

Investigación en Soldadura en el MIT y Panorama de la Industria de la Soldadura en los Estados Unidos

Patricio F. Mendez

**Welding and Joining Group
Massachusetts Institute of Technology
Goierrri, 2 de Diciembre de 1999**

Introducción

La motivación de este resumen es presentar un sumario de la investigación en soldadura que se está llevando a cabo en el Massachusetts Institute of Technology, y un breve panorama de la industria de la soldadura en los Estados Unidos en las Jornadas Técnicas organizadas por la Fundación del Goierri “Tecnología de la soldadura y unión de materiales. Cualificaciones profesionales y formación continua”. Por razones de espacio no es posible presentar una descripción profunda de los varios temas relevantes, entonces he optado por presentar una descripción relativamente superficial de algunos tópicos de interés, documentando precisamente las referencias para que puedan ser seguidas por quien quiera profundizar. He dado énfasis al material y la literatura que pueden ser obtenidos en la World Wide Web (Internet), pues esa es información moderna, dinámica, y por sobre todo accesible inmediata y gratuitamente. Este resumen está organizado de la siguiente manera:

1. Breve reseña del Instituto Tecnológico de Massachusetts
2. Investigación en soldadura en MIT
 - 2.1 Actividades del Grupo de Soldadura y Uniones de MIT
3. Panorama de la Industria de la Soldadura en los Estados Unidos
 - 3.1 Tendencias en la industria de la soldadura en Estados Unidos
 - 3.2 Situación laboral
 - 3.3 Educación en soldadura
4. Sistema de Standards y Cualificaciones en los Estados Unidos
 - 4.1 Standards
 - 4.2 Cualificaciones
5. Conclusiones

1. Breve reseña del Instituto Tecnológico de Massachusetts¹

El MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts²) es considerada la mejor universidad de tecnología de los Estados Unidos de acuerdo a diversos rankings y estadísticas³. Situado en Cambridge, Massachusetts, MIT admitió sus primeros alumnos en 1865. Actualmente tiene aproximadamente 10.000 alumnos y 900 profesores, diez de los cuales son

poseedores del Premio Nobel. El presupuesto anual es de 1.200 millones de dólares, de los cuales 900 son usados en educación e investigación.

El MIT es un polo de fundación de nuevas compañías. Un estudio del Banco de Boston⁴ estableció que graduados de MIT fundaron 4.000 compañías, empleando a 1.1 millones de personas, y generando unos ingresos por ventas de \$232.000 millones por año. La Tabla 1 muestra las mayores compañías fundadas por graduados de MIT. La ley 96-517 (Bayh-Dole, 1980) asigna a las universidades los derechos de patentes obtenidos con fondos del gobierno. MIT asigna a los inventores un tercio de los derechos de patente, lo que resulta en un gran número de estudiantes y profesores que comienzan nuevas compañías. Para asistirlos, MIT estableció la Technology Licensing Office (Oficina de Licenciamiento de Tecnología). Durante los últimos cinco años esta oficina procuró mas de 100 patentes por año, de las cuales 50 a 75 fueron licenciadas a compañías.

Otra oficina importante en MIT es la de Relaciones Industriales (Industrial Liaison Program), que actúa como un puente entre MIT y las industrias y gobiernos. Esta oficina consiste de un grupo de especialistas en diversas industrias. Cada empresa o gobierno miembro paga una cuota anual, y un especialista es asignado para trabajar sobre un plan de acción determinado por las dos partes.

