

## Ostenitik Paslanmaz Çeliklerde ilave ısı girdisinin distorsiyona etkisi

**Murat İhsan YILMAZ\***, **H. Oktay BODUR**

*İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Konstrüksiyon ve İmalat Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul*

### Özet

*Türk Deniz Kuvvetlerinin modernizasyonu kapsamında İstanbul Tersanesi Komutanlığı/Pendik'te, Alman Abeking&Rasmussen ve Lürssen firmalarının konsorsiyumu ile Aydın Sınıfı mayın avlama gemileri inşa edilmektedir. Aydın Sınıfı mayın avlama gemilerinin, genel olarak dünya bahriyesindeki mayın avlama gemilerinden farkı, bu sınıf gemi inşasında kullanılan ostenitik paslanmaz çeliklerdir. Hali hazırda bu çeliği, Alman, İtalyan ve Kanada donanmaları kullanmaktadırlar. Anılan çeliğin, mayın avlama gemilerindeki kullanım amacı, manyetik olmamaları, deniz suyu korozyonuna dayanımlı olmaları ve yüksek mukavemete sahip olmalarıdır. Ancak manyetik olmayan ostenitik paslanmaz çeliklerin, ısı iletimlerinin kötü, buna mukabil ısıl genleşmelerinin yüksek olması, bu çeliklerin kaynak sonrası distorsiyonlarının, diğer çeliklere oranla, daha fazla olmasına neden olmaktadır. Bu durum, kaynaklı parçaların montajları esnasında, birleştirme problemlerine yol açtığından, her kaynak işleminden sonra kaynaklı parçalar, alevle düzeltme işlemine tabi tutulmaktadır. Bu çalışmanın amacı, İstanbul Tersanesi Komutanlığı/Pendik'te imali devam eden Aydın Sınıfı mayın avlama gemilerinin kaynak işlemi sonrasında meydana gelen distorsiyonlarını en aza indirmek amaçlı, kaynak esnasında uygulanan ilave ısı girdisinin bir yöntem olarak uygulanabilirliğinin ispat edilmesidir. İskoçya Strathclyde Üniversitesi'nde yapılan deneyler sonucunda, kaynak esnasında parçaya ilave ısı girdisi verilerek, Isıl Gerilme Tekniği uygulanmasının, T kaynaklı parçalarda, ondüle şeklindeki (buckling) distorsiyonlarını önlediği ve açısal çarpılmaları azalttığı ispatlanmıştır.*

**Anahtar Kelimeler:** *Ostenitik paslanmaz çelik, ondüle distorsiyon, ısıl gerilme tekniği.*

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Murat İhsan YILMAZ. muratnavy73@gmail.com; Tel: (544) 420 26 79.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği A.B.D. Konstrüksiyon ve İmalat Programında tamamlanmış olan "Ostenitik Paslanmaz Çelik Plakanın (EN DIN 1.3964) T Bağlantı Kaynağında İlave Isı Girdisi Uygulanmasının Meydana Gelen Distorsiyona Etkisinin İncelenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 03.05.2007 tarihinde dergiye ulaşmış, 26.06.2007 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 01.03.2009 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Examination of welding distortion via applying thermal tensioning technique on austenitic stainless steels

### Extended abstract

*Under the construction of German Mine Hunter Consortium (Abeking&Rasmussen and Lürssen), Istanbul Shipyard/Pendik is building Aydın Class Mine Countermeasures (MCM) Vessels for Turkish Navy.*

*Aydın Class Mine Countermeasures (MCM) Vessels distinct from the other world navies because of their hull made of austenitic stainless steel. Nowadays, German, Italian and Canadian navies use this type of steel for ship hulls. Austenitic stainless steel has many advantages, like resistant to the corrosion of sea water, high yield point and non-magnetic structure. But these metals are having also disadvantages, like poor heat conductivity and high thermal expansivity. These disadvantages create more distortions than normal steels in welding conditions. Fittings of welded structure are very important section in shipbuilding, so geometry of welded structure need to be accurate. For straightening of distortions, flame straightening method is widely using in shipbuilding industry. Nowadays for quality products it is necessary to reduce price. Straightening of distortions via flame straightening method is more time, manpower and material consuming. So improving of straightening of distortions will be beneficial for budget of government.*

*The aim of this thesis is to show benefits of usage of Thermal Tensioning Technique as a method of straightening of distortions for Aydın Class Mine Countermeasures (MCM) Vessels which are built at the Istanbul Shipyard/Pendik. Straightening of distortions via Thermal Tensioning Technique is examined for ship building industry as a preventing method with many academic researches. The stiffened panel made of austenitic stainless steel is used in the experiment of the Strathclyde University/Scotland. In specific condition under gas protection weld (MIG), thermal camera is used for distribution of heat, thermo couples are used for temperature measurement and laser appliance is used for distortion measurements.*

*This paper focuses on the transient temperature fields created by the large heat inputs from arc welding which is the driving force for distortion in*

*the plates. The use of a thermal imaging camera allows the thermal fields to be viewed on a whole-field basis. The use of a welding rig in this kind of investigation is essential as it allows parameters to be kept constant throughout. The moveable track is controlled by stepper motors such that the travel speed of the weld can be adjusted to a tenth of a millimeter per second. The torch is held static while the plate is pulled along at a constant speed by a series of pulleys and small stepper motors. The welding machine was connected to the computer and so all parameters could be entered via the computer so that all the variables could be controlled. The camera was held in place with scaffolding and the tripod for the camera fixed to a bracket that allowed movement in all directions. The CCD thermal imaging camera used here was the ThermaCam SC500 from FLIR systems. The camera is able to provide thermo graphic images in the infrared spectrum from 3 to 12 $\mu$ m. Following initial tests with austenitic stainless steel plates the amount of background radiation reflected from the plate to the camera was seen to be high. This led to the painting of the plates with a high emissivity, two-part zinc silicate primer made up in two parts. To verify thermal images thermocouples were also present at distances of 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 and 100mm. The laser appliance is used for distortion measurements. All of austenitic stainless steel plates are scanned before welding and again after welding. The data was used to compare the distortion effects under different restraint conditions. The distortion analysis was carried out using an automated laser scanner which was programmed to cover the whole plate recording data at intervals throughout the scan. The surface deformation data obtained from Labview program was evaluated on the graphics. Austenitic stainless steel plates are tested under four conditions. These are free welding, restrained welding, restrained and additional heat input welding, free and additional heat input welding.*

*As a result, the experiments in Strathclyde University proved that Thermal Tensioning Technique prevent buckling distortions and improves angular distortions on stiffened welded plates. Usage of Thermal Tensioning Technique for Aydın Class Mine Countermeasures (MCM) Vessels and also other type of ship building industry is additional benefit and assistance for economy.*

**Keywords:** *Austenitic stainless steels, buckling distortions, thermal tensioning technique.*

## **Giriş**

Bu çalışmada, İstanbul Tersanesi Komutanlığı'nda halen inşası devam eden Aydın Sınıfı mayın karşı tedbir gemilerinde sıkça kullanılan, T şeklindeki kaynaklı bağlantıların, gaz altında çift taraflı kaynakları sonrası meydana gelen ondüle şeklindeki distorsiyonlar ele alınarak, kaynak esnasında ilave ısı girdisi ile bu distorsiyonların önlenebileceği ispatlanmaya çalışılmıştır.

