohetes de sondeo. Tal es el caso de los grupos experimentales que trabajan en el ámbito de las universidades mexicanas. De la mayor importancia, es el hecho de que se utilizan materiales comerciales disponibles y ante todo, la ausencia de bienes de capital como prensas y moldes en el proceso de fabricación. La extensa naturaleza del tema nos obliga a referenciar en forma extensa, ya que son muchos los detalles omitidos en favor de la síntesis.

DESARROLLO

Adquisición del Material y Especificaciones

El aprovisionamiento de la materia prima es en forma de hojas de lámina, directamente del distribuidor, del anaquel. Los distribuidores de Thyssen-Krupp Mexinox, incluyen el grado AISI 301, además del 304L. En este caso es posible, en general, obtener sólo un certificado genérico del material. Se prefiere desde luego el 301, ya que éste material rinde la más alta resistencia de todos; sin embargo, las existencias son escasas y hay que estar a lo que haya disponible, para completar el suministro. La opción de medio-mayoreo existe, pero se está sujeto a la compra de 750 Kg como mínimo; lo que representa una inversión de unos US\$ 6,000. Aquí se puede tener la opción de seleccionar entre algunas coladas, por lo que se recomienda optar por las de más bajo carbono (igual o menor que 0.10% AISI establece igual o menor que 0.15%) [15 (*Pag 14 Fig 3.5*)].

La opción del AISI 304L, rinde un 25% menos que el AISI 301 en cuanto a resistencia mecánica [14 (*Pag 202*)], pero se puede conseguir en cualquier medida y calibre; inclusive en diferentes acabados. Es prudente hacer notar que para el caso de las presentaciones en placa y barra, de aceros inoxidable austeníticos, se ha encontrado que no se obtienen las mismas propiedades de

impacto y resistencia a bajas temperaturas, especialmente en la condición de soldadura [4 (*Fig 1 Pag 7*)]. Se sugiere un límite práctico para este proceso en un máximo de 0.25 pulgadas de espesor para la lámina.

Recordaremos aquí que en el misil Atlas se utilizó el acero AISI 302 (mejor resistencia a la corrosión que el 301), para los tanques, en forma de hojas de muy bajo espesor (0.002 pulgadas), endurecidas por laminación en frío, directo del molino. La soldadura por puntos a resistencia eléctrica; y así se logró una verdadera maravilla estructural.

Aparte de las normas AISI, se cuenta con una referencia extensa, en lo que se refiere al acero AISI 301: NASA-CR-123780 [15].

Acondicionamiento del Material

En el caso de que no se cuente con certificado de origen específico, es aconsejable invertir en el análisis químico; y al menos efectuar mediciones de dureza a fin de detectar zonas endurecidas por el trabajo de laminación en el molino. Con esa información, es posible decidir si se requiere de un proceso de normalizado completo, o sólo de un recocido. Éste material deberá ser sometido, seguidamente, a un decapado controlado [15 (*Pag 8, Secc 3-22*)] [15 (*Pag 89 Cap 11*)]. Nuevamente mediciones de dureza, y de ser posible, pruebas mecánicas; ya que en algunas instituciones, se cuenta con laboratorio de Pruebas Mecánicas. Del análisis químico, especialmente por el contenido de C, es posible predecir el nivel de propiedades mecánicas que exhibirá el producto final [15 (*Pag 14 Fig 3.5*)]. En el caso de que el recipiente a fabricar sea un acumulador de presión, es aconsejable verificar por ultrasonido, la presencia de inclusiones o de laminaciones en el material.

Corte del Material

El corte del material deberá hacerse con base en los procesos de hidrocorte por chorro a presión, o bien laser. Ésto permite que las propiedades del material preparado y acondicionado no sean alteradas. Los elementos necesarios se reducen a discos, sección rectangular para rolar un cuerpo cilíndrico y secciones para rolar cuerpos cónico-truncados, tal y como se deduce de la descripción que sigue.

Fabricación de Tanques Esféricos

La manufactura tradicional de tanques esféricos,

se basa en la fabricación de hemisferios moldeados a presión [16 (*Pag 10 fig 2 y 3*)].

Para la manufactura de nuestros recipientes esféricos, se hace uso del método de Branson : “Method of Forming Tanks of Spherical Configuration” (Fig 1), descrito en su patente US 2,503,191 (1947) [17] y que consiste en la manufactura (preforma) de un cuerpo cilíndrico con extremos cónico-truncados; soldados y que por la aplicación de suficiente presión interna, se logra la deformación plástica del material, incluyendo la soldadura (*), hasta configurar una esfera casi perfecta. Lo anterior, sin importar el grado de anisotropía de las propiedades mecánicas del material, o defectos dimensionales. Cabe aclarar que hasta ahora no se le ha dado el crédito a Branson, en ninguna publicación sobre el tema.