Company	City	State	Employment Thous.	Sales \$ Bns	Founder	MIT Class	Founded
Hewlett-Packard Co	Palo Alto	CA	102.3	31.5	William R. Hewlett	1936	1939
Rockwell International	Seal Beach	CA	82.7	13.0	Willard F. Rockwell	1908	1928
Raytheon Co	Lexington	MA	76.0	11.7	Vannevar Bush	1916	1922
McDonnell Douglas	St Louis	MO	63.2	14.3	James S. McDonnell Jr.	1925	1939
Digital Equipment Corp	Maynard	MA	61.1	7.6	Kenneth H. Olsen	1950	1957
Texas Instruments Inc	Dallas	TX	59.6	13.1	Cecil H. Green	1923	1930
Campbell Soup Co	Camden	NJ	43.8	7.3	John Dorrance	1895	1900
Intel Corp	Santa Clara	CA	40.0	16.2	Robert N. Noyce	1953	1968
Gillette Co	Boston	MA	32.8	6.8	William Emery Nickerson	1876	1901
Tyco International Ltd	Exeter	NH	32.0	5.1	Martin Weinstein	1961	1961
Iad Resources Intl	Cambridge	MA	30.0	0.5	David J. McGrath Jr.	1989	1956
AMP	Harrisburg	PA	28.7	4.0	Uncas A. Whitaker	1923	1941
National Semiconductor	Santa Clara	CA	20.3	2.6	Fred B. Bialik	1956	1967
Teledyne Inc	Los Angeles	CA	18.0	2.6	Henry T. Singleton	1940	1961
E G & G Inc	Wellesley	MA	15.0	1.4	Kenneth Gomeshausen	1931	1949
					Herbert F. Grier	1933	
					Harold E. "Doc" Edgerton	1927	
Thermo Electron Corp	Waltham	MA	14.4	2.2	George N. Hatsopoulos	1949	1956
Koch Industries Inc	Wichita	KS	12.6	19.0	Fred Koch	1922	1940
Over 10,000 Jobs	Companies:		17	732.4	Average Employees:	43,084	
1,000—10,000			89	257.9		2,898	
Others (Employment Known)			2,448	128.9		53	
Total			3,998	1,119.2		231.6	

Tabla 1: Compañías fundadas por graduados de MIT con mas de 10.000 empleados

2. Investigación en soldadura en MIT^{5,6}

El Laboratorio de Soldadura del MIT (MIT Welding and Joining Laboratory) fue fundado en la década del 30. Su director actual es Prof. Thomas W. Eagar, quien también es Jefe del Departamento de Materiales de MIT. Este laboratorio hoy emplea seis estudiantes de postgrado, dos investigadores de postdoctorado y un asistente técnico, con un presupuesto anual de medio millón de dólares. Los proyectos de investigación se concentran en el entendimiento de la química y física de métodos nuevos y tradicionales de soldadura y uniones, incluyendo MIG, TIG, spot welding, TLP bonding, brazing y

soldering. Otros tópicos de investigación incluyen la economía y estrategia de manufactura. La interacción y transferencia de tecnología entre nuestro laboratorio y la industria son muy fluídas, como se detalla mas abajo en la Sección 2.1.

Nuestra metodología básica de investigación puede ser resumida en los siguientes puntos⁷:

- Ser cuantitativo
- Mantener un análisis simple
- Ser buen observador
- Ser flexible en el método de análisis
- Ser crítico, cuestionar las hipótesis
- Desarrollar una visión integradora, nuevos paradigmas
- Combinar experimentos y análisis

La importancia de ser cuantitativo puede ser resumida en la frase de Lord Kelvin: “En la ciencia sólo se conoce algo cuando se lo puede medir y cuantificar”. Respecto de la simplicidad, otra cita, de Einstein es descriptiva: “Hay que hacer las cosas de la manera mas simple posible, pero no mas simple que eso”. Uno de las quejas de la industria es que el análisis muy complicado que las universidades hacen a menudo no tiene aplicación industrial directa⁸. Hay varios métodos de análisis: experimental (proceso real y modelado físico), modelado matemático (numérico y analítico). En el estudio de soldadura es erróneo utilizar uno solo, pues es un proceso muy complicado. Las hipótesis deben ser cuestionadas constantemente, pues científicamente, no hay manera de probar que algo es correcto, tan solo que algo es incorrecto. Las cosas que se aceptan como verdaderas son las cosas que fueron cuestionadas y no pudieron ser demostradas incorrectas. Los conceptos novedosos, que llevan al entendimiento y innovaciones son generalmente el producto de una visión integradora que une campos del conocimiento que inicialmente parecen desconectados. Experimentos y análisis deben ser combinados, pues experimentos sin análisis no tienen uso futuro (defecto típico en la industria), análisis sin experimentos tiende a ser erróneo (defecto típico en las universidades).