Literatürdeki çalışmalar ışığında, kaynak esnasında ilave ısı girdisi uygulama yöntemine ait teorik bilgilerle, Strathclyde Üniversitesi/İskoçya'da Makine Mühendisliği Bölümü Deneysel Laboratuvarı'nda yapılmak üzere bir deney yöntemi oluşturulmuştur.

Deneyde, Türk Donanması'na ait Aydın Sınıfı mayın karşı tedbir gemilerinin inşasında kullanılan ostenitik paslanmaz çelikten plakalar kullanılmıştır. Deney ve koşulları İstanbul Tersanesi/Pendik'te inşası devam eden mayın avlama gemileri temel alınarak oluşturulmuştur.

Deneyde kullanılan plakalar, kaynak işleminden önce, termal kamera görüntüsü için özel boya ile boyanmışlardır, daha sonra T parçası olarak kullanılan plakaların her biri, punta kaynağı ile ana gövdeye tutturulmuştur. Bu işlemlerden sonra lazer cihazı ile boyutsal ölçümleri yapılan plakalar, sırasıyla, tersanedeki koşullarda ve ilave ısı girdisi uygulamasıyla kaynak edilmişlerdir. Kaynak işlemi esnasında plakaların altına yerleştirilen termokupullarla ve termal kamerayla, sıcaklık ve ısı dağılımları kaydedilmiştir. Kaynak işleminden sonra meydana gelen deformasyonu ölçmek amacıyla her bir plaka lazer cihazıyla tekrar boyutsal ölçüm işlemine tabi tutulmuştur.

Deneyin amacı olan, distorsiyonların ilave ısı girdisi ile önlenmesi çalışması, ilave ısı girdisi için belirlenen parametrelerin uygulanmasına ve elde edilen neticelere göre, en uygun koşulların elde edilmesi için bu parametrelerin değiştirilerek tekrar edilmesi prensibine dayandırılmıştır.

Özellikle ince levhalarda meydana gelen ondüle şeklindeki distorsiyonlar hem deneysel hem de sayısal metotlarla birçok araştırmacı tarafından ele alınmıştır. Watanabe ve Satoh (1959) ondüle şeklindeki distorsiyonu, yapı çeliğinden mamul ince plakaların kaynağında gözlemişlerdir. Yine aynı yıl, Masubuchi (1959) bu alanda yaptığı çalışmalarını daha da ileri götürerek aynı sonuçları gözlemlemiştir. Bahsedilen bu çalışmalarda dar ve uzun levhalar kullanılmıştır. Taniguchi (1972) sayısal ve deneysel yaklaşımın birleşimi bir çalışma ile alüminyum panel yapıların kaynağında açısız çarpılmayı incelemiştir. Bu çalışmada levha kalınlığı ile açısız çarpılma arasında bir bağımlı ortaya konmuştur. Pattee (1975), çeşitli sınır koşullarında alüminyum levhaların ondüle şeklindeki distorsiyonlarını incelemek üzere deneysel çalışmalar yapmıştır. Elde ettiği sonuçlar daha önce bahsedilen araştırmacılar ile aynı gözlemlere dayanıyordu. Satoh ve Terasaki (1976), geniş bir araştırma yaparak, çeşitli malzemelerin kaynaklarında artık gerilmeleri önleyecek açısız çarpılmayı ve enine çekmeyi tanımlayacak basit bir formülasyon geliştirmişlerdir. Terai vd. (1976) gemi inşasında kullanılan ince levhalarda kaynak distorsiyonlarını giderecek çeşitli düzeltme teknikleri üzerinde çalışmalar yapmıştır. Bunlar ön ısıtma ve ön gerilme gibi uygulamalardır. Bu metotların kaynak imalatında uygulanmasıyla açısız çarpılma oranları düşüş göstermiştir. Penso (1992), yumuşak çelikler üzerinde eğilme şeklindeki distorsiyonların analizi için, teorik ve deneysel çalışmalar yapmıştır. Terai vd. (1976) ön ısıtma ve ön gerilme uygulamaları ile ondüle şeklindeki distorsiyonlar üzerinde çalışmalarını daha da ileri götürerek başarılı neticeler aldı. Uzun yıllar araştırmacılar kaynak sonrası meydana gelen distorsiyonların tahmini için sonlu elemanlar metoduyla çalışmalar yaptılar. Birçok karmaşık modeller geliştirdi. Kaynak distorsiyonları hakkında önemli faydalar sağlayan bu karmaşık modeller, sanayide, uygulama safhasında yoğun olarak bilgisayar hesaplamalarına ihtiyaç duyduğu için pratik olarak kullanılmamıştır. Daniewicz (1993) gemi inşasındaki imalatlar için teorik ve deneysel içerikli ve sonlu elemanlar metodunu kullanarak bir çalışma