April 4, 1950 R. J. BRANSON 2,503,191
 METHOD OF FORMING TANKS OF SPHERICAL CONFIGURATION
 Filed June 30, 1947

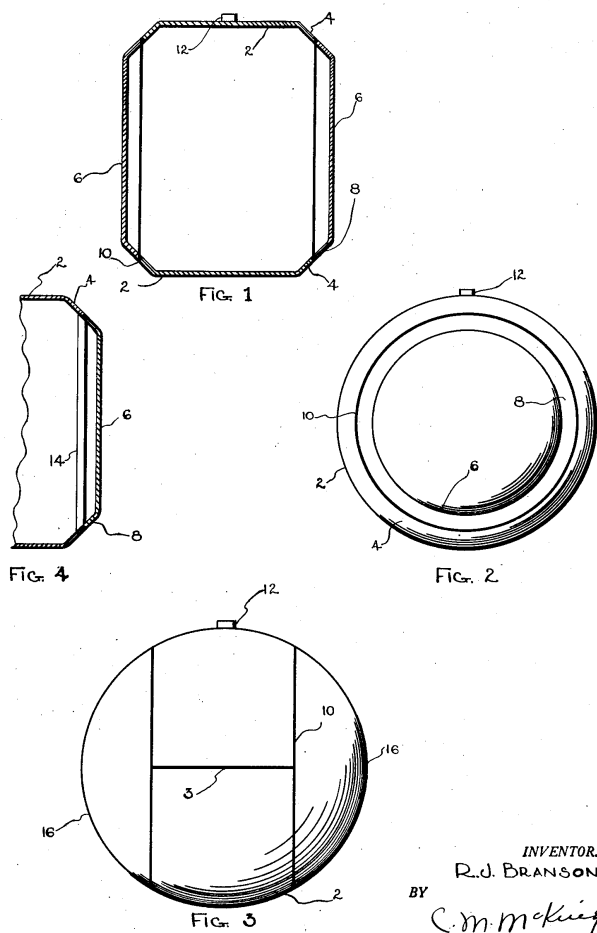


Fig 1) Formación de Tanques Esféricos

* Expansión esférica $L = H$, sin restricción.
 - Expansión cilíndrica $L > H$, con restricción de segmento cilíndrico.

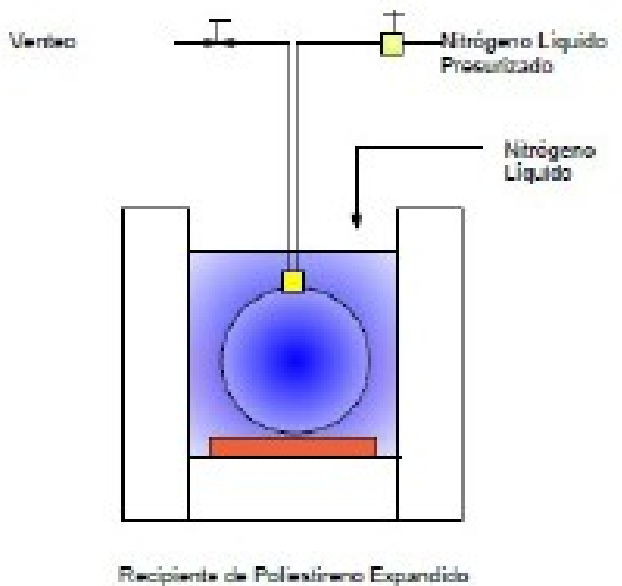
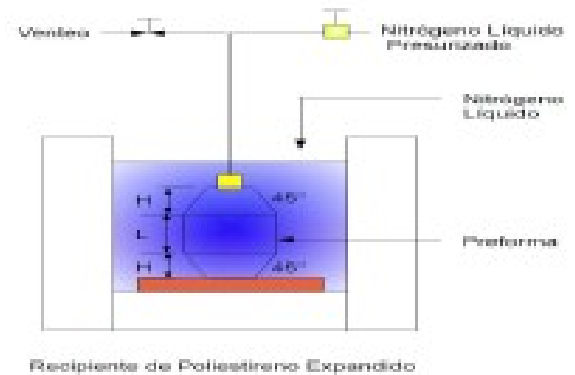


Fig 2) Esquema del Proceso de Crioformado

(*). Los cordones de soldadura (material de electrodo tipo 308L) deberán ser rectificadas a nivel, con el fin de que su sección transversal no sea mayor a la del material base, ya que éste material deberá ser deformado, idealmente, en la misma proporción que el material base. Éste rectificado permite la inspección ultrasónica del cordón.