2.1 Actividades del Grupo de Soldadura y Uniones de MIT

Supresión de defectos en soldadura de alta productividad⁹

Esta investigación se concentra en el aumento de productividad en soldaduras de arco automáticas. Estudios experimentales y matemáticos permitieron determinar que la causa de generación de defectos es una combinación de la presión del arco eléctrico con una solidificación prematura. De esta manera es posible aumentar la velocidad de la soldadura significativamente (por lo menos en un 20%) con las consecuentes reducciones en costos. La aplicación industrial de estas conclusiones esta siendo estudiada por la empresa EG&G.

Aporte de material en MIG¹⁰

El estudio de la fundición del electrodo en MIG tiene por objeto mejorar la calidad de la transferencia de metal, y por lo tanto del cordón de soldadura. Para este efecto se creó

una maquina de MIG especializada en la que se pueden controlar con alto nivel de precisión la corriente y el voltaje (en una máquina normal sólo el voltaje y la velocidad del alambre de aporte pueden ser controlados). El desprendimiento de las gotas es iluminado por un láser, y observado con una cámara de alta velocidad. El mayor entendimiento del aporte de material en MIG está siendo aplicado en nuevas máquinas de soldar controladas por microprocesador, tales como la Lincoln Electric Power Wave 455¹¹.

Generación de humos de soldadura¹²

OSHA (el organismo a cargo de salud y seguridad en el trabajo en Estados Unidos) está determinando límites más estrictos en la producción de humos. Esto tiene una importancia económica muy grande pues puede restringir procesos de soldadura que son económicos sólo en las condiciones actuales. Resultados de nuestra investigación en MIG permitieron a la firma John Deere reducir la generación de humos en un 80% sin cambios significativos de equipamiento¹³.

Unión de metales y cerámicos¹⁴

Las uniones entre metales y cerámicos son importantes para máquinas que operan a alta temperatura, tales como celdas de combustible y elementos de turbinas de reacción. Es un problema muy difícil por la distinta naturaleza de los materiales, especialmente en expansión térmica. Nuestra investigación también involucra modelado numérico e innovaciones tales como materiales compuestos con propiedades térmicas y mecánicas anisotrópicas.

Otros desarrollos

Otros desarrollos en nuestro laboratorio incluyen la construcción de componentes sin molde ni maquinado utilizando electron beam¹⁵, la unión de metales utilizando semisólidos¹⁶, el desarrollo de una antorcha de MIG de plasma semitransferido, el estudio de escala de producción mas conveniente en la industria manufacturera, y el desarrollo de fluxes. Este último trabajo permitió a la firma Lincoln Electric reducir el tiempo de desarrollo de un nuevo flux de 20 años-hombre a 4 meses-hombre.

3. Panorama de la Industria de la Soldadura en los Estados Unidos

En los Estados Unidos hay unos 700.000 usuarios de soldadura, de los cuales 260.000 son empleados en la industria. Los gastos anuales en consumibles y equipos de soldadura totalizan \$6.000 millones por año^{17, p. 4, 35}. La Figura 1 ilustra la distribución de soldadores empleados en la industria.