yapmış ve kaynak distorsiyonlarını tahmin etmeye çalışmıştır. Son yıllarda Michaleris ve De Biccari (1997), büyük ve karmaşık yapılarda kaynak sonrası meydana gelen distorsiyonları tahmin edici sayısal analiz teknikleri geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri bu teknikle, iki boyutlu kaynak simülasyonunu, üç boyutlu yapı analizi ile birleştirmişlerdir. Sayısal teknik, ondüle kaynak distorsiyonlarını değerlendirmekte kullanılmıştır. Termal-elastik-plastik kaynak simülasyonu ve sonlu elamanlar analizi ile uygulanan kaynak yükü ve yapının kritik ondüle değerinin tespit edilmesine çalışılmıştır. Bu yöntem özellikle araştırmacının termal gerilme yaratarak, ince levhaların kaynak distorsiyonlarını önleyici çalışmalarında kullanılmıştır. Düzeltme teknikleri konusunda, gerek kaynak öncesi, gerekse kaynak sonrası ısı uygulamalarına ilişkin birçok patent alınmıştır. Örneğin Japonya'da alınan bir patent (JP-A-6018292), kalın plakalardaki kaynak sonrası açısız çarpılmaları kontrol altına almakla ilgili işlemler hakkındadır. Buna göre, kaynak bitiminde, kaynak bölgesi soğutulurken kaynağın her iki yanına ısı uygulanmakta, böylelikle düzgün bir ısı dağılımıyla açısız çarpılmalar minimuma indirilmekteydi. Bir Sovyet patenti ise (SU-A-1066765) kaynak bölgesindeki sıcaklık yükselmesini önleyici ısı emen malzemeler (kuru buz vb.) kullanmaktaydı. Bir başka Japon patenti de (JP-A 5311138) açısız çarpılmayı önleyici ilave ısı girdisi ve hareketi kısıtlanması uygulaması geliştirmiştir.

Burada kaynağa yakın bölgenin ısınması ve kaynak bölgesinin soğuması sonucu, düzgün olmayan sıcaklık dağılımı sebebiyle çeki gerilmesi meydana gelir ve bası gerilmesini kontrol etmektedir. Bu metotta, kaynak boyunca, kaynağın her iki tarafı da sabitlenmektedir. Bu metot deneysel olarak Burak (1979) tarafından incelenmiştir. Ancak bu metodu, 4 mm den düşük kalınlıklardaki levhalarda pek verimli olmadığı Guan vd. (1988) tarafından tespit edilmiştir. Çin patenti 87100959, Guan vd. (1987) tarafından alınmış ve daha sonra Guan vd. (1988) tarafından geliştirilerek uluslararası patente (PCT/GB88/00136) dönüştürülmüştür. Japon patenti JP-A-5311138'e benzer, ancak ilave ısı

girdisi ve soğutması daha aktif olan uygun şekilde hareket sınırlaması yapılmış bir yöntem uygulamışlardır. Bu metoda düşük gerilimli deformasyonsuz metot ismi verilmiştir. Bu yöntem 4 mm den düşük kalınlıklar için distorsiyonu önlediği belirtilmektedir.

## **Mayın karşı tedbir gemilerinin inşasında kullanılan ana malzemeler**

Donanmaya sahip birçok ülke, Mayın Karşı Tedbir (MKT) gemisi tekne inşasında kullanılan, bakım/idamesi masraflı klasik ahşap malzemenin yerine geçecek yeni bir malzeme için araştırmalar yapmaktadırlar. Klasik ahşap malzemenin yerine modern, cam elyafıyla takviyeli plastik (GRP, Glass-Reinforced Plastic) ve manyetik olmayan çelik teknolojileri üzerinde yoğunlaşmışlardır. GRP ve manyetik olmayan çeliklerin, şoka karşı mukavim oluşu, yangına karşı hassas olmaması (ahşap malzemeye nazaran) ve bakım-onarım kolaylığı gibi avantajları nedeniyle, MKT gemilerinin tekne inşasında son yıllarda ana malzeme olarak kullanılmaya başlanmıştır.

### **Cam elyafıyla takviyeli plastik**

Cam elyafıyla takviyeli plastik malzeme kullanılarak gemi inşa etmenin üç şekli mevcuttur. Bunlar mono blok, tek cidarlı gövde (Single Skin Framed) ve sandviç tip gemi inşasıdır.

Mono blok teknelerde, omurga ve gövdenin tek bir parça olarak inşası söz konusudur. Tekne, oldukça kalın cam elyafıyla takviyeli plastik kaplanmış ve ana bölmeler arası, ilave parçalar ile takviye edilmiştir. Tekneler güçlü ve esnek bir yapıda olmalarının yanı sıra, oldukça ağır bir yapıya sahiptirler.

Tek cidarlı gövde, iskelet üzerine tek kaplama şeklinde yapılan inşadır. Bu tekne yapısında, hafif plastik kaplama üzerindeki eğimli alabandalara çapraz ve boyuna takviyeler konulmuştur.

Sandviç tipi inşa, İsveç tarafından geliştirilen çift cidarlı teknelere uygulanmış olup, yapılan şoka mukavemet testlerinden arzu edilen neticeler elde edilmiştir.

Cam elyafıyla takviyeli plastik tekne yapımı iklimlendirme kontrollü altyapı ve tesisler ile eğitilmiş personele ihtiyaç göstermesi açısından bu kaynakların hazır olmaması durumunda ilk yatırım maliyeti yüksek bir inşa yöntemi olabilmektedir.

### Manyetik olmayan çelik

Manyetik olmayan çelik uygulamaya geçiş için geniş çaplı yatırıma, altyapı ve tesise ihtiyaç gerektirmemesi, mukavemet dayanımı ve manyetik iz özelliklerinin iyi olmasından dolayı MKT gemileri ana tekne yapımında ve düşük manyetik özellikler istenen metal aksamın ham maddesi olarak, günümüzde etkin olarak kullanılmaktadır.

### Ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağı

Ostenitik krom nikelli paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyetlerini etkileyen fiziksel özelliklerinin yanında, metalürjik etkenler de bu tür çeliklerin kaynağında önemlidir. Ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında delta ferrit fazının oluşumu, taneler arası korozyona hassasiyet, gerilmeli korozyona hassasiyet ve sigma fazının oluşması istenmez.

Ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağı esnasında eriyen bölge çok kısa bir zamanda katılaşır hızla soğuduğundan ve elektrot olarak kullanılan alaşımların karbon içeriği de düşük olduğundan, kaynak metali için karbür çökeltme tehlikesi yoktur. Ancak ısının tesiri altında kalan bölge (ITAB) kaynak süresi boyunca 500-900 °C sıcaklık aralığında tavlı olarak kalmakta ve karbon içeriğinin yüksek olması halinde ostenit tane sınırlarında karbür çökmesi meydana gelmektedir. Sıcaklık ve çeliğin karbon içeriğine göre en kısa sürede çökeltmenin başladığı sıcaklığa kritik sıcak Tablo 1’de verilmiştir.