Fabricación de Tanques Cilíndricos con Cabezas Hemisféricas

La Compañía Arde Portland (B.J. Allec) [18] desarrolló el proceso de fabricación de recipientes por expansión criogénica, pero con molde de restricción; y registró la patente US3197851

(Fig 3)

Este proceso logró resultados notables, sin embargo, está fuera del alcance de los equipos de trabajo en las universidades.

Adicionalmente se encontró que se puede mejorar la resistencia y tenacidad, al utilizar coladas de bajo silicio (Típicamente 0.10 %) y por un tratamiento de envejecimiento a 430° C durante 20 horas, del tanque terminado. Este último punto es aprovechable en nuestro proceso, ya que el tratamiento está disponible en el mercado.

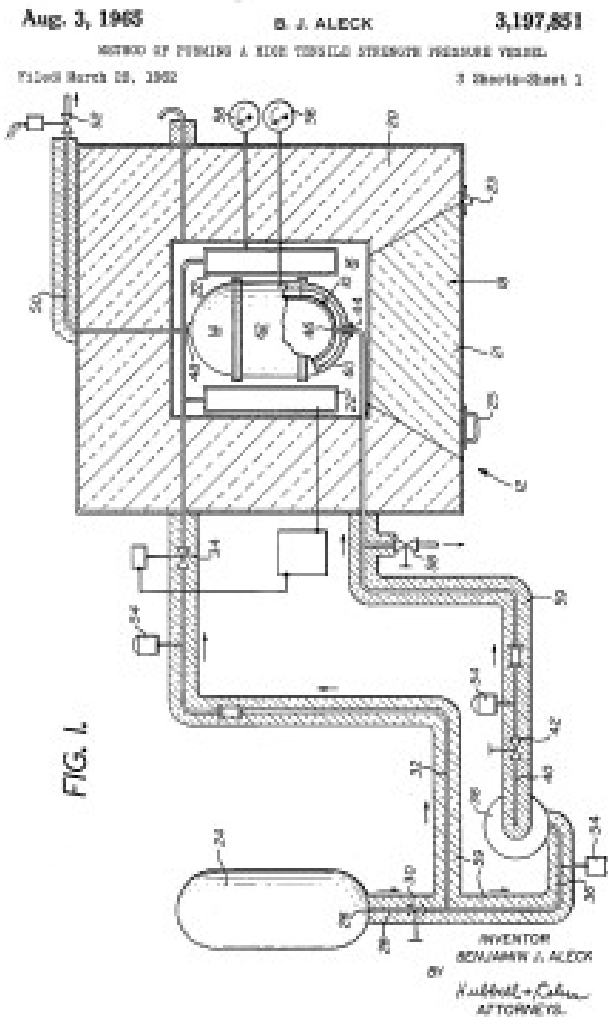


Fig 3 Fabricación de Tanques con Molde de Restricción

NASA (GCMSFC) emprendió un estudio para la fabricación de recipientes cilíndricos con extremos hemisféricos y restricción en la sección cilíndrica [16], (Fig 4). Es éste el método que se utiliza para la fabricación de nuestros tanques cilíndricos, habida cuenta de que $L > H$, donde L

es la longitud de la sección cilíndrica, H la longitud de la sección tronco cónica (Fig 2 y 4).

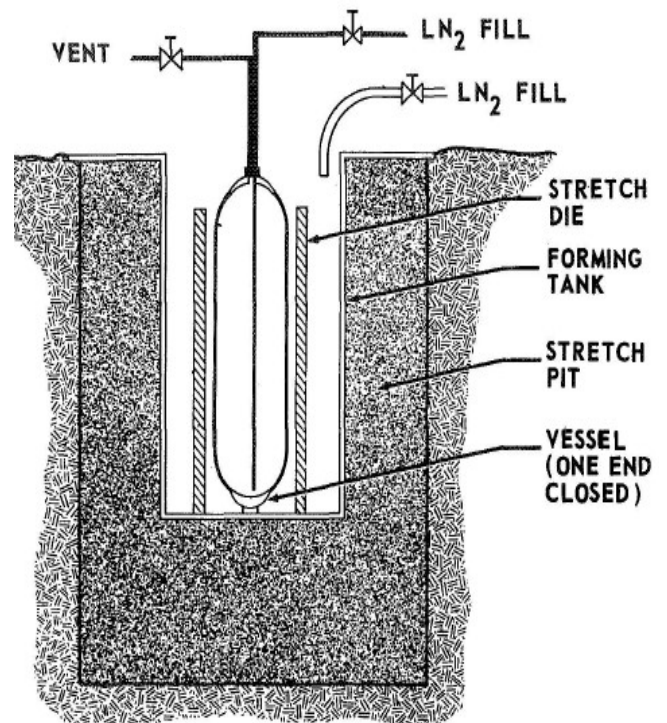


Fig 4 Fabricación con Restricción en la sección Cilíndrica

Además, el espesor de la sección cilíndrica deberá ser del doble, en relación con el espesor de las secciones tronco-cónicas (Fig 5) toda vez que aplica para tanquería de bajo espesor:

