

21856

FERRİTİK VE OSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİKLERİN KARBONLU ÇELİK İLE NOKTA KAYNAĞINDA KAYNAK
PARAMETRELERİNİN BAĞLANTININ ÇEKME-MAKASLAMA DAYANIMINA VE TANELERARASI KOROZYONA ETKİSİ

DOKTORA TEZİ

Y.Müh. Vural CEYHUN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28 Şubat 1992

Tezin Savunulduğu Tarih : 26 Haziran 1992

Tez Danışmanı : Prof. Selahattin ANIK

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Kutsal TÜLBENTÇİ

Prof.Dr. Öktem VARDAR

HAZİRAN 1992

ÖNSÖZ

1900'lı yılların başlarından itibaren otomotiv endüstrisinde özellikle otomobillerde ve demiryolu vagonlarında karoseri malzemesi olarak, inşaat sektöründe dekoratif amaçlarla, ayrıca uçak, gemi, kimya, gıda ve uzay endüstrilerinde kullanılan ferritik kromlu, ostenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklerin ve karbonlu çeliklerin elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmeleri büyük önem taşımaktadır. Bu endüstri dallarında benzer ya da farklı çeliklerin biraraya getirildiği konstrüksiyonlarda, kaliteli kaynak bağlantılarının oluşturulması için uygun kaynak parametrelerinin saptanması ve bağlantının çekme-makaslama dayanımı üzerine etkisi güncelliğini hala korumaktadır.

Bu boşluğu doldurmak amacıyla, yukarıda belirtilen çelik çiftlerinin elektrik direnç nokta kaynağında uygun kaynak parametrelerinin saptanması, çalışmanın temel konusu olarak seçilmiştir.

Böyle güncel ve son derece ilginç olan bir konuda çalışma olanağı veren, tekenmeyen enerjisi ile yönlendiren ve çalışmalarım süresince her konuda yardımcı olan muhterem hocam Sayın Prof.Selahattin ANIK'a şükranlarımı sunarım. Çalışmalarımı sürekli teşvik ederek manevi destek olan değerli hocalarım Sayın Prof.Dr.Ahmet Ulvi AVCI'ya, Prof.Dr. Levon ÇAPAN'a, Prof.Dr.Müzeyyen MARŞOĞLU'na, Prof.Dr. Ahmet TOPUZ'a ve Prof.Dr.Şadi KARAGÖZ'e, elektrik direnç nokta kaynağı deneylerimi gerçekleştirmek için fabrikalarında her türlü yardımı yapan ÇOŞKUNÖZ A.Ş. yetkililerine ve personeline, elektron mikrogroğraflerinin alınmasında yardımcı olan ŞİŞECAM Araştırma Merkezi Müdürlüğü'ne ve Sayın Jeoloji Y.Müh.Akif ÖZCAN'a, deneylerim sırasında büyük bir çabayla yardımcı olan Trakya Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü ve İ.T.Ü. Makina Fakültesi Makina Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Anabilim Dalı Öğretim Üye ve personeline, tezimin basımını büyük bir titizlikle yapan Trakya Üniversitesi Bilgisayar Araştırma ve Uygulama Merkezi Araştırma Görevlileri Sayın Ercan BULUŞ, Yıldırım BAYAZIT ve Servet ŞENYÜCEL'e teşekkürlerimi borç bilirim.

Bu çalışma Trakya Üniversitesi Araştırma Fonu tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	vii
SUMMARY	ix
BÖLÜM 1.GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.PASLANMAZ ÇELİKLER	3
2.1.Genel.....	3
2.2.Paslanmaz Çeliklerin Denge Diyagramları	4
2.3.Paslanmaz Çeliklerin Fiziksel Özellikleri	9
2.4.Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması.....	11
2.4.1.Martenzitik Kromlu Paslanmaz Çelikler.....	11
2.4.2.Ferritik Kromlu Paslanmaz Çelikler.....	13
2.4.3.Ostenitik Krom-Nikelli Paslanmaz Çelikler....	14
BÖLÜM 3.KARBONLU ÇELİKLER	16
3.1.Genel.....	16
BÖLÜM 4.KAYNAK KABİLİYETİ.....	19
4.1.Genel.....	19
4.2.Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti.....	20
4.2.1.Martenzitik Kromlu Paslanmaz Çeliklerin	
Kaynak Kabiliyeti.....	20
4.2.2.Ferritik Kromlu Paslanmaz Çeliklerin Kaynak	
Kabiliyeti.....	21
4.2.3.Ostenitik Krom-Nikelli Paslanmaz Çeliklerin	
Kaynak Kabiliyeti.....	23
4.2.3.1.Delta Ferrit.....	23
4.2.3.2.Krom Karbür Çökmesi ve Tanelerarası	
Korozyon.....	24
4.2.3.3.Sigma Fazı.....	27
4.3.Karbonlu Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti.....	27
BÖLÜM 5.ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI.....	30
5.1.Genel	30

5.2.Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Prensi ve Özellikleri.....	30
5.3.İsı Enerjisinin Oluşumu.....	32
5.3.1.Üretilen Isı enerjisinin Bilançosu.....	32
5.3.2.Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Direnç Faktörü.....	35
5.3.3.Kaynak Akımı ve Kaynak Süresi.....	36
5.3.4.Elektrod Kuvveti ve Kaynak Akımı.....	37
5.3.5.Yüzey Durumu.....	38
5.3.6.Malzemenin Fiziksel Özellikleri.....	38
5.4.Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Kullanılan Elektrodlar.....	38
5.5.Kaynak Noktasının Etüdü.....	41
5.5.1.Ergiyen Bölge (Kaynak Çekirdeği).....	42
5.5.2.İsının Tesiri Altında Kalan Bölge(ITAB).....	42
5.6.Paslanmaz Çeliklerin Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Üzerine Yapılan Çalışmalar.....	42
5.6.1.Genel.....	42
5.6.2.Feritik Kromlu Paslanmaz Çeliklerin Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Üzerine Yapılan Çalışmalar.....	43
5.6.3.Ostenitik Krom-Nikelli Paslanmaz Çeliklerin Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Üzerine yapılan Çalışmalar.....	45
5.6.4.Karbonlu Çeliklerin Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Üzerine Yapılan Çalışmalar.....	47
BÖLÜM 6.KONUNUN ÖNEMİ ve ÇALIŞMANIN PLANLANMASI.....	49
6.1.Konunun Önemi.....	49
6.2.Çalışmanın Planlanması.....	50
BÖLÜM 7.DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	51
7.1.Genel.....	51
7.2.Kullanılan Malzeme.....	51

7.3.Deney Parçalarının Boyutları.....	52
7.4.Deney Parçalarının Hazırlanması.....	52
7.5.Kaynak Makinası.....	53
7.6.Elektrodlar.....	54
7.7.Deneylerin Yapılışı.....	54
7.7.1.Elektrik Direnç Nokta Kaynağı İşlemi.....	54
7.7.2.Çekme-Makaslama Deneyi.....	55
7.7.3.Metalografik Çalışmalar.....	57
7.7.3.1.Işık Metal Mikroskobu ile İnceleme.....	57
7.7.3.2.Tarayıcı Elektron Mikroskobu ile İnceleme.....	57
7.7.4.Çekirdek Boyutlarının Ölçülmesi.....	57
7.7.5.Sertlik Deneyi.....	58
7.7.6.Temas Dirençlerinin Saptanması.....	58
7.7.6.1.Deney Parçalarının Yüzeylerinin Hazırlanması.....	58
7.7.6.2.Yüzey Pürüzlüklerinin Saptanması.....	59
7.7.6.3.Temas Direnci Değerlerinin Ölçülmesi...	60
BÖLÜM 8.DENEY SONUÇLARI ve İRDELENMESİ.....	61
8.1.Genel.....	61
8.2.Bağlantının Çekme-Makaslama Dayanımı.....	61
8.2.1.Kaynak Akımının Etkisi.....	61
8.2.2.Kaynak Süresinin Etkisi.....	71
8.3.Bağlantının Sertlik Dağılımı.....	77
8.4.Bağlantının İçyapı Özellikleri.....	91
8.5.Kaynak Parametrelerinin Çekirdek Boyutları Üzerine Etkisi.....	103
8.6.Çelik Çiftlerinin Temas Dirençleri.....	108
BÖLÜM 9.SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	111
KAYNAKLAR.....	114
ÖZGEÇMİŞ.....	121

ÖZET

Elektrik direnç nokta kaynağı, sağladığı hafiflik, kaynak noktası başına düşük işçilik maliyeti, yeterli düzeyde kaynak dayanımı, uygulama kolaylığı ve yüksek kaynak hızı nedenleriyle otomotiv endüstrisinde, uçak inşaatında, büro ve mutfak eşyalarının imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Özellikle son yıllarda, uzun ömürlü demiryolu taşıtlarının imaline yönelik projeler, farklı çeliklerin elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesinin önemini bir defa daha gündeme getirmiştir.

Konu ile ilgili literatür incelendiğinde, paslanmaz çelik-karbonlu çelik çiftinin elektrik direnç nokta kaynağı üzerine bir çalışma yapılmadığı saptanmıştır.

Literatürdeki bu boşluğu doldurmak amacı ile, hazırlanan çelik çiftlerine ait nokta kaynağı bağlantılarında kaynak parametrelerinin bağlantının çekme-makaslama dayanımına etkileri saptanmış ve kaynak bölgesinin tanelerarası korozyon davranışı incelenmiştir.

Bu çalışmada, deney malzemesi olarak 1 mm kalınlığında ferritik kromlu ve ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelik saclarla, karbonlu çelik saclar kullanılmıştır. Ferritik kromlu paslanmaz çelik-karbonlu çelik; ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelik-karbonlu çelik çiftleri, elektrot formu ve elektrot kuvveti sabit kalmak koşulu ve kaynak akım şiddeti ile periyodu değiştirilerek beş seri halinde elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmişlerdir. Bağlantının dayanım değerlerini saptamak amacı ile bütün seriler çekme-makaslama deneyine tabi tutulmuştur. ayrıca sertlik ve mikroyapı özellikleri ile çelik çiftlerinin temas dirençleri de araştırılmıştır.

Çalışmanın sonucunda bu tür bağlantılar için uygun kaynak parametreleri seçilerek tatminkar sonuçlar elde edilebileceği görülmüştür.

THE EFFECT OF WELDING PARAMETERS ON THE TENSILE-SHEAR STRENGTH AND THE FORMATION OF INTERCRYSTALLINE CORROSION IN THE SPOT WELDING OF FERRITIC AND AUSTENITIC STAINLESS STEELS WITH CARBON STEEL

SUMMARY

Despite their high cost, the main reason for the usage of stainless steels, which do not designate much more differences from other steels on the basis of mechanical properties, is that they have a great resistance to corrosion. Although this property is obtained with the presence of chromium as the main alloying element, it is enhanced with the addition of molybdenum and nickel (1).

When the stainless steel contain chromium more than 12 %, their strength to the high temperature increases with the increase of chromium content. Because of this property, they have used as steels which have resistance to creep at high temperatures (1,2).

In modern industries, their high strength to corrosion and oxidation for the working conditions in high temperatures the high mechanical and physical properties, the hot and cold formability and weldability and being unaffected from the corrosion and creep strength or mechanical properties of this property and their low cost are most important benefits of stainless steels (3).

The electric resistance spot welding of ferritic and austenitic stainless and carbon steels, which are used, beginning from the 1900's, especially for the carbody materials in automotive industry, for decorative aims in construction industry, as well as in aircraft, ship, chemistry, food and space industries have a great importance. In these industries, determination of the suitable welding parameters and the effect of these parameters on the tensile-shear strength of welded joints to obtain qualified welded joints are still important subjects for the constructions made with the same or different types of steel.

Electric resistance spot welding offers many advantages to the manufacturers. Especially during last decade, the projects for the production of long-life railway wagons have emphasized the importance of joining of different types of steel with electric resistance spot welding once more (80).

The usage of these steel pairs in automotive industry in Europe, USA and USSR have been the main factor for the ongoing scientific researches on spot welding of constructions made with stainless steels and carbon steels.

In this study, done for investigating the effects of welding parameters on the strength and corrosion properties of the spot welded joints were investigated to determine the welding parameters.

The ferritic chromium and austenitic chromium-nickel stainless steel and carbon steel sheets were used as the experiment materials. The ferritic chromium stainless steel-carbon steel and austenitic chromium-nickel stainless steel-carbon steel pairs were joined with the electric resistance spot welding keeping the electrode shape and the force constant while changing the welding current and period. For each selected welding current and period, five samples were welded. For determination of the tensile-shear strength of the joints, the tensile-shear tests were applied to all samples. In addition, the hardness and the microstructure properties as well the contact resistance of joints were investigated.

The ferritic chromium and austenitic chromium-nickel stainless steels used for this investigation are AISI 430 (X6Cr17) and AISI 304 (X5CrNi188) respectively, and the carbon steel are low carbon and unalloyed ones. After the experiment materials were cut in dimension of 1X30X100 mm, they were cleaned in ethanol of 96 %, and finished with a clean and cotton cloth for purifying the materials' surfaces from dirt, oils, etc.

An electric resistance spot welding machine with single arm, equipped with pneumatic pressure and electronic time and current units was used for the experiments.

The electrode force is measured with a manometer located on the bottom arm of machine, and the welding current was continuously controlled with a magnetic field measuring amperimeter.

In the experiments, the electrodes which have a truncated cone shape with 6 mm of tip diameter were used.

The electrode force was kept constant at 5 kN.

The welding times were selected as 5, 15 and 25 periods, and the squeezing and holding times were kept constant at 25 periods for all the samples.

The welding current was increased from 4.5 kA to 13.5 kA with the intervals of 1 kA.

According to the planned experiment program, five pairs of joints were obtained for each condition. The tensile-shear tests and the micro Vickers tests were applied to the first and second groups respectively. The nugget diameters of the third group of the joints were measured with a measuring microscopy, and the microstructure photographs of the fourth group were taken. By examining the grain boundaries of the fifth group with the scanning electron microscopy, the chromium carbide precipitation were investigated.

The best joints always exhibited regular, clean, columnar structures and showed only slightly indentation and no cavitation.

To determine the hardness distribution of joints, the hardness measurements are done at the base metal, Heat Affected Zone (HAZ) and weld metal.

To obtain the effect of welding currents on the nugget dimensions and tensile-shear strength of the welded samples, the nugget dimensions and their ratios were measured.

The contact resistance of experiment pieces at different surface conditions were measured in line with the principles given at IIW/IIS Doc. III-905-88, IIIG-126-88.

The results obtained may be listed as follows:

1. The tensile-shear strength of the joint increases, as the welding time and the welding current increase.

The maximum tensile-shear strengths were obtained at 25 periods of welding time and of 10.5 kA welding current.

2. Maximum tensile-shear strength values were obtained with the welding parameters for which

the nugget formation has been completed and this was verified by the nugget dimensions and the dimension rates.

3. Since nugget formation is not completed at short welding times and at low welding currents, the tensile-shear strengths of the joints are not sufficient, and a rupture of separation types were observed.
4. Beginning from certain welding conditions (e.g. after 8.5-9.5 kA of welding currents), it was determined that the intercrystalline corrosion was formed at the electric spot welded ferritic chromium stainless steel-carbon steel sheets and that this formation effects the tensile-shear strength of the joints in opposite way.
5. Above 9.5 kA of current value, an excessive splash at the interface a decrease at the tensile-shear strength of joint was observed for both ferritic chromium stainless steel-carbon steel and austenitic chromium-nickel stainless steel-carbon steel pairs.
6. At very high current values, the formation of excessive indentations on the surfaces and some significant decreases at the quality and the tensile-shear strength of the joints due to the splash at outer surfaces of the sheets were observed.

The beginning of splash at the outer surfaces for each group of steel pairs, was determined after 12.5 kA of current value.
7. Before tearing starts and the expulsion of metal occurs, so as to get a satisfactory welded spots, the proper welding current must be selected.
8. For the prevention of chromium carbide formation resulting in the intercrystalline corrosion, especially at the spot welding of the ferritic chromium stainless steel-carbon steel pairs, the stabilized types of ferritic chromium stainless steels are suggested.
9. The results of chemical analysis of the welding nugget, shows that the nugget is subjected to a chromium loss, and therefore it losses its

stainless property.

10. For both steel pairs, it was observed that the contact resistance of steel sheets surfaces of which were chemically prepared and then brushed, is considerably high. This provides a significant advantage for welding operation.



BÖLÜM I

1. GİRİŞ

Mekanik özellikler açısından diğer çeliklerden pek farklılık göstermeyen paslanmaz çeliklerin yüksek maliyetlerine karşın, uygulamada çok yaygın olarak kullanılmalarının ana nedeni, yüksek korozyon dayanımına sahip olmalarıdır. Bu özellik, esas alaşım elementi krom ile elde edilirse de, molibden ve nikel katkısı ile artırılmaktadır (1).

Paslanmaz çelikler % 12'den daha yüksek oranda krom içerdiklerinde, krom miktarındaki artışa bağlı olarak yüksek sıcaklıklara karşı dayanımları artmaktadır. Bu özellikten ötürü yüksek sıcaklıklarda sürünmeye karşı dayanıklı çelikler olarak kullanılmaktadırlar (1,2).

Günümüz endüstrilerinde yüksek sıcaklıkta çalışma koşullarında yüksek korozyon ve oksidasyon dayanımları, yüksek mekanik ve fiziksel özellikleri, sıcak ve soğuk işlenebilirlikleri, kaynak yapılabilir olması ve bu özelliğin korozyon ve sürünme dayanımını ya da mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilememesi ve maliyetlerinin düşük olması en önemli üstün yönleridir (3). 19. yüzyılın başlarından itibaren araştırma konusu olan ve dünya çelik piyasalarında yassı ve uzun ürünler şeklinde büyük bir payı elinde bulunduran paslanmaz çeliklerin, günümüzde 200'e yakın türü değişik amaçlar için endüstride yaygın uygulama alanı bulmuştur (4,5).

Düşük karbonlu yumuşak çelikler ise genellikle sac ya da levha şeklinde imal edilirler. Bileşimlerindeki toplam

alaşım elementi miktarı maksimum % 1 kadardır. Düşük oranda karbon içermeleri nedeniyle kolayca soğuk şekillendirilebilirler. Motorlu taşıtların yaklaşık % 50'sini oluşturan bu çeliklerden çok karışık şekillere deformasyonla kolayca getirilebilme ve yüzey düzgünlüğü olmak üzere iki önemli özellik istenir.

Günümüz endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan metalsel malzeme demir esaslı alaşımlardır ki, bunların içinde çelikler önemli bir yere sahiptirler. Çelikleri bu kadar önemli kılan özellik, çok çeşitli alaşım yapabilme olanağının yanı sıra, ısıt işlemler yardımıyla da farklı özellikler kazanabilmeleridir. Endüstri devriminden bugüne kadar özellikleri ve bileşimleri farklı yaklaşık 4000 çelik türü geliştirilmiştir. Isıt işlemler yardımıyla aynı çelikte elde edilen farklı özellikler de hesaba katılırsa ne denli geniş spektrumun ortaya çıktığı görülür.

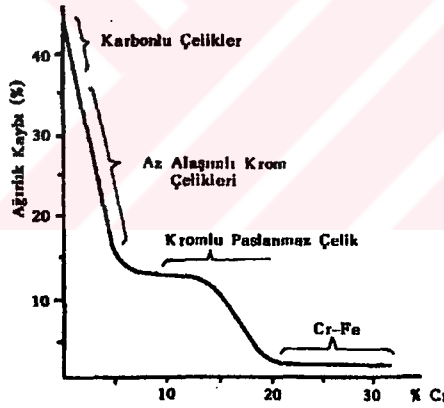
Konstrüksiyon tekniğinde önemli bir birleştirme yöntemi olan kaynak yöntemlerindeki gelişmeler sayesinde, otomotiv, kimya, boya ve uzay endüstrilerinde önemli miktarlarda kullanılan paslanmaz çeliklerle karbonlu çeliklerin, ayrı ayrı ya da birlikte oluşturdukları konstrüksiyonlarda, elektrik ark kaynağı, gazaltı kaynak yöntemleri, tozaltı ve plazma kaynağı ve elektron ışın kaynağı, laser kaynağı, elektrik direnç kaynağı gibi modern kaynak yöntemleri kullanılmaktadır (6,7).

BÖLÜM 2

2. PASLANMAZ ÇELİKLER

2.1. Genel

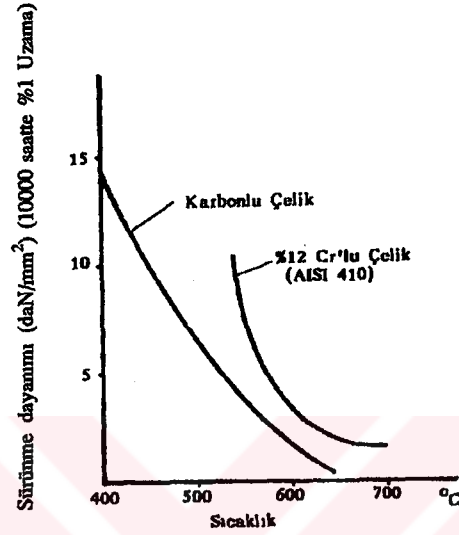
Paslanmaz çeliklerin en önemli özelliği paslanmamaları, başka bir deyişle oksidasyona ve korozyona karşı dayanımlarıdır. Bu özellik çeliğin içerdiğine %12'den fazla miktarda krom katılmasıyla elde edilir. Artan krom miktarına bağlı olarak ta yüksek sıcaklıklarda oksidasyon dayanımları artmaktadır (Şekil 2.1) (1).



Şekil 2.1 : Paslanmaz çeliklerde artan krom miktarına bağlı olarak yüksek sıcaklıklardaki oksidasyon dayanımı.

Çeliğin içeriğinde yalnız yüksek miktarda nikel bulunması paslanmayı önlerse de, krom ile birlikte bulunması özellikle asitli ortamlarda yüksek bir korozyon dayanımı sağlar. Nikel'in yanı sıra molibden katkısı da, çeşitli korozyon türlerine karşı çeliği korur. Ancak % 6.5'tan fazla molibden içeren paslanmaz çelikler ekonomik olarak üretilemezler(1).

Krom, çeliğin yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini korumasını sağlar. Bu nedenle kromlu paslanmaz çelikler, yüksek sıcaklıklarda sürünmeye karşı dayanımlı çelikler olarak ta kullanılmaktadır (Şekil 2.2) (1).



Şekil 2.2 : Paslanmaz çeliklerin yüksek sıcaklıklardaki sürünme dayanımı.

Günümüzde 200'e yakın türü bulunan paslanmaz çelikler, değişik amaçlar için endüstride oldukça yaygın uygulama alanı bulmuşlardır. Değişik endüstri dallarında kullanılan paslanmaz çelik türlerinin bazılarında krom yüzdesi % 30'a ulaşmakta, bazılarında da yeni elementler katılarak değişik özellikler elde edilmekte ve işlenebilme kolaylığı sağlanmaktadır. Örneğin, nikel ve molibden korozyon dayanımını, karbon-molibden-titranyum- alüminyum-bakır dayanımı artırıcı yönde etkilemekte, selenyum-kükürt ise işleme kabiliyetini geliştirmektedir (4).

2.2. Paslanmaz Çeliklerin Denge Diyagramları

Paslanmaz çeliklerin içeriğinde, paslanmazlık özelliği veren alaşım elementlerinden başka, çeliğe diğer fiziksel

ve metalurjik özellikleri sağlamak için katılan ya da kaçınılmaz olarak bulunan gayri safiyet elementleri ve karbon bulunmaktadır. Bu tür çeliklerdeki başlıca alaşım elementleri önem sırasına göre krom, nikel, molibden ve mangan'dır. Bunlardan öncelikle krom ve nikel içyapının ferritik ya da ostenitik olmasını belirler. Alaşım elementlerinin demirle katı çözelti oluşturması, atom çaplarının oranı ile kristal yapılarına bağlıdır. Bunlardan:

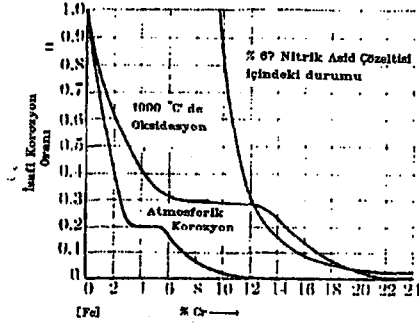
Cr, Al, Ti, Ta, Si, Mo, V, W

öncelikle alfa-demirinde çözündüklerinden ferrit yapıcılar,

Ni, C, Co, Mn, N

ise benzer nedenle ostenit yapıcılar olarak adlandırılır (8,9).

Bir metalin korozyon dayanımı, safiyeti artırılarak iyileştirilebilir, ancak saf metallerin düşük dayanımlı oluşu önemli bir dezavantajdır. Uygun alaşım elementleri kullanılarak, başka bir deyişle alaşımlandırma yoluyla hem dayanımın hem de korozyon dayanımının artırılması daha yaygındır. Bu tip alaşım elementlerinin örnekleri hemen tüm metaller için bulunabilir. Örneğin, yapı çeliklerinin atmosferik korozyona dayanımı düşük miktarda fosfor ve bakır ile artırılırken; yüksek miktarda silisyum dökme demirin aside karşı dayanımını; yaklaşık % 10 alüminyum ise demirin yüksek sıcaklık oksidasyonuna dayanımını artırmakta, ancak demirin gevrekleşmesine neden olmaktadır. Demire sınırlı korozyon dayanımı kazandırmak üzere değişik alaşım elementleri kullanılmaktadır. Bunların içinde kromun, tüm ortam koşullarında korozyon dayanımı sağlaması nedeniyle özel bir önemi vardır. Şekil 2.3'te üç farklı ortam koşulunda krom içeriği ile korozyon dayanımı arasındaki ilişki görülmektedir (10,11,12).

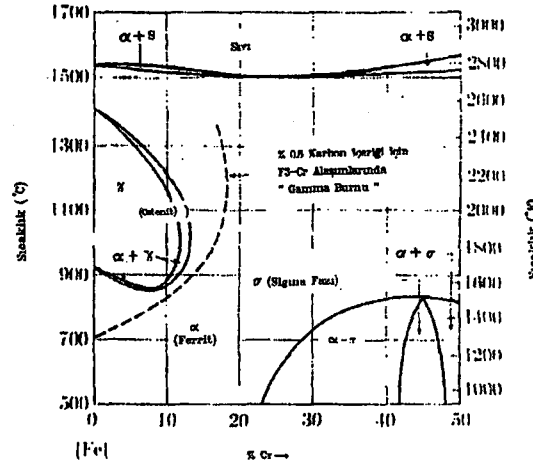


Şekil 2.3 : Üç farklı ortam koşulunda krom içeriği ile korozyon dayanımı arasındaki ilişki.

Demir-krom alaşımlarında, belirli miktarlarda krom bulunması çeliğin korozyon dayanımını büyük oranda artırır.

Martenzitik paslanmaz çelikler, ostenit alanından hızlı soğutma sonucu elde edilen ve maksimum % 12 krom içeren paslanmaz çelik türüdür. Reaksiyon sırasında ostenitin tamamı martenzite dönüşür. Yaklaşık % 0.6 (gamma burnu) kromlu paslanmaz çeliklerde, ostenit alanı % 18 krom miktarına kadar genişler. Bu tür çelikler de martenzit oluşumu ile sertleşebilen çelikler olup, krom miktarının artmasıyla korozyon dayanımı da yükselmektedir. Martenzitik paslanmaz çelikler, daha çok petrol endüstrisinde uygulama alanı bulan paslanmaz çelik türüdür (10).

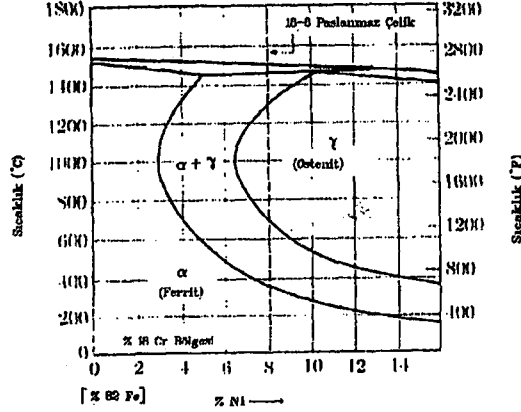
Demir-krom alaşımlarında, alaşıma paslanmazlık özelliği kazandıran krom miktarı arttıkça (uygulamada bu sınır % 13-25 kroma kadardır), Şekil 2.4'teki denge diyagramından da görüleceği gibi alaşım, ferrit alanına girer ve ferritik paslanmaz çelikler olarak adlandırılır (10,11).



Şekil 2.4 : Demir - krom denge diyagramı.

Ferritik paslanmaz çelikler ostenit-ferrit dönüşümü olmadığından ısıtılma işlemle sertleştirilemezler ve tavlanmış halde kullanılırlar. Dayanımlarını artırmak için genellikle imalatları sırasında soğuk sertleştirme uygulanabilir. Ferritik paslanmaz çelikler daha ucuz oluşları nedeniyle yüksek sıcaklık oksidasyonuna dayanımın önemli olduğu yerlerde ve otomotiv endüstrisinde kullanılmaktadır. Çok yüksek krom içeriklerinde görülen sigma-fazı, korozyon dayanımı ve tokluk üzerinde olumsuz etkiye sahip olduğundan hiç istenmez. ancak bu fazın sertliği, hem aşınma hem de korozyon sorunlarıyla karşılaşılacak otomobil motor supapları gibi uygulamalarda yararlı olmaktadır (10).

Demir-krom denge diyagramı, martenzitik ve ferritik paslanmaz çeliklerin doğasını anlamak için yeterlidir. Bu grubun en önemli ve değişik bir sınıfı olan ostenitik paslanmaz çelikleri tanımak için demir-krom nikel üçlü diyagramını ele almak gerekir (Şekil 2.5) (10).



Şekil 2.5 : Demir - krom - nikel üçlü diyagramı.

18-8 olarak adlandırılan standart ostenitik paslanmaz çelik, yaklaşık % 18 krom ve % 8 nikel içerir. Bu nedenle şekilde yalnızca %18 krom içeren kısmi denge diyagramı ele alınarak nikelin etkisini anlamak mümkündür.