Taneler arası korozyonu önlemek amacıyla uygulanan diğer bir yöntem ise karbonun kroma karşı ilgisinden daha yüksek bir ilgiye sahip bir elementin çeliğin bileşimine katılmasıdır. Bu elementler titanyum, niyobyum ve tantalyumdur. %9 dan daha az nikel içeren ostenitik paslanmaz çeliklerde kaynak bölgesinde sigma fazının oluşması da bu tür çeliklerde

kaynak kabiliyetini olumsuz etkileyen başka bir olgudur.

Tablo 1: Sıcaklık ve çeliğin karbon içeriğine göre en kısa sürede çökeltmenin başladığı kritik sıcaklık (Anık ve Vural, 2000)

Karbon içeriği (%)	Kuluçka periyodu (dakika)	Kritik Sıcaklık (°C)
0.03	11	650
0.05	7	650
0.06	2.5	670
0.08	0.3	750

### Aydın sınıfı mayın karşı tedbir gemilerinde ostenitik paslanmaz çeliğin kullanımı

Aydın Sınıfı mayın karşı tedbir gemilerinin inşasında manyetik olmayan ostenitik paslanmaz çelikler kullanılmaktadır. Aydın Sınıfı mayın karşı tedbir gemilerinin, genel olarak dünya bahriyesindeki mayın avlama gemilerinden farkı, bu sınıf gemi inşasında kullanılan ostenitik paslanmaz çeliklerdir. Hali hazırda bu çeliği, Alman, İtalyan ve Kanada donanmaları kullanmaktadırlar. Anılan çeliğin, mayın karşı tedbir gemilerindeki kullanım amacı, manyetik olmamaları, deniz suyu korozyonuna dayanımlı olmaları ve yüksek mukavemete sahip olmalarıdır.

Aydın Sınıfı mayın karşı tedbir gemilerinde kullanılan ostenitik paslanmaz çeliklerin (EN DIN 1.3964) içyapısı incelendiğinde (X2CrNiMnMoNb21-16-5-3) içerdiği elementler bakımından ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında söz konusu olan olumsuzlukların meydana gelmeyeceği görülmektedir.

### Aydın sınıfı mayın karşı tedbir gemilerinde karşılaşılan kaynak distorsiyonları

Aydın sınıfı mayın karşı tedbir gemilerinde kullanılan ostenitik paslanmaz çelik sahip olduğu özellik gereği, yapı çeliklerine nazaran ısı iletimi düşük buna karşın ısıl genleşmesi yüksek bir çeliktir.

Bu sebepten dolayı kaynak sonrası distorsiyonları yapı çeliklerine nazaran daha

fazla olmaktadır. İstanbul Tersanesi/Pendik'te inşa edilen yapı çeliğinden mamul hücumbotlarda kaynak sonrası meydana gelen distorsiyonların düzeltilmesi için tüm kaynaklı imallerin içerisinde yaklaşık % 15'lik bir dilim mevcut iken bu oran ostenitik paslanmaz çelikten imal edilen Aydın Sınıfı mayın karşı tedbir gemilerinde yaklaşık % 35'tir.

Aydın Sınıfı mayın karşı tedbir gemilerinde diğer gemi sanayinde olduğu gibi ince sacların kullanımı yoğundur.

### Kaynak distorsiyonlarını düzeltme işlemi

Aydın Sınıfı mayın karşı tedbir gemilerinin inşasında, kaynak sonrası meydana gelen distorsiyonlar gerek ilk geminin inşa edildiği Alman tersanelerinde, gerekse İstanbul tersanesinde oksisasetilen alevi kullanılarak düzeltilmektedir.

Meydana gelen kaynak distorsiyonlar, oksisasetilen aleviyle, bu işlemde tecrübe kazanmış personelce kullanılarak düzeltilmektedir. Ancak ostenitik paslanmaz çeliklerin ısıl genleşmelerinin yüksek buna karşın ısı iletimlerinin düşük olması, kaynak sonrası meydana gelen deformasyon oranının, diğer çeliklere göre daha fazla olmasına sebep olmaktadır. Bu durum da, distorsiyon düzeltme işlemine harcanan zaman, iş gücü ve malzemeyi arttırmaktadır.

### Deneysel çalışma

Aydın Sınıfı mayın karşı tedbir gemilerinde kullanılan ostenitik paslanmaz çeliklerin (EN DIN 1.3964) koruyucu gaz altında, T bağlantısı şeklindeki çift taraflı kaynakları sonrası meydana gelen distorsiyonların incelenmesi, İskoçya Strathclyde Üniversitesi Makine mühendisliği Bölümü'nde çeşitli kaynak araştırmaları yapmak üzere kurulan deney laboratuvarı'nda yapılmıştır.

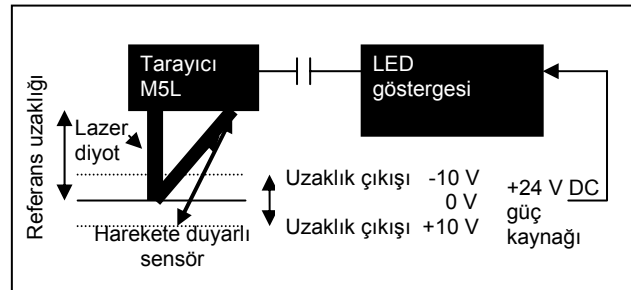
### Deneyde kullanılan ölçme sistemi

Ostenitik paslanmaz çelikten mamul plakaların koruyucu gaz altında T şeklindeki kaynaklarında meydana gelen distorsiyonlarının incelenme-

si amacıyla, plakaların kaynak öncesi ve sonrası boyutsal ölçümleri, kaynak esnasında sıcaklık ölçümleri ve ısı dağılımları bu amaç için kurulmuş kaynak tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan kaynak tezgâhında, yapımından itibaren, alın kaynağı birleştirilmeleri ile ilgili deneyler yapıldığından bahse konu tezgâhta, T şeklindeki çift taraflı kaynakların yapılabilmesi için tadilat yapılmıştır.