$$P \cdot D = 4 \sigma \cdot E \dots [1];$$

Para tanques esféricos

y

$$P \cdot D = 2 \sigma \cdot E \dots [2].$$

Para tanques cilíndricos

P = Presión (psi), D = Diámetro(pulgadas),
 σ = Esfuerzo de Diseño(psi), E = Espesor de la lámina (pulgadas).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Es posible fabricar tanques esféricos y cilíndricos con base en acero AISI 301 y 304 L, por expansión en nitrógeno líquido (-196°C), utilizando materiales comerciales debidamente acondicionados y probados. Los resultados dependen del material disponible. El límite de fluencia es de 140,000 psi para el AISI 301 y de 100,000 psi para el AISI 304L [14] como resultado del proceso. Actualmente se han fabricado los tanques para nuestro cohete PBB-2000 en AISI 304L. Como punto referencial, recordaremos que en la fabricación de la tanquería para el legendario cohete Aerobee 150 [20], se utilizó el acero 19-9DL, un inoxidable cuyo límite elástico es de 100.000 psi, tal como sale del molino de laminación. Aquí cabe la posibilidad de obtener los mismos resultados con un acero 304 L crioformado.

2) En el caso de que el material con que se cuenta es alto en C, se puede recurrir al tratamiento de envejecimiento a fin de incrementar las propiedades mecánicas después del formado.

3) En cuanto a la fabricación de accesorios como boquillas, puntos de anclaje, etc., se recurre al acero tipo AISI 304L en forma de barra o placa para maquinado, más que nada por la disponibilidad, pero debe tomarse en cuenta las diferentes propiedades mecánicas en relación con el material crioformado. Es conveniente soldar éstas partes a la preforma a fin de que la interfase entre las soldadura y el material de base del cuerpo y del accesorio sean concurrentemente deformados.

4) Es importante que en el proceso de decapado, no se utilice por ejemplo, el ácido clorhídrico o algún otro químico que induzca la penetración de hidrógeno a la red cristalina del material. Los procesos electrolíticos son también fuente de penetración del hidrógeno; condición de fragilización para el material [19].

5) Como un punto referencial, se concluye que si la tanquería del cohete SCT hubiese sido fabricada por éste método, el ahorro en el peso del cohete le daría el potencial de alcanzar los 100 Km de altura.

6) Éste método es particularmente útil para la fabricación de lanas para tanques de materiales

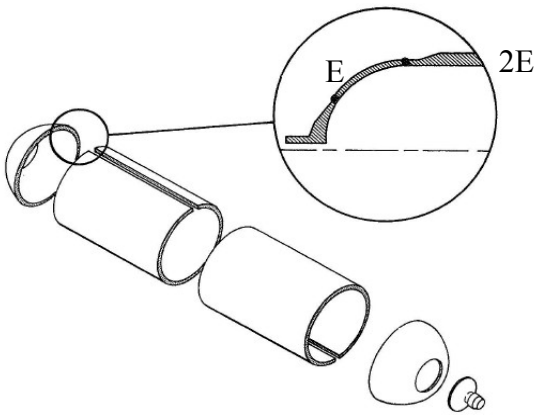


Fig 5) Preforma para expansión cilíndrica [16].
Sección hemisférica espesor E,
Sección cilíndrica espesor 2 E.
Aquí los hemisferios fueron rolados en caliente