Yüksek sıcaklıklarda % 18 krom içeren demir-krom alaşımına nikel ilavesi, ferrit fazından, önce iki fazlı bölgeye ve sonra da % 6'dan fazla nikel içermesi durumunda ise tamamen ostenit alanına doğru değişmeye neden olur. Bu denge ilişkisi, demir-krom-nikel üçlü diyagramında, yüksek nikel miktarlarında metastabilitenin varlığı ile açıklanabilir.

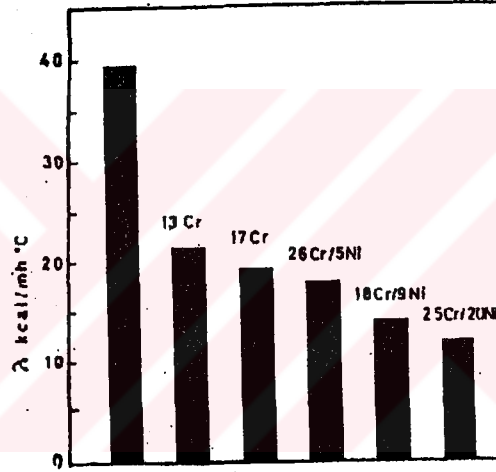
Şekil 2.5'e göre; 18-8 paslanmaz çeliğinin oda sıcaklığında tamamen ferritik yapıda olması gerektiği halde, uygulamada bu çelik, yüksek sıcaklıktan itibaren oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra ostenitik yapıda kalır. Sonuç olarak ostenitik paslanmaz çelikler, ostenit martenzite dönüşmediğinden su verilerek sertleştirilemezler.

Ostenitik paslanmaz çeliklerin en önemli özelliği, içeriklerinde bulunan yüksek nikel oranları nedeniyle hem korozyona hem de oksitlenmeye karşı dayanımlarının

yüksek oluşudur (10,11,12).

2.3. Paslanmaz Çeliklerin Fiziksel Özellikleri

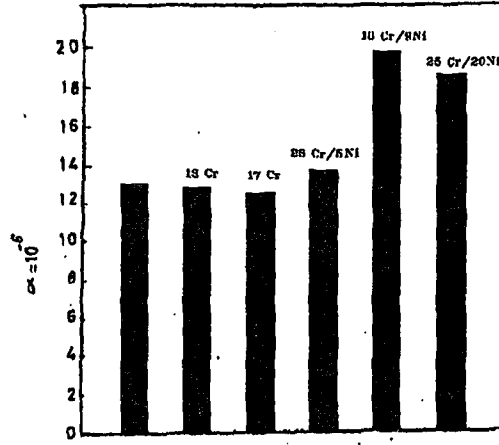
Paslanmaz çelikler ısı iletim katsayıları bakımından karbonlu çeliklerden farklıdır. Örneğin, ferritik kromlu paslanmaz çeliklerin ısı iletim katsayıları karbonlu çeliklerin yaklaşık yarısı kadardır. Ostenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklerin ise daha düşük olup, karbonlu çeliklerin üçte birine kadar düşmektedir (Şekil 2.6) (1).



Şekil 2.6 : Paslanmaz çeliklerle karbonlu çeliklerin ısı iletim katsayıları.

Bu da, kaynak yapılan bölgede sıcaklığın daha uzun süre kalacağını gösterir ve dolayısıyla de bazı zorlukların ortaya çıkmasına neden olur.

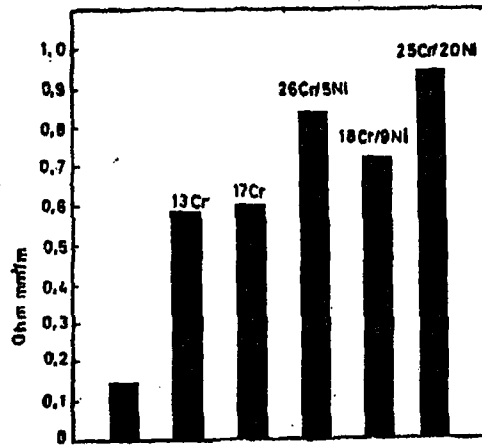
Ferritik kromlu paslanmaz çelikler, genellikle karbonlu çeliklerle aynı genleşme katsayısına sahiptir. Ostenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklerde ise bu değer, karbonlu çeliklerden yaklaşık % 50 daha fazladır (Şekil 2.7) (1).



Şekil 2.7 : Paslanmaz çeliklerle karbonlu çeliklerin ısı genleşme katsayıları.

Bu özellik yalnız kaynakçıyı değil tasarımcıyı da ilgilendiren önemli bir noktadır.

karbonlu çelikler düşük bir elektrik iletme direncine sahiptir. Paslanmaz çeliklerde ise bu değer 4-7 kat daha yüksektir (Şekil 2.8) (1,13,14,15).



Şekil 2.8 : Paslanmaz çeliklerle karbonlu çeliklerin elektrik direnç katsayıları.

Paslanmaz çeliklerle karbonlu çeliklere ait ve kaynak tekniği açısından önem taşıyan bu özelliklerin karşılaştırması (Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1 : Paslanmaz çeliklerle alaşımsız çeliklerin fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması.

Özellik	X8Cr17	X5CrNi189	St 37.3
Isı İletkenliği (J/cm s ° K)	0.25	0.15	0.50
Isıl Uzama Katsayısı(K ⁻¹)	11x10 ⁻⁶	16x10 ⁻⁶	12x10 ⁻⁶
Elektrik İletkenliği(Ωmm ² /m)	0.476	0.769	0.107

2.4. Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması

Endüstride çokça kullanılan paslanmaz çelik türleri 3 ana grup altında toplanmaktadır (16):

1. Martenzitik Kromlu Paslanmaz Çelikler,
2. Ferritik Kromlu Paslanmaz Çelikler,
3. Ostenitik Krom-Nikelli Paslanmaz Çelikler.

Tablo 2.2'de AISI ve DIN normlarına göre paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri verilmiştir.

2.4.1. Martenzitik Kromlu Paslanmaz Çelikler

Bu gruba giren paslanmaz çelikler % 11.5-18 krom içeren normal karbonlu çeliklerdir. Bu tür paslanmaz çelikler mangnetiktirler, zorluk göstermeksizin haddelenebilirler hatta düşük karbonlu türleri rahatlıkla işlenebilirler.

Çok iyi tokluğa sahiptirler, hava ve kimyasal etkilere

Tablo 2.2 : Endüstride kullanılan paslanmaz çelik türleri ve bileşimleri.

Çelik		Kimyasal Bileşim (%)				
Simgesi	Malzeme No	C	Cr	Mo	Ni	Diğer 1)
AISI	DIN	FERRİTİK VE MARTENZİTİK PASLANMAZ ÇELİKLER				
403	X6Cr13	<0.08	12.0-14.0	-	-	- Al 0.10-0.30
405	X6Cr13	<0.08	12.0-14.0	-	-	-
403	X10Cr13	0.08-0.12	12.0-14.0	-	-	-
410	X15Cr13	0.12-0.17	12.0-14.0	-	-	-
420	X20Cr13	0.17-0.25	12.0-14.0	-	-	-
420	X30Cr13	0.28-0.35	12.0-14.0	-	-	-
420	X38Cr13	0.35-0.42	12.5-14.5	-	-	-
420	X46Cr13	0.42-0.50	12.5-14.5	-	-	-
420	X45CrMoV15	0.42-0.50	13.8-15.0	0.45-0.60	-	V 0.10-0.15
430	X6Cr17	<0.08	15.5-17.5	-	-	-
430 Ti	X6CrTi17	<0.08	16.0-18.0	-	-	-
-	X4CrMoS18	<0.06	16.5-18.5	0.2-0.6	-	-
430 F	X12CrMoS17	0.10-0.17	15.5-17.5	0.2-0.6	-	-
431	X20CrNi172	0.14-0.23	15.5-17.5	-	1.5-2.5	-
OSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİKLER						
304	X5CrNi1810	<0.07	17.0-19.0	-	8.5-10.5	-
-	X5CrNi1812	<0.07	17.0-19.0	-	11.0-13.0	-
303	X10CrNiS189	<0.12	17.0-19.0	-	8.0-10.0	p<0.06,S0.15-0.35
304L	X2CrNi1911	<0.030	18.0-20.0	-	10.0-12.5	-
-	X2CrNi1810	<0.030	17.0-19.0	-	8.5-11.5	N0.12-0.22
321	X6CrNiTi1810	<0.08	17.0-19.0	-	9.0-12.0	TS5xC-0.80
347	X6CrNiNb1810	<0.08	17.0-19.0	-	9.0-12.0	Nb10xC-100 ²⁾
316	X5CrNiMo17122	<0.07	16.5-18.5	2.0-2.5	10.5-13.5	-
316L	X5CrNiMo17132	<0.030	16.5-18.5	2.0-2.5	11.0-14.0	-
-	X2CrNiMo17122	<0.030	16.5-18.5	2.0-2.5	10.5-13.5	Nb10xC-0.80
316Ti	X6CrNiMoTi17122	<0.08	16.5-18.5	2.0-2.5	10.5-13.5	TS5xC-1.00 ²⁾
316Cb	X6CrNiMoNb17122	<0.08	16.5-18.5	2.0-2.5	10.5-13.5	Nb10xC-1.00 ²⁾

1) Özel bir göstirim işareti kullanılmadığı hallerde P<0.045; S<0.030; Si<1.0; Ferritik ve Martenzitik çeliklerde Mn<2.0 olacaktır.

2) Tantal içeriği Niyobyum ile beraber gösterilmiştir.

1) Özel bir gösterim işareti kullanılmadığı hallerde P<0.045; S<0.030; Si<1.0; Ferritik ve Martenzitik çeliklerde Mn<2.0 olacaktır.

2) Tamam içeriği Niyobyum ile beraber gösterilmiştir.

karşı çok iyi dayanım gösterirler, kolaylıkla sıcak şekillendirilebilirler. Ostenitik krom-nikelli ve ferritik kromlu paslanmaz çelikler kadar olmasa da istenen sıcaklıklardan itibaren sertleştirildikten sonra çok iyi korozyon dayanımına sahip olurlar (17,18).

Martenzitik kromlu paslanmaz çeliklerin kritik soğuma hızlarının çok yavaş olması, yavaş soğuma halinde, örneğin sakin havada soğuma, martenzit oluşumuna neden olur. Martenzitik durumda, sertleşmiş olarak korozyon dayanımları oldukça iyidir.

815⁰C'ye kadar paslanmazlık özelliklerini yitirmezler, ancak uzun süre yüksek sıcaklığın etkisinde kalırlarsa hafif bir korozyon başlangıcı olur ve bu bakımdan endüstride sürekli olarak 700⁰C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kullanılmazlar (1).

2.4.2. Ferritik Kromlu Paslanmaz Çelikler

Bu tür çelikler paslanmaz çelik ailesinin önemli bir grubunu oluşturmaktadır. Alaşım elementi ilavesine bağlı olarak bünyelerinde % 16-30 krom içerirler, magnetiktirler, soğuk ya da sıcak haddelenebilirler. Ancak maksimum süneklik, tokluk ve korozyon dayanımları normalize hallerinde çok iyidir. Normalize halde akma dayanımları, karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerden % 50 daha yüksektir. Talaşlı şekillendirilebilme kabiliyetleri ve korozyon dayanımları ise martenzitik kromlu paslanmaz çeliklerden daha üstündür (1,4,13,14,19,20).

Ferritik kromlu paslanmaz çelikler, pahalı ve stratejik bir element olan nikel içermemeleri nedeniyle ostenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklerden daha ucuzdurlar ve

bu önemli bir avantajlarıdır. Ayrıca oldukça parlak ve dekoratif bir görünüşe de sahiptirler. Bu tür paslanmaz çelikler, dünya paslanmaz çelik tüketiminde ostenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklerin ardından % 30'luk bir pay ile ikinci sırayı almaktadırlar. Kolaylıkla soğuk şekillendirilebilmeleri nedeniyle levha ve sac haline getirildiklerinden, atmosferik korozyona iyi dayanım göstermelerinden ötürü, mimaride iç ve dış dekorasyonda, temizlik ve sterilizasyon maddelerinin korozif etkisine dayanımları ile toplu yaşam yerlerinde mutfak tezgah ve donanımlarının, yemek kaplarının çamaşır ve kurutma makinaları kazanlarının, gıda endüstrisinde depolama kaplarının, süt ve bira tanklarının imalatında kullanılır (7,8,9,17,21,22,23).

Ferritik kromlu paslanmaz çelikler, klorürlü ortamlardan kaynaklanan gerilmeli korozyon çatlamasına karşı yüksek bir dayanıma sahiptirler. Bu nedenle otomotiv endüstrisinde türlü ekzost boruları ile petro-kimya ve kimya endüstrilerinde kazanlar v.b. ısı iletimi uygulama yerlerinde kullanılırlar. ayrıca bünyelerine katılan alaşım elementleriyle geliştirilmiş türlerinde talaşlı şekillendirilebilme özellikleri iyileştirilerek paslanmaz makina elemanlarının imalatında da kullanılmaktadırlar (4,17,19,21,24,25,26,27).

2.4.3. Ostenitik Krom-Nikelli Paslanmaz Çelikler

Ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelikler, bileşiminde % 12-25 krom ve %8-25 nikel içeren ve paslanmaz çelik ailesinin en yaygın kullanım alanına sahip olan çeliklerdir. Nikel, kuvvetli ostenit yapıcı bir element olduğundan, bu çeliklerde katılaşma sırasında ortaya çıkan ostenit, oda sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda bile dönüşmeden kalır. Ostenit-ferrit dönüşümü olmadığından bu tür paslanmaz

Çelikler de su verme yoluyla sertleştirilemezler. Antimagnetik olan bu tür paslanmaz çeliklere korozyon dayanımını arttırmak için katılan alaşım elementleri ve etkileri řu şekilde sıralanabilir:

1. Çukur ve çatlaklardaki korozyonu önlemek için molibden katılması,

2. Kaynak edilmiş parçalarda tanelerarası korozyonu önlemek için karbon miktarının azaltılması ya da titanyum niyobyum ve tantalyum gibi stabilizasyon elementleri katılması.

3. Yüksek sıcaklıklarda korozyon dayanımını yükseltmek için krom ve nikel miktarının artırılması.

4. Gerilmeli korozyon çatlamasının önlenmesi için nikel miktarının artırılması.

Ostenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklerin korozyon dayanımları martenzitik kromlu ve ferritik kromlu paslanmaz çeliklerden daha yüksektir (1,4,13,14,17).

BÖLÜM 3

3. KARBONLU ÇELİKLER

3.1. Genel

Ek bir işlem gerektirmeden dövülebilen demir-karbon alaşımlarına çelik denir (C % 2). Çelikler genellikle sünek malzemelerdir. Tümüne sıcak, düşük karbonlularına soğuk olarak ta şekil verilebilir. Sertleştirme, ıslah etme gibi ısıt işlemler yardımıyla ve sünekliğin azalması karşılığında dayanımları büyük oranda arttırılabilir (10).

Kimyasal etkilere dayanıklılık ve imalat sırasında sertleştirme işlemi öngörülmeven konstrüksiyon çelikleridir. Kullanım yerine göre seçilmelerinde, öncelikle akma sınırının yüksekliği gözönünde tutulur. Bunun yanında yeterli süneklik ve gerektiğinde tokluk aranır. Bu arada sözkonusu çeliklerin en başta kaynak olmak üzere talaş kaldırma, soğuk şekil verme gibi bazı imal usulleriyle ilgili tenolojik özellikleri de büyük önem taşıyabilir (10,11).

Toplam çelik üretimi içinde en büyük paya sahiptirler. Alaşımsız ve çoğunlukla kitle çeliği olarak sıcak şekillendirmeden sonra normalleştirilmiş, bazen de soğuk şekil verilmiş durumda kullanılırlar. Bu çeliklerden özellikle çekme ve akma dayanımları gözönünde tutularak, yeraltı ve yerüstü inşaatı, köprü, depolama kabı, taşıt ve makina yapımı gibi değişik mühendislik alanlarında yararlanılır (10). Tüm karbonlu çeliklerin içyapılarında çelik üretimi koşullarından kaynaklanan, fakat alaşımlama amacıyla çelik bileşimine bilinçli olarak katılmamış krom, molibden, bakır, nikel gibi elementler katışkı olarak bulunabilir. Bunlar karbonlu

çeliğe, istenmeden ve rastlantı sonucu, kullanılan hammadde ve katkı maddelerinden girmektedir. Çelik bileşiminde bunlar için çoğunlukla, bir üst sınır belirtilmemiştir (10,11).

Tablo 3.1'den DIN nomuna göre karbonlu çeliklerin kimyasal bileşimleri verilmiştir.



Tablo 3.1 : Endüstride kullanılan Karbonlu Çelik türleri ve bileşimleri.

İşareti	Malzeme No	DIN/SEW	C	S	Mn	Cr	Ni	Mo	Akma N/mm ²	Çekme N/mm ²	Uzama (%)	Uygulama Alanı
Alaşımsız Çelikler												
US137-2	1.0036	1700	0.17	-	-	-	-	-	235	360-470	26	Genel Yapı Çelikleri
St 37-3	1.0116		0.17	-	-	-	-	-	275	430-440	22	
St 44-2	1.0044		0.21	-	-	-	-	-	355	510-630	22	
St 52-3	1.0570		0.20	<0.55	<1.60	-	-	-	-	-	-	
St 35	1.0308	1629	<0.18	-	-	-	-	-	240	340-440	25	Dikişsiz Boru
St 45.8	1.0405	17155	<0.21	<0.35	0.4-1.2	-	-	-	260	410-530	21	Kazan Borusu
H1	1.0345	17175	<0.16	<0.35	<0.40	-	-	-	230	340-440	-	Kazan Sacları
H IV	1.0445		<0.26	<0.35	<0.60	-	-	-	290	460-550	-	
C 22	1.0422	17200	0.18-0.25	0.15-0.35	0.30-0.60	-	-	-	360	490-640	22	Isılah Çelikleri
GS-C 25	1.0619	17245	0.18-0.23	0.30-0.50	0.50-0.80	<0.30	-	-	250	450-600	22	Sıcak Dayanımlı
TTS135	1.0356	SEW 680	<0.17	<0.35	<0.40	-	-	-	255	390-490	-	Düşük Sıcaklık

SEW = Stahl-Eisen - Werkstoffblatt
GL = Germanischer Lloyd (Alman Lloydu)

BÖLÜM 4

4. KAYNAK KABİLİYETİ

4.1. Genel

Kaynak kabiliyeti kavramı, herne kadar kesin ve niceliksel olarak tanımlanabilen bir özellik değilse de, çok karışık bir anlam taşır. Uluslararası Kaynak Enstitüsü (IIW/IIS)'nın IX. numaralı Kaynak Kabiliyeti Komisyonu kaynak kabiliyetini aşağıdaki gibi tanımlar:

Bir metalsel malzeme verilen bir yöntem ile bir amaç için, bir dereceye kadar kaynak yapılabilir diye kabul edilir. Uygun bir yöntem kullanarak kaynaklı metalsel bağlantı elde edildiği zaman, bağlantı yerel özellikleri ve bunların konstrüksiyona etkileri bakımından önceden belirlenmiş olan koşulları sağlamalıdır. (1,28).

Elektrik direnç kaynak yöntemiyle birleştirilecek parça, malzemenin türüne göre elektrik akımının geçişine az ya da çok olmak üzere bir özgül direnç gösterir ve bu elektrik direnci nedeniyle ısınır. Joule Kanunu'na göre parçada ısıya dönüşen elektrik enerjisi aşağıdaki eşitlikle tanımlanır (29).

$$Q=I^2Rt \quad (4.1)$$

Burada:

Q: Kaynak Yerinde Isıya Dönüşen Elektrik Enerjisi

I: Kaynak Akım iddeti (A),

R: Kaynak Yapılan Parçanın Toplam Direnci (Ohm),

t: Kaynak Süresi (s).

Bu eşitlikten, elektrik direnç kaynağında, kaynak kabiliyetinin malzemenin türüne bağlı olduğu görülür. ancak kaynak kabiliyetinin tam olarak tanımlanabilmesi için kaynak yapılacak malzemenin elektrik iletkenliğinin yanında, malzemenin ısı iletkenliği ile ergime noktasının da bilinmesine gerek vardır. Sözü edilen malzeme özelliklerinin de gözönüne alınmasıyla elektrik direnç kaynağında kaynak kabiliyeti:

$$S = \frac{10^4}{\alpha \lambda t_e} \quad (4.2)$$

ampirik eşitliğiyle tanımlanır. Burada:

- S: Kaynak Kabiliyeti Faktörü,
 α : Kaynak Yapılan Malzemenin Elektrik İletkenliği ($\Omega \text{mm}^2/\text{m}$)
 λ : Kaynak Yapılan Malzemenin Isı İletkenliği ($\text{cal}/\text{cm s}^\circ\text{C}$)
 t_e : Kaynak Yapılan Malzemenin Ergime Noktası ($^\circ\text{C}$)'dır.

4.2. Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti

4.2.1. Martenzitik Kromlu Paslanmaz Çelikler

Martenzitik kromlu paslanmaz çeliklerin kaynağında başlıca etkili element karbon'dur. Karbon miktarı ITAB'nin sertliği üzerinde etkilidir ve bu bir dereceye kadar kaynak yöntemiyle kontrol edilebilir. ITAB'nin sertliği artarsa soğuk çatlamaya duyarlılık artar ve tokluk azalır. Bu bakımdan düşük karbonlu martenzitik kromlu paslanmaz çelikler, bazı önlemler alınarak kaynak edilebilirler, yüksek karbon içerenler ise olabildiğince kaynak edilmemelidirler.

Düşük karbonlu martenzitik kromlu paslanmaz çeliklerde, martenzit daha az serttir ve dolayısıyla çatlamaya eğilimleri zayıftır. Normal olarak bu çelikler kaynaktan önce bir ön tavlama tabi tutulurlar ($200-240^\circ\text{C}$), burada uygulanan

öntav ITAB'de bir sertlik azalması oluturmaz, yalnızca oluşan ısı gerilmeleri azalttığından çatlama olasılığını azaltır. Kaynak bölgesinde daha tok bir yapı elde etmek ve kullanım sırasında parçalarda ortaya çıkabilecek çatlama olasılığını ortadan kaldırmak amacıyla parçalar hemen kaynaktan sonra, parça soğumadan bir gerilme azaltma tavlamasına tabi tutulmalıdır ($800-820^{\circ}\text{C}$).

Yüksek oranda karbon içeren (% 0.5-1.2) martenzitik kromlu paslanmaz çelikler, alınacak tüm önlemlere karşın sağlıklı bir şekilde kaynak edilemezler (14,15,30,31,32,33).

4.2.2. Ferritik Kromlu Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti

Ferritik kromlu paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyeti, martenzitik kromlu paslanmaz çeliklere göre çok daha iyidir. Bu tür paslanmaz çelikler; ark kaynağı, gazaltı kaynak yöntemleri, tozaltı kaynağı, elektrik direnç kaynağı yöntemlerinin yanı sıra modern kaynak yöntemleri ile de rahatlıkla kaynak edilebilmektedirler. Kaynakta çıkan sorunlar önceden bilindiğinde, üretim aşamasında kazandırılan özellikler sayesinde ve kaynak öncesi ile sonrasında alınacak önlemler ile ortadan kaldırılabilir (6,7,34).

Bu tür paslanmaz çelikler, su verme yoluyla sertleştirilemediklerinden, ITAB'de martenzit oluşumu tehlikesi meydana gelmez. Bu bakımdan martenzitik kromlu paslanmaz çeliklere göre daha kolay kaynak edilirler.

Ferretik kromlu paslanmaz çeliklerin kaynağında karşılaşılan önemli sorunlardan bir tanesi, 1150°C 'nin üzerindeki sıcaklıklarda tane irileşmesine karşı aşırı eğilimleridir. Kaynak sırasında ITAB'nin bir kısmı 1150°C 'nin üzerindeki bir sıcaklığa kadar ısınır ve dolayısıyla bu bölgede aşırı

bir tane irileşmesi oluşur. Bu tür çeliklerde ostenit-ferrit dönüşmesi oluşmadığından, ısıtıl işlem yardımıyla tane küçültmenin olanağı yoktur. Normal halde ferritik kromlu paslanmaz çelikler, çok ince taneli ve sünek bir yapıya sahiptirler. İri taneli bir yapı haline geçince gevrekleşirler ve çentik vurma dayanımı düşer, geçiş sıcaklığı yükselir. Tane irileşmesine mani olmak için bazı ferritik kromlu paslanmaz çeliklerin bileşimine bir miktar (% 0.035-0.25) azot ilave edilir.

Ferritik kromlu paslanmaz çeliklerin kaynağında ortaya çıkan diğer bir tehlike de, ITAB'de tanelerarası korozyona karşı aşırı duyarlıdır. Özellikle stabilize edilmemiş, yüksek krom ve karbon içeren türlerde karşılaşılan önemli bir sorundur. Bu olay ostenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklerde oluşanın tersine, ferritik türlerde 900°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda hızlı soğumada ortaya çıkmaktadır. Çünkü ostenitik yapıya göre ferritik yapı içinde krom karbür çökmesi daha yüksek oranlardadır. Ferritik kromlu paslanmaz çelikler kaynak edildiklerinde, dikiş komşu bölgeler tanelerarası korozyona karşı duyarlıdır. Çünkü krom karbürler önce çözünürler, soğuma sırasında mümkün olduğunca çabuk gerisin geriye tane sınırlarına partiler halinde çöklerler. Stabilize edilmemiş % 17 kromlu çeliklerden yapılan kaynaklı bağlantılar, kaynaktan hemen sonra 750°C'de tavlama işlemine tabi tutularak tanelerarası korozyona karşı dayanımlı hale getirilebilirler. Eğer bu tür çelikler titanyum ya da niyobyum ile stabilize edilmişlerse kaynaklı bağlantılar tanelerarası korozyona karşı ısıtıl işlemsiz halde bile dayanımlı olacaklardır.

Ferritik kromlu paslanmaz çeliklerin kaynağında yapılacak bir ön tavlama, martenzitik paslanmaz çeliklerin kaynağından

farklı metalurjik etkilere sahiptir. Bu tür çeliklerin kaynaklı bağlantıları yavaş soğutulduğu zaman tane irileşmesi ve tokluk azalması görülür. Bazı ferritik kromlu paslanmaz çelikler de tane sınırlarında martenzit oluşumuna eğilimlidirler. Bu çeliklere uygulanan ön tavlama ITAB'de çatlama tehlikesini ortadan kaldırır ve kaynaktan sonra doğan gerilmeleri sınırlar. Ön tavlama sıcaklığı, bileşime, istenen mekanik özelliklere, kalınlığa ve artık gerilmelere bağlı olarak saptanır. Öntav sıcaklığı normalde 150-250°C arasında uygulanır.

Kaynaktan sonra 750-850°C'lik bir tavlamanın ardından hızlı bir soğutma, bu çeliklerde ITAB'nin sünekliğinin ve tanelerarası korozyona dayanımının artmasına yardımcı olur.

Kaynak edilmiş bağlantılarının soğuk şekillendirilmesi ve zorlanması 300-400°C'lik bir tavlamadan sonra yapılmalıdır. Çünkü bu çeliklerin şekil değiştirme kabiliyeti bu sıcaklıkta hissedilir şekilde artmaktadır (6,7,14,15,24,30,31,32,33).

4.2.3. Ostenitik Krom-Nikelli Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti

Ostenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyetlerini etkileyen fiziksel özelliklerinin yanında bir dizi metalurjik etken de bu tür çeliklerin kaynağında önemli rol oynar. Bunlar delta ferrit fazının oluşumu, tanelerarası korozyona duyarlık, gerilmeli korozyona duyarlık ve sigma fazının oluşmasıdır (14,35,36).

4.2.3.1. Delta Ferrit

Ostenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklerin üretimlerinde, sıvı halden itibaren katılaşma başlayınca, ostenit ve delta-

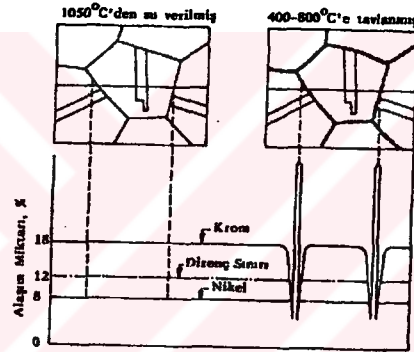
ferrit taneleri oluşmaya başlar. Bu ferrit, ostenitin dönüşümü sonucunda ortaya çıkan ferritten farklıdır. Bu faz, krom ve ferriti dengeleyen elementler yönünden zengin, nikel ve osteniti dengeleyen elementler yönünden fakirdir. Bu fazın oluşumunu çelik üreticilerinin istemediği bir durumdur. Çünkü malzemenin sıcak şekillendirilmesini zorlaştırır ve malzemede çatlakların oluşumunu teşvik eder. Bu fazın sürekli olarak tane sınırlarında bulunması korozyon dayanımını azaltır. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda uzun süre delta-ferrit fazıyla karşı karşıya kalınması sonucunda da malzemenin dayanımını ve şekillendirilebilme kabiliyetini azaltıcı yönde etkileyen sert ve gevrek sigma fazının oluşumu gibi sorunlarla karşılaşılır.

4.2.3.2. Krom Karbür Çökelmesi ve Tanelerarası Korozyon

Ostenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklerin kaynağında ortaya çıkan ikinci bir sorun da, özellikle 18/8 çeliği gibi bazı krom-nikelli çeliklerin 450-850°C sıcaklık aralığındaki bir sıcaklıkta uzun süre kalmalarında oluşan krom karbür çökelmesi eğilimidir. Bu çelikler, üretimleri sırasında krom karbürün ostenit içerisinde çözündüğü 1100°C'den itibaren hızla soğutulurlar. Bu şekilde bu elementlerin çökelme tehlikesi ortadan kalkmış olur ve oda sıcaklığında karbonun difüzyon hızı çok düşük olduğundan, kullanım sırasında oluşma olanağı yoktur. Sıcaklığın 450°C'nin üzerine çıkmasıyla karbonun difüzyon hızı, karbonu tane sınırlarından dışarıya çıkartacak derecede artar. Tane sınırlarında biriken karbon, kroma karşı olan yüksek ilgisinden (affinitesinden) dolayı bu bölgede krom ile birleşerek krom karbürü oluşturur $((Fe,Cr)_{23}C_6)$. Oluşan krom karbürün ağırlık olarak % 90'ını krom oluşturduğundan,

tane sınırlarında bulunan çok az karbon bile ostenit tanelerinin çevresindeki krom miktarını aşırı derecede azaltır (Şekil 4.1) (1,10,14,37,38,39,40).