### Optik uzaklık sensörü (Lazer)

Deneyde kullanılan plakaların kaynak işlemi öncesi ve kaynak işlemi sonrası boyutsal ölçümlerini gerçekleştirmek amacıyla optik uzaklık sensörü kullanılmıştır. Optik uzaklık sensörü, bir lazer diyot ve pozisyona (harekete) duyarlı cihazdan oluşmaktadır. Ölçülen uzaklık sinyali, uzaklığa (mm) oranlı voltaj (V) olarak görülmekte olup sıfırlama (referans noktası), ölçme aralığının ortasından yapılmaktadır. Bu sistemde uzak cisimler bir pozitif voltaja (+10 VDC ye kadar) yakın cisimler ise bir negatif voltaja (-10 VDC ye kadar) düşmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Lazer ölçme sisteminin şematik gösterimi

### Adım motoru

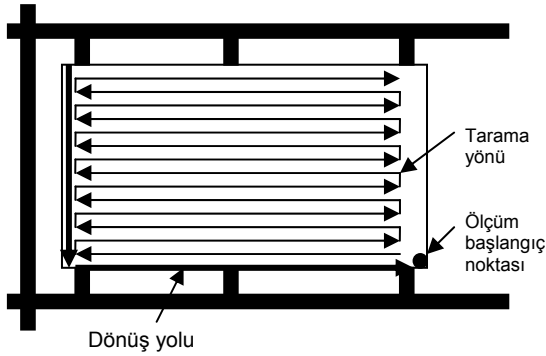
Ölçme sisteminde kullanılan lazer cihazı, kramayer dişli üzerinde hareket eden, pinyon dişliye sahip bir motor (adım motoru) tarafından tahrik edilmektedir. Adım motorunun kullanımındaki amaç motorun dönüş sayısını hassas bir şekilde ayarlayabilmektedir. Bu durum ölçümlerin istenilen noktada yapılabilmesine olanak sağlamaktadır.

Adım motoru pinyonunun dönme hızı, giriş sinyalleri frekansıyla kontrol edilir. Adım motoru

dijital çıkış sinyalleri üreten bir bilgisayar programı vasıtasıyla (Labview) bilgisayar üzerinden kontrol edilmektedir.

### Tarama mekanizması

Kaynak tezgâhının üzerine monte edilen lazer cihazı, distorsiyon ölçümü yapılacak plaka yüzeyini Şekil 2’de gösterildiği gibi önceden belirlenen bir güzergâh paralelinde tarar.



Şekil 2. Kaynak tezgâhında boyut ölçümünün şematik gösterimi

### Termal kamera

Deney esnasında kaynak sıcaklığının ve ilave ısı kaynağının sıcaklık dağılımlarının incelenmesi termal kamera (ThermaCam SC500 FLIR systems) ile gerçekleştirilmiştir. Termal grafiğin çalışma prensibi, grafiği istenen parçadan infrared emisyonunun yakalanması yoluylaadır. Termal kamera 3 ila 12  $\mu\text{m}$  aralığındaki dalga boyunda infrared radyasyonunu yakalamaktadır. Termal kameradan doğru bilgilerin alınması malzemenin emisyonuna bu da büyük oranda malzemenin yüzey durumuna bağlıdır. Bu sebeplerden dolayı deney parçaları raspanmış ve çinko silikat içerikli gri mat boya ile boyanmıştır. Bunun dışında emisyon sıcaklığın da bir fonksiyonudur, özellikle yüksek sıcaklıklarda ( $>500\text{ }^\circ\text{C}$ ) doğruluktan sapmalar olabilmektedir. Kaynak işleminde distorsiyon incelendiğinden bu durum bir olumsuzluk yaratmamaktadır.

### Termokupul

Kaynak esnasında plaka üzerinde belirli noktalardaki sıcaklık dağılımının ölçülebilmesi amacıyla 20 adet termokupul kullanılmıştır. Termokupulların montajı amacıyla her bir deney parçasının belirlenen noktalarına, 2 mm derinli-

ğinde ve 1 mm çapında delikler açılmıştır. Kaynak işlemi esnasında termokupullardan okunan değerler zamanın bir fonksiyonu olarak Labview adlı bilgisayar programı vasıtasıyla bilgisayara kaydedilmiştir.

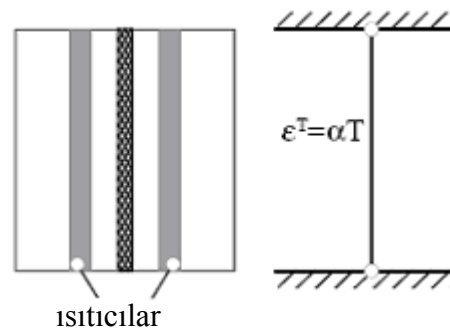
### Deney parçasının boyut ölçümü

Her bir deney parçası kaynak işlemi öncesinde ve kaynak işlemi sonrasında lazer cihazı kullanılarak boyutsal ölçüme tabi tutulmuş, böylelikle kaynak işleminin meydana getirdiği distorsiyon sayısal olarak gösterilmiştir. Bu işlem için deney parçası 4 nokta üzerine oturtularak (ucu sivriltilmiş saplama) sıfır ayarları lazer cihazının hassas boyutsal toleransı kullanılarak yapılmıştır.

Sıfır ayarları yapılan deney parçalarının tüm yüzeyi, lazer cihazıyla taranmıştır. Kaynak öncesi yapılan tüm bu işlemler kaynak sonrası da tekrarlanarak kaynak işleminin neden olduğu deformasyonlar kaydedilmiştir.

### İlave ısı girdisi

Aydın Sınıfı mayın karşı tedbir gemilerinin inşasında kaynak sonrası meydana gelen deformasyonların düzeltilmesi amacıyla alevle düzeltme işlemi uygulanmaktadır. Burada kullanılan alev, oksii-asetilen olduğundan, deney şartlarında da oksii-asetilen kullanılmıştır. Oksii-asetilen alevinin verdiği sıcaklık ve ısı dağılımı kaynak işlemi yapılmadan önce test edilerek ayarlanmıştır. Test işleminde termal kamera kullanılarak gerekli düzeltmeler yapılmıştır.



Şekil 3. Maksimum ısıtma sıcaklığının hesabı

Şekil 3’teki denklem kullanılarak plastik deformasyon yaratmadan iç gerilmeleri azaltan gerekli sıcaklık hesaplanabilir.