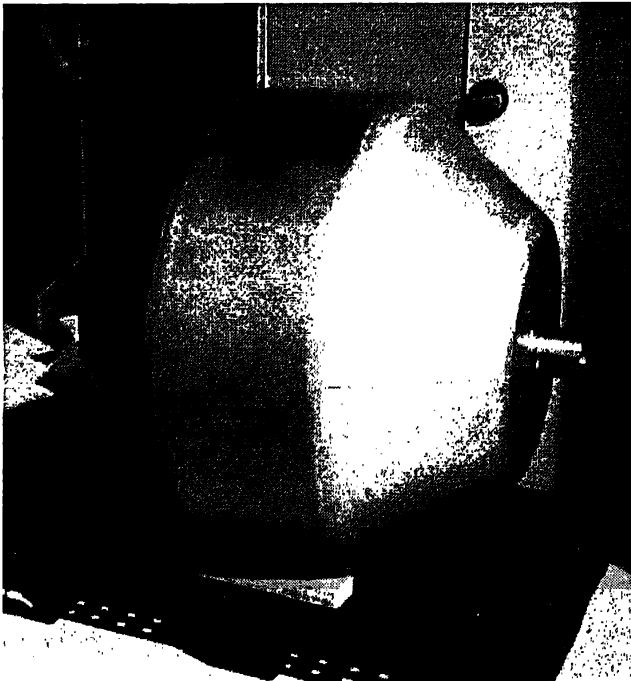


Fig 6) Tanque preforma antes de expansión.
Forma final esférica [14].

compuestos reforzados con Fibra de Carbono, Kevlar ó Fibra de Vidrio.

REFERENCIAS

- (1) BECERRIL BUITRÓN PORFIRIO (1960) “Construction and Launching of SCT-1 and SCT-2 Rockets” [NASA-TT-F-8430](#) .
- (2) FLORES DAMIÁN JESÚS (1968) “Diseño de un Cohete de Propelente Líquido para fines Meteorológicos”. TESIS ESIME IPN, México.
- (3) R. L. JONES (1960) “ Final Report on the Evaluation of Chemical Milling as a Possible Processing Technique in the Production of ½ -Hard and 3/4-Hard 301 Stainless Steel Bulkheads” [NASA CR-54951](#)
- (4) J. L. CHRISTIAN & J. F. WATSON (1960) “Effect of Sheet Thickness On The Mechanical properties of Type 301 EFH Stainless Steel at Cryogenic Temperatures” [NASA CR-54709](#).
- (5) CHARLES J. KROOP (1961) “Corrosión Resistance of Out-of-Chemistry 301 Full Hard Stainless Steel” [NASA CR-54862](#)
- (6) E. B. MIKUS & R. L. JONES (1961) “Influence of Creep Damage on the Toughness of Ti-5Al-2.5Sn and 301 Stainless Steel XFH at - 423° F” [NASA CR-54681](#).
- (7) L. D. GIRTON (1962) “Evaluation of electroformed Nickel to 301 Stainless Steel Resistance Spot Welds at 78° F and – 423° F” [NASA CR-54536](#).
- (8) C. J. GUNTER (1963) “Preliminary Investigation of Low Temperature Phase Transformations in AISI 301” [NASA CR-54699](#).
- (9) GEORGE CLAFFY (1963) “Fabrication of a 65.5-Inch-Diameter Simulated Rocket Case By Cryogenic Stretch-Forming.” [DTIC. AD407278](#).
- (10) J.J. CIOFFI (1965) “Fabrication of Large Diameter Spheres by the Ardeform Process”. [NASA CR-65003](#).
- (11) R. ALPER (1968) “Research and Development on Cryogenic Stretch-Formed Helium Bottles Saturn IV-B” [NASA CR-98041](#).
- (12) E. J. BECK & F. R. SCHWATZBERG (1971) “Fracture Behavior of Cryogenical Stretched 301 Stainless Steel Used in the M-509 Pressure Vessel” [NASA CR-134330](#).
- (13) T. R. ALCHORN. “Cryogenic Stretch Form Bottle test Program” [NASA CR-61294](#).
- (14) A. FAURE & L. GOURGEON (1999) “Cryoformed Stainless Steel Pressure Vessels for Space Applications” [ESA-SP-428](#)
- (15) R. F. MURACA & J. S. WITTICK (1972) “MATERIALS DATABOOK Stainless type 301” [NASA-CR-123780](#).
- (16) C. N. IRVINE (1969) “Cryoformed 301 Stainles Steel for Pressure Vessels” [NASA TM X-53978](#).
- (17) R. J. BRANSON (1947) “Method of Forming Tanks of Spherical Configuration” US Patent 2,503,191.
- (18) B. J. ALECK (1965) “Method of Forming a High Tensile Strength Pressure Vessel US Patent 3197851.
- (19) J.XU , X. Z. YUAN , X. K. SUN & B. M.WEI (1993) “Hydrogen Permeation and Diffusion in a 0.2C-13Cr Martensitic Stainless Steel.” Scripta METALURGIA et MATERIALIA ,Vol 29 ,pp 925 – 930.
- (20) L. W. FRASER (1948) “Aerobee high altitude Sounding Rocket – Design Construction and Use” [BumbleBee Series report No 95](#).