Bunun sonucu olarak melzeme korozif bir ortamda bulunduğunda, kromca zayıflamış olan tane sınırlarında korozyon oluşur. Bu şekilde ortaya çıkan tenelerarası korozyon tüm malzemeyi çok kısa bir zamanda kullanılmaz hale getirir. Çeliğin karbon içeriği arttıkça bu olay şiddetlenir.



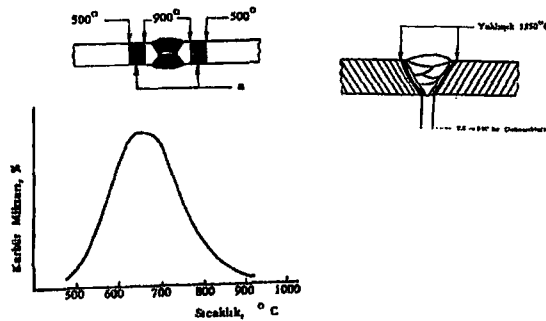
Şekil 4.1 : Paslanmaz çeliklerde krom içeriğine bağlı olarak kromkarbür çökmesi.

Tanelerarası korozyonu önlemenin en etkin yolu çeliğin stabilizasyonu olarak adlandırılır. Bu durum, karbonun kroma karşı olan ilgisinden daha yüksek bir ilgiye sahip bir elementin çeliğin bileşimine katılmasıyla gerçekleştirilir. Bu şekilde çeliğin bileşimindeki karbon ile bu yeni element karbür oluşturur ve dolayısıyla içyapının bazı bölgelerinde ortaya çıkan krom azalması olayı oluşmaz. Stabilizasyon için ilave edilen elementler titanyum, niyobyum ve tantalum'dur. Bu elementlerin karbürleri, tane sınırları boyunca değil, ostenit taneleri içerisinde, ince zerreler halinde dağılmış olduklarından, çeliğin mekanik özelliklerinde

de bir değişiklik oluşturmaz. Stabilizasyonun gerçekleşebilmesi için ilave edilen titanyumun karbonun dört katı, niyobyumun sekiz-on katı, tantalyumun onaltı katı olması gereklidir (1,10,12).

Stabilize edilmiş çelikler de tanelerarası korozyona karşı tam anlamıyla dayanıklıdır denilemez. Çünkü niyobyum, titanyum ve tantalyum karbürler 1300°C 'nin üzerindeki sıcaklıklarda zler ve karbon serbest kalarak krom karbürü oluşturabilir. Bu sıcaklığa kadar erişen bölge çok dar bir alan olduğu için ergime çizgisine yakın bir yerde, çok dar bir alan korozyona karşı dayanımını kaybeder. Bu olaya bıçak izi etkisi ya da korozyonu adı verilir (şekil 4.2) (1,10,12).

ITAB ya da esas metalde krom karbür zelmesinin oluştuğu hallerde, eğer parçanın boyutları ve konstrüksiyonu uygun ise, parça 1100°C 'ye kadar tavlanıp su içinde hızla soğutulursa, yüksek sıcaklıkta ostenit içerisinde çözülmüş bulunan karbürler hızlı bir soğuma sırasında tekrar oluşamazlar. Ancak, böyle bir ısıl işlemin uygulanması kolay olmaya-bilir. Bu nedenle, krom karbür çökelmesine eğilimli $\%0.03$ 'ten fazla karbon içeren ostenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklerin kaynağında, kaynakçının kaynak sırasında alacağı en iyi nlem, dikişi çektikten hemen sonra ıslak bir bez ya da stp ile hızla soğutması olarak tavsiye edilir (1,10).



şekil 4.2 : Stabilize edilmiş paslanmaz çeliklerde bıçak izi korozyonu.

4.2.3.3. Sigma Fazı

Ferritik kromlu paslanmaz çeliklerde görülmesinin yanısıra, %9'dan daha az nikel içeren ostenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklerde kaynak bölgesinde sigma fazının oluşması bu tür çeliklerde de kaynak kabiliyetini olumsuz yönde etkiler. 550-925⁰C sıcaklık aralığında oluşan sert, gevrek metallere bileşik olan sigma fazının (800-1000 HV) oluşabilmesi için ostenitik yapı içinde bir miktar da ferrit bulunması gerekir. Soğuk şekil değiştirme, niyobyum, molibden, silisyum gibi elementlerin varlığı, sigma fazının oluşumunu teşvik eder. Sigma fazının bulunması, çeliğin uzama, büzülme ve çentik vurma dayanımını düşürdüğünden varlığı istenmez. Karbür çökmesini yok etmek için uygulanan ısıtma işlemi sigma fazının da yok olmasını sağlar. ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelik daha önceden bir homojenleştirme tavlama işlemine tabi tutulmuş ve içindeki ferrit miktarı %6.5'in altına düşürülmüşse kaynak bölgesinde oluşacak sigma fazı çentik vurma dayanımının düşmesine neden olmaz. Burada ferrit miktarı az olduğundan, ostenitik yapı içerisinde ağ şeklinde değil, izole edilmiş adacıklar halinde bulunur. Bu şekilde oluşturulan sigma fazı, yapıya bir süneklik kazandırmaktadır. Tavlama işlemi durumunda % 7-8'den daha az ferrit içeren kaynak bölgesi, sigma dönüşümü ile az bir gevreklik kazanır. Bu da uygulamada önemli bir özelliktir. Eğer yapıda sigma fazı oluşmuşsa, bu faz 950-1050⁰C sıcaklık aralığında belirli bir süre tavlama ve suda soğutma ile giderilir. (10,14).

4.3. Karbonlu Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti

Alaşımız yapı çeliklerinde (karbonlu çeliklerde) kaynak kabiliyeti kavramı aşağıdaki durumları içerir:

1. Kaynak metalinde oluşan sıcak çatlaklar, gözenekler ve diğer kaynak hatalarının oluşumuna eğilim.
2. Isının tesiri altında kalan bölgede (ITAB) sertleşmeye ya da martenzit oluşumuna eğilim (bu eğilim özellikle dikişaltı çatlaklarının oluşma olasılığını arttırır),
3. Gevrek kırılma tehlikesi.

Sıcak çatlaklar, gözenekler ve diğer kaynak hatalarının kaynak metalinde oluşma eğilimi; yalnız esas metale tabi olmayıp aynı zamanda önemli miktarda kaynak metali ile de ilgilidir (1).

Kaynak açısından en önemli nokta bazı tür çeliklerde görülen yüksek sıcaklıktan itibaren hızlı soğuma sonucunda ortaya çıkan sertleşmedir. Kaynak işleminde genellikle metal önce ergime sıcaklığının üstünde bir sıcaklığa kadar ısınmakta sonra da soğumaktadır. Yapılan deneyler ve ölçümler kalın bir çelik parça üzerinde kaynak bölgesinin soğuma hızının yüksek sıcaklığa kadar ısıtılmış ve suya atılarak soğutulan bir parçanın soğuma hızına eşdeğer olduğunu göstermiştir. Bu bakımdan belli bir miktarın üstünde karbon ve alaşım elementi içeren çeliklerin kaynak bölgesinde böyle bir sert ve gevrek yapının ortaya çıkacağı açıkça görülebilen bir olaydır.

Uluslararası Kaynak Enstitüsü (IIW/IIS)⁽¹⁾ nün IX.numaralı Kaynak Kabiliyeti Komisyonu, çatlamaya karşı bir emniyet olarak ITAB'de sertliğin 350 Hv'ni aşmamasını önermektedir. Sertleşme özelliğine sahip çelikler halinde ITAB'nin sertliğini düşürmek için en emin yol parçaya kaynaktan önce bir ön tavlama uygulamak ve bu sıcaklık derecesinde kaynağı yapmaktır. Bu şekilde soğuma hızı da, kritik soğuma hızından daha yavaş bir hıza düşürülmektedir. Bazı araştırmacılar

tarafından önerilen ikinci bir yöntem de, parçaya kaynaktan sonra bir normalizasyon tavlaması uygulamaktır. Bu şekilde parça normalize edilmiş olduğundan ITAB'de martenzite rastlanılmaz (1).

Kaynakta, çeliğin sertleşme eğilimini belirten bir değer sayısının bulunması, buna bağlı olarak uygulanacak öntav sıcaklığını belirten bir eşitliğin elde edilmesi için birçok teorik ve uygulamalı çalışmalar yapılmıştır. Bütün bu çalışmalara dayanarak uygulamada çok kolay bir biçimde sonuca giden bir çözüm geliştirilmiştir. Karbon eşdeğeri olarak adlandırılan bu çözümde, çeliğin bileşiminde var olan alaşım elementlerinin miktarları bir eşitlikte yerlerine konularak bir değer hesaplanır ve bu değere bağlı olarak ta öntav sıcaklığı seçilir.

Bir yapı çeliğine uygulanacak öntav sıcaklığını karbon eşdeğeri ile belirten birtakım eşitlikler varsa da, pratikte hiç eşitlik kullanmadan aşağıdaki tavlama değerleri uygulanmaktadır (1).

Karbon Eşdeğeri (%)	Öntav Sıcaklığı (° C)
0.45 ' ten küçük	Normal atmosfer koşullarında gerek yoktur.
0.45 - 0.60	100 - 200
0.60 ' tan büyük	200 - 350

1) IIW: International Institute of Welding

IIS: Institut International de la Soudure

BÖLÜM 5

5. ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI

5.1. Genel

Elektrik direnç nokta kaynağı, yaklaşık 3 mm kalınlığa kadar olan aynı kimyasal bileşimdeki sac ve levhaların birbiri üzerine bindirilerek birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılır. Nadiren 6 mm ve daha kalın sacların birleştirilmesinde de kullanılır. Bununla birlikte ikiden daha fazla sac levhanın, bileşimi ve kalınlıkları farklı sacların ve başka bir metal ile kaplanmış sacların birleştirilmesinde de kullanılır (29,41,42).

Yöntemin diğer kaynak yöntemlerine göre en önemli üstünlükleri;

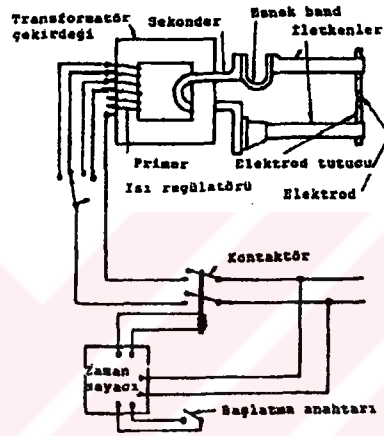
1. Yüksek hızlı olması,
2. İnce sac ve levhaların birleştirilmesinde deformasyona neden olmaması,
3. Yüksek üretim kapasitesindeki birleştirme hatlarında kolaylıkla kullanılabilmesi,
4. Rijit ve esnek otomasyona elverişli olmasıdır (43).

5.2. Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Prensipleri ve Özellikleri

Elektrik direnç nokta kaynağı, elektrodlar arasında tutulan iş parçalarından geçen elektrik akımına karşı, iş parçalarının gösterdiği dirençten sağlanan ısı ve aynı zamanda basıncın uygulanmasıyla oluşturulan bir kaynak yöntemidir. Ayrıca bir dış ısı kaynağı yoktur. Isı, kaynak edilecek bölgelerde oluşur ve basınç kaynak makinasındaki

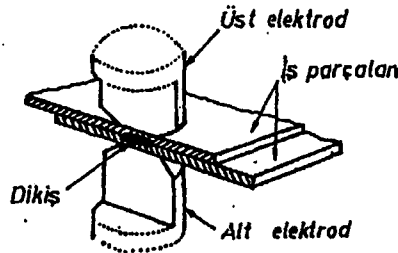
elektrodlar ya da çeneler aracılığıyla uygulanır. Genellikle kaynak işleminde ilave hiçbir madde kullanılmaz (44,45).

Kaynak için gerekli akım, yüksek gerilim ve düşük akım şiddetindeki elektrik gücünü, düşük gerilim ve yüksek akım şiddetine çeviren akım menbaından sağlanır. Gerekli basınç ya da elektrod kuvveti ise, hidrolik, pnömatik ya da mekanik donanımlarla gerçekleştirilir (Şekil 5.1) (42,46,47,48).



Şekil 5.1 : Elektrik direnç nokta kaynağı makinasının prensip şeması.

Oluşan kaynak dikişinin boyut ve şekli ise, elektrodların boyut ve şekli ile sınırlıdır (Şekil 5.2.).



Şekil 5.2 : Elektrik direnç nokta kaynağında oluşan kaynak dikişinin şekil ve boyutu.

Elektrik direnç nokta kaynağı, sağladığı hafiflik, kaynak noktası başına düşen işçilik maliyeti, yeterli düzeyde kaynak dayanımı, uygulama kolaylığı ve yüksek kaynak hızı nedenleriyle otomotiv endüstrisinde, uçak inşaatında, büro ve mutfak eşyaları imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrik direnç nokta kaynağı, ergitme kaynağı ve sert lehimleme yöntemleriyle, işlem süresi ve bu süre içinde birleşme bölgesine verilen ısı girdisi açısından karşılaştırıldığında, distorsiyonların ve renk bozulmasının en az düzeyde olması ve içi yapıdaki değişmelerin oldukça dar bir alanda kalması gibi üstünlüklere sahiptir (43,49).

5.3. Isı Enerjisinin Oluşumu

Kaynak işleminde ısı enerjisi, Joule Yasası'na göre oluşmaktadır (29).

$$Q=I^2R_t t_k \quad (5.1)$$

Burada:

Q: Kaynak İşlemi Sırasında Isıya Dönüşen Elektrik Enerjisi

I: Kaynak Akım Şiddeti (A),

R_t : Kaynak Akımı Devresindeki Toplam Direnç (Ohm),

t_k : Kaynak Süresi (s)'dir.

5.3.1. Üretilen Isı Enerjisinin Bilançosu

Elektrik direnç nokta kaynağında üretilen ısı enerjisi, biri kaynak noktasında oluşan (Q_1), diğeri de elektrodalarda oluşup noktaya transfer olan (Q_2) enerjileri toplamıdır.

$$Q_1+Q_2=I^2R_t t_k \quad (5.2)$$

Diğer taraftan üretilen bu ısı enerjisinin bir kısmı

(Q3) kaynak noktasının oluşumunda tüketilirken, diğer bir kısmı da ısı transferi yoluyla parçanın içine ve çevreye (Q4) yayılır. Böylece ısı enerjisi bilançosu;

$$Q_1+Q_2=Q_3+Q_4 \quad (5.3)$$

şeklinde yazılabilir(50,51).

Noktanın içinde tüketilen ısı enerjisi:

$$Q_3=G((C_1T_1+C_2T_2)+(C_3+C_4)) \quad (5.4)$$

şeklinde, noktadan transfer edilen ısı enerjisi ise:

$$Q_4=t_k l_t (\lambda_1 T_1 + \lambda_2 T_2) \quad (5.5)$$

şeklinde yazılabilir.

Bu eşitliklerde:

G : Kaynak Çekirdeğinin Kütlesi (g),

C_1, C_2 : Birleştirilen Malzemelerin Özgül Isıları (J/g⁰K),

$T_1 T_2$: Birleştirilen Malzemelerin Ergime Sıcaklıkları (⁰K),

$C_3 C_4$: Birleştirilen Malzemelerin Gizli Ergime Isıları(J/g⁰K),

λ_1, λ_2 : Birleştirilen Malzemelerin Isı İletim Katsayıları(J/sm⁰K),

t_k : Toplam Kaynak Süresi (s),

l_t : Birleştirilen Parçanın Toplam Uzunluğu (m)'dir.

Kaynak çekirdeğinin kütlesi:

$$G=Vd \quad (5.6)$$

eşitliğiyle saptanır.

Burada:

V: Kaynak Çekirdeğinin Hacmi (cm³),

d: Birleştirilen Malzemenin Özgül Ağırlığı (g/cm³)'dir.

Çekirdek çapı d_n (mm) ve çekirdek yüksekliği h_n (mm) olmak üzere:

$$V = \frac{4}{3} \pi \left(\left(\frac{d_n}{2} \right)^2 \left(\frac{h_n}{2} \right) \right) \quad (5.7)$$

yazarak:

$$G = \left(\frac{4}{3} \right) \pi \left(\left(\frac{d_n}{2} \right)^2 \left(\frac{h_n}{2} \right) \right) d \quad (5.8)$$

eşitliği elde edilir (52).

Diğer taraftan çekirdek çapı ve yüksekliği, her iki malzeme kalınlığı da aynı olmak koşuluyla e (mm) sac kalınlığına:

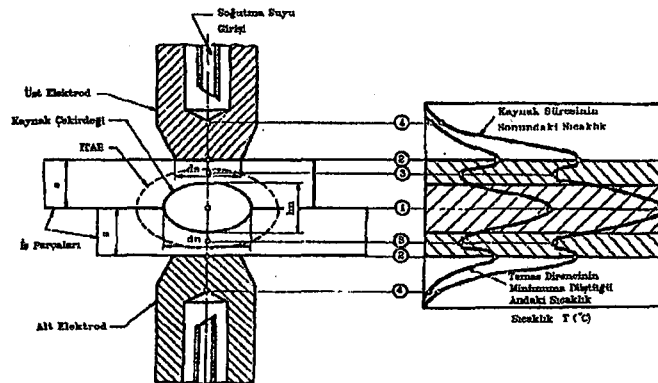
$$d_n = (4-6) \sqrt{e} \quad (5.9)$$

ve,

$$h_n = (1-1.6) e \quad (5.10)$$

ampirik eşitlikleriyle bağlıdır (7).

Kaynak çekirdeğini oluşturan Q3 ısısının kaynak bölgesindeki dağılımı ve sıcaklık aralığı Şekil 5.3'te görülmektedir.



Şekil 5.3 : Kaynak çekirdeğini oluşturan ısısın, kaynak bölgesindeki dağılımı ve sıcaklık aralığı.

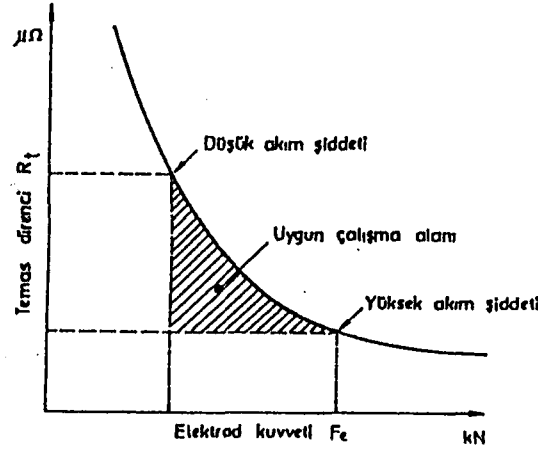
5.3.2. Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Direnç Faktörü

Yöntemde kaynak ısını oluşturarak elektriksel direnç R_t , kaynak akımının geçtiği devre üzerinde karşılaştığı dirençlerin toplamıdır ve elektrod-malzeme, malzeme-malzeme çiftleri arasındaki temas dirençleri ile kaynak yapılan malzemelerin ve elektrodların dirençlerinden oluşmaktadır (29).

Kaynak akım yolu üzerinde bulunan kablo ve diğer bağlantı elemanlarının dirençleri, çok küçük oldukları için gözardı edilmektedir.

Kaynak işleminde en düşük ısı, oldukça düşük özgül dirençleri ve suyla soğutulmaları nedeniyle elektrodlarda oluşmaktadır. Malzemelerin kendilerinde oluşan ısı biraz daha fazla olmasına karşın, bu ısı, malzemelerin yüzeyinden suyla soğutulan elektrodlar aracılığıyla transfer olur. Malzeme-elektrod çiftlerinin temas noktalarında oluşan ısı da yüksetir. Ancak yüksek elektrod basınç kuvveti temas direncini azalttığından, ayrıca oluşan ısının bir kısmı da soğutma suyuna aktarıldığından, bu ısı miktarı sınırlı kalmaktadır. Kaynak işleminde en yüksek ısı malzeme-malzeme çifti arasındaki temas direncinde oluşmakta ve kaynak çekirdeğinin oluşması için gerekli ilk sıcaklığı vermektedir (29,53,54).

İki yüzey arasındaki temas direnci ise, birleştirilecek malzemelerin yüzey pürüzlülüğünden ileri gelen daralma ve yüzey film dirençlerinin toplamıdır. Temas direnci, akım yoğunluğuna, elektrod kuvvetine, sıcaklığa ve birleştirilecek malzemelerin deformasyon özelliklerine bağlı olarak akım süresinin yaklaşık 1/4'ü kadar bir süreyle etkili olur. Bu süre içinde maksimum değerine ulaşır ve hızla azalır(Şekil 5.4) (50).



Şekil 5.4 : İki yüzey arasındaki temas direnci değerinin değişimi.

Bu davranışın nedeni, kaynaktan önce parça ve elektrodların yüzeyindeki mevcut pürüzlülük ve yüzey filmidir. Hızla yükselen temas direncinin ısı etkisi ve elektrodların uyguladığı kuvvet sonucu pürüzlülük düzelir ve yüzey filmi de parçalanır. Böylece kaynak akımı, elektrod çapına kadar büyüyen bir temas kesitinden dirençle karşılaşmadan akmaya başlar. Temas dirençleri de, kaynak çekirdeğinin oluşması için gerekli ilk ısıyı vererek görevini tamamlamış olur (29).

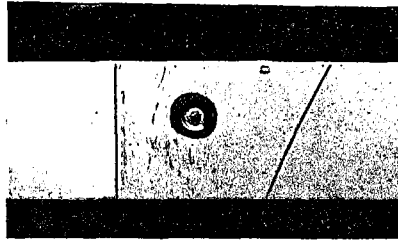
5.3.3. Kaynak Akımı ve Kaynak Süresi

Belirli bir elektrod kuvveti, malzeme türü ve kalınlığı için gerekli ısı miktarını sağlamak üzere değişik kaynak akımı ve süresi seçilebilir. ancak bu değerlerin seçiminde, ısı kaybının zamana bağlı olması nedeniyle kaynak akımından kazanç sağlamak için kaynak süresini uzatmak, noktanın çevresinde sıcaklığın yükselmesine ve elektrodların birleştirilen parçalara gömülerek derin izler bırakmasına neden olur. Ayrıca akım yoğunluğunun belli bir minimum değer altında olması halinde de ergime ve birleşme olmaz (55).

Buna karşılık, minimum kaynak süresinde çalışmak amacıyla kaynak akım şiddetini, başka bir deyişle akım yoğunluğunu artırmak ta noktada ani ergime, hatta buharlaşmaya ve fışkırmaya yol açar. Genellikle ısı iletim katsayısı yüksek olan malzemelerin elektrik direnç nokta kaynağında, kaynak süresinin uzamasıyla çevreye yayılan ısı miktarı artacağından kısa süreli kaynak tercih edilir (50).

5.3.4. Elektrod Kuvveti ve Kaynak Akımı

Kaynak yapılacak parçaların birarada tutulabilmesi ve homojen akım geçişinin sağlanabilmesi amacıyla, birleştirilecek parçalara elektrodlar aracılığıyla bir basınç kuvveti uygulanır. elektrod kuvveti olarak adlandırılan bu kuvvet, özellikle temas direncinin uygun bir değerde olmasını ve kaynak sırasında sıvı haldeki çekirdeği katı haldeki metal hacmi içinde basınç altında tutarak dışarı fışkırmasını önler. Çok düşük elektrod kuvvetleriyle çalışılması halinde, malzeme-malzeme temas direnci çok yüksek olacağından ani sıcaklık yükselmesi sonucu yerel ergimeler ve fışkırmalar görülür. Çok yüksek elektrod kuvvetlerinde, temas direnci çok azalacağından ya kaynak noktası oluşmaz ya da yüksek kaynak akımıyla çalışılması gerekir (Şekil 5.5). Bu da istenmeyen çarpılmalara, kaynak noktasında ezilmelere ve renklenmelere neden olur (7,29).



Şekil 5.5 : Çok yüksek elektrod kuvvetleri ve yüksek kaynak akım şiddetlerinde kaynak noktası ve çevresinde oluşan ezilme ve renklenmeler.

5.3.5. Yüzey Durumu

Kaynak yapılacak malzemelerde yüzey durumu, temas direnciyle yakından ilgili olan; yüzey pürüzlülüğü, parçaların yüzeyindeki filmler ve yüzey kirlilikleridir. Yüzey kirliliği çeşitli kimyasal ve mekanik yöntemlerle giderilmelidir. Çünkü yüzeydeki kirlilik ve homojen olmayan bir yüzey pürüzlülüğü, heterojen ve kalitesiz bir kaynak noktasının oluşmasına neden olur (29).

5.3.6. Malzemenin Fiziksel Özellikleri

Elektrik direnç nokta kaynağı yöntemiyle birleştirilecek malzemelerin kaynak kabiliyeti, sözkonusu malzemelerin özgül elektrik direnci, ısı iletim katsayısı, özgül ısı, ergime noktası ve yoğunlukları ile belirlenir. Genellikle özgül elektrik direncinin artması ve ısı iletim katsayısının küçülmesiyle malzemenin elektrik direnç nokta kaynağı kabiliyeti artar (51,52,56).

5.4. Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Kullanılan Elektrodlar

Tablo 5.1'de elektrik direnç nokta kaynağında kullanılan başlıca elektrod malzemeleri ve özellikleri verilmiştir (1,29,57).

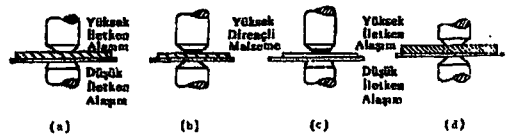
Tablo 5.1 : Elektrod malzemeleri ve özellikleri.

Malzeme	Bileşim (%)	Elektrik İletkenliği ($\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$)	Brinell Sertlik Değeri (daN/mm^2)
Elektrolitik Bakır	99.9 Cu	56	85 - 105
Gümüş - Bakır	2-8 Ag	50 - 29	80 - 120
Kadmilyum - Bakır	0.9-1.2 Cd	50 - 45	100 - 120
Krom - Bakır	0.7 Cr	47	150 - 170
Berilyum - Bakır	0.6 -1.3 Be 0.3 Ni 0.06-0.29 Cr	53 - 30	136 - 290
Tungsten - Bakır	55 - 60 W	25 - 22	225

Ticari saf bakır en iyi bir iletkenidir. Saf bakır elektrodlar; üstün mekanik özelliklerinin yanında, yeterli elektrik iletkenliğine sahip malzemeler elde edilinceye kadar direnç kaynağı elektrodu olarak kullanılmıştır. Daha yüksek akım şiddeti, daha yüksek basınç ve daha yüksek kaynak hızı kullanılan yöntemlerin gelişmesi, saf bakırın elektrod malzemesi olarak kullanılmasını durdurmuştur.

Elektrolitik bakır, yüksek elektrik ve ısı iletkenliğe sahip olduğundan, hafif metallerin kaynağında tercih edilir. Gümüş-bakır, kadmiyum-bakır ve krom-bakır esaslı elektrodlar elektrik iletkenliklerinin yanında sertlikleri ile tanınırlar. Daha sert özelliğe sahip berilyum-bakır elektrodlar ise, yüksek elektrik dirençli sert malzemelerin kaynağı için önerilir. Tungsten-bakır ve molibden-bakır esaslı elektrodlar ise genellikle gümüş, bakır ve farklı metal çiftlerinin birleştirilmesinde, yüksek kaynak değerleri ile çalışma koşullarında, seri işlemlerde ve özel bir tür olan kabartılı direnç kaynağı uygulamaları için tavsiye edilmektedir.

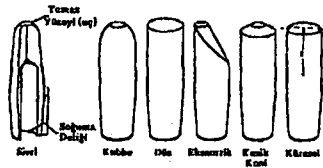
Şekil 5.6'da farklı metallerin elektrik direnç nokta kaynağında ısı 1 denge sağlamak için uygulanan yöntemler belirtilmiştir.



Şekil 5.6 : Farklı metallerin elektrik direnç nokta kaynağında ısı 1 dengeyi sağlamak için uygulanan yöntemler.

Şekil 5.6.a'da yüksek iletkenliğe sahip malzeme tarafına daha küçük temas yüzeyine sahip elektrod konularak bu taraftaki akım yoğunluğu artırılmış ve her iki parçada da eşit derecede ergime sağlanmıştır. Şekil 5.6.b'de yine aynı malzemelerde bir başka yöntem kullanılarak ısıl denge sağlanması gösterilmiştir. Burada yüksek iletkenlikteki malzeme ile temasta olan elektrodun temas yüzeyi, molibden ve tungsten gibi yüksek ısıl dirence sahip malzemeden yapılmıştır. Şekil 5.6.c, her iki yöntemin birarada uygulanışını göstermektedir. Şekil 5.6.d'de yüksek iletkenliği dengelemek için malzemenin kalınlığı artırılarak gerçekleştirilen yöntem görülmektedir.

Elektrodun şekil ve boyutları, kaynak yapılacak iş parçalarının şekil ve boyutlarına göre belirlenir. Standart elektrod türleri içinde en çok kesik koni uçlu ve küresel uçlu elektrodlar kullanılır. Diğer elektrod formları ise sivri, düz ve eksantriktir (Şekil 5.7) (42).



Şekil 5.7 : Elektrik direnç nokta kaynağında kullanılan elektrod formları.

Sac kalınlığına ve malzemeye bağlı olarak elektrod temas yüzeyi aşağıdaki ilkelere göre saptanır (58):

1. Sivri, düz, eksantrik ve kesik koni uçlu elektrodlar için:

$$S > 3 \text{ mm için : } d_e = 5^* S$$

$$S < 3 \text{ mm için : } 2S + K : S > 7.5 \text{ mm için : } K = 2$$

$$S < 7.5 \text{ mm için : } K = 3$$

Burada:

S : Sac Kalınlığı (mm),

d_e : Elektrod Uç Çapı (mm)'dir.