Bu şekilde;

$$\Delta l = l \cdot \alpha \cdot (T_{\max} - T_{\text{ortam}}) \quad (1)$$

$$\varepsilon = \alpha \cdot \Delta T \quad (2)$$

$$T_{\max} = \sigma_{\text{akma}} / \alpha \cdot E + T_{\text{ortam}} \quad (3)$$

$T_{\max}$ : Sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\sigma$ : Akma sınırı ( $430 \text{ N/mm}^2$ ),  $E$ : Elastisite Modülü ( $195 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$ ),  $\alpha$ : uzama katsayısı ( $14.7 \cdot 10^{-6} \text{ m/m.K}$ ),  $T_{\text{ortam}}$ :  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$T_{\max} \approx 170^{\circ}\text{C}$  elde edilir. (3 numaralı denklem)

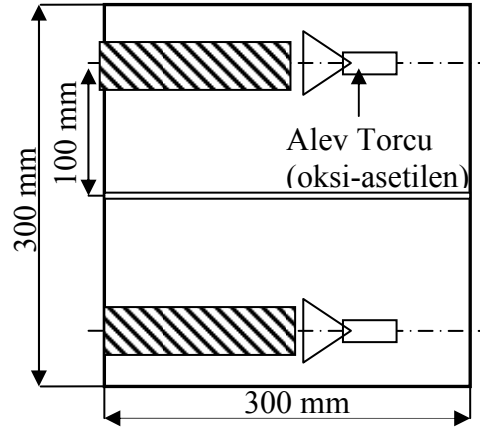
İlave ısı girdisinin deney parçası üzerindeki uygulama yeri Şekil 4'de, uygulanan sıcaklık değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

İlave ısı girdisi olarak, oksii-asetilen alevi kullanıldığından, deney parçasında maksimum  $150^{\circ}\text{C}$  lik sıcaklığa ulaşabilmek için gerekli gaz sıcaklığı ve parçanın yüzey sıcaklığı termal kamera ile parçanın ısısı ise, deney parçalarının altına yerleştirilen 20 adet termokupul vasıtasıyla kontrol edilmiştir.

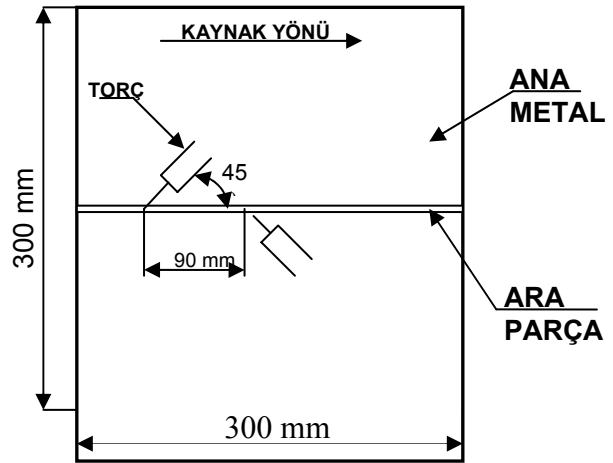
Aydın sınıfı mayın karşı tedbir gemilerinin inşasında kullanılan ostenitik paslanmaz çeliklerin (EN DIN 1.3964) kaynak distorsiyonlarını incelemek üzere  $300 \times 300 \text{ mm}$  ebatlarında ve  $3 \text{ mm}$  kalınlığında plaka ve T kaynağı yapabilmek için  $300 \times 50 \text{ mm}$  ebatlarında ve  $3 \text{ mm}$  kalınlığında destek parçası kullanılmıştır (Şekil 5).

İlave kaynak metali olarak  $1 \text{ mm}$  çapında ostenitik paslanmaz çelik (EN DIN 1.3954) ve gazaltı kaynağında koruyucu gaz olarak %92

Argon + %8  $\text{O}_2$  karışımına sahip gaz kullanılmıştır. Ara parça ana parçaya çift taraflı kaynak edilmiştir.



Şekil 4. İlave ısı girdisi uygulama yeri



Şekil 5. Deney parçasının şematik gösterimi

Ana plaka üzerine ara parça punta kaynağı ile tutturulmuştur. Boyut ölçümleri kaynak öncesinde ara parçalı olarak yapılmıştır. Her bir deney parçasının hangi şart ve koşullarda kaynak edildiği Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Deney şartları

Deney No	Boyut (mm)	Voltaj (V)	Amper (A)	İlerleme hızı (mm/s)	Tel ilerleme hızı (mm/s)	İlave ısı ( $^{\circ}\text{C}$ )	Kısıtlama
1	300×300×3	23.1	186	10	231	Yok	Yok
2	300×300×3	23.1	186	10	231	Yok	Var
3	300×300×3	23.1	186	10	231	Var (160)	Var
4	300×300×3	23.1	186	10	231	Var (200)	Var

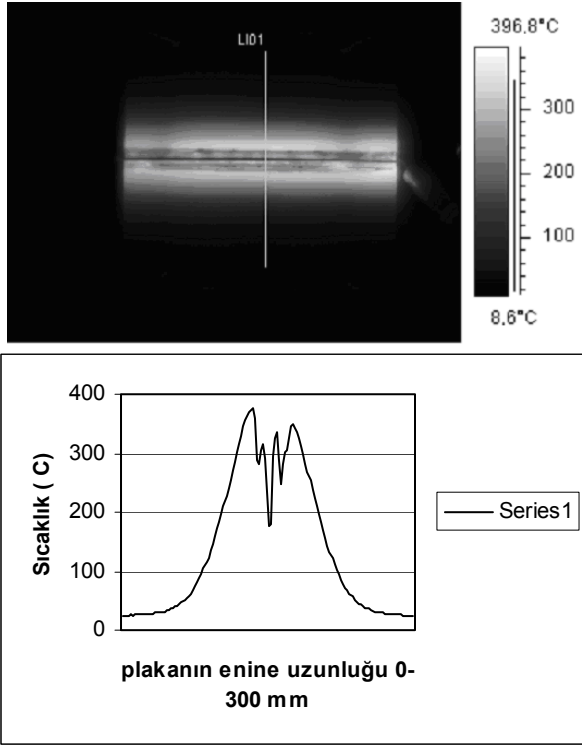


## Deneyle

### 1 Numaralı deneyin yapılışı

Kaynak öncesi boyutsal ölçümü yapılan ve termokupulları monte edilen plaka, hareket kısıtlaması olmaksızın Tablo 2’de belirtilen koşullarda çift taraflı kaynak edilmiştir.

Deney parçası kaynak edilirken termal kamera ile kaynak bölgesindeki ısı dağılımı kaydedilmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı

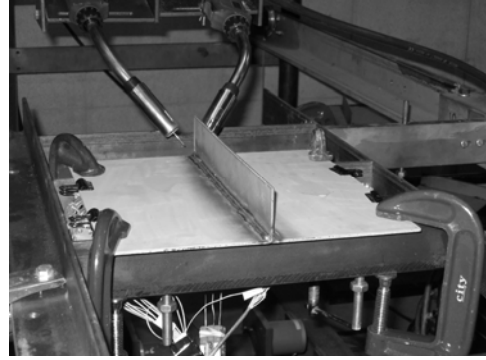
### 2 Numaralı deneyin yapılışı

Kaynak öncesi boyutsal ölçümü yapılan ve termokupulları monte edilen plakanın hareketleri kısıtlanmak üzere dört köşesinden kelepçelenmiş halde kaynak edilmiştir (Şekil 7).