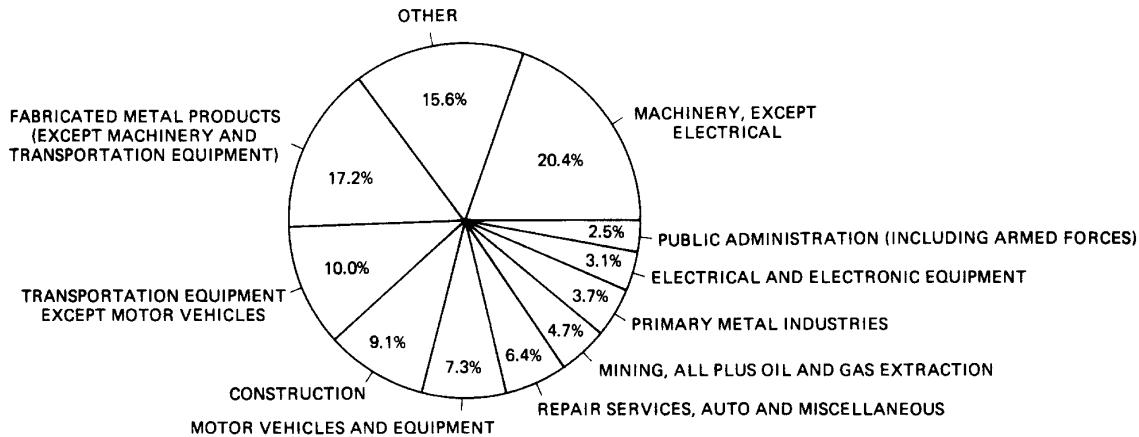


Figura 1: Distribución de los soldadores empleados en la industria¹⁷

3.1 Tendencias en la industria de la soldadura en Estados Unidos^{8, 17, p. 11}

Existe una necesidad de reducir los costos de manufactura porque 1) los costos de mano de obra están en aumento, 2) los costos de materiales de base y aporte están en aumento, y 3) se espera que los costos de energía y combustible también aumenten. Otra tendencias son: el uso de soldadura en materiales de alta resistencia y mayor aleación, la sustitución de piezas fundidas por piezas soldadas (especialmente en maquinaria), mayores exigencias de confiabilidad y calidad, y el uso creciente de procesos automáticos y robots.

Areas de crecimiento

Se espera que los siguientes procesos sean los de mayor crecimiento:

- MIG, especialmente con mezcla de gases (incluyendo CO₂), flux core y corriente pulsada (incluyendo polaridad reversa, con mayor control de la penetración). También uso de MIG en tandem. MIG es un sustituto directo de la soldadura eléctrica manual.
- TIG, debido a la necesidad de soldaduras de precisión, unión de nuevos metales y chapa fina.
- Plasma Arc: similar al TIG pero mas potente, se espera que su uso se difunda mas cuando se entienda mejor este proceso.
- Procesos con poca generación de humos, debido a los requisitos de salubridad cada vez mas estrictos.
- Nuevos procesos tales como laser welding, electron beam welding, y friction stir welding van a crecer pero sin ser de uso masivo. Se espera que el uso de láseres sea el de mayor aumento.

Existe una tendencia hacia las máquinas de soldar del tipo inversor computarizadas (especialmente tipo resonante). Esto se debe a que son mucho más portables y flexibles, pues su sistema electrónico permite que sean controladas por un microprocesador. La firma Lincoln Electric diseñó un standard de comunicación digital para equipos de soldadura (LECO).

El uso de soldadura se incrementará también en las siguientes áreas:

- soldadura de chapa (incluyendo tailor welded blanks para la industria automotriz)
- industria de la construcción
- reparación de infraestructura
- industria del transporte
- estructuras marinas
- industria aeroespacial (especialmente procesos novedosos como laser welding y friction stir welding)
- industria automotriz (especialmente soldadura de aluminio)
- automatización, especialmente en la industria naviera, camiones y trenes, plataformas off-shore

Areas de decrecimiento

Un proceso que esta claramente en declinación en los Estados Unidos es la soldadura eléctrica manual. Esto se debe en parte a la escasez de soldadores calificados, y también a la necesidad de incrementar la productividad. Los procesos semiautomáticos, tales como uso manual de MIG o flux core, que están siendo mas empleados corrientemente, eventualmente serán reemplazados por procesos completamente automáticos. La automatización no es aplicable a todos los procesos; los procesos que no son repetitivos no van a ser automatizados. Las máquinas de soldar del tipo motor-generador también tienden a ser cada vez menos populares.

3.2 Situación laboral

Actualmente hay una gran demanda insatisfecha de soldadores calificados e ingenieros en soldadura, y la situación tiende a empeorar. Una de las razones es que la soldadura no es considerada una ciencia, sino un proceso crudo y sucio, y por lo tanto no es una carrera atractiva para la gente joven. El creciente uso de automatización contribuye a aliviar la demanda de soldadores calificados, pero como contrapartida agrava la demanda insatisfecha de ingenieros en soldadura, que necesitan una mayor capacitación.

3.3 Educación en soldadura

Educación básica

Las inscripciones en programas en soldadura en escuelas técnicas y nivel terciario esta decreciendo¹⁸. La AWS (American Welding Society¹⁹) está tratando de mejorar la imagen del oficio y atraer nuevos estudiantes al campo de la soldadura. Se han preparado videos promocionales²⁰, posters, y un folleto con 12 experimentos relacionados a la soldadura para atraer el interés de los estudiantes de colegio secundario²¹. AWS tambien provee apoyo económico, pues cada año de estudio técnico cuesta aproximadamente \$2500. Este apoyo consiste en 163 becas de distrito (\$110.000 en total), 6 becas nacionales (\$2.500 a 3.000 cada una), una beca internacional, préstamos para estudiantes, mas otros premios y becas, por ejemplo para investigación de postgrado. Las empresas Lincoln Electric y Esab ofrecieron donar este año \$100.000 cada una, si una cantidad equivalente es donada por otros.

La educación básica se lleva a cabo en institutos educacionales independientes con subsidios del gobierno (por ejemplo el Santa Rosa Junior College²²), o dependientes de empresas (por ejemplo el Hobart Institute of Welding Technology²³ o el Lincoln Electric Welding Institute²⁴). Con un año de estudios y práctica de soldadura luego del colegio secundario, un soldador principiante tiene una paga de \$10 a \$18 por hora. Con dos años de estudio y práctica de soldadura durante el colegio secundario, y dos años mas después de la graduación, un soldador con calificaciones básicas tiene una paga de \$25 a \$30 por hora²⁵.

Un típico programa de educación básica, tal como el del Santa Rosa Junior College admite entre 24 a 30 estudiantes aptos luego de su graduación del colegio secundario. El programa básico dura un año, dividido en dos semestres. En el primer semestre los alumnos aprenden soldadura eléctrica manual, brazing, y corte y soldadura de oxiacetileno. En el segundo semestre los estudiantes aprenden a soldar en diferentes posiciones, soldadura de filete, MIG, TIG, y conceptos fundamentales de soldadura: matemática, física, lectura de planos y metalurgia. La totalidad de los graduados son empleados en la industria local.

De los nuevos graduados, unos 10 a 12 son patrocinados por su empleador para tomar un curso más profundo. Este curso dura cuatro años y comprende 8.000 horas de soldadura (en producción durante la jornada laboral), teoría de soldadura, y nociones de planificación, organización y administración. Los graduados obtienen una certificación estatal, y en la industria ocupan posiciones de planificación y organización, no de soldadores de producción. Este programa se caracteriza por una alta tasa de deserción, del orden de 50%.

Educación avanzada

Es impartida en universidades cuatro de años de duración, y tiene el objetivo de formar ingenieros y tecnólogos en soldadura, no soldadores de producción. Una sola universidad en los Estados Unidos es otorga el título oficial de Ingeniero en Soldadura: Ohio State University²⁶. Otras universidades que otorgan títulos en Tecnología en Soldadura son Utah State University²⁷, Ferris State University²⁸, y LeTourneau University²⁹.

El programa cubierto en Ohio State University es un programa de educación de Bachelor of Science tradicional de Estados Unidos, pero es especialmente extenso en el área de soldadura incluyendo:

- Teoría y práctica de soldadura
- Física y química de soldadura
- Experiencia en una industria
- Control de procesos
- Metalurgia de soldadura
- Modelado matemático (flujo de calor, tensiones, etc.)
- Ensayos no destructivos (ultrasonido, radiografía, etc.)
- CAD
- Robots

- Diferentes procesos de soldadura (láser, etc.)

Investigación en soldadura

Los proyectos de soldadura que no pueden ser resueltos con el uso de los manuales tradicionales^{17, 30, 31} o experiencia previa están fuera del alcance de los ingenieros en soldadura. En algunos casos los proveedores de equipamiento actúan como consultores gratis, sin embargo la disponibilidad de esta ayuda está decreciendo fuertemente debido a las consolidaciones de las industrias¹⁸. Cuando el problema es muy complicado o novedoso, los usuarios se remiten a universidades, tales como MIT (descripta en la Sección 2), laboratorios nacionales, como los de Oak Ridge³² o Idaho³³. Otras instituciones importantes son el Edison Welding Institute³⁴ en Ohio, y The Welding Institute³⁵ en Inglaterra.

4. Sistema de Standards y Cualificaciones en los Estados Unidos

4.1 Standards

Los diversos standards de soldadura fueron unificados en 1998 bajo la norma B2.1-98: Specification for Welding Procedure and Performance Qualification. Esta norma cualifica tanto procesos como personal. Fue motivada por la necesidad de reducir costos y demoras, pues en muchos casos un mismo proceso o soldador debían ser recertificados cuando caían bajo la jurisdicción de una norma diferente. El espíritu de esta norma es que la esencia de una soldadura de calidad es la compatibilidad mecánica del material de aporte y de base, y la capacidad de aportar material sin defectos.

Las características de esta norma son que es independiente de la aplicación final, incluye todas las formas de material de base (chapa, plancha, tubos, vigas), incluye todos los tipos de material (acero al carbono, acero de baja y alta aleación, aluminio, cobre, titanio, etc.), e incluye una amplia gama de procesos de soldadura (TIG, MIG, manual eléctrica, flux core, electron beam, laser beam, MIG de corriente pulsada, arco sumergido, etc.). Esta norma incluye provisiones para la calificación de nuevos procesos no considerados en su forma actual.

Influencia de los standards europeos³⁶

El comité TC44 de la ISO esta reescribiendo los standards internacionales de soldadura, y estos nuevos standards son virtualmente idénticos a los standards europeos (CEN). Esto puede obligar a los Estados Unidos a cumplir normas europeas para acceder al mercado, lo cual puede resultar en costos demasiado altos para los norteamericanos, con la consecuente disminución de su participación en el mercado internacional. Los Estados Unidos tienen voz y voto en TC44, pero tienen poca participación debido a su poco interés inicial. Actualmente están tratando de alentar a los miembros de la comunidad de soldadura para tener mayor influencia. La Tabla 2 incluye una lista completa de los países participantes del comité ISO/TC44. La Tabla 3 detalla los subcomités del TC44, donde se puede observar la preeminencia de participantes europeos.

	No. P-Members	No. O-Members
Argentina		4
Australia	2	7
Austria	5	
Belgium	8	
Bulgaria		9
Canada	2	
China	3	6
Colombia	2	1
Cuba		7
Czech Republic	10	
Denmark	3	1
Egypt		8
Finland	4	6
France	10	
Germany	10	
Hungary	3	6
India	3	5
Ireland		9
Italy	9	1
Japan	8	2
S. Korea	6	4
Mexico		8
Netherlands	1	8
Norway	3	4
Poland	10	
Portugal	5	2
Romania	10	
Russian Fed.	7	
Saudi Arabia		1
Slovakia	10	
South Africa	7	3
Spain		9
Sweden	10	
Switzerland	8	2
Turkey		7
Ukraine	9	
United Kingdom	10	
United States	10	
Yugoslavia		5

Tabla 2: Países participantes de ISO/TC44³⁶

ISO Subcommittee and Title	Secretariat	Voting Members	
		European	Non-European
SC3 Welding Consumables	Sweden	15	6
SC4 Arc Welding Equipment	U.S.	13	5
SC5 Testing and Inspection of Welds	U.S.	16	7
SC6 Resistance Welding	Germany	13	4
SC7 Representation and Terms	Germany	15	2
SC8 Equipment for Gas Welding, Cutting and Allied Processes	Germany	14	5
SC9 Health and Safety	U.S.	13	2
SC10 Unification of Requirements in the Field of Metal Welding	Germany	19	4
SC11 Approval Requirements for Welding and Allied Processes Personnel	Slovakia	16	6
SC12 Soldering and Brazing Materials	U.K.	11	3

Tabla 3: Subcomités de ISO/TC44³⁶

4.2 Cualificaciones

Un 1993 la AWS y el Departamento de Trabajo decidieron desarrollar un programa de formación de “Entry Level Welders” (Soldadores de Nivel Básico). En 1995 decidieron expandir el programa incluyendo “Level II - Advanced Welders” y “Level II - Expert Welders” (Nivel II - Soldadores Avanzados, y Nivel III - Soldadores Expertos). La cualificación (vigente desde 1996) es de nivel nacional, y se relaciona a procesos básicos, de tal manera que es relativamente independiente de las variaciones introducidas por los avances tecnológicos³⁷. Uno de los nuevos procesos incluidos en las cualificaciones es el uso de MIG de corriente pulsada en la certificación de soldadores expertos.