2. Küresel uçlu elektrodlar için:

$$r = k_1^* S + k_2 \quad (5.11)$$

Yumuşak çelik ve paslanmaz çelik için : $k_1=20$

$k_2=50$

Alüminyum ve alaşımları için : $k_1=60$

$k_2=20$

Magnezyum ve alaşımları için : $k_1=70$

$k_2=40$

Burada:

r: Küresel Uçun Çapı (mm),

S: Sac Kalınlığı (mm),

k_1, k_2 : Malzeme Sabitleri'dir.

Malzeme ve sac kalınlığına bağlı olarak elektrod kuvveti ise şöyle seçilebilir:

Alaşımsız Çelikler için : $F=2^* S$

Yüksek Alaşımlı Çelikler için : $F=3.5^* S$

Alüminyum için : $F=2.5^* S$ 'dir. (5.12)

Burada:

F : Elektrod Kuvveti (kN),

S : Sac Kalınlığı (mm)'dir.

5.5. Kaynak Noktasının Etüdü

Kaynak noktası, (5.4) eşitliğine uygun olarak, Q_3 ısısının etkisi ile Ergiyen Bölge (Kaynak Çekirdeği) ve Isının Tesiri Altında Kalan Bölge (ITAB)'den oluşmaktadır.

Gerek kaynak çekirdeğinin, gerekse ITAB'nin boyutları ve formu kaynak parametrelerine bağlıdır. Diğer taraftan kaynak parametreleri değiştirilmediği sürece kaynak çekirdeği ve ITAB'nin boyutları yüzey hazırlama koşullarından etkilenmemekte, ancak metalurjik özellikler önemli bir rol oynamaktadır (51,52).

5.5.1. Ergiyen Bölge (Kaynak Çekirdeği)

Kaynak çekirdeğinin sıcaklığı, kaynak parametrelerine ve malzemenin fiziksel değerlerine bağlı olarak katı-sıvı faz sıcaklık aralığına ulaşmakta, hatta bazı durumlarda sıvı faz sıcaklığı değerinin üstüne çıkarak çekirdekte ergime oluşmaktadır. Kaynak işlemi sonunda katılaşma başlamakta, çekirdekte silindirik kristalli ve iri taneli bir yapı oluşmaktadır. Kaynak işleminin tutma periyodunda, elektrodlar üzerinden hızlı bir soğuma ile birlikte yine elektrodlar aracılığıyla uygulanan kuvvetle tanelerde küçülme sağlanmaktadır.

5.5.2. Isının Tesiri Altında Kalan Bölge (ITAB)

Kaynak periyodu sırasında oluşan ısının büyük bir kısmı kaynak çekirdeğinin oluşumuna harcanırken, bir bölümü de çekirdeğin yakın çevresinde sıcaklık dağılımına bağlı olarak bazı metalurjik oluşumlara yol açmaktadır. Bu bölgeye de ergitme kaynağı yöntemindeki gibi Isının Tesiri Altında Kalan Bölge (ITAB) adı verilmektedir.

5.6. Paslanmaz Çeliklerin Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Üzerine Yapılan Çalışmalar

5.6.1. Genel

Günümüzde martenzitik kromlu, ferritik kromlu ve ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelik ince sacların birleştiril-

mesinde, elektrik direnç nokta kaynağı yaygın olarak kullanılmaktadır. Aynı tür paslanmaz çeliklerin elektrik direnç nokta kaynağı üzerine ABD, Avrupa, SSCB ve Doğu Bloku Ülkeleri'nde yapılan değişik çalışmalara rastlanmaktadır. Bu çalışmaların tümünde araştırmacılar, kaynak parametrelerinin bağlantının çekme-makaslama dayanımı ve korozyon özelliklerine etkisini incelemişlerdir (3,13,30,31,59,60,61,62,63).

Paslanmaz çeliklerin ostenitik krom-nikelli türüne ait fazla bir çalışmaya rastlanamamaktadır. Ancak 1970'li yıllarda bazı ferritik kromlu paslanmaz çelik türlerinin nokta kaynağında yalnızca kimi özel sorunların araştırıldığı bilimsel çalışmalar mevcuttur. Martenzitik kromlu paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyetlerinin iyi olmaması nedeniyle nokta kaynağı yöntemiyle birleştirilmeleri konusunda çok az sayıda çalışmaya rastlanmaktadır. Ayrıca martenzitin varlığı ITAB'de sertlik ve kırılabilirliğin artmasına neden olmaktadır. Martenzitik kromlu paslanmaz çeliklerin düşük karbonlu türlerinin nokta kaynağında, kaynak sonrası herhangi bir ısıtım işlemi uygulanmadan tatminkar sonuçlar alınırken, yüksek karbonlu türlerinde ise, tatminkar sonuçlar alabilmek için genellikle kaynak sonrası bir ısıtım işlemi uygulanmıştır (30,31,62,64).

5.6.2 Ferritik Kromlu Paslanmaz Çeliklerin Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Üzerine Yapılan Çalışmalar

Ferritik kromlu paslanmaz çeliklerin nokta kaynağında, kaynak parametrelerinin bağlantının çekme-makaslama dayanımı ve korozyon özelliklerinin saptanması amacıyla yapılan çalışmalarda çoğunlukla X7CrAl13, X8Cr17, X8CrNb17 türü paslanmaz çelik saclar kullanılmıştır. Sözü edilen çelik türlerinin nokta kaynağı bağlantıları oda sıcaklığında

kırılgan bir özellik gösterdiklerinden, hatalı bağlantılara kaynak işleminin ardından bir tavlama uygulamak gerekir (30,31).

Küppers, Ortmann ve Düchting'in niyobyum ile stabilize edilmiş X8CrNb17 türü ferritik kromlu paslanmaz çeliklerin elektrik direnç nokta kaynağı üzerine yapılmış çalışmaları mevcuttur (61). Bu çalışmada; 08,1 ve 1,25 mm kalınlığında ve aynı kimyasal bileşimdeki paslanmaz çelik saclar, elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmişlerdir. İşlem sırasında; kaynak süresi 0.08 saniye, son tutma süresi 2.75 saniye, kaynak akım şiddeti 7.5 kA'den başlayarak 1 kA aralıklarla 15 kA'e kadar artırılmış, elektrod kuvveti 300,400, 500 daN olarak seçilmiş ve kaynak işlemi tek ve çift sıralı nokta kaynağı olarak yapılmıştır.

Araştırmacılar bu çalışmalarında, X8CrNb17 türü ferritik kromlu paslanmaz çelik saclar için saptadıkları kaynak koşullarını bir seri diyagram ile açıklamışlardır.

Küppers, Ortmann ve Düchting, X6CrMo17 türü molibden katkılı ferritik kromlu paslanmaz çelik sacların nokta kaynağı üzerine yaptıkları diğer bir çalışmada da, çekirdekte oluşan çatlaklar ve çekme-makaslama dayanımının tatminkar olmayan sonuçlar vermesi nedeniyle bu tür çeliklerin nokta kaynağına elverişli olmadığını belirtmişlerdir (61).

Anık, Çapan ve Gülbahar, X6Cr17 türü ferritik kromlu paslanmaz çelik sacların elektrik direnç nokta kaynağı üzerine yaptıkları çalışmalarında ise, kısa (5 periyod), orta (15 periyod) ve uzun (25 periyod) kaynak sürelerinde ve 7.5-11.5 kA kaynak akım şiddeti aralığında gerçekleştirdikleri kaynaklı bağlantılarda; kaynak parametrelerinin kaynaklı, kaynaklı-korozyonlu ve kaynaklı-ısıtılmış-koroz-

yonlu koşullar için bağlantının çekme-makaslama dayanımına etkisini incelemişlerdir (65).

5.6.3. Ostenitik Krom-Nikelli Paslanmaz Çeliklerin Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Üzerine Yapılan Çalışmalar

Ostenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklerin nokta kaynağı konusunda ilk çalışmalar Oppenheimer ve Brand tarafından gerçekleştirilmiştir (59). Oppenheimer ve Brand çalışmalarında, otomotiv endüstrisinde çokça kullanılan X5CrNi189 türü ile bu türün titanyum ve niyobyumla stabilize edilmiş ve 1, 1.5 mm kalınlığında paslanmaz çelik sacların nokta kaynağı yapılmış bağlantılarında, bağlantının çekme-makaslama dayanımı üzerine kaynak parametrelerinin ve elektrod uç formunun etkilerini incelemişlerdir.

Oppenheimer ve Brand, X10CrNiTi189 ve X10CrNiNb189 türü titanyum ve niyobyumla stabilize edilmiş ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelik sacların ve X5CrNi189/St 37.12 ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelik-karbonlu çelik çiftinin nokta kaynağında, bağlantıların mekanik davranışlarını belirlemek amacıyla yaptıkları araştırmalar da mevcuttur. Her üç çalışmada yapılan deneylerin sonuçları bir tablo halinde toplanarak, bu tür bağlantılar için kaynak parametreleri önerilmiştir (59).

Küppers ve Düchting, X5CrNi189 türü ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelik sacların nokta kaynağına ait yaptıkları çalışmada ise, çekirdekte ortaya çıkan boşluk ve çatlaklar üzerinde durarak, hatasız kaynak noktalarının elde edilmesinde yardımcı olacak önerilerde bulunmuşlardır (66).

Ostenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklerin ve özellikle vagon imalatında kullanılan ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelikler ile karbonlu çeliklerin oluşturduğu çelik çiftlerinin

nokta kaynağında, kaynak parametrelerinin bağlantının çekme-makaslama ve yorulma dayanımları ile korozyon özelliklerine etkileri Sovyetler Birliği'nde de araştırılmıştır (67,68).

Ayrıca Anık, Dorn ve Kassner, X12CrNi188 türü ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelik saçların nokta kaynağında, kaynak parametrelerinin bağlantının çekme-makaslama dayanımı ve bu bağlantılarda gerilemeli korozyon olayının oluşup oluşmadığını incelemişlerdir. Araştırmacılar bu çalışmalarında, çekirdek kesitinde yaptıkları makroskobik ve mikroskobik incelemeler sonucunda kaynak öngerilmelerinden dolayı gerilemeli korozyon olayının ortaya çıktığını, tasarımcının bu konuda dikkatli olmasını önermektedirler (69).

Yine Anık, Dorn ve Günaltan, X12CrNi188 türü ostenitik krom-nikelli ve 1 mm kalınlığında paslanmaz çelik saçlarla yaptıkları diğer bir çalışmada, kaynak süresinin çeliğin karbon içeriğine bağlı olarak uzun kaynak sürelerinde (50 periyod) dahi tanelerarası korozyona neden olamayacağını belirtmişlerdir (70).

Blanco, Cabrera ve Choy, X5CrNiMo1810 türü molibden katkılı ostenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklerin nokta kaynağında, esas metalde, ITAB'de ve çekirdekte tanelerarası korozyona hassasiyet olduğu ortaya çıkarılmıştır. Araştırmacılar 1050⁰C ve 30 dakikalık bir ısıtıl işlemin bu hassasiyeti ortadan kaldıracağını savunmaktadırlar (71).

Anık, Çapan ve Kaluç, X12CrNi188 ve X8Cr17 türü ostenitik krom-nikelli ve ferritik kromlu paslanmaz çelik saçların nokta kaynağında kaynak parametrelerinin bağlantının çekme-makaslama dayanımı ve tanelerarası korozyona etkisini diğer bir çalışmada incelemişlerdir (72).

5.6.4. Karbonlu Çelikleri Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Üzerine Yapılan Çalışmalar

19. yüzyılın başlarından itibaren otomotiv endüstrisinde karoseri ve vagon imalinde kullanılan farklı çeliklerin kaynağında elektrik direnç nokta kaynağı uygulanmasına karşın, konuyla ilgili çok sayıda araştırmaya rastlanmamıştır.

Hess ve Ringer, otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan 18-8 türü ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelik-karbonlu çelik çiftleriyle yaptıkları çalışmada; 0.068"(1.72mm) ve 0.047" (1.09 mm) kalınlığında çelik sacların elektrik direnç nokta kaynağı yapılmış bağlantılarında, kaynak parametrelerinin bağlantının çekme-makaslama dayanımı, temas direnci ve kaynak çekirdeği ile ITAB'nin mikroyapı özelliklerine etkisini incelemişlerdir (73,74)?

Ueda ve Kawataka, 1.5 mm kalınlığındaki AISI 301 türü ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelik-karbonlu çelik çiftlerinin nokta kaynağı üzerine yaptıkları araştırmada; çok sıralı nokta kaynağı yapılmış numunelerde kaynak parametrelerinin bağlantının çekme-makaslama ve yorulma dayanımları, sertlik ve kaynak çekirdeği ile ITAB'nin mikroyapı özelliklerine etkisini incelemişlerdir (75).

Çalışmada özellikle bağlantının yorulma dayanımına ait sonuçlar, bağlantıda gerilme analizleri başlığı altında toplanarak grafiklerle açıklanmıştır.

Brooks yaptığı çalışmada, düşük karbonlu çeliklerin nokta kaynağı yapılmış bağlantılarında; optimum kaynak koşulları, kaynak kabiliyeti deneyleri ve bağlantının mekanik özelliklerinin saptanmasında izlenecek yol konusunda önerilerde bulunmuştur (76).

Denk yaptığı çalışma ile, farklı çeliklerin elektrik direnç nokta kaynağı için uygun kaynak koşullarını tablolar halinde vermektedir (77).

Kimchi, 0.038"(1 mm) kalınlığında düşük karbonlu çelik sacların nokta kaynağı üzerine yaptığı araştırmada; kaynak süresi 9-12 ve 16 periyod, kaynak akım şiddeti 9 kA'den başlayarak 0.5 kA aralıkla 12 kA'e kadar artırılmış ve elektrod kuvveti 2 kN olarak seçilmiştir (78).

Kaynak parametrelerinin bağlantının yorulma dayanımı, yorulma ömrü ve çekirdek çapına etkileri bir seri diyagram ile açıklanmıştır.

Minarik ve Lehka ise, nokta kaynağı yapılmış farklı çeliklerin düşük (sıfıraltı) sıcaklıklardaki davranışlarını incelemişlerdir.

Araştırmacılar, elektrik direnç nokta kaynağı yapılmış bu tür çeliklerin, düşük sıcaklıklardaki çekme-makaslama dayanımına ait saptadıkları sonuçları tablolar halinde vermişlerdir (79).

BÖLÜM 6

6. KONUNUN ÖNEMİ ve ÇALIŞMANIN PLANLANMASI

6.1. Konunun Önemi

1900'lü yılların başlarından itibaren otomotiv endüstrisinde, özellikle otomobillerde ve demiryolu vagonlarında kaporta malzemesi olarak, inşaat sektöründe dekoratif amaçlarla, ayrıca uçak, gemi, kimya, gıda ve uzay endüstrilerinde kullanılan ferritik, ostenitik paslanmaz çeliklerin ve karbonlu çeliklerin elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmeleri büyük önem taşımaktadır. Bu endüstri dallarında benzer ya da farklı çeliklerin biraraya getirildiği konstrüksiyonlarda kaliteli kaynak bağlantılarının oluşturulması için uygun kaynak parametrelerinin saptanması ve bağlantının çekme-makaslama dayanımı üzerine etkisi güncelliğini hala korumaktadır.

Elektrik direnç nokta kaynağı, konstrüksiyonların oluşturulmasında imalatçıya sayısız yararlar sağlamaktadır. Özellikle son yıllarda. uzun ömürlü demiryolu taşıtlarının imaline yönelik projeler, farklı çeliklerin elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesinin önemini bir defa daha gündeme getirmiştir (80).

Paslanmaz çeliklerle karbonlu çeliklerin biraraya getirildiği konstrüksiyonların elektrik direnç nokta kaynağı üzerine bilimsel çalışmaların yapılmasında, Avrupa ABD ve SSCB' de bu çelik çiftinin otomotiv endüstrisinde kullanılması etken olmuştur.

6.2. Çalışmanın Planlanması

Konuyla ilgili literatür incelendiğinde, paslanmaz çelik-karbonlu çelik çiftinin elektrik direnç nokta kaynağı üzerine çalışma yapılmadığı görülmüştür. Bu boşluğa doldurmak amacıyla hazırlanan deney parçaları seçilen kaynak parametreleriyle kaynak edilmişlerdir. Ön deneylerden olumlu sonuçlar alındığı görüldükten sonra, kaliteli kaynak bağlantılarının oluşturulması amacıyla kaynak parametreleri değiştirilmiştir. Çünkü kaynak parametrelerinin bağlantının çekme-makaslama dayanımı üzerine etkisi büyüktür. Çalışmada, ferritik kromlu paslanmaz çelik-karbonlu çelik ve ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelik-karbonlu çelik çiftlerinin elektrik direnç nokta kaynağında optimum kaynak koşullarının bulunması amaçlanmıştır. Bu deneylerden sonra kaynak parametrelerinin bağlantının mekanik özellikleri ve kaynak çekirdeği boyutlarına etkisinin araştırılmasının yanı sıra, tanelerarası korozyona neden olan krom karbür çözelmesinin oluşup oluşmadığı ve bağlantıda diğer bazı metalurjik değişimlerin varlığını anlamak için esas metal, ITAB ve kaynak çekirdeğinin ışık metal mikroskobu ve elektron mikroskobu ile incelenmesi ve çelik çiftlerinin temas derinliğinin saptanması planlanmıştır.

BÖLÜM 7

7.1. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

7.1. Genel

Bu çalışmada, deney malzemesi olarak ferritik kromlu ve ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelik saclarla, karbonlu çelik saclar kullanılmıştır. Ferritik kromlu paslanmaz çelik-karbonlu çelik; ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelik-karbonlu çelik çiftleri elektrod formu ve elektrod kuvveti sabit kalmak koşulu ve kaynak akımı ve periyodu değiştirilerek beş seri halinde elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmişlerdir. Bağlantının dayanım değerlerini saptamak amacıyla bütün seriler çekme-makaslama deneyine tabi tutulmuştur. Ayrıca, sertlik ve mikroyapı özellikleriyle çelik çiftlerinin temas dirençleri araştırılmıştır.

7.2. Kullanılan Malzeme

Araştırmada kullanılan ferritik kromlu ve ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelik saclar AISI 430 (X6Cr17) ve AISI 304 (X5CrNi188), karbonlu çelik saclar ise düşük karbonlu alaşımsız çeliklerdir. Bu çelik sacların kimyasal bileşimleri Tablo 7.1'de verilmiştir.

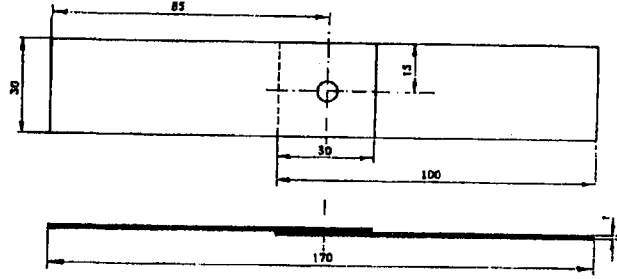
Tablo 7.1 : Deney malzemelerinin kimyasal analizleri ¹⁾.

Kimyasal Bileşim (%)									
Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
X6Cr17	0.074	0.487	0.241	0.010	0.0027	16.90	0.079	0.012	0.018
X5CrNi188	0.068	0.309	1.450	0.012	0.0029	18.57	8.070	0.275	0.325
Karbonlu Çelik	0.072	0.004	0.323	0.008	0.0025	0.01	0.005	0.004	0.005

¹⁾Kimyasal analiz Spektro-Lab cihazıyla yapılmıştır
(OERLIKON A.Ş.).

7.3. Deney Parçalarının Boyutları

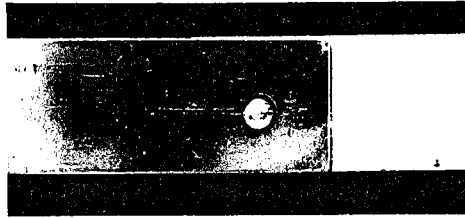
Deneylerde 1 mm kalınlığında çelik saclar kullanılmış olup, boyutları Şekil 7.1'de verilmiştir.



Şekil 7.1 : Deney parçalarının boyutları.

Çekme-makaslama deneyi sırasında kırılmanın kaynak bölgesinde oluşmasını sağlamak, kenar etkisini ortadan kaldırmak, minimum malzeme harcamı gibi etmenler, deney parçalarının boyutlarının saptanmasında gözönüne alınmıştır.

Şekil 7.2'de elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş deney parçaları görülmektedir.



Şekil 7.2 : Elektrik direnç nokta kaynağı yapılmış deney parçaları.

7.4. Deney Parçalarının Hazırlanması

Deney parçaları Şekil 7.1'de gösterilen boyutlarda giyotin makasla kesildikten sonra, derin bir kab içinde

rastgele dağıtılarak, yüzeylerindeki yağ, pas v.b. yabancı maddelerden arındırılması amacıyla % 96 saflıktaki etil alkolde yıkanmış ve temiz pamuklu bir bezle silinmiştir.

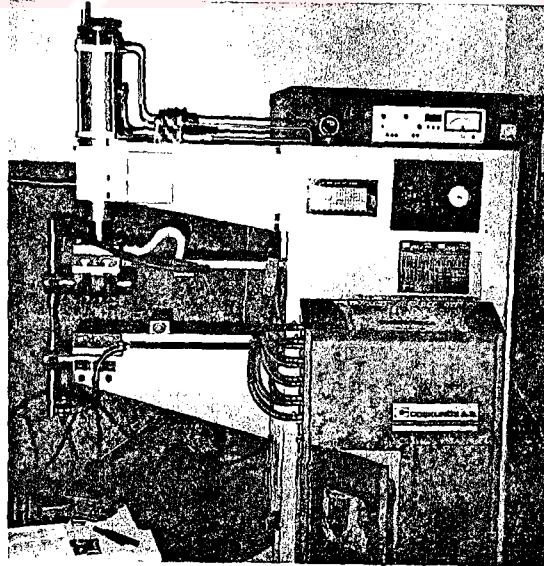
7.5. Kaynak Makinası

Deneylerde, tek kollu 120 kVA gücünde¹⁾, elektronik akım ve zaman kontrollü, pnömatik basma donanımlı elektrik direnç nokta kaynak makinası kullanılmış, elektrod kuvveti ise, kaynak makinasının alt koluna yerleştirilen bir manometre²⁾ ile ölçülmüştür.

Kaynak akım şiddeti değerleri, nokta kaynak makinasının alt koluna yerleştirilen magnetik alan ölçmeli, geniş alanlı bir ampermetre³⁾ ile sürekli olarak kontrol edilmiştir.

Kaynak zamanı, sıkıştırma ve tutma zamanları makina üzerindeki elektronik donanımlarla ayarlanmıştır.

Şekil 7.3'te elektrik direnç nokta kaynak makinası ve donanımları topluca gösterilmiştir.



Şekil 7.3 : Elektrik direnç nokta kaynağı makinası.

1) Coşkunöz marka

(COŞKUNÖZ A.Ş.)

2) Özel imalat

(COŞKUNÖZ A.Ş.)

3) Messer-Griesheim PECO Widerstands-Schweisstechnik SM 12 A

(COŞKUNÖZ A.Ş.)

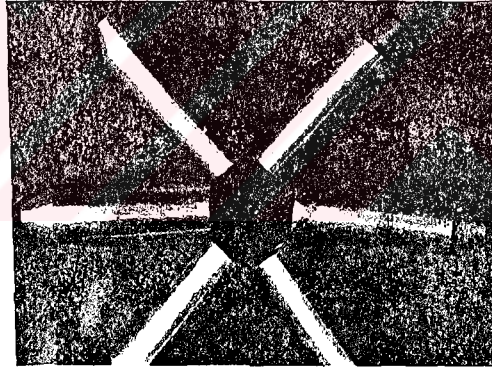
7.6. Elektrodlar

Deneylerde, kesik koni uçlu, uç ęapı 6 mm olan elektrod-
lar¹⁾ kullanılmıştır (81). Tablo 7.2 kullanılan elektrodların kim-
yasal bileşimi ve mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 7.2 : Elektrodların kimyasal bileşimi ve mekanik zellikleri.

Elektrod	Kimyasal Bileşimi (%)	Isı İletkenliği (J/cm s °K)	Elektrik İletkenliği (Ω mm ² /m)	ekme Dayanımı (N/mm ²)
ELMEDUR HA	1.0 Co, 1.0 Ni ,5 Be, Cu	210	30	850

şekil 7.4'te deneylerde kullanılan elektrodlar gösterilmiştir.



şekil 7.4 : Deneylerde kullanılan elektrodlar.

7.7. Deneylerin Yapılışı

7.7.1. Elektrik Direnç Nokta Kaynağı İşlemi

Deney parçaları şekil 7.1'de gösterilen boyutlarda hazırlanıp temizlendikten sonra, sırasıyla ferritik kromlu paslanmaz elik-karbonlu elik, ostenitik krom-nikelli paslanmaz elik-karbonlu elik çiftlerine ait sacların 30 mm'lik kısımları st üste bindirilerek tam orta noktalarından kaynatılmıştır.

Elektrod kuvveti 5 kN olarak sabit tutulmuş ve bu değer makinanın iki kolu arasına yerleştirilen bir manometre ile sürekli olarak kontrol edilmiştir.

Kaynak zamanı 5, 15, 25 periyod olarak değiştirilmiştir. Sıkıştırma ve tutma süreleri ise, bütün serilerde 25 periyod olarak sabit tutulmuştur.

Kaynak akım şiddeti 4.5 kA'den başlatılarak 13.5 kA'e kadar 1 kA aralıklarla artırılmıştır.

Tasarlanan deney programına göre, her deney koşulunda 5 çift parça kaynatılmıştır. Birinci grup parçalar kaynaklı vaziyette çekme-makaslama deneyine, ikinci grup parçalar mikro Vickers sertlik deneyine tabi tutulmuş, üçüncü grup parçalarda çekirdek boyutları ölçü mikroskobu ile saptanmış, dördüncü grup parçaların ışık metal mikroskobu ile mikroyapı fotoğrafları alınmıştır. Beşinci grup parçaların ise tarayıcı elektron mikroskobu ile tane sınırları etüd edilerek krom karbür çökmesi incelenmiştir.

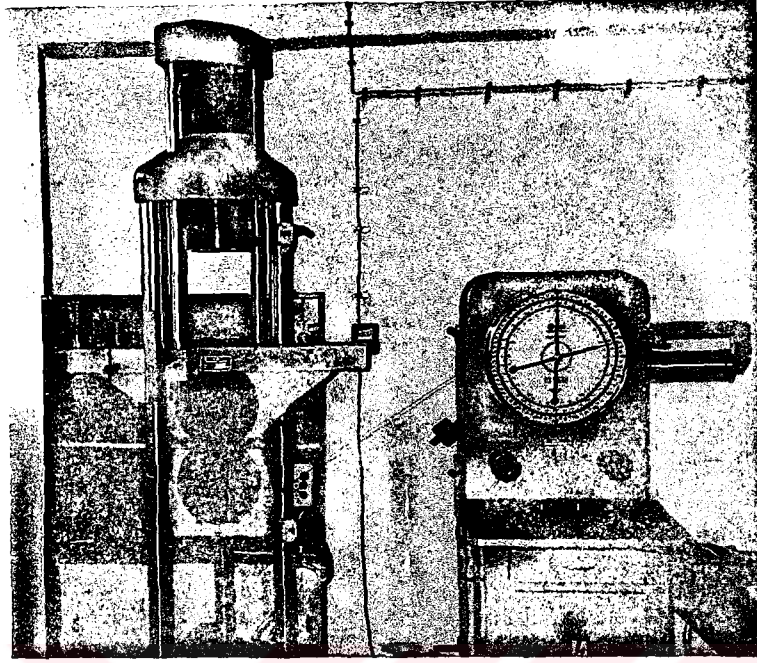
7.7.2. Çekme-Makaslama Deneyi

Elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirelen parçalar Laboratuvar koşullarında 5 ton'luk üniversal çekme makinasında¹⁾ çekme-makaslama deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 7.5.).

Deneyler sırasında çekme hızı 7 mm/dk olarak bütün parçalarda sabit tutulmuştur. (82).

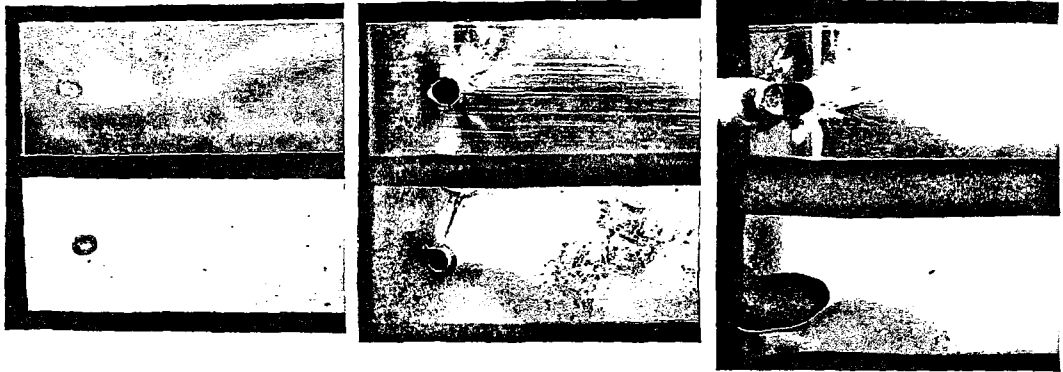
Çekme-makaslama dayanımı olarak verilen değerler, üniversal çekme makinasının skalasından okunan maksimum değerlerdir.

1) Al-Şa marka, maksimum 20 ton (TRAKYA ÜNİVERSİTESİ)



Şekil 7.5 : Maksimum 20 ton kapasiteli üniversal çekme makinası.

Çekme-makaslama deneyi sırasında 3 değişik kopma tipi görülmüştür. Bunlar, ayrılma kopması, düğmeleme şeklinde kopma ve yırtılma şeklinde kopmalardır (Şekil 7.6).



a) Ayrılma kopması. b) Düğmeleme şeklinde kopma. c) Yırtılma şeklinde kopma.

Şekil 7.6 : Kopma türleri.

7.7.3. Metalografik Çalışmalar

7.7.3.1. Işık Metal Mikroskobu İle İnceleme

Nokta kaynağı yapılmış serilerden alınan örnekler, metalografik inceleme amacıyla mekanik olarak çekirdek ortasından kesilmiş ve polyestere gömülmüştür. Kaba ve ince zımparalamadan sonra, numuneler parlatma diskinde¹⁾ parlatma pastası ile parlatılmış ve Adler ayracı (4g bakır amonyum klorür, 25 ml distile su, 50 ml hidroklorik asit ve 15 g demir klorür) ile dağlanmıştır (83).

7.7.3.2. Tarayıcı Elektron Mikroskobu ile İnceleme

Elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş parçalarda ITAB'de tanelerarası korozyona neden olan kromkarbür çökmesi ve bağlantının yüzey karakterleri hakkında ayrıntılı bilgi elde edebilmek amacıyla kaynak çekirdeği merkez olmak üzere 20X20 mm boyutlarında mekanik olarak kesilen numuneler Vilella ayracıyla (10 ml etanol, 5 mm hidroklorik asit, 1 g pikrik asit) dağlandıktan sonra Tarayıcı (Scanning) Elektron Mikroskobu²⁾ ile incelenmiştir.

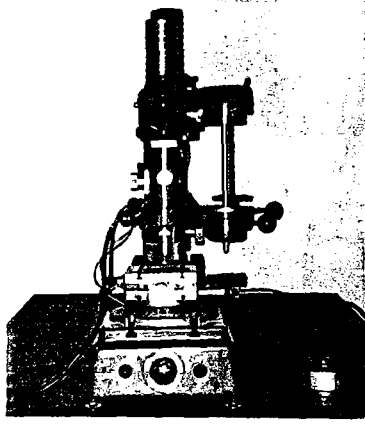
7.7.4. Çekirdek Boyutlarının Ölçülmesi

Kaynak akım şiddetinin çekirdek boyutları üzerindeki etkisinin ve çekirdek boyut oranı ile kaynaklı numunelerin çekme-makaslama dayanımı arasındaki ilişkinin incelenmesi amacıyla nokta kaynaklı deney parçalarında çekirdek boyutları ölçü mikroskobu³⁾ ile ölçülmüştür.

1) Struers marka (TRAKYA ÜNİVERSİTESİ)
2) JEOL Superprobe 733 (PAŞABAHÇE ARAŞTIRMA MERKEZİ)
3) Carl Zeiss Jena marka optik ölçü mikroskobu (TRAKYA ÜNİV.)

7.7.5. Sertlik Deneyi

Bağlantıdaki sertlik dağılımının belirlenmesi amacıyla çekirdek kesitinde, esas metalde, ITAB'de ve kaynak metalinde mikro Vickers sertlik cihazıyla⁴⁾ sertlik ölçümü yapılmıştır(Şekil 7.7)(84).



Şekil 7.7 : Mikro Vickers sertlik cihazı.

7.7.6. Temas Dirençlerinin Saptanması

7.7.6.1. Deney Parçalarının Yüzeylerinin Hazırlanması

Şekil 7.1'de gösterilen boyutlarda mekanik olarak kesilen deney parçaları bileşimi Tablo 7.3'te verilen gres giderme ayracı içinde yağ ve gresten arındırıldıktan sonra su ile yıkanmış, daha sonra da 80°C sıcaklıktaki % 5'lik sülfürik asit ayracına daldırılmıştır. Bu ayraçta 2 saat bekletilen parçaların yüzeylerindeki reaksiyon artıkları saf su ile temizlenmiş ve yüzeyler sıcak hava altında kurutulmuştur.

Tablo 7.3 : Gres giderme ayracı.

Kimyasal Madde	Miktarı (g/l)	Eriyik Sıcaklığı : 80 °C
Sodyum Karbonat	230	
Potasyum Fosfat	290	

4) Karl Frank marka Vickers sertlik cihazı

Deney parçaları:

1. Hiçbir mekanik yüzey hazırlama işlemine tabi tutulmadan (piyasa koşullarında),
2. Kimyasal olarak yüzeyleri temizlendikten sonra,
3. Kimyasal olarak yüzeyleri temizlenip, mekanik olarak hazırlandıktan sonra;
 - a. Tel fırça ile fırçalanmış durumda ve
 - b. Yalnızca bir yüzeylerinden zımparalanarak yüzey pürüzlükleri saptanmış ve temas direnci değerleri ölçülmüştür.

7.7.6.2. Yüzey Pürüzlüklerinin Saptanması

Yukarıda belirtilen yüzeylere sahip deney parçalarının yüzey pürüzlükleri dijital-programlanabilir ultrasonik yüzey pürüzlük test cihazı¹⁾ ile ölçülmüştür.

Yüzeylere ait pürüzlülük değerleri Tablo 7.4'te verilmiştir

Tablo 7.4 : Hazırlanan yüzeylere ait yüzey pürüzlülük değerleri.

Yüzey Durumu	Yüzey Pürüzlülüğü (µm)		
	Ferritik	Ostenitik	Karbonlu Çelik
Piyasa Durumu	0.02	0.07	0.82
Kimyasal Yöntem	0.15	0.11	1.07
Tel Fırçalama	0.22	0.15	0.97
Zımparalama	0.15	0.08	0.78

1) Prazis, RUG-03 marka dijital yüzey pürüzlülük test cihazı (TRAKYA ÜNİVERSİTESİ)

7.7.6.3. Temas Direnci Değerlerinin Ölçülmesi

Değişik yüzey durumundaki deney parçalarının temas dirençleri IIW/IIS Doc.III-95-88,II-126-88'de verilen ilkeler çerçevesinde ve Şekil 7.8'de şematik olarak verilen donanım aracılığıyla ölçülmüştür (85,86).



Şekil 7.8 : Çelik çiftlerinin temas dirençlerinin ölçülmesinde kullanılan deney tesisatı.

Deneylerde elektrod kuvveti 4,5,6 kN olarak sabit tutulmuş ve kaynak işlemi sırasında kullanılan elektrod geometrisine sahip elektrodlar kullanılmıştır.

Şekil 7.8'deki A ve B noktaları arasındaki gerilim düşümü milivoltmetreden, devredeki akım şiddeti ampermetreden okunarak, Ohm Yasası yardımıyla temas dirençleri hesaplanmıştır. Ölçmeler 2 amper akım şiddetindeki doğru akım değerlerinde yapılmıştır.

BÖLÜM 8

8. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ

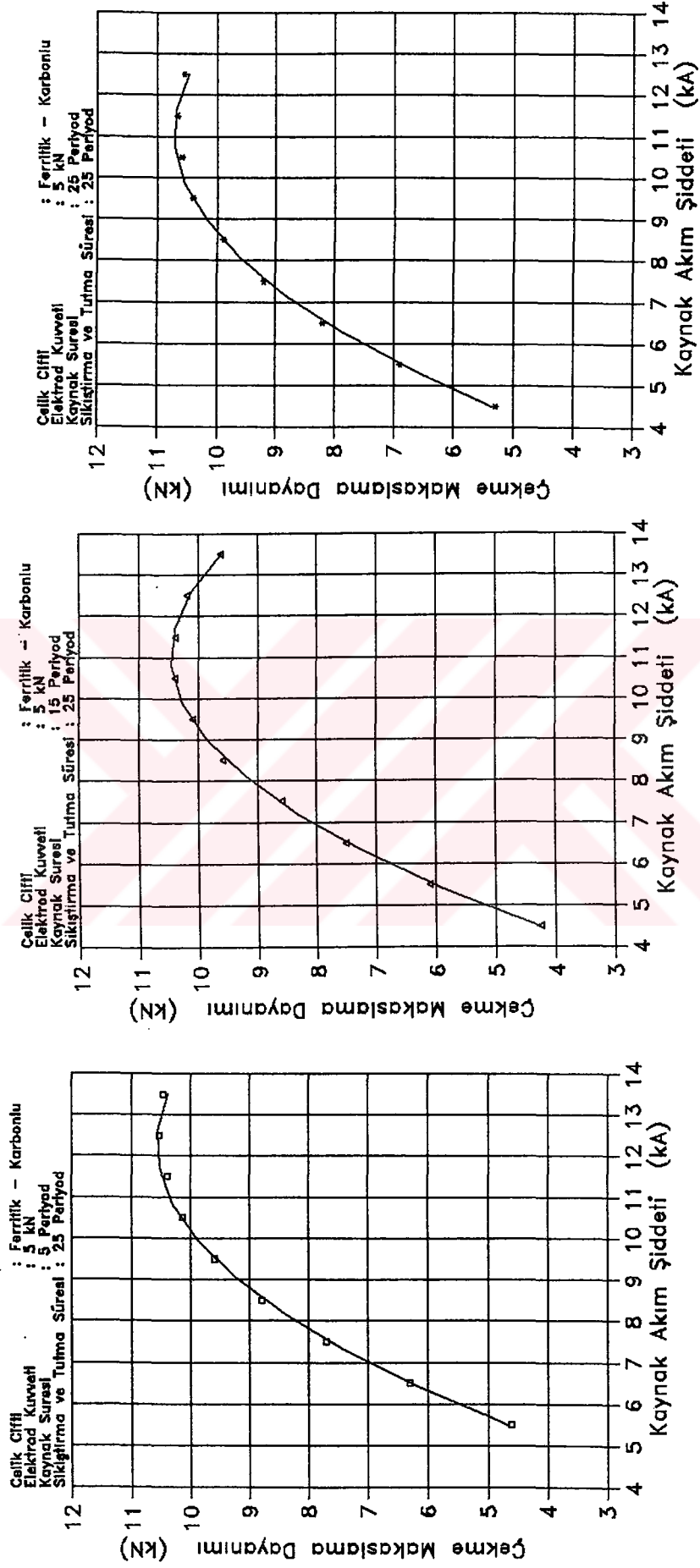
8.1. Genel

Bu çalışmanın temel amacı, ferritik kromlu paslanmaz çelik-karbonlu çelik, ostenitik krom-nikelli çelik-karbonlu çelik sacların elektrik direnç nokta kaynağında uygun kaynak parametrelerini belirlemek üzere bağlantının çekme-makaslama dayanımlarının incelenmesi ile bu tür bağlantılardaki tanelerarası korozyonun etkisinin araştırılmasıdır. Bunun için yukarıda belirtilen çelik çiftlerine ait nokta kaynağı bağlantıları laboratuvar koşullarında ele alınarak incelenmiştir.

8.2. Bağlantının Çekme-Makaslama Dayanımı

8.2.1. Kaynak Akımının Etkisi

Deneylerde kullanılan ferritik kromlu paslanmaz çelik-karbonlu çelik sacların nokta kaynağı yapılmış bağlantılarında kaynak akımının etkisi Şekil 8.1'deki diyagramlarda, ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelik-karbonlu çelik sacların nokta kaynağı yapılmış bağlantılarında kaynak akımının etkisi ise Şekil 8.2'deki diyagramlarda görülmektedir.

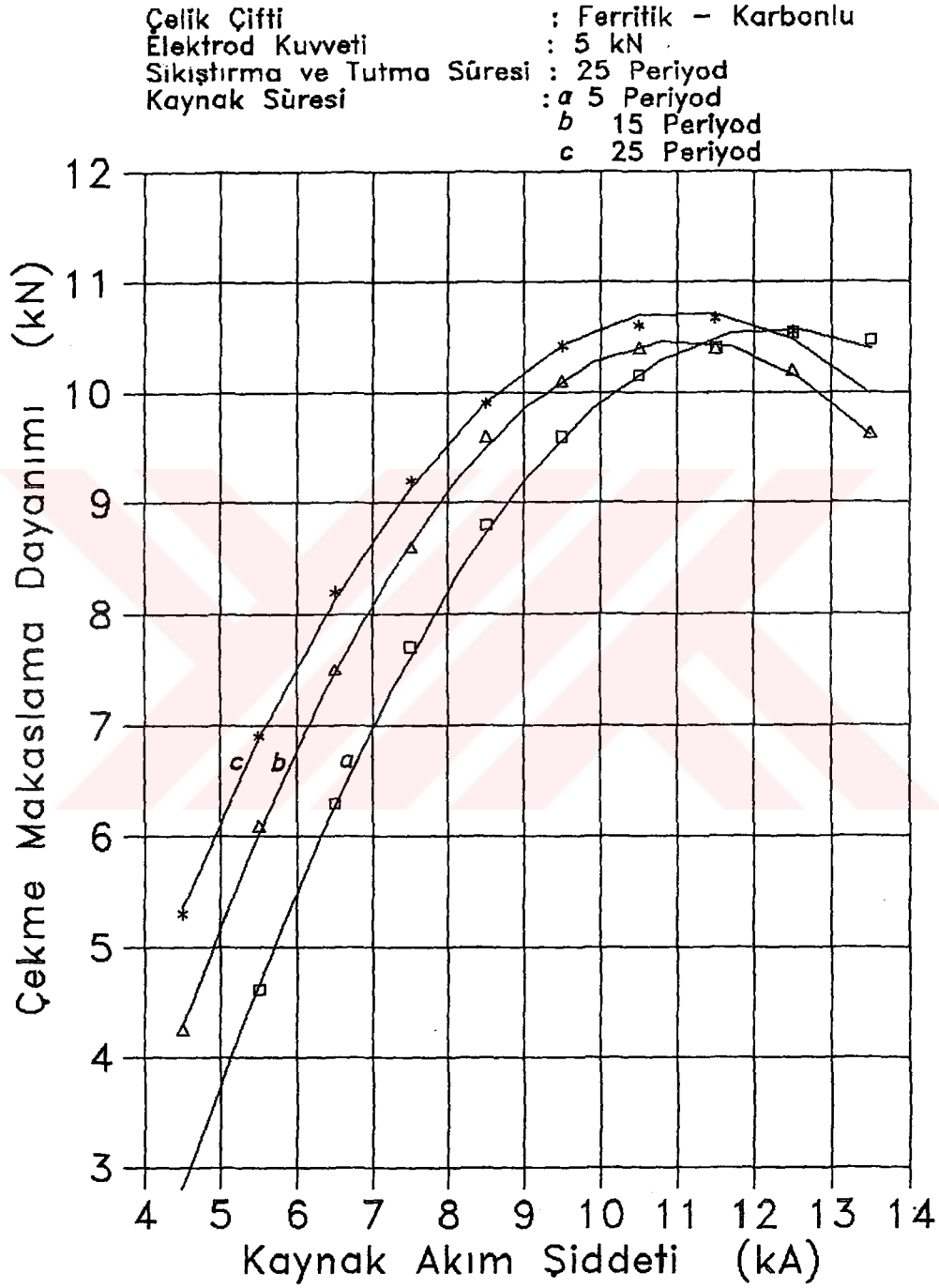


a) 5 Periyod

b) 15 Periyod

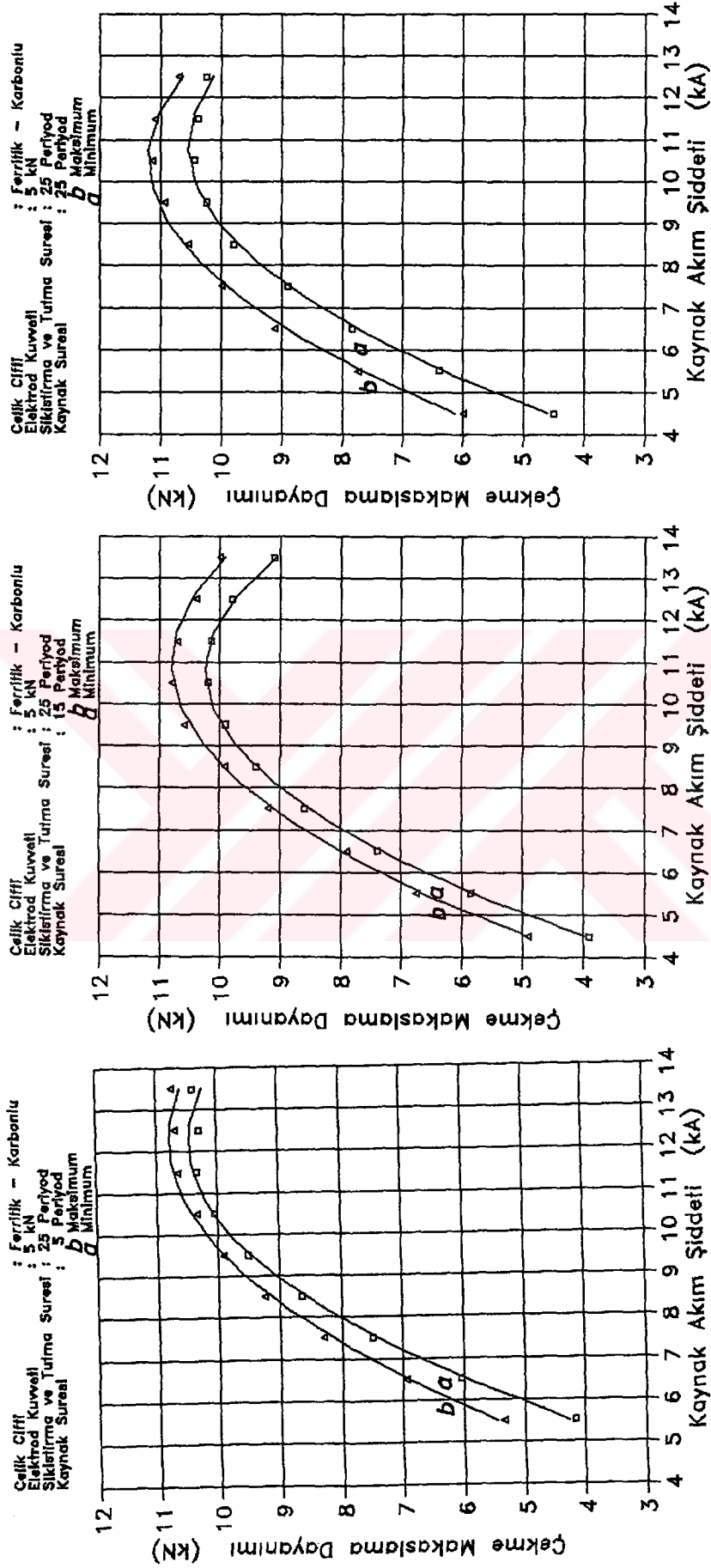
c) 25 Periyod

Şekil 8.1 : Elektrik direnç nokta kaynağı yapılmış ferritik paslanmaz çelik-karbonlu çelik çiftinin çekme-makaslama dayanımları üzerine kaynak akım şiddetinin etkisi (a, b, c, d, e).



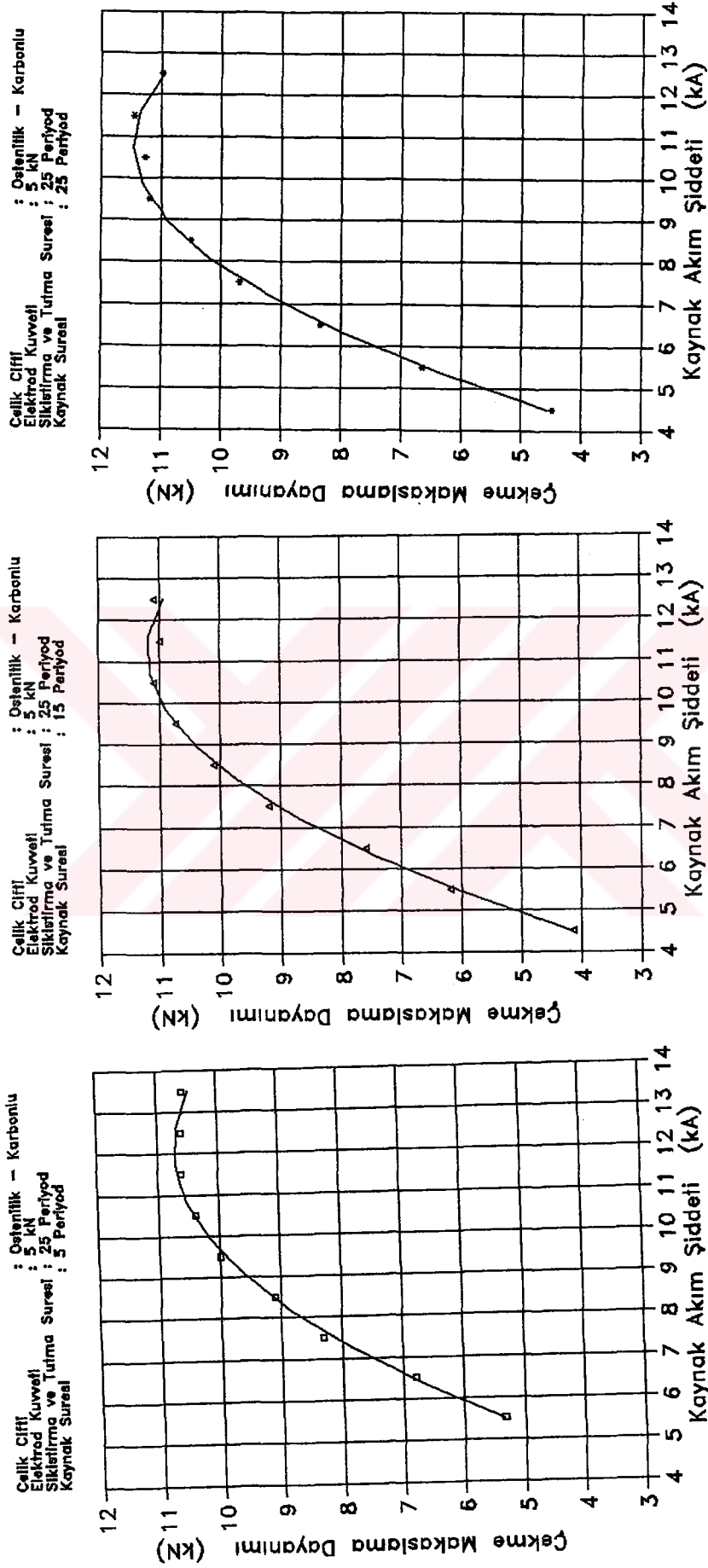
d) Kaynak akım şiddetinin bağlantının çekme-makaslama dayanımı üzerine etkisi,

Şekil 8.1 (devam)



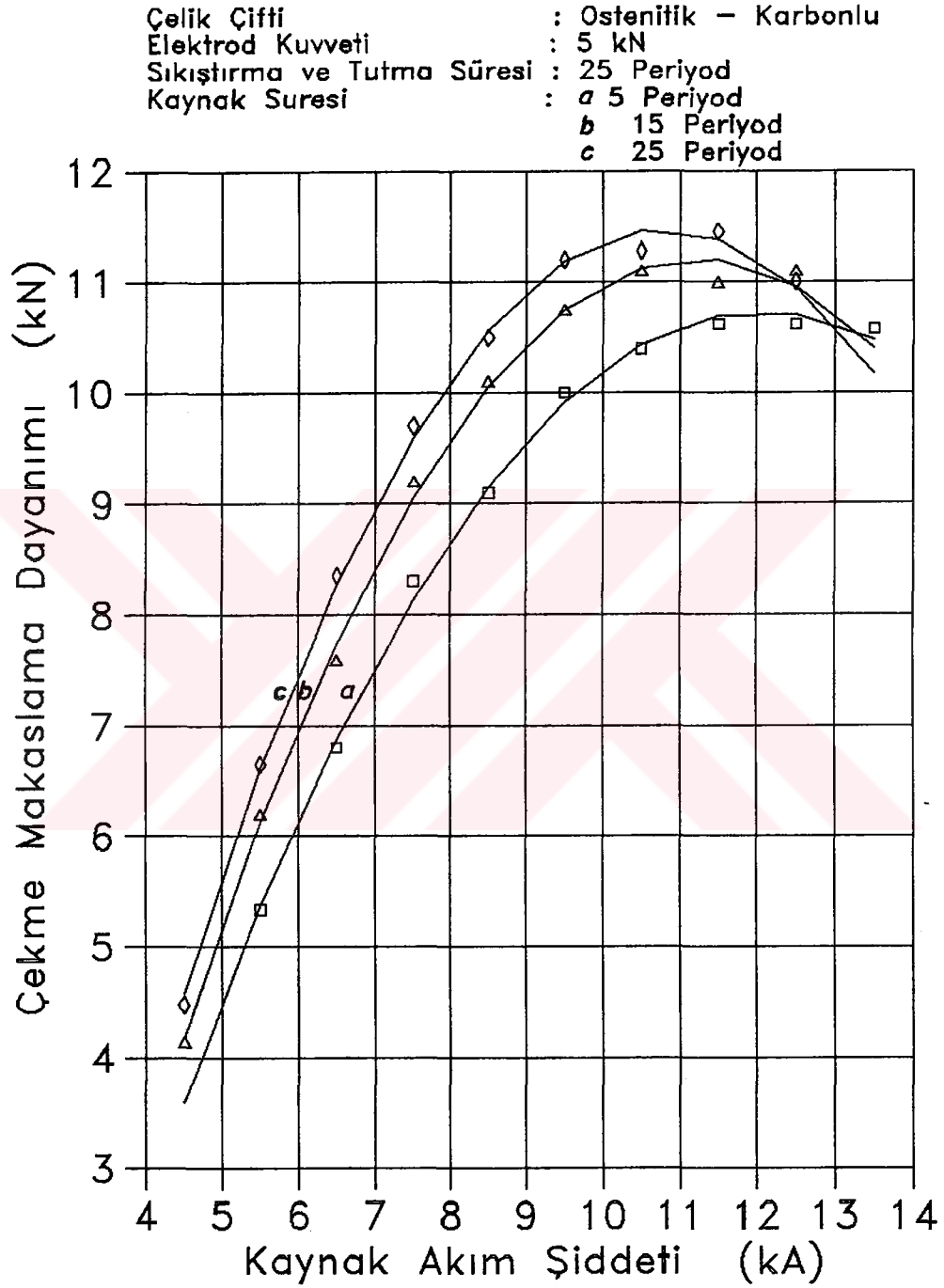
e)Bağlantının çekme-makaslama dayanım değerlerinin minimum ve maksimumları (Çekme-Makaslama Dayanımı Bandı).

Şekil 8.1 (devam)



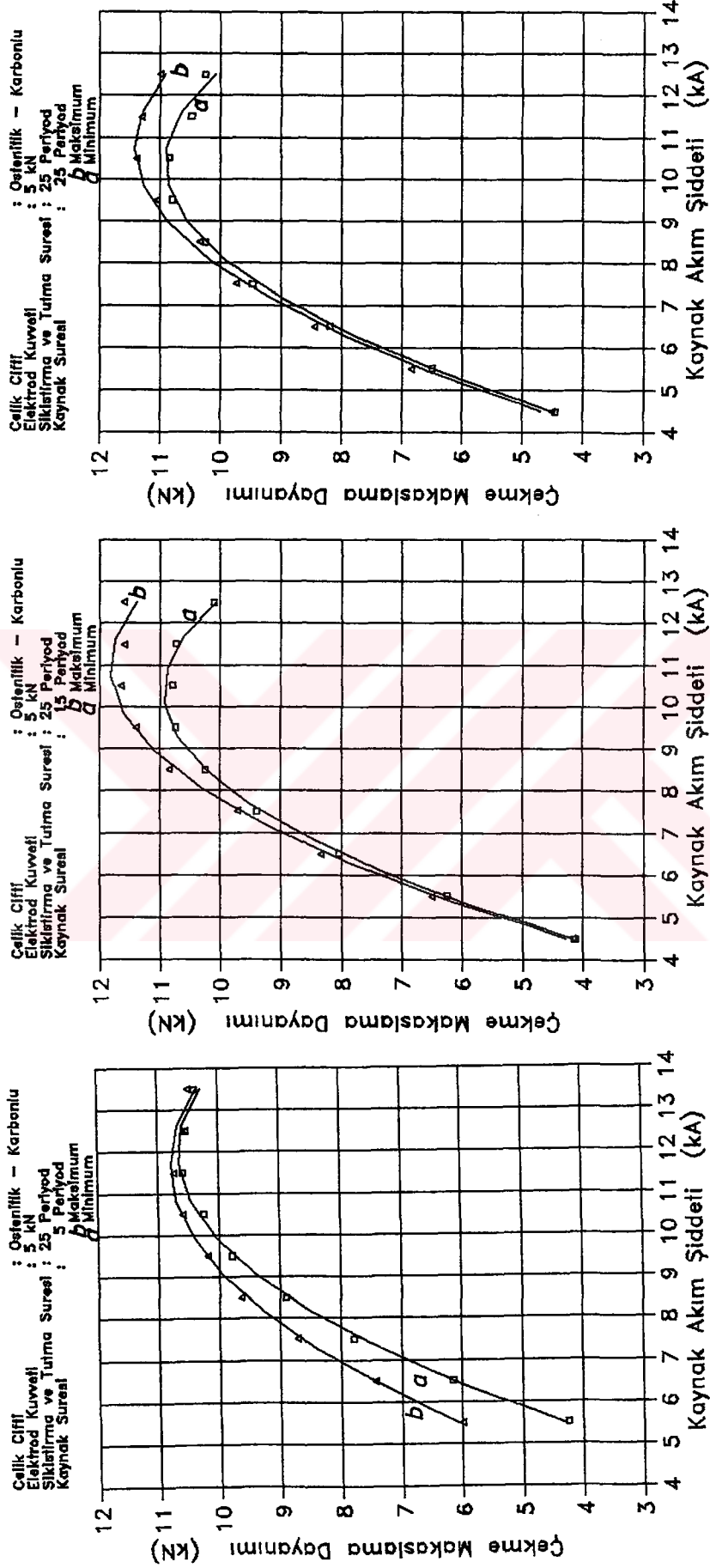
a) 5 Periyod b) 15 Periyod c) 25 Periyod

Şekil 8.2 : Elektrik direnç nokta kaynağı yapılmış ostenitik paslanmaz çelik-karbonlu çelik çiftinin çekme-makaslama dayanımları üzerine kaynak akım şiddetinin etkisi (a, b, c, d, e).



d) Kaynak akım şiddetinin bağlantının çekme-makaslama dayanımı üzerine etkisi,

Şekil 8.2 (devam)



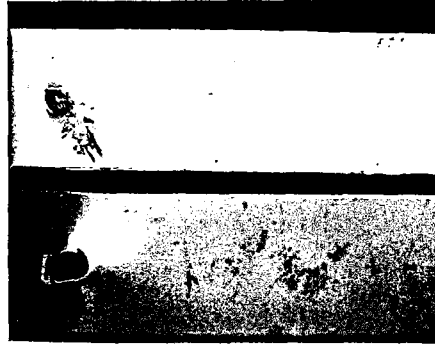
e) Bağlantının çekme-makaslama dayanım değerlerinin minimum ve maksimumları (Çekme-makaslama Dayanımı Bandı).

Şekil 8.2 (devam)

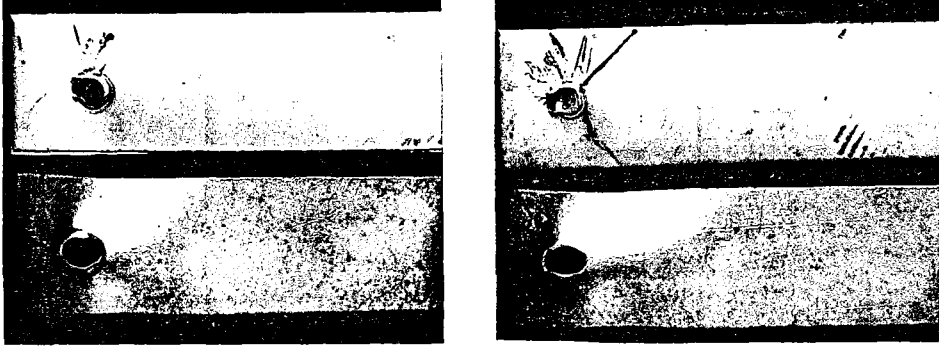
Bağlantılarda düşük akım şiddetlerinde çekirdek kesitinin küçük olması nedeniyle ayrılma tipinde kopma olmakta ve düşük çekme-makaslama dayanım değerleri elde edilmektedir. Yüksek Akım şiddeti ve 5 periyod olarak sabit tutulan düşük kaynak sürelerinde düşük çekme-makaslama dayanım değerleri, 25 periyodluk yüksek kaynak sürelerinde ve 9.5 kA ile 10.5 kA kaynak akım şiddetlerinde ise maksimum çekme-makaslama dayanım değerleri elde edilmiştir. 15 periyodluk kaynak süresinde artan kaynak akım şiddetine bağlı olarak elde edilen çekme-makaslama dayanım değerleri ise her iki eğrinin ortasında yer almaktadır.

Artırılan kaynak akımının yanı sıra kaynak süresinin uzun tutulması, kaynak ısı girdisini artırdığından kaynak çekirdek kesiti büyümekte, böylece yüksek çekme-makaslama dayanım değerleri elde edilirken düğmelenme tipinde kopma oluşmaktadır.

8.5.9.5 kA kaynak akım şiddeti aralığından sonra sac ara yüzeylerinde fışkırma oluşması, bağlantının çekme-makaslama dayanımının düşmesine neden olmaktadır (Şekil 8.3).

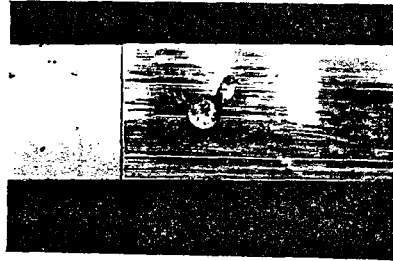


Şekil 8.3 : Yüksek kaynak akım şiddetlerinde (8.5-9.5 kA'den sonra) sac ara yüzeylerinde oluşan fışkırma.



Şekil 8.3 (devam)

12.5 kA - 13.5 kA'lık yüksek kaynak akım şiddetlerinde hem saclar arasında hem de sacların üst yüzeylerinde fışkırma oluşmakta (Şekil 8.4) ve derin elektrod izlerinin yanısıra nokta çevresindeki renklenme ile kaynak kalitesi ve bağlantının çekme-makaslama dayanımı önemli ölçüde düşmektedir.



Şekil 8.4 : Çok yüksek kaynak akım şiddetlerinde (12.5-13.5 kA'den sonra) sac üst yüzeylerinde oluşan fışkırma, derin elektrod izleri ve renklenmeler.

Ferritik kromlu paslanmaz çelik-karbonlu çelik çifti için 5 periyod kaynak süresi ve 10.5 kA kaynak akım şiddetinde 10.2 kN, ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelik-karbonlu çelik çifti için ise aynı kaynak süresi ve 10.5 kA kaynak akım şiddetinde 10.25 kN'luk bir çekme-makaslama dayanımı elde edilmektedir.

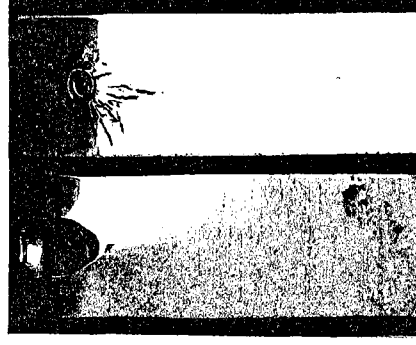
Kaynak süresinin 15 periyod olarak sabit tutulduğu aynı tür birleştirmelerde ise 4.5 kA akım şiddetinden itibaren bağlantının çekme-makaslama dayanımı artmakta ve bir maksimumdan geçmektedir. Bu değer ferritik kromlu paslanmaz çelik-karbonlu çelik çifti için 10.5 kA kaynak akım şiddetinde 10.4 kN, ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelik-karbonlu çelik çifti için ise 10.5 kA kaynak akım şiddeti ve 11.2 kN'dur.

25 periyodluk sabit kaynak süresi için maksimum çekme-makaslama değerleri ise; ferritik kromlu paslanmaz çelik-karbonlu çelik çifti için 10.5 kA kaynak akım şiddetinde 10.8 kN, ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelik-karbonlu çelik çifti için 10.5 kA kaynak akım şiddetinde 11.4 kN olarak elde edilmektedir.

Her iki tür çelik çiftine ait nokta kaynağı bağlantılarında çekme-makaslama deneyinin uygulanmasında dikkati çeken bir durum, kaynak akım şiddetinin artmasına bağlı olarak düğmelenme tipinde kopmaların oluşmasının yanısıra karbonlu çelik tarafında çekirdek dibinden başlayarak yırtılma oluşmasıdır.

Bu tür kopmanın metalografisi Şekil 7.6'da görülmektedir.

Hem ferritik kromlu paslanmaz çelik-karbonlu çelik hem de ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelik-karbonlu çelik çiftinin nokta kaynağı bağlantılarında 8.5 kA'den daha yüksek kaynak akım şiddetlerinde sac ara yüzeyinde fışkırma oluşmakta, toplam fışkırma miktarı arttığından bağlantının çekme-makaslama dayanımı önemli ölçüde azalmaktadır (Şekil 8.5).



Şekil 8.5 : Yüksek kaynak akım şiddetlerinde paslanmaz çelik sacların ara yüzeylerinde oluşan fışkırma.

25 periyodluk kaynak süresinin sabit tutulduğu çok yüksek kaynak akım şiddetlerinde bağlantılarda sac ara yüzeylerinde fışkırmanın meydana gelmesinin yanında, özellikle ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelik ve karbonlu çelik sacların üst yüzeylerinde aşırı tav rengi ile elektrod basma yüzeyinden fışkırma oluşmaktadır (Şekil 8.6).



Şekil 8.6 : Çok yüksek kaynak akım şiddetlerinde karbonlu çelik saclarının üst yüzeylerinde oluşan derin elektrod izleri, renklenme ve delinmeler.

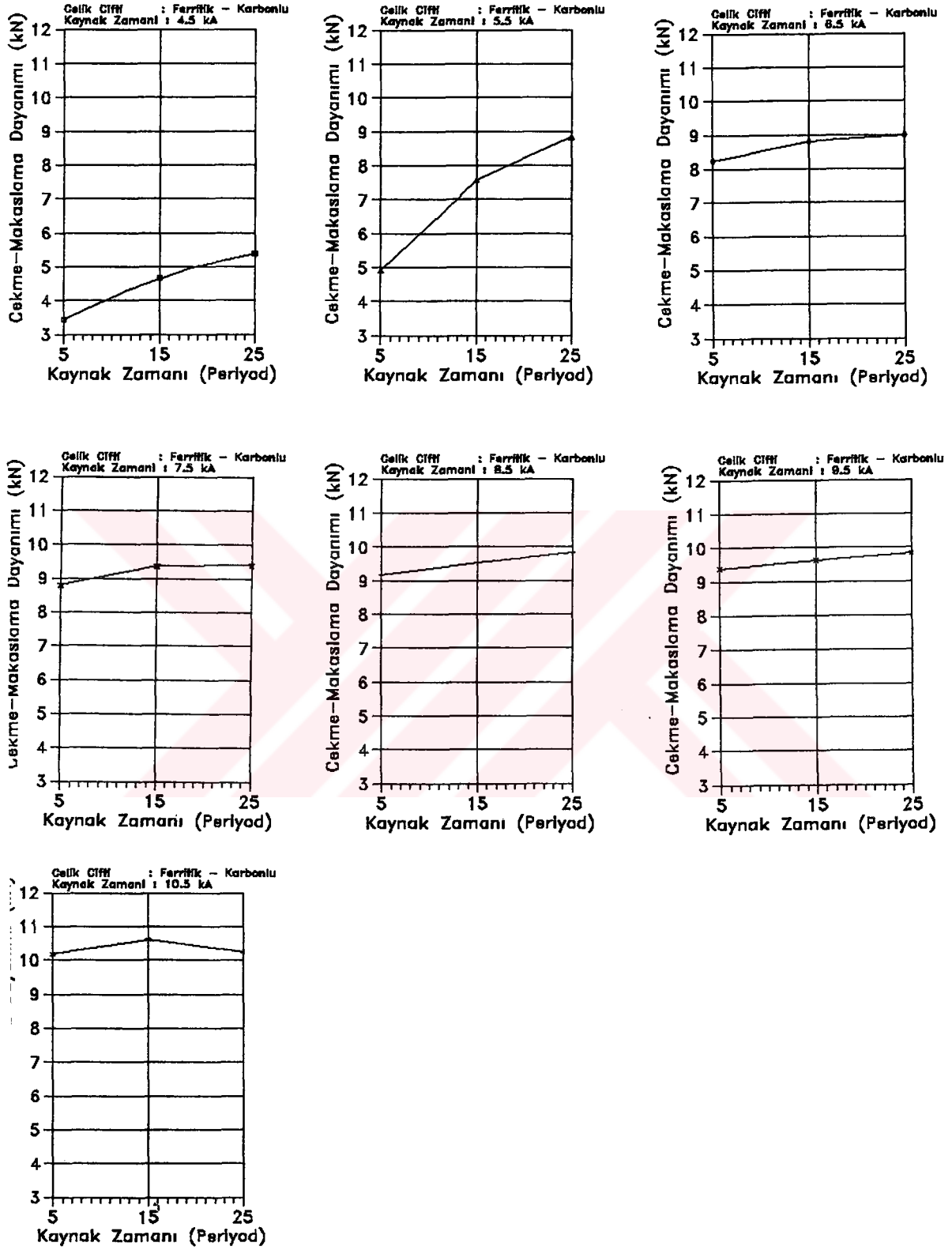
8.2.2. Kaynak Süresinin Etkisi

deneylerde kullanılan 1 mm kalınlığındaki ferritik kromlu paslanmaz çelik-karbonlu çelik ve ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelik-karbonlu çelik sacların nokta kaynağında kaynak süresinin bağlantının çekme-makaslama dayanımına

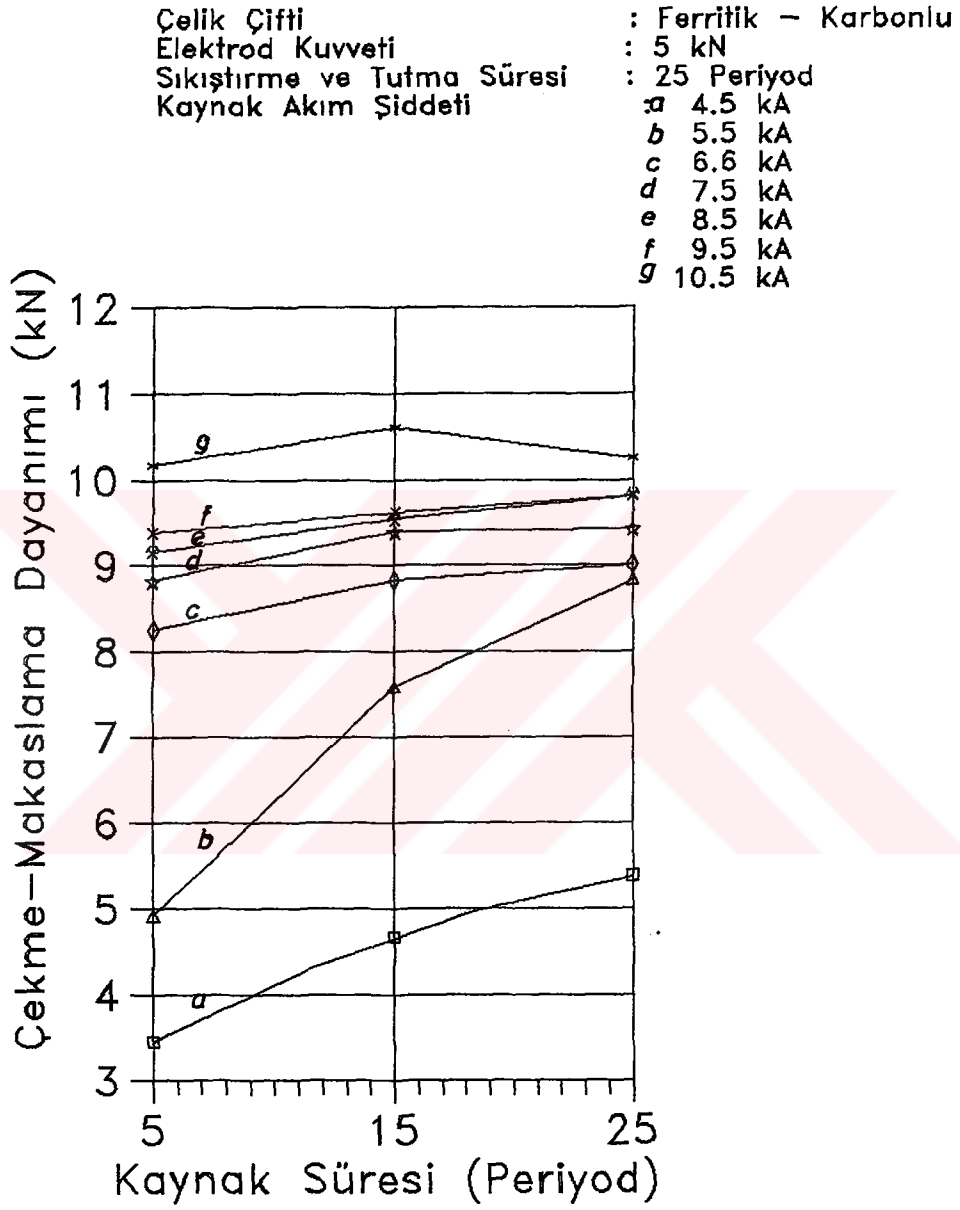
etkisi Şekil 8.7 ve Şekil 8.8'de görülmektedir.

Diyagramlardan görüleceği gibi, kaynak süresinin artmasıyla kaynak ısı girdisi de artmakta, böylece kaynak çekirdek kesiti büyüyerek bağlantının çekme-makaslama dayanımının artmasına neden olmaktadır. Bu artış, fışkırmanın başladığı yüksek akım şiddetlerine kadar devam etmektedir.

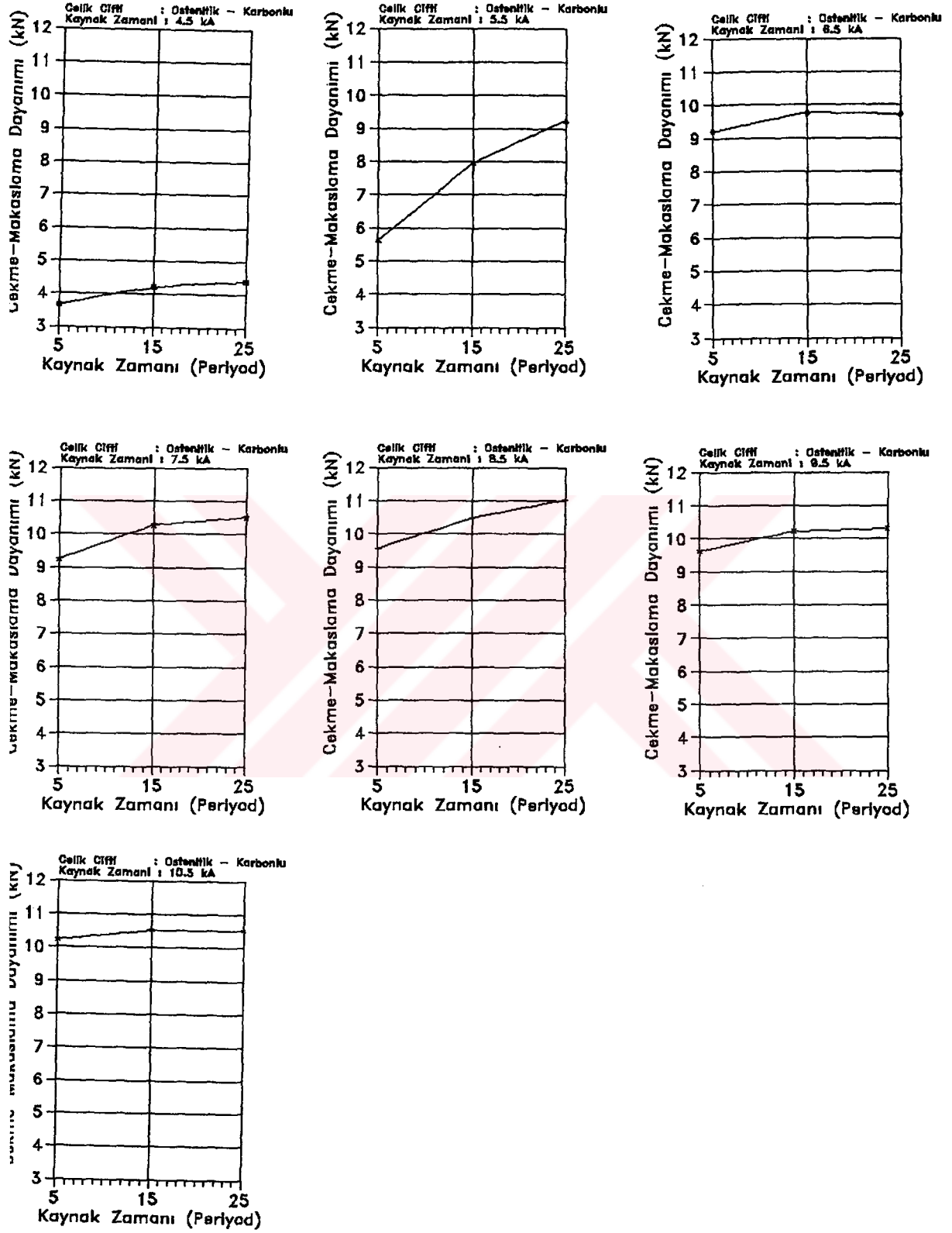
Diyagramlar incelendiğinde, ferritik kromlu paslanmaz çelik-karbonlu çelik çiftinin çekme-makaslama dayanımının ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelik-karbonlu çelik çiftinin çekme makaslama dayanımından daha düşük olduğu görülmektedir. Çünkü ostenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklerin dayanımları ferritik kromlu paslanmaz çeliklere göre daha yüksektir.



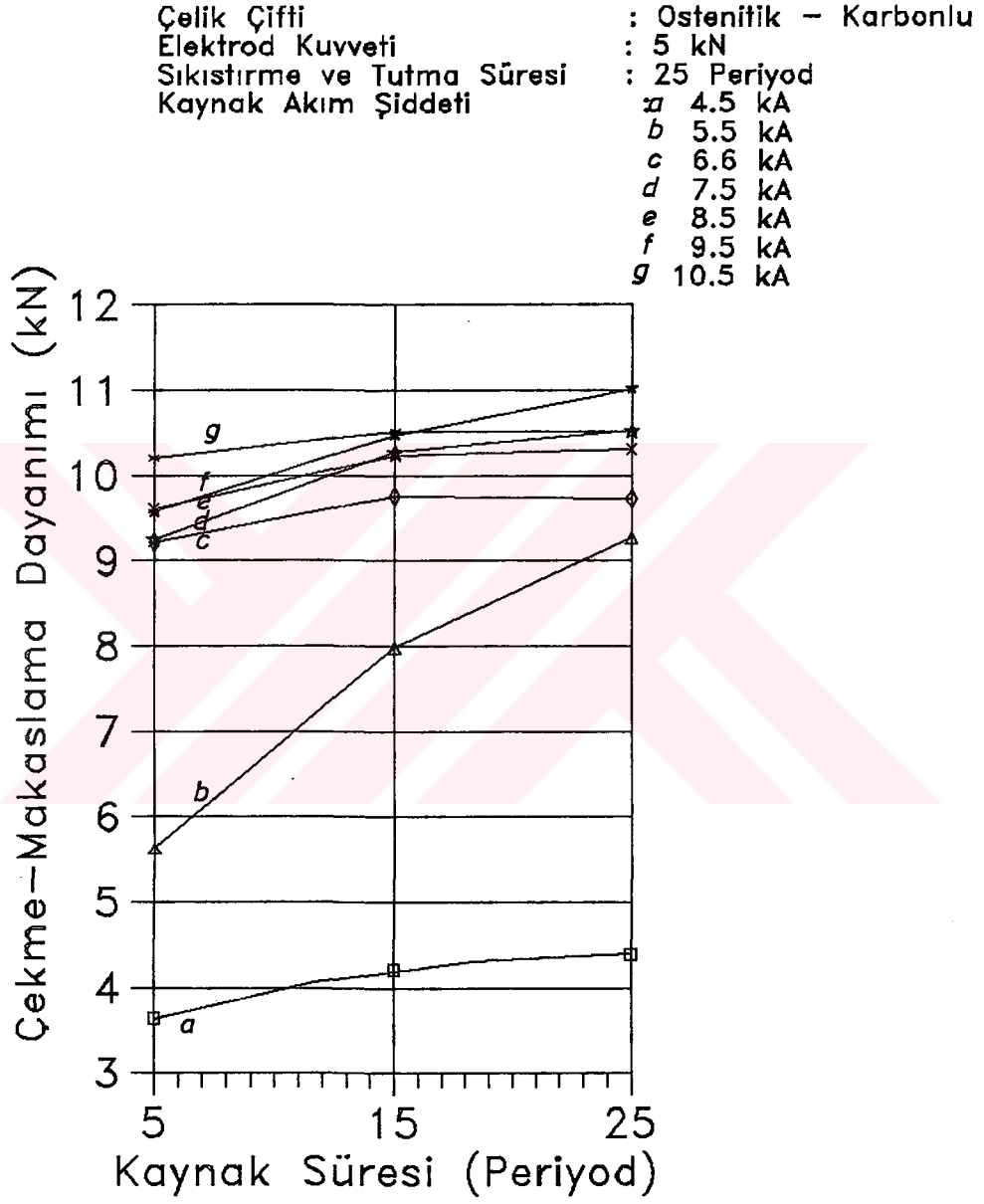
Şekil 8.7 : Elektik direnç nokta kaynağı yapılmış ferritik paslanmaz çelik-karbonlu çelik çiftinin çekme-makaslama dayanımları üzerine kaynak süresinin etkisi.



Şekil 8.7 (devam)



Şekil 8.8 : Elektrik direnç nokta kaynağı yapılmış ostenitik paslanmaz çelik-karbonlu çelik çiftinin çekme-makaslama dayanımları üzerine kaynak süresinin etkisi.



Şekil 8.8 (devam)

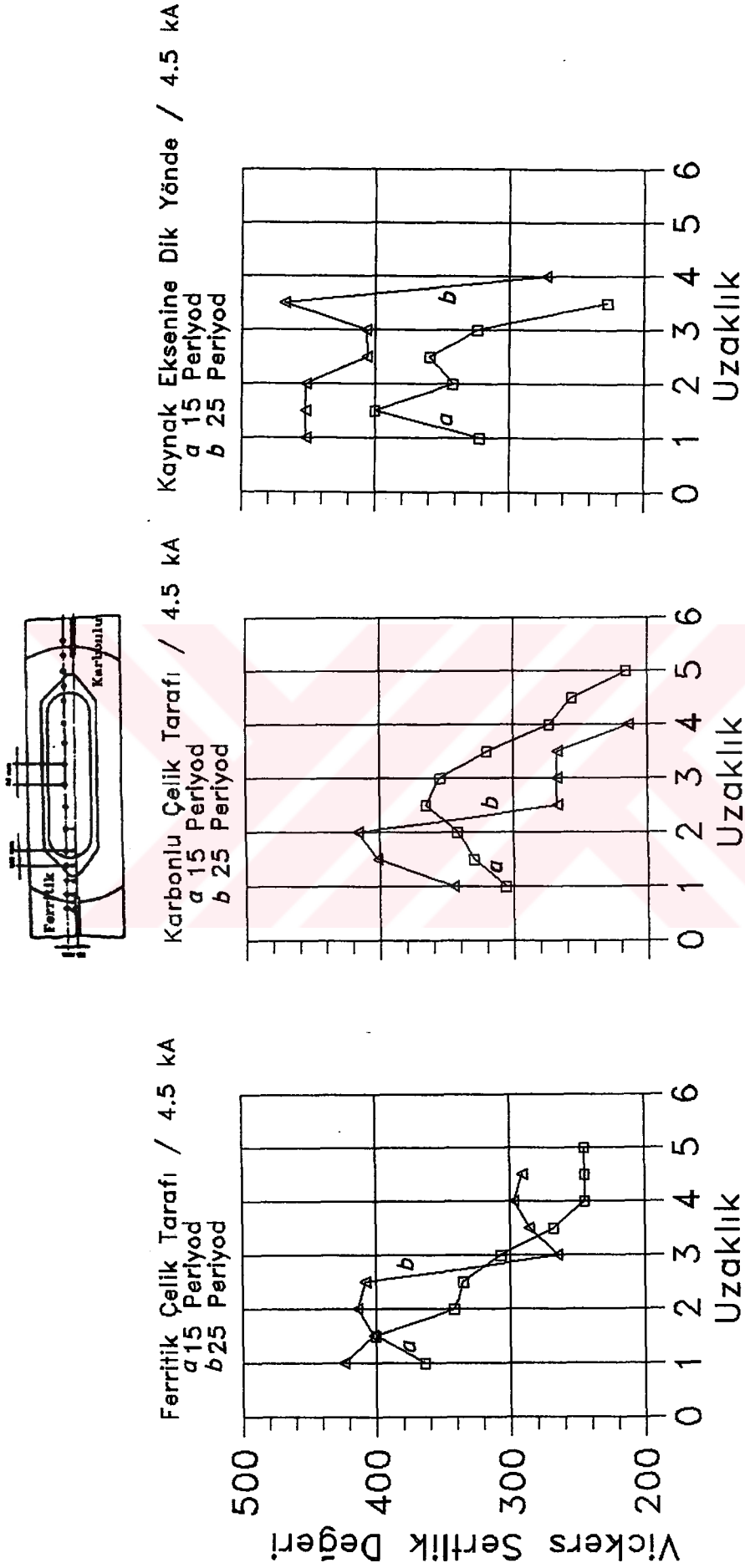
8.3. Bağlantının Sertlik Dağılımı

Şekil 8.9'da esas metal, ITAB ve kaynak metalindeki sertlik dağılımları gösterilmiştir.

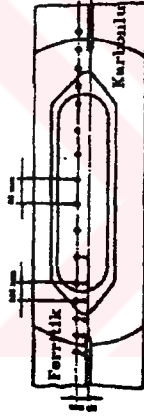
Çekirdek kesitinden alınan sertlik değerleri arasında büyük bir farklılık görülmemektedir. Çünkü krom karbür çökelmesi etkisini, tane sınırlarında ve sınırlara oldukça yakın, çok ince bir bölgede göstermektedir.

Sertlik izi genellikle tane içine, büyük bir tesadüfle de tane sınırına düşmektedir.



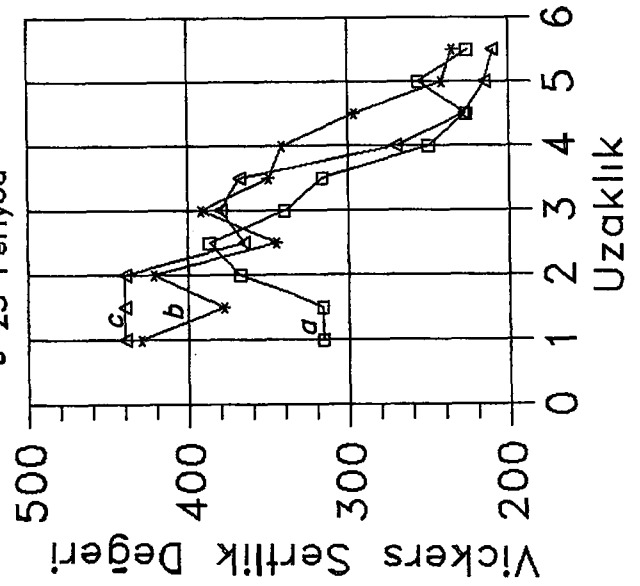


Şekil 8.9 : a) Elektrik direnç nokta kaynağı yapılmış ferritik paslanmaz çelik-karbonlu çelik çiftinin esas metal, ITAB ve kaynak metalindeki sertlik dağılımları.
b) Elektrik direnç nokta kaynağı yapılmış ostenitik paslanmaz çelik-karbonlu çelik çiftinin esas metal, ITAB ve kaynak metalindeki sertlik dağılımları.



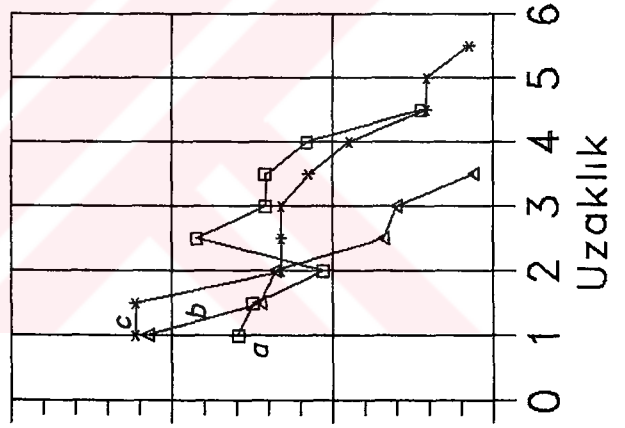
Ferritik Çelik Tarafı / 5.5 kA

a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod



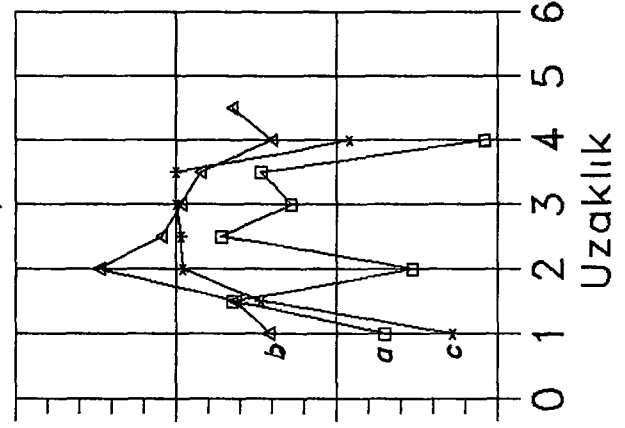
Karbonlu Çelik Tarafı / 5.5 kA

a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod

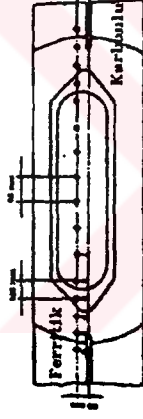


Kaynak Eksenine Dlk Yönde / 5.5 kA

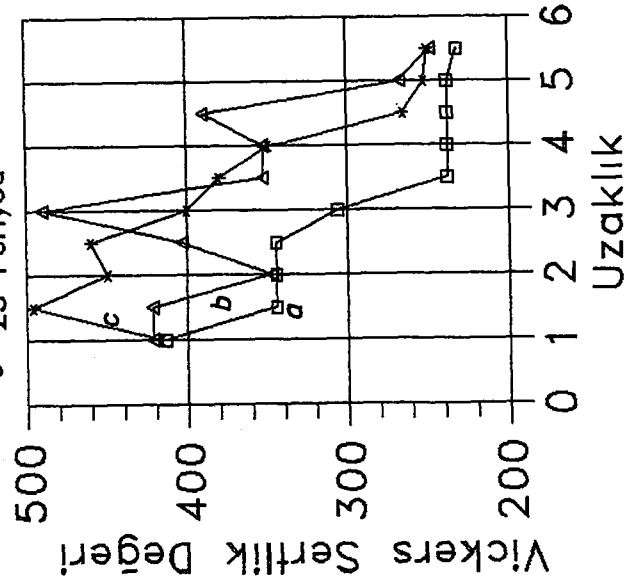
a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod



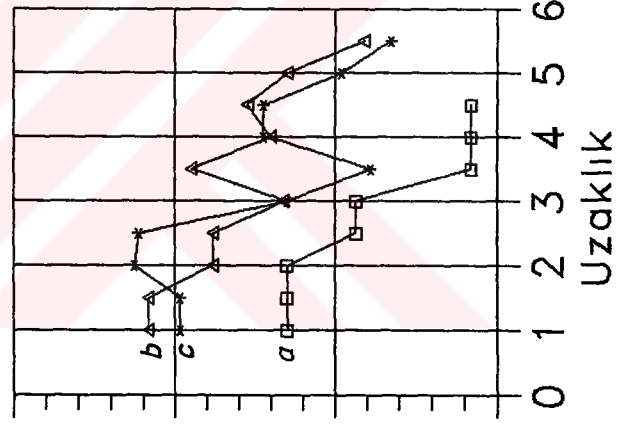
Şekil 8.9 : a) (devam)



Ferritik Çelik Tarafı / 6.5 kA
a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod

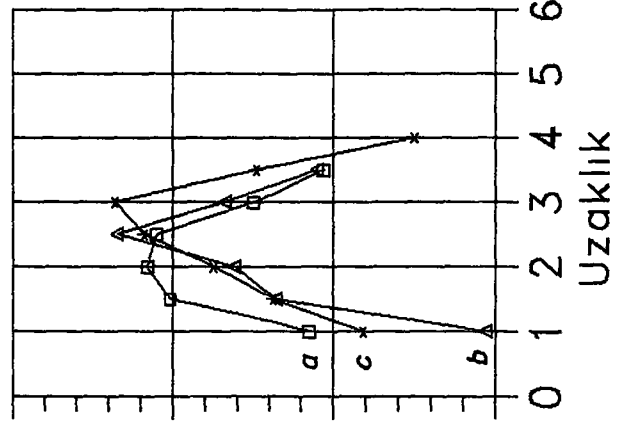


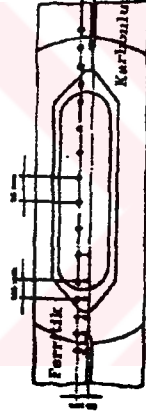
Karbonlu Çelik Tarafı / 6.5 kA
a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod



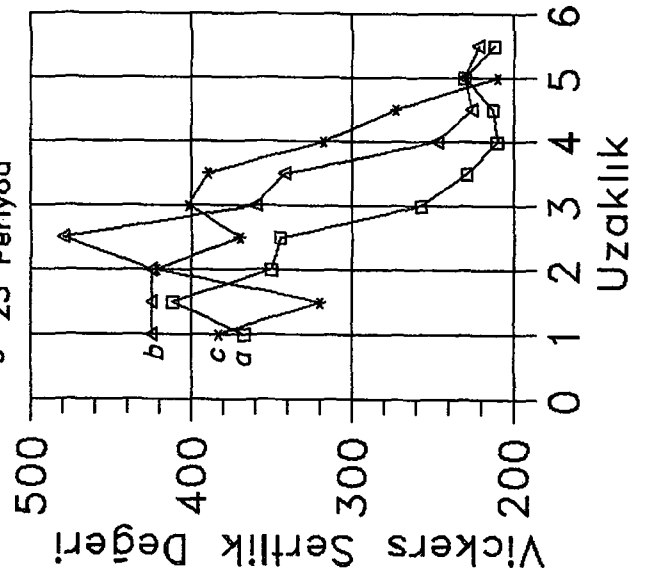
Şekil 8.9 : a) (devam)

Kaynak Eksenine Dik Yönde / 6.5 kA
a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod

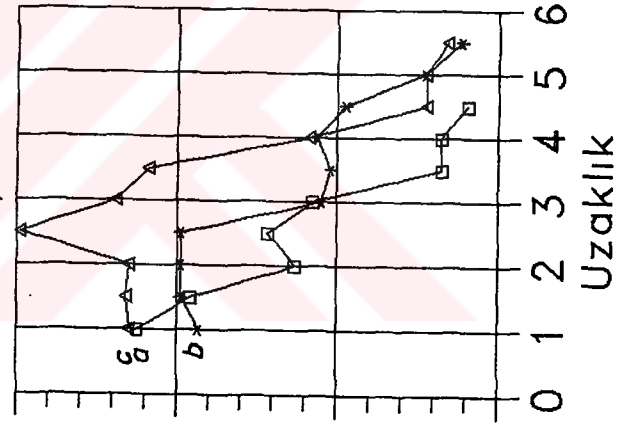




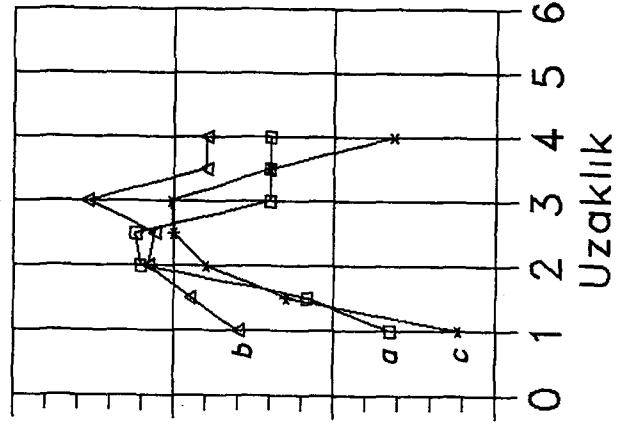
Ferritik Çelik Tarafı / 7.5 kA
a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod



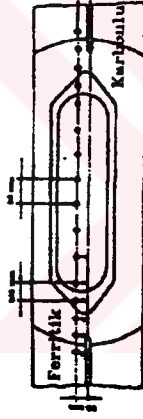
Karbonlu Çelik Tarafı / 7.5 kA
a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod



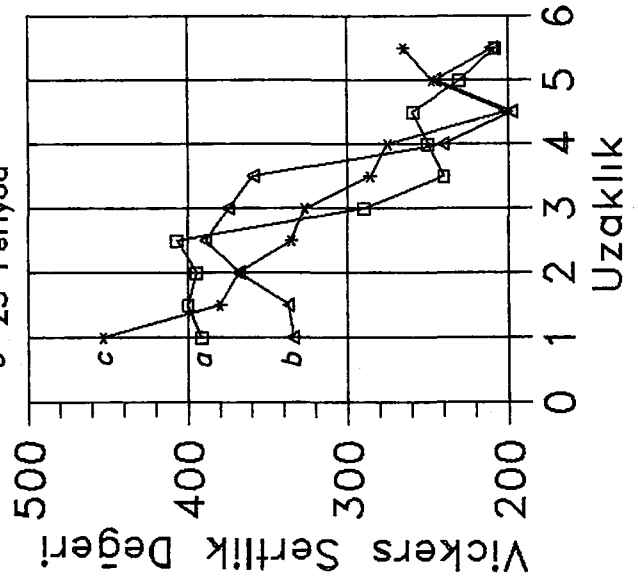
Kaynak Eksenine Dlk Yönde / 7.5 kA
a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod



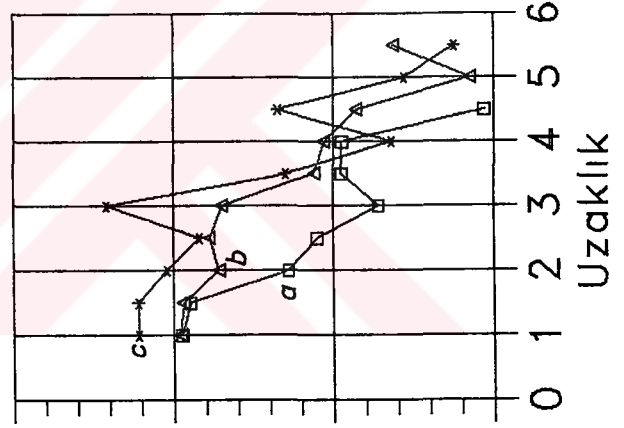
Şekil 8.9 : a) (devam)



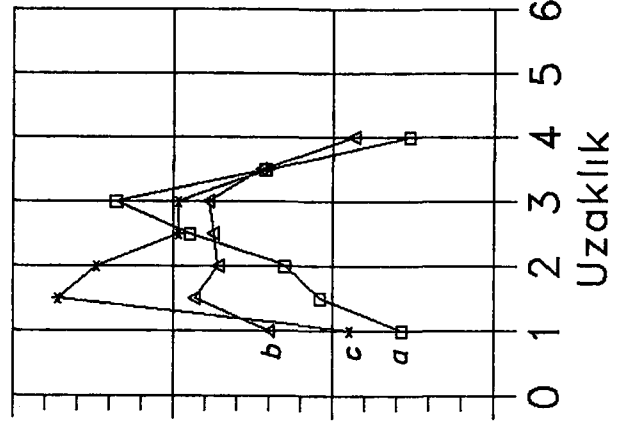
Ferritik Çelik Tarafı / 8.5 kA
a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod



Karbonlu Çelik Tarafı / 8.5 kA
a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod



Kaynak Eksenine Dik Yönde / 8.5 kA
a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod

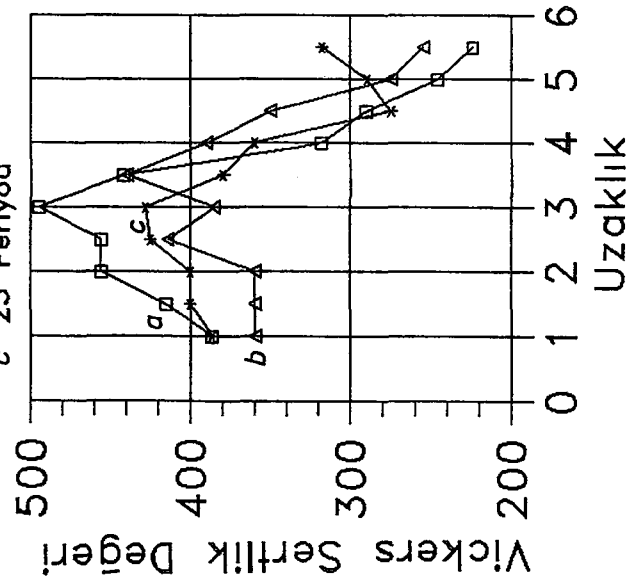


Şekil 8.9 : a) (devam)



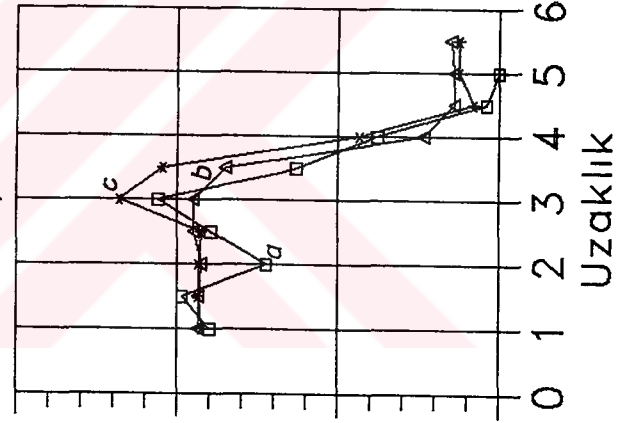
Ferritik Çelik Tarafı / 9.5 kA

a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod



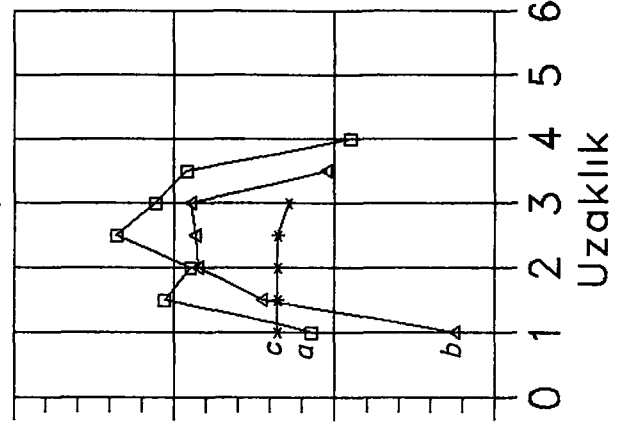
Karbonlu Çelik Tarafı / 9.5 kA

a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod

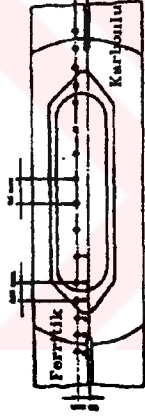


Kaynak Eksenine Dik Yönde / 9.5 kA

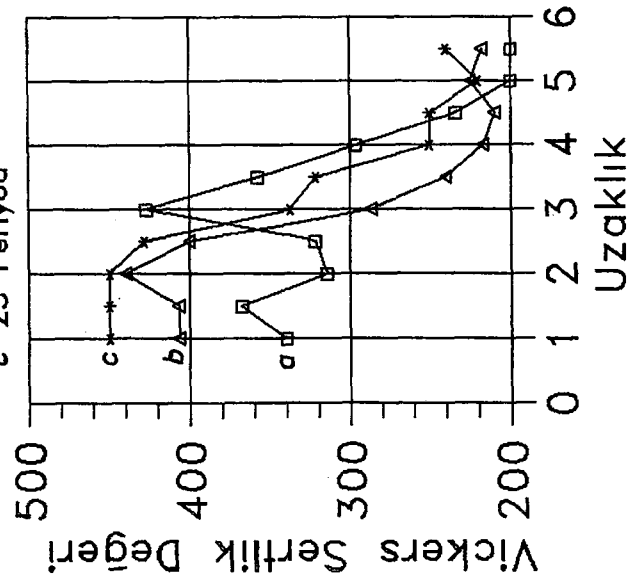
a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod



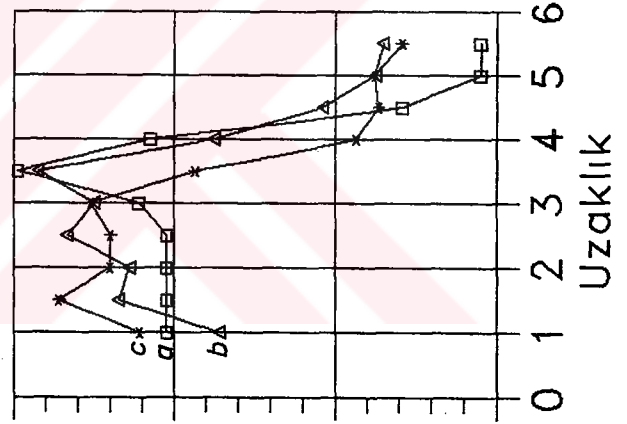
Şekil 8.9 : a) (devam)



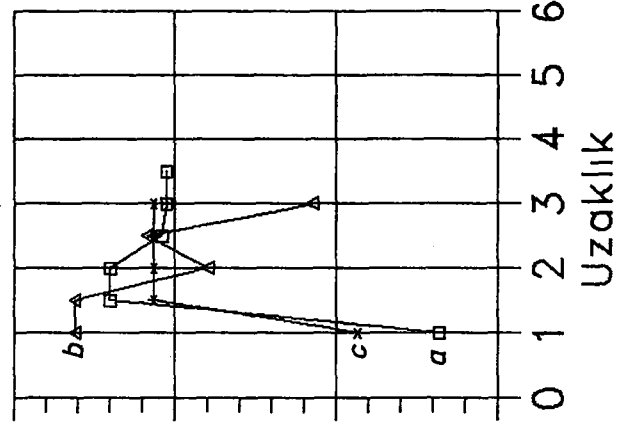
Ferritik Çelik Tarafı / 10.5 kA
a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod



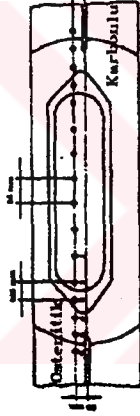
Karbonlu Çelik Tarafı / 10.5 kA
a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod



Kaynak Eksenine Dik Yönde / 10.5 kA
a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod

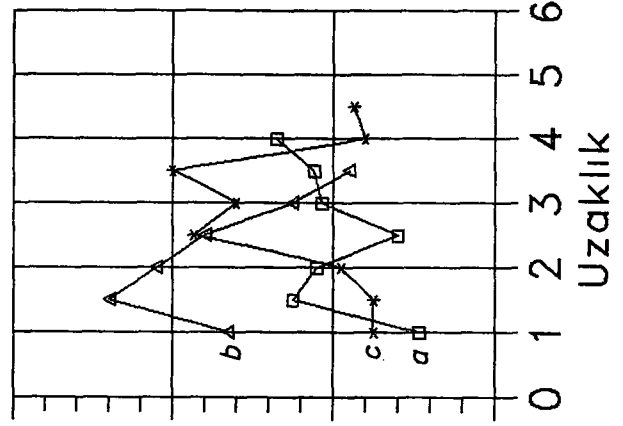


Şekil 8.9 : a) (devam)



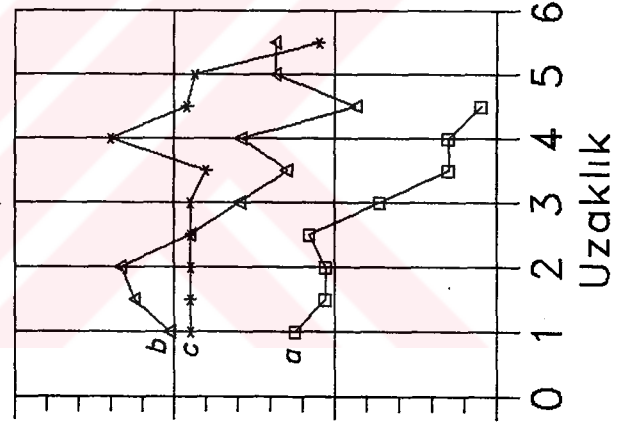
Kaynak Eksenine Dik Yönde / 5.5 kA

a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod



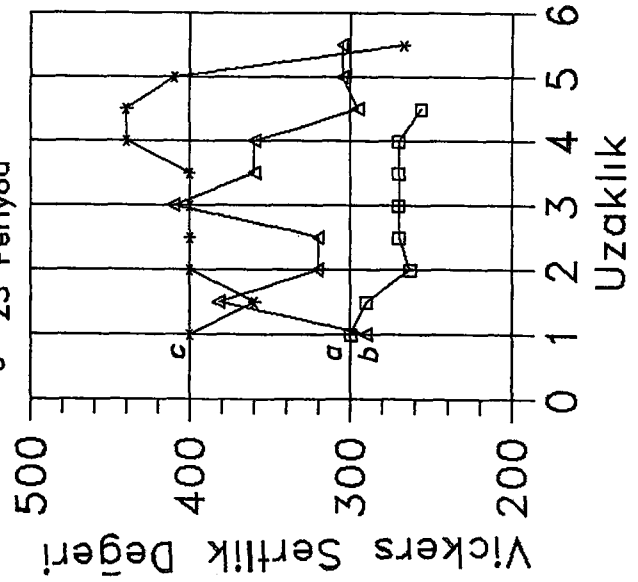
Karbonlu Çelik Tarafı / 5.5 kA

a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod

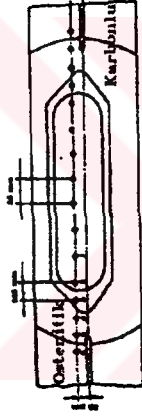


Ostenitlik Çelik Tarafı / 5.5 kA

a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod

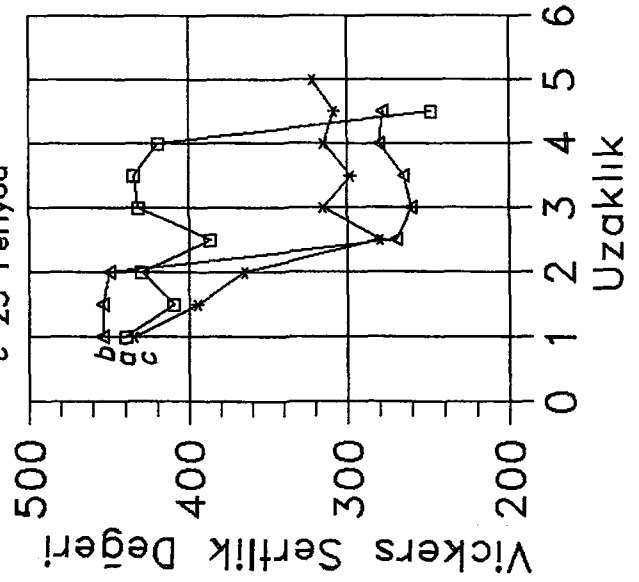


Şekil 8.9 : b) (devam)



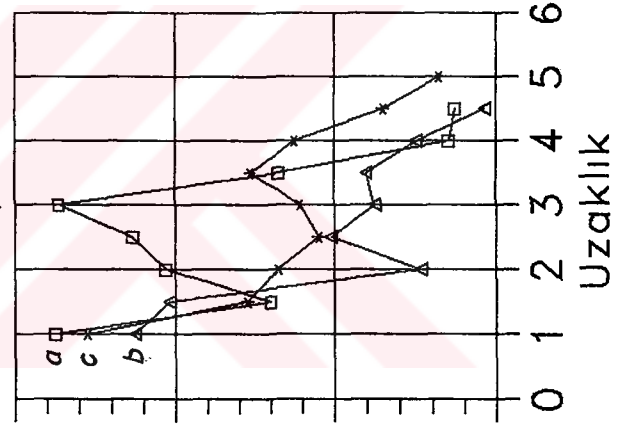
Ostenitlik Çelik Tarafı / 6.5 kA

a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod



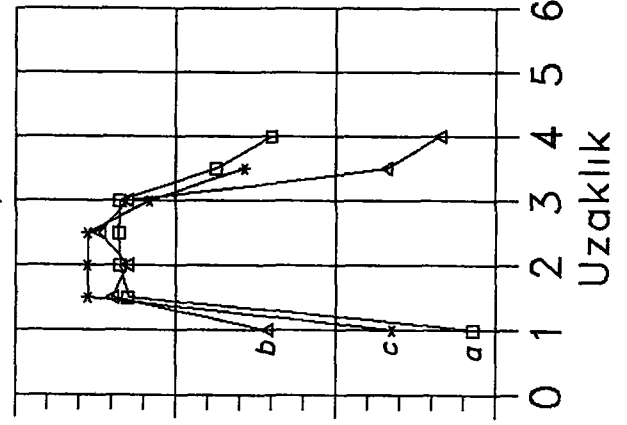
Karbonlu Çelik Tarafı / 6.5 kA

a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod

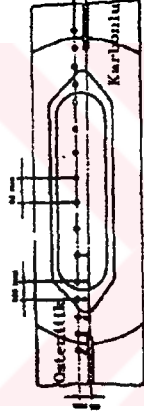


Kaynak Eksenine Dlk Yönde / 6.5 kA

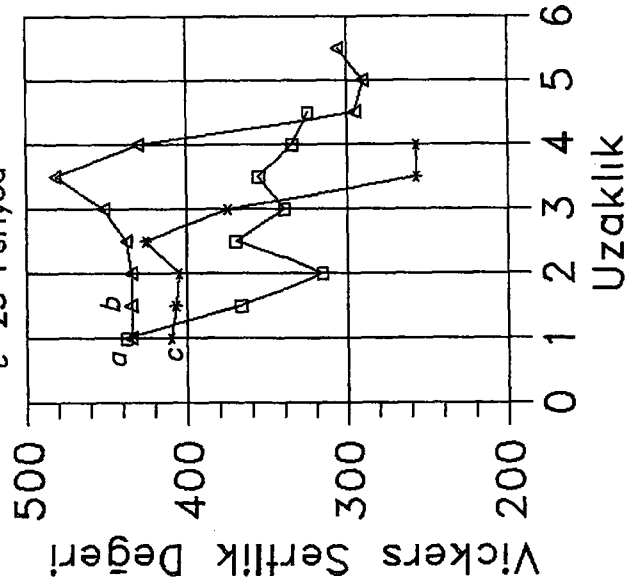
a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod



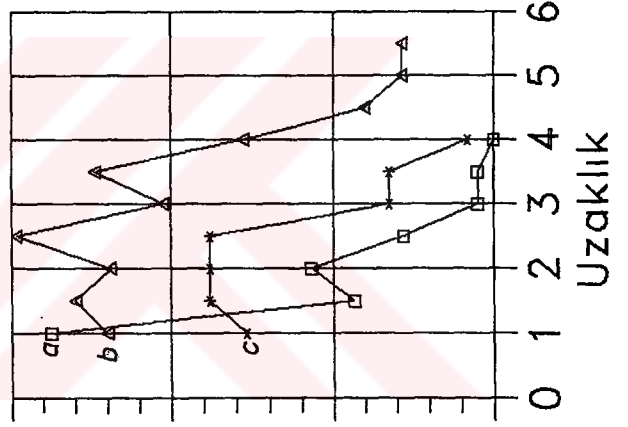
Şekil 8.9 : b) (devam)



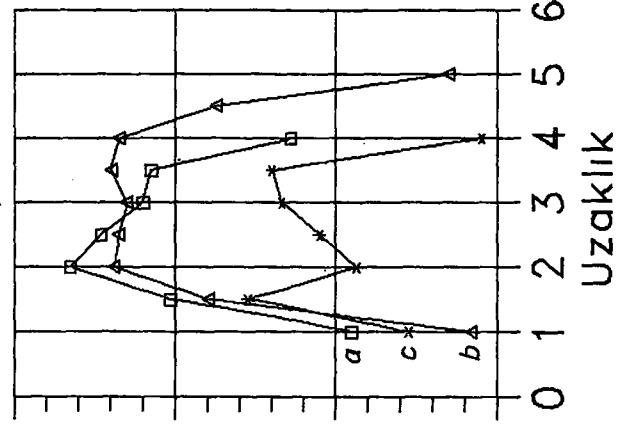
Ostenitlik Çelik Tarafı / 7.5 kA
a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod



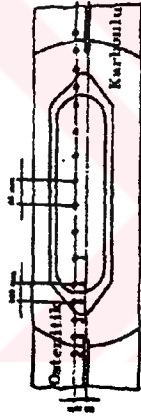
Karbonlu Çelik Tarafı / 7.5 kA
a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod



Kaynak Eksenine Dik Yönde / 7.5 kA
a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod

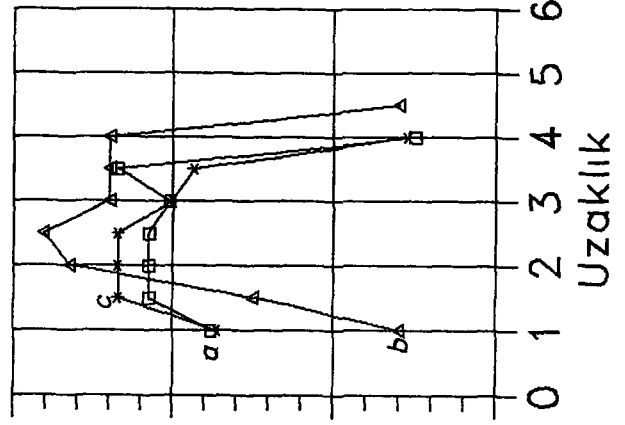


Şekil 8.9 : b) (devam)



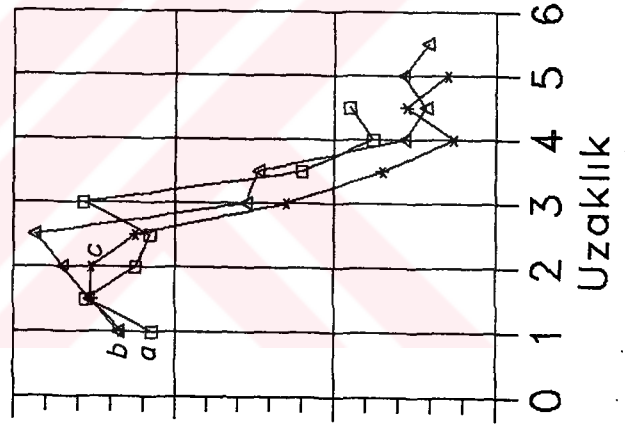
Kaynak Eksenine Dlk Yönde / 8.5 kA

a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod



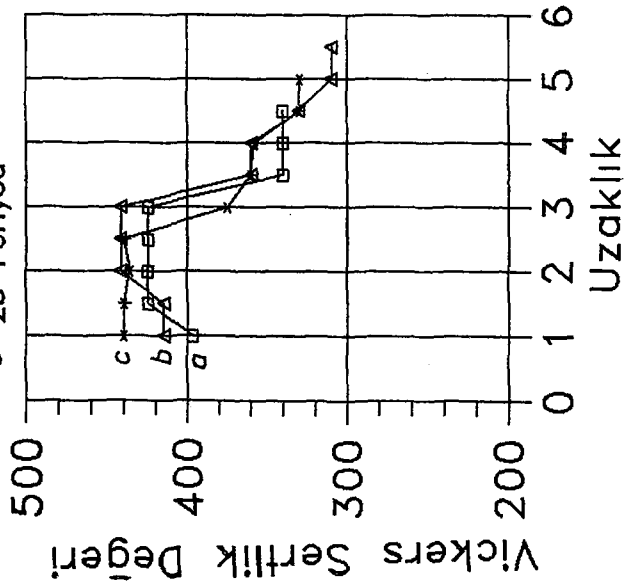
Karbonlu Çelik Tarafı / 8.5 kA

a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod

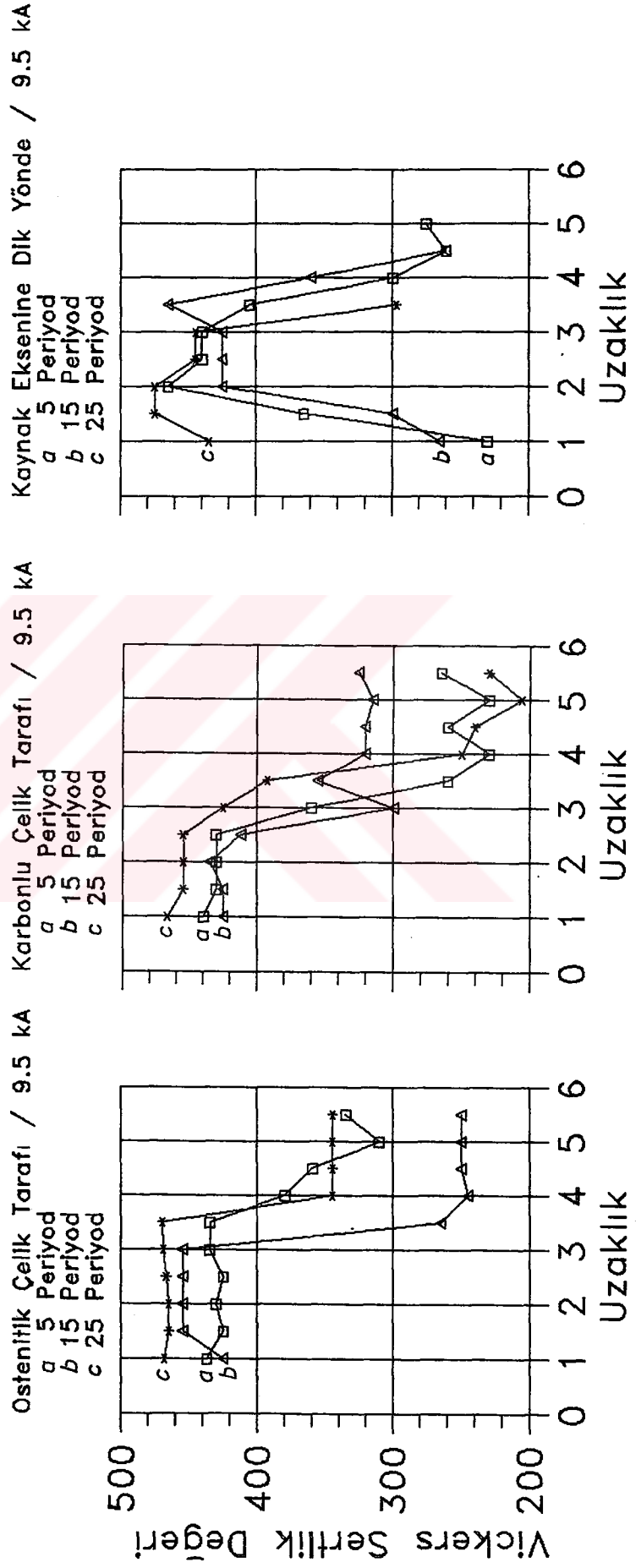
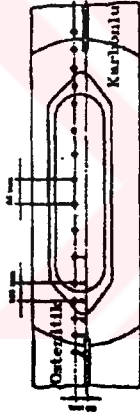


Ostenitlik Çelik Tarafı / 8.5 kA

a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod



Şekil 8.9 : b) (devam)



Şekil 8.9 : b) (devam)

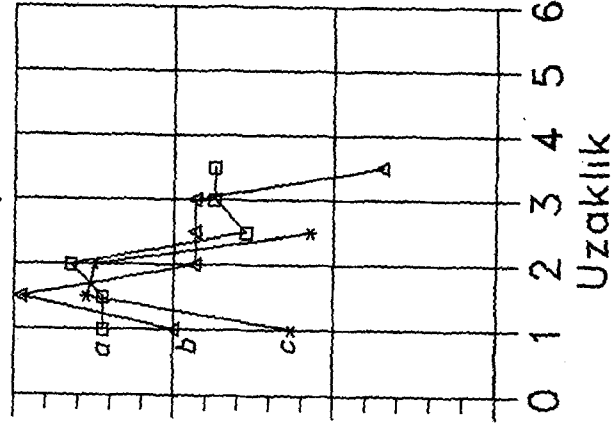
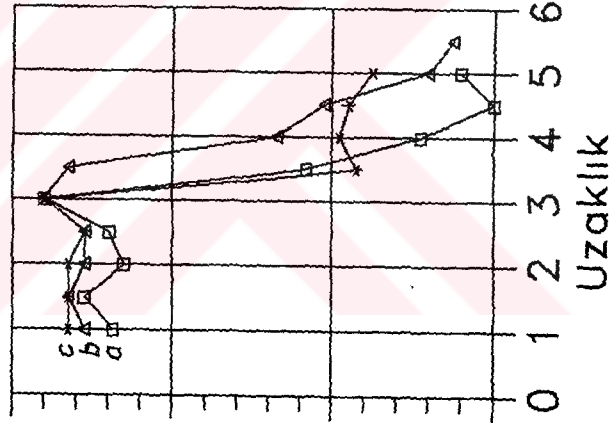
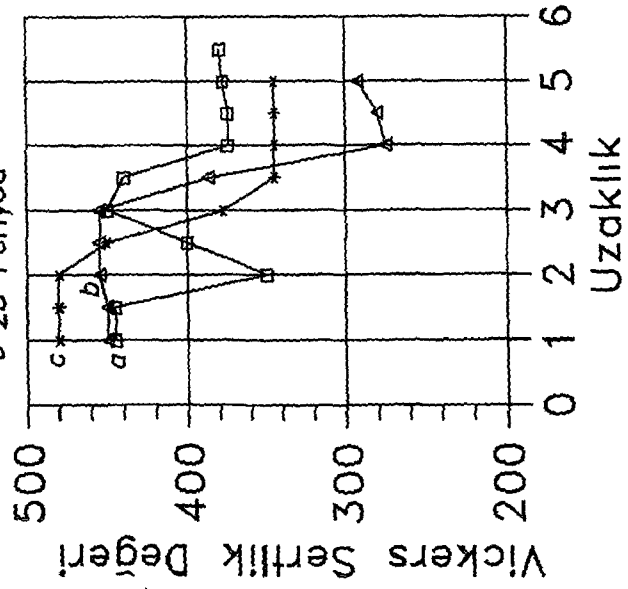


Ostenitlik Çelik Tarafı / 10.5 kA Karbonlu Çelik Tarafı / 10.5 kA Kaynak Eksenine Dik Yönde / 10.5 kA

a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod

a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod

a 5 Periyod
b 15 Periyod
c 25 Periyod



Şekil 8.9 : b) (devam)

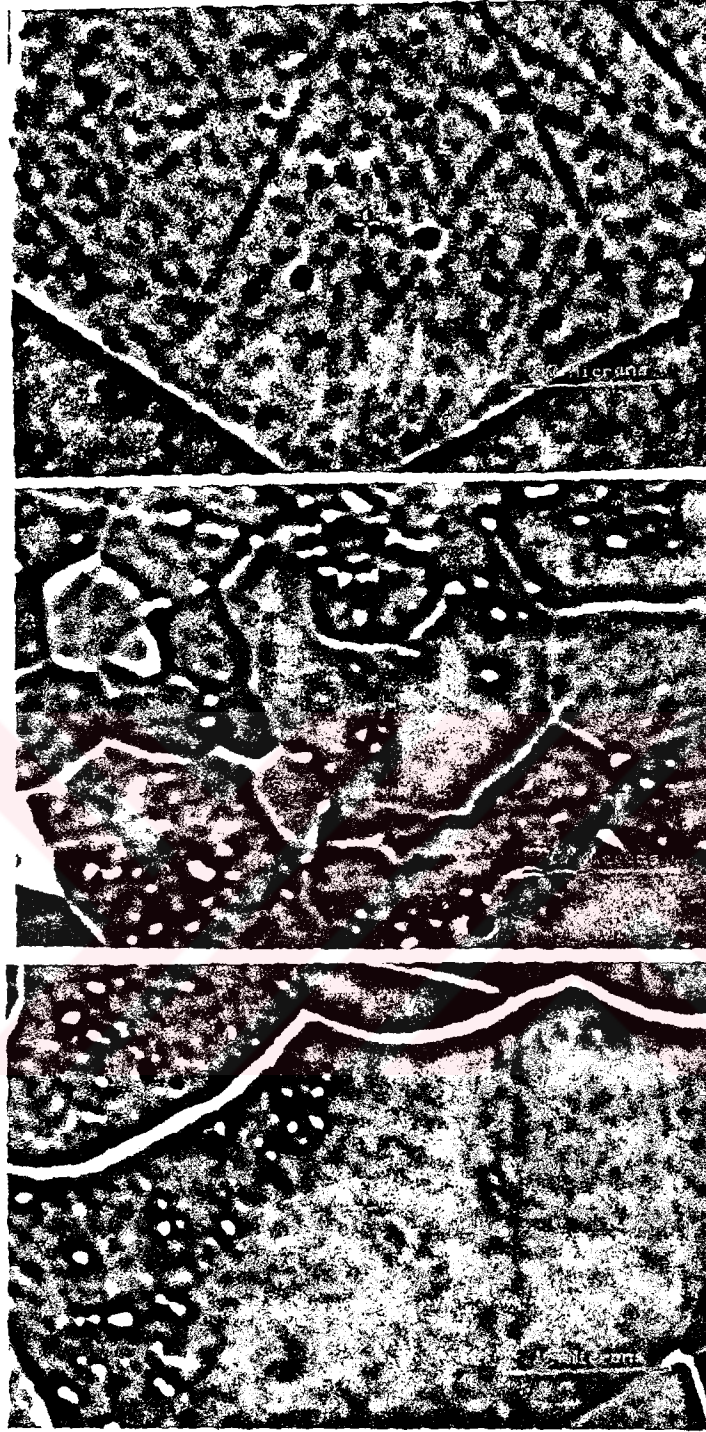
8.4. Bağlantının İçyapı Fotoğrafları

Yapılan çalışmada, ferritik kromlu paslanmaz çelik karbonlu çelik ve osteritik krom-nikelli paslanmaz çelik-karbonlu çelik çiftine ait bağlantılarda kaynak parametrelerinin kaynak çekirdek kesitinde oluşturduğu metalurjik olayları tanımlamak amacıyla içyapı incelemesi yapılmıştır.

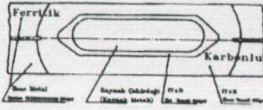
İçyapı fotoğraflarının incelenmesinden görüleceği gibi, kaynak süresinin artmasıyla, başka bir deyişle arttırılan ısı girdisine bağlı olarak ferritik kromlu paslanmaz çelikte ITAB'de tanelerin irileştiği ve tane sınırlarında krom karbür çökmesinin olduğu görülmektedir (Şekil 8.10 ve Şekil 8.11).



Şekil 8.10 : a) Ferritik kromlu paslanmaz çeliğin tarayıcı elektron mikroskobu (TAREM) ile alınmış yüzey fotoğrafları (X2000).



Şekil 8.10 : b) Ferritik kromlu paslanmaz çeliğin tarayıcı elektron mikroskobu (TAREM) ile alınmış mikroyapı fotoğrafı (Vilella aynası ile dağlanmış, X2000).



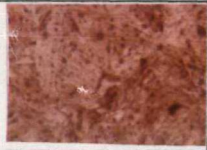
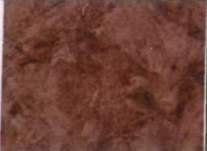
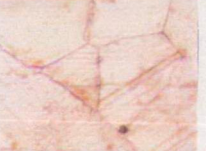
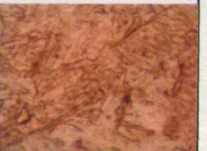
Esas Metal

ITAB

Kaynak Metali

4.5 kA	5 Periyod			
	15 Periyod			
	25 Periyod			
5.5 kA	5 Periyod			
	15 Periyod			

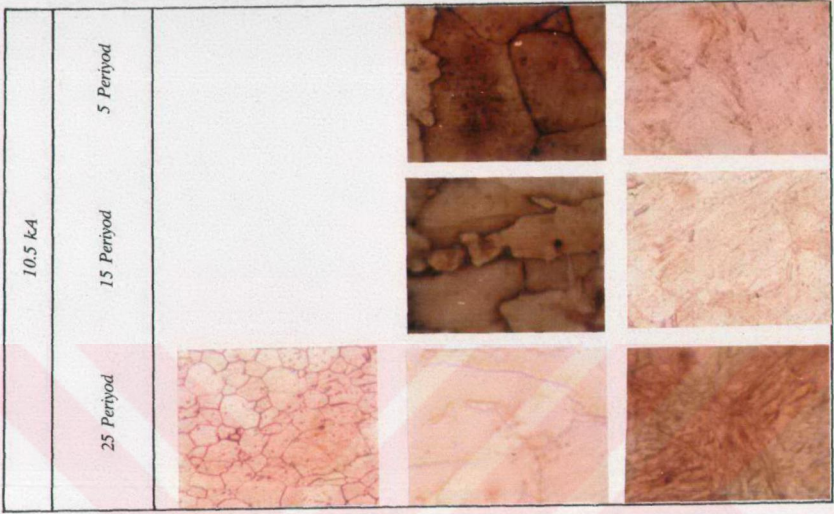
Şekil 8.11 : Elektrik direnç nokta kaynağı yapılmış ferritik kromlu paslanmaz çelik-karbonlu çelik çiftinin metal ışık mikroskobu ile alınmış mikroyapı fotoğrafları (Adler ayırıcı ile dağlanmış, X400).

	25 Periyod			
6.5 kA	5 Periyod			
	15 Periyod			
	25 Periyod			
7.5 kA	5 Periyod			
	15 Periyod			
	25 Periyod			

Şekil 8.11 (devam)



Şekil 8.11 (devam)



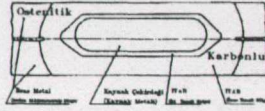
Şekil 8.11 (devam)

15 periyodluk kaynak süresinin uygulandığı bağlantılarda ısı girdisine bağlı olarak ferritik kromlu paslanmaz çelikte, ITAB'de tanelerin irileştiği ve tane sınırlarında kromkarbür çökmesinin olduğu anlaşılmaktadır.

25 periyodluk kaynak süresinin uygulandığı bağlantılarda, özellikle 8.5 kA'den daha yüksek kaynak akım şiddeti değerlerinden sonra, bağlantının daha uzun süre çökelme sıcaklık aralığında kalması sonucu ferritik kromlu paslanmaz çelik tarafından aşırı tane irileşmesi görülmekte ve kromkarbür tane sınırlarına çökelme olanağı bulunmaktadır.

5 periyodluk kaynak süresinin uygulandığı bağlantılarda ise, bağlantının daha kısa süre çözelme sıcaklık aralığında kalması nedeniyle kromkarbür çökmesi oldukça azdır.

Ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelikte büyük bir değişimle karşılaşmamaktadır. Çünkü elektrik direnç nokta kaynağında krom karbür çökmesi için gerekli sıcaklık aralığı ve süresi yeterli değildir (Şekil 8.12).



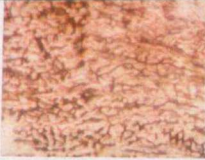
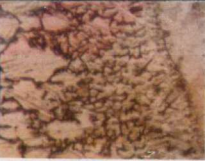
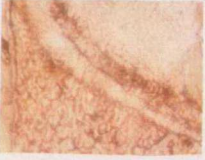
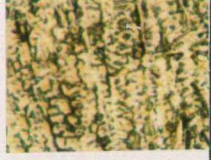
Esas Metal

ITAB

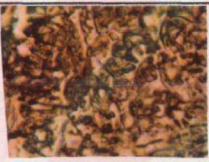
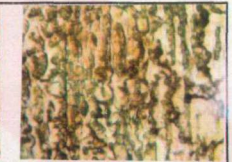
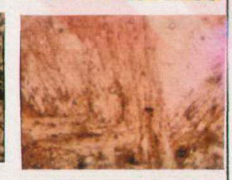
Kaynak Metali

4.5 kA	5 Periyod	Mikroyapı fotoğrafı alınamamıştır.	
	15 Periyod		
	25 Periyod		
5.5 kA	5 Periyod		 
	15 Periyod		 

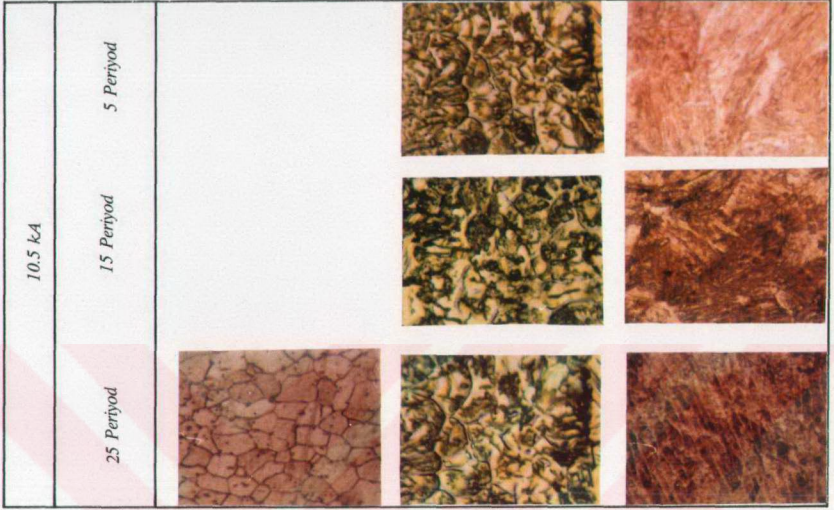
Şekil 8.12 : Elektrik direnç nokta kaynağı yapılmış ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelik-karbonlu çelik çiftinin mikroyapı fotoğrafları (Adler ayırıcı ile dağlanmış, X400).

	25 Periyod			
6.5 kA	5 Periyod			
	15 Periyod			
	25 Periyod			
7.5 kA	5 Periyod			
	15 Periyod			
	25 Periyod			

Şekil 8.12 (devam)

8.5 kA	5 Periyod			
	15 Periyod			
	25 Periyod			
9.5 kA	5 Periyod			
	15 Periyod			
	25 Periyod			

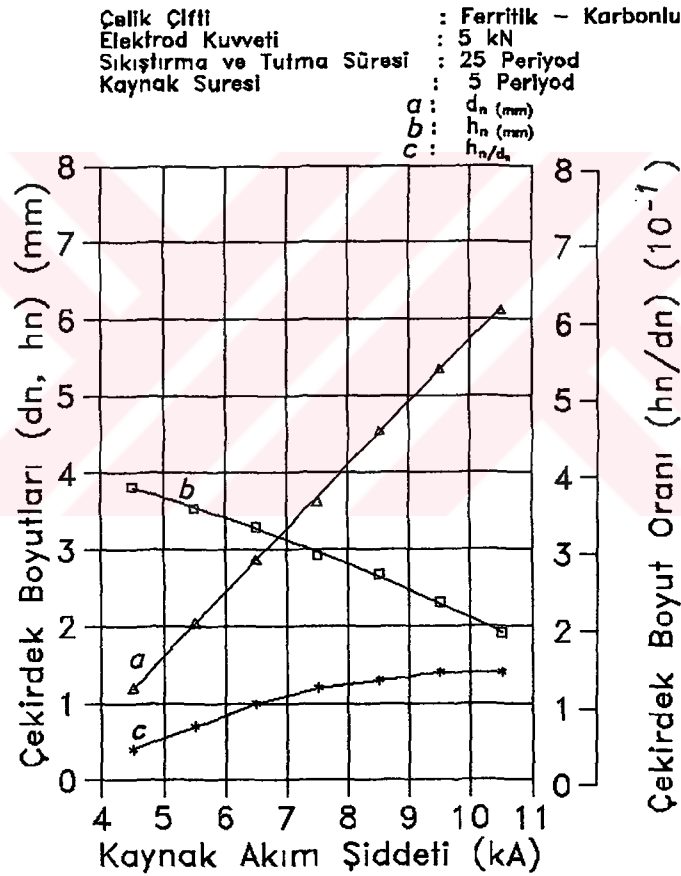
Şekil 8.12 (devam)



Şekil 8.12 (devam)

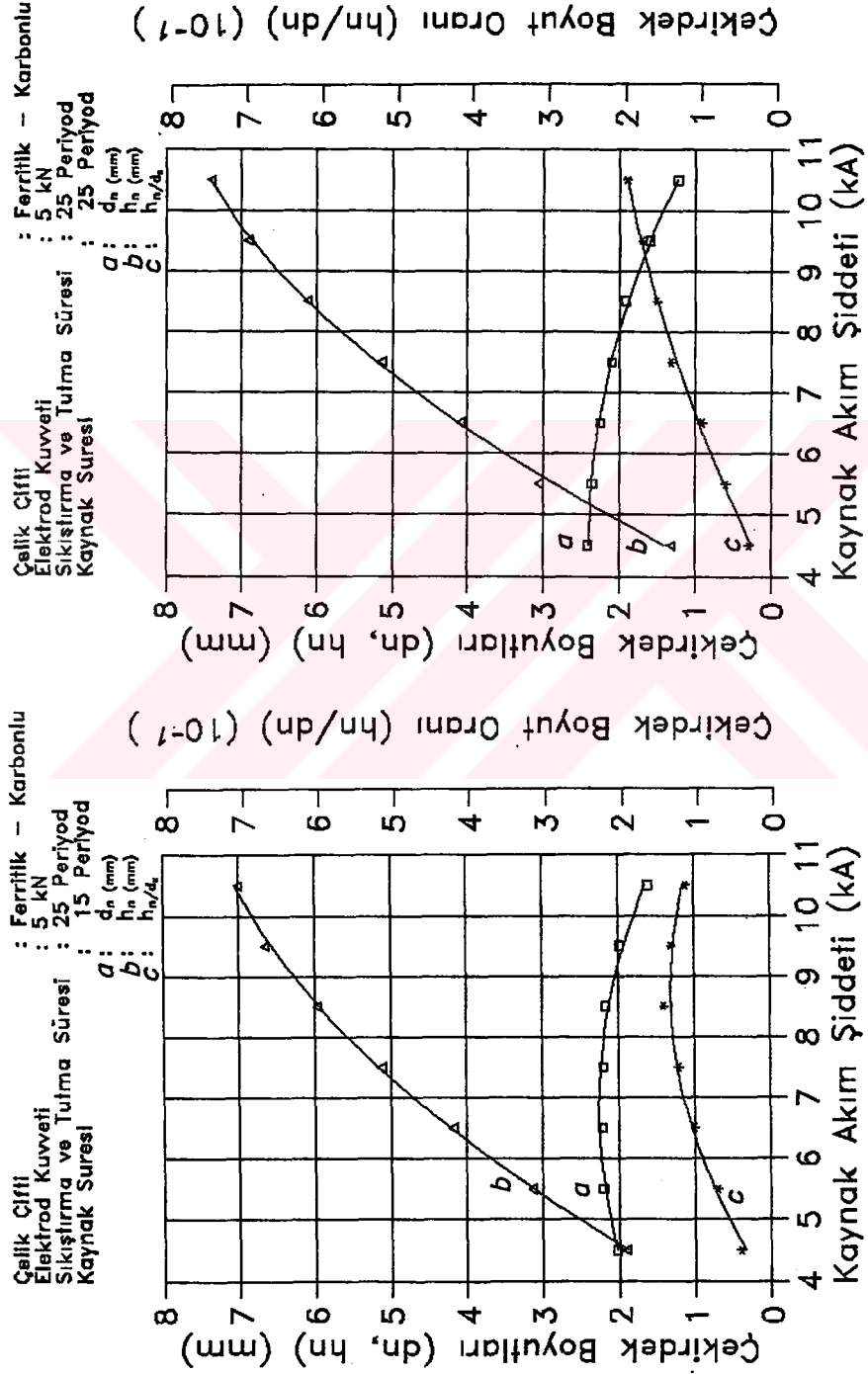
8.5. Kaynak Parametrelerinin Çekirdek Boyutları Üzerine Etkisi

Kaynak parametrelerinin çekirdek boyutları ve çekirdek boyut oranı üzerindeki etkisini ve çekirdek boyut oranı ile bağlantının çekme-makaslama dayanımı arasındaki ilişkiyi gösteren diyagramlar Şekil 8.13 ve Şekil 8.14'da gösterilmiştir.



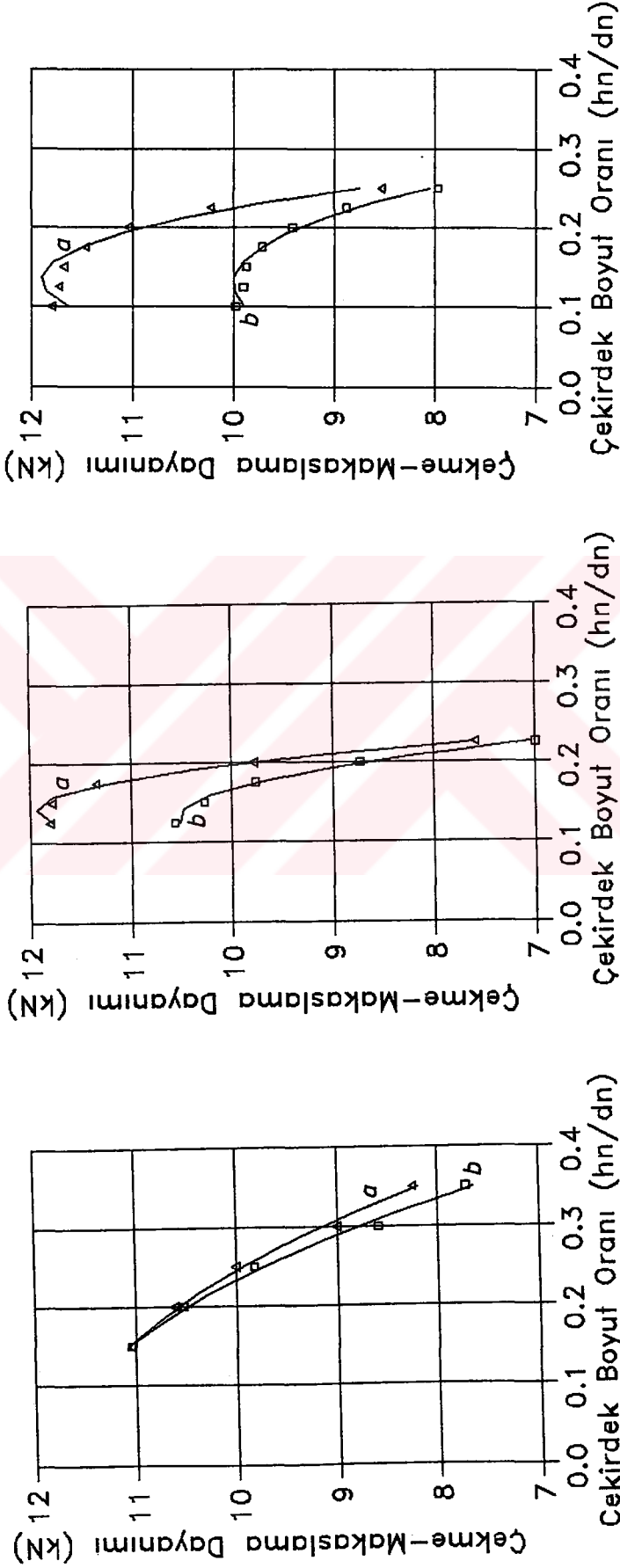
a) Çekirdek boyutları ve boyut oranları.

Şekil 8.13 : Elektrik direnç nokta kaynağı yapılmış ferritik kromlu paslanmaz çelik-karbonlu çelik çiftinde kaynak parametrelerinin çekirdek boyutları ve bağlantının çekme-makaslama dayanımı üzerine etkisi (a, b).