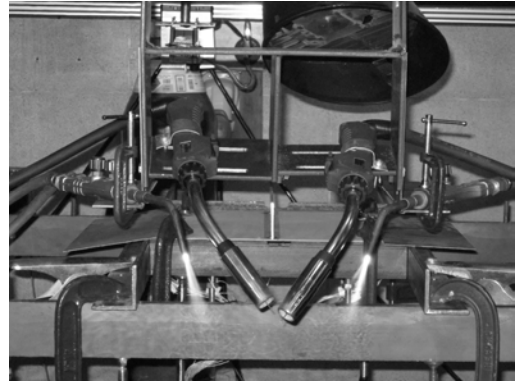
### 3 Numaralı deneyin yapılışı

Kaynak öncesi boyutsal ölçümü yapılan ve termokupulları monte edilen plaka hareketi kısıtlanmak üzere dört köşesinden mengene ile sabitlenmiş olduğu halde ilave ısı girdisi ile kaynak edilmiştir (Şekil 8).

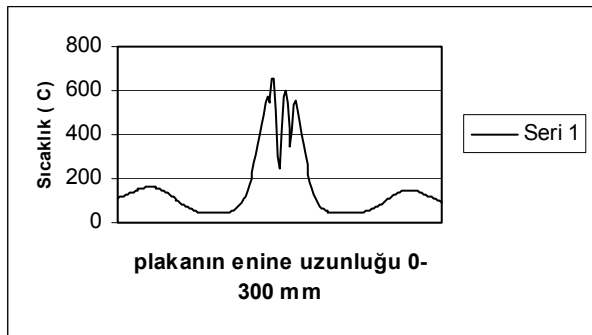
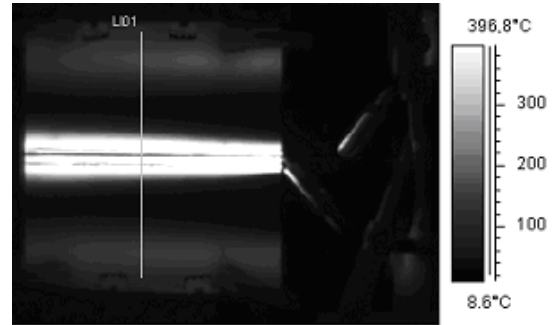
Deney parçası kaynak edilirken termal kamera ile kaynak bölgesindeki sıcaklık dağılımı kaydedilmiştir (Şekil 9).



Şekil 7. Hareketi kısıtlanmış deney parçasının kaynak sonrası görünümü



Şekil 8. Hareketi kısıtlanmış ilave ısı girdili deney parçasının kaynak işlemi



Şekil 9. Kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı

#### 4 Numaralı deneyin yapılışı

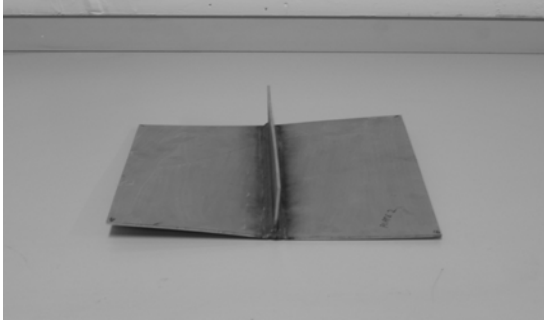
Kaynak öncesi boyutsal ölçümü yapılan ve termokupulları monte edilen plaka serbest hareketli olduğu halde ilave ısı girdisi ile kaynak edilmiştir.

#### Deney sonuçları

##### 1 Numaralı deney sonucu

Bu deneyde, tersanedeki imalat işlemleri gibi, deney parçası serbest hareketli ve ilave ısı girdisi olmadan Tablo 2'deki koşullarda kaynak edilmiştir.

Kaynak işlemi sonrası deney parçasının görünümü Şekil 10'dadır.

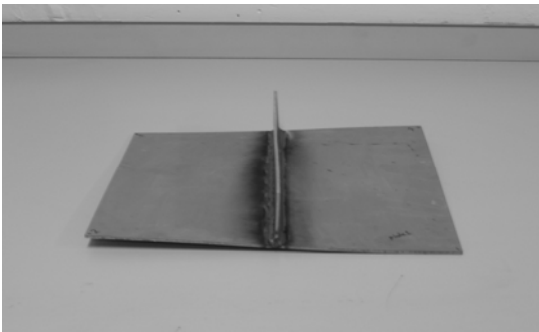


Şekil 10. 1 numaralı deney parçasının kaynak sonrası görünümü

##### 2 Numaralı deneyin sonucu

Bu deneyde, deney parçası hareketleri kısıtlanmak üzere dört köşesinden sabitlenerek ve ilave ısı girdisi olmadan Tablo 2'deki koşullarda kaynak edilmiştir.

Kaynak işlemi sonrası deney parçasının görünümü Şekil 11'dedir.

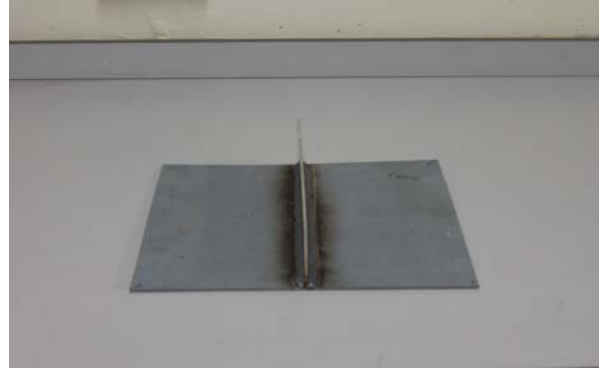


Şekil 11. 2 numaralı deney parçasının kaynak sonrası görünümü

##### 3 Numaralı deneyin sonucu

Bu deneyde, deney parçası hareketleri kısıtlanmak üzere dört köşesinden sabitlenerek ve ilave ısı girdisi uygulanarak Tablo 2'deki koşullarda kaynak edilmiştir.

Kaynak işlemi sonrası deney parçasının görünümü Şekil 12'dedir.