Los tópicos y requisitos para cada nivel son detallados en guías publicadas por la AWS³⁸⁻⁴³ del que aquí se incluye un breve sumario.

Soldadores de Nivel Básico:

Aprenden los siguientes procesos de soldadura y corte: manual eléctrica, MIG, TIG, flux core, oxicorte, etc. Los materiales usados son acero al carbono, inoxidable y aluminio, en espesores mayores de 10 mm para MIG, TIG y manual, en todas posiciones, con la excepción de algunas para TIG. La cualificación es a través de la inspección visual de soldaduras MIG, TIG y flux core, y ensayos mecánicos de soldadura manual en posiciones horizontal y vertical.

Soldadores Avanzados:

Con los mismos procesos y materiales del nivel básico unen espesores mayores de 10mm y tubos Schedule 80. Además unen chapa fina con TIG, y dominan todos los procesos en todas las posiciones. La cualificación es a través de la inspección visual de soldaduras manuales, MIG, TIG y flux core, y ensayos mecánicos de soldadura manual en posiciones múltiples e inclinadas.

Soldadores Expertos:

Un soldador experto maneja todos los procesos en todo tipo de espesores y tubos en todas las posiciones. Además de los materiales básicos saben soldar cobre, níquel, magnesio y titanio. La cualificación es a través de la inspección visual de soldaduras MIG de corriente pulsada, TIG y flux core, y ensayos mecánicos de soldadura manual en posiciones múltiples e inclinadas, con acceso restringido.

5. Conclusiones

- La soldadura en los Estados Unidos es una industria en crecimiento.
- Los procesos de mayor crecimiento son MIG y TIG
- Las máquinas de soldar tienden a ser de tipo inversor y computarizadas
- La soldadura manual eléctrica continúa decreciendo
- Hay una gran demanda insatisfecha de soldadores calificados e ingenieros en soldadura
- Los standards norteamericanos se unificaron bajo la norma B2.1-98, que permite la cualificación de nuevos procesos
- Los standards internacionales se están definiendo en el comité ISO/TC44, en el cual las normas europeas predominan y los Estados Unidos tienen poca participación.
- Un sistema nacional de cualificaciones de soldadores de tres niveles fue definido en 1996.
- Este sistema de calificación se relaciona solo a los procesos básicos, y es relativamente independiente de los cambios tecnológicos

Agradecimientos

Quiero agradecer al Sr. José María Ormazábal por la invitación y el privilegio de participar en este importante evento, y también a los Sres. Juan Manuel Barandiarán y Juan Vicente Erazkin. Mi gratitud para los Sres. Eduardo Fernández Bodegas y Alberto Villaizán Güezmes, por su ayuda en la organización de la ponencia.

Referencias

1. Massachusetts Institute of Technology, *MIT Facts*, 1999
<http://web.mit.edu/facts/index.html>
2. *Massachusetts Institute of Technology*, <http://www.mit.edu>
3. U. S. News, *Top Engineering Schools*, 1999
<http://www.usnews.com/usnews/edu/beyond/gradrank/eng/gdengt1.htm>

4. Bank Boston, *MIT, The Impact of Innovation*, March 1997
<http://web.mit.edu/newsoffice-founders/>
5. Eagar, T.W., 1999 <http://web.mit.edu/cmse/www/Eagar99.pdf>
6. *Welding and Joining Group*, <http://www-dmse.mit.edu/groups/tweagar/>
7. Eagar, T.W., *Welding and Joining: Moving from Art to Science*. Welding Journal, 1995: p. 49-55.
8. Cullison, A. and M.R. Johnsen, *Welding Forges into the Future*. Welding Journal, 1999. **78**(6): p. 37-41.
9. Mendez, P.F., *Order of Magnitude Scaling of Complex Engineering Problems, and its Application to High Productivity Arc Welding*, Doctor of Philosophy, Massachusetts Institute of Technology, 1999.
10. Jones, L.A., *Dynamic Electrode Forces in Gas Metal Arc Welding*, Doctor of Philosophy, Massachusetts Institute of Technology, 1996.
11. Lincoln Electric,
<http://www.lincolnelectric.com/products/wprod/powerwave455.asp>
12. Jenkins, N., *Welding Fume Formation*. Doctoral Thesis Proposal, 1999, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
13. Irving, B., *Inverter Power Sources Check Fume Emissions in GMAW*. Welding Journal, 1992: p. 53-57.
14. Park, J.W. and R. Arroyave, personal communication, 1999.
15. Dave, V.R., J.E. Matz, and T.W. Eagar. *Electron Beam Solid Freeform Fabrication of Metal Parts*. in *Solid Freeform Fabrication Symposium*. 1995. Austin, TX.
16. Mendez, P.F., *Joining Metals Using Semi-Solid Slurries*, Master of Science, Massachusetts Institute of Technology, 1995.
17. Cary, H.B., *Modern Welding Technology*. Fourth ed. 1998, Prentice Hall.
18. Arn, R.L., *Where Has All the Passion Gone?* Welding Journal, 1999. **78**(2): p. 10.
19. American Welding Society, <http://www.aws.org>
20. American Welding Society, *Welding, So Hot It's Cool*, . 1998, American Welding Society: Miami, FL.
21. American Welding Society, *Engineering Your Future*. 1992, American Welding Society.
22. *Santa Rosa Junior College*, <http://www.santarosa.edu/>
23. *Hobart Institute of Welding Technology*, <http://www.welding.org/>
24. Lincoln Electric, *The Lincoln Electric Welding School*,
<http://www.lincolnelectric.com/services/educate/weldscho.asp>
25. American Welding Society, *Welding in the News*, November 1999
<http://www.aws.org/Education/news.html>
26. Ohio State University, *Welding Engineering*, <http://www-iwse.eng.ohio-state.edu/we/>
27. Utah State University, *Welding Engineering Technology*,
<http://www.engineering.usu.edu/ite/Undergrad/Welding/index.html>
28. Ferris State University, *Welding Engineering Technology*,
<http://www.ferris.edu/HTMLS/colleges/technolo/weldengt.htm>

29. LeTourneau University, *Welding Engineering*,
<http://www.letu.edu/programs/undergrad/eng/academics/Course%20Descriptions/wegr.htm>
30. American Welding Society, *Welding Handbook*. 1987, American Welding Society.
31. Lincoln Electric, *The Procedure Handbook of Arc Welding*. 13th ed. 1994, The Lincoln Electric Company.
32. Oak Ridge National Laboratory, *Materials Joining Center*,
<http://www.ornl.gov/orcmt/devlpmnt/matjoin.html>
33. Idaho National Engineering & Environmental Laboratory, <http://www.inel.gov>
34. Edison Welding Institute, [http://www.ewi.org/](http://www.ewi.org)
35. The Welding Institute, <http://www.twi.co.uk/>
36. Irving, B., *International Standardization: A Wake-Up Call for American Industry*. Welding Journal, 1999. **78**(9): p. 35-39.
37. American Welding Society, *S.E.N.S.E. Program*,
<http://www.aws.org/Education/sense.html>
38. American Welding Society, *Specification for Qualification and Certification for Entry Level Welders*. AWS QC10-95, 1996, American Welding Society, Miami, FL.
39. American Welding Society, *Specification for Qualification and Certification for Level II - Advanced Welders*. AWS QC11-96, 1996, American Welding Society, Miami, FL.
40. American Welding Society, *Specification for Qualification and Certification for Level III - Expert Welders*. AWS QC12-96, 1996, American Welding Society, Miami, FL.
41. American Welding Society, *Guide for the Training and Qualification of Welding Personnel. Entry Level Welder*. AWS EG2.0-95, 1996, American Welding Society, Miami, FL.
42. American Welding Society, *Guide for the Training and Qualification of Welding Personnel. Level II - Advanced Welder*. AWS EG3.0-96, 1996, American Welding Society, Miami, FL.
43. American Welding Society, *Guide for the Training and Qualification of Welding Personnel. Level III - Expert Welder*. AWS EG4.0-96, 1996, American Welding Society, Miami, FL.