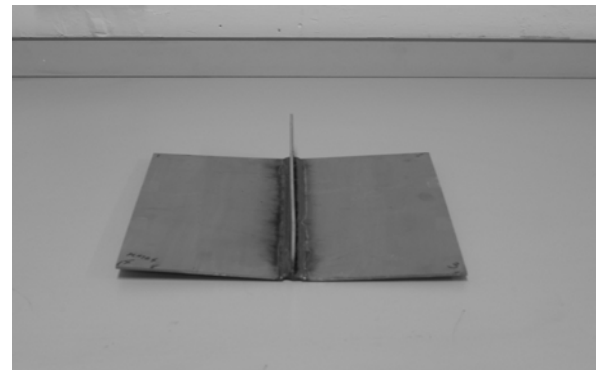


Şekil 12. 3 numaralı deney parçasının kaynak sonrası görünümü

##### 4 Numaralı deneyin sonucu

Bu deneyde, deney parçası serbest hareketli ve ilave ısı girdisi uygulanarak Tablo 2'deki koşullarda kaynak edilmiştir.

Kaynak işlemi sonrası deney parçasının görünümü Şekil 13'tedir.



Şekil 13. 4 numaralı deney parçasının kaynak sonrası görünümü

#### Deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Askeri sahada ileri teknoloji ürünü malzemelerin kullanımı, donanma gemilerinde kullanılan çeliklerin de çeşitlilik yelpazesini genişletmiştir.

Bu kapsamda, donanma gemilerinin inşasında, sahip olduğu ayırt edici özelliklerinden ötürü ostenitik paslanmaz çeliklerin kullanımı yaygınlaşmıştır.

İstanbul Tersanesi/Pendik'te, Aydın Sınıfı ma-yın karşı tedbir gemileri inşasında kullanılan ostenitik paslanmaz çeliklerin, kaynak işlemi sonrası meydana gelen distorsiyonları ve bu distorsiyonların düzeltme işleminin getirdiği maliyetlerin azaltılmasına yönelik olarak, kaynak işlemi esnasında ilave ısı girdisi uygulanmasının neticeleri bu çalışmada incelenmiştir.

Yapılan deneyler neticesinde elde edilen sonuçlar özetlenirse;

- Hali hazırda uygulaması olmayan, ostenitik paslanmaz çeliklerde kaynak esnasında ilave ısı girdisi uygulamasıyla, kaynak bölgesinde boylamasına çekme gerilmesi meydana getirmek, bu bölgede kaynaktan dolayı oluşan artık gerilmelerin plastik deformasyonuna sebep olmaktadır. Plastik deformasyon sonucu azalan çekme gerilmeleri, denge sağlamak üzere basma gerilmelerini de azaltmakta ve kritik ondüle oluşum gerilmesinden aşağıda tutmaktadır. Böylelikle ondüle şeklindeki distorsiyon oluşumu engellenebilmektedir.
- Yapılan deneylerde ilave ısı girdisi uygulaması, ondüle şeklindeki kaynak distorsiyonlarının oluşumunu önlemekte ancak açısız çarpılmaların oluşumunu engellememektedir. Açısız çarpılmalar günümüz sanayisinde de hareket kısıtlaması uygulanarak önlenebilmektedir. Buradan faydalanarak ostenitik paslanmaz çelikten parçadaki açısız çarpılmayı da engellemek üzere ilave ısı girdisi uygulamasıyla birlikte, hareket kısıtlaması uygulaması tatbik edilmiş böylelikle parçadaki distorsiyon oluşumları tamamıyla engellenmiştir.

## Kaynaklar

- Anık, S. ve Vural, M., (2000). *1000 Soruda Kaynak Teknolojisi El Kitabı*, 363, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Burak, Ya., (1979). Selection of the optimum fields for preheating plates before welding. *Automatic Welding (Avt. Svarka)*, **5**, 5–9, Russia.

- Daniewicz, S., (1993). Application of distortion control technology during fabrication of large offshore structures. *International Conference on Modeling and Control of Joining Processes*. Orlando, Florida.
- EN DIN 1.3964 (2003). Austenitic Stainless Steel part-1:plate, *Deutsches Institut für Normung*, Germany.
- Guan, Q., Brown, K. W. ve Guo, D., (1988). International patent specification No. PCT/GB88/00136, London, U.K.
- Guan, Q., Leggatt, R. H. ve Brown, K. W. (1988). Low stress, non-distortion (LSND) TIG welding of thin-walled structural elements. *The Welding Institute Research Report 374*. Abington, Cambridge, U.K.
- Guan, Q., Guo, D., (1987). Method and Apparatus for Low Stress and Non-Distortion Welding of Thin-Walled Structural Elements. Chinese Patent No.87100959.
- JP-A 5311138, (1993). method for controlling angular distortion, *Japan Patent Office*, Japan.
- JP-A-6018292, (1992). postweld thermal management process for controlling angular distortion of thick plates, *Japan Patent Office*, Japan.
- Masubuchi, K., (1980). *Analysis of welded structures*, Pergamon Press, London.
- Masubuchi, K., (1959). New approach to the problem on residual stress and deformation due to welding. *Transportation Technical Research Institute Report*, **8**, 1-12, New York.
- Michaleris, P., and DeBicari, A. (1997). Prediction of welding distortion. *Welding Journal*, **76**, 4: 172-179.
- Pattee, F. M., (1975). Buckling distortion of thin aluminum plates during welding. *Master's thesis*. MIT, Massachusetts.
- Penso, J. A. (1992). Development of a PCbased FEM model to predict weld distortion. *Master's thesis*. The Ohio State University, Columbus, Ohio.
- Satoh, K. ve Terasaki, T. (1976). Effect of welding conditions on residual stress distributions and welding deformation in welded structures materials. *Japan Welding Society*, **45**, 1, 42–53.
- SU-A-1066765, (1993). the thermal management process during welding to control welding distortion, *Soviet Patent Office*, Russia.
- Taniguchi, C. (1972). Out-of-plane distortion caused by fillet welds in aluminum. *Master's thesis*. MIT, Massachusetts.
- Terai, K., Matsui, S., Kinoshita, T., (1976). Study on Prevention of Welding Deformation in Thin-Skin Plate Structures. *Kawasaki Technical Review*, **61**: 61–66.
- Watanabe, M. ve Satoh, K., (1959). Fundamental study on buckling of thin steel plate due to bead-welding, *Japan Welding Society*, **27**, 6, 13–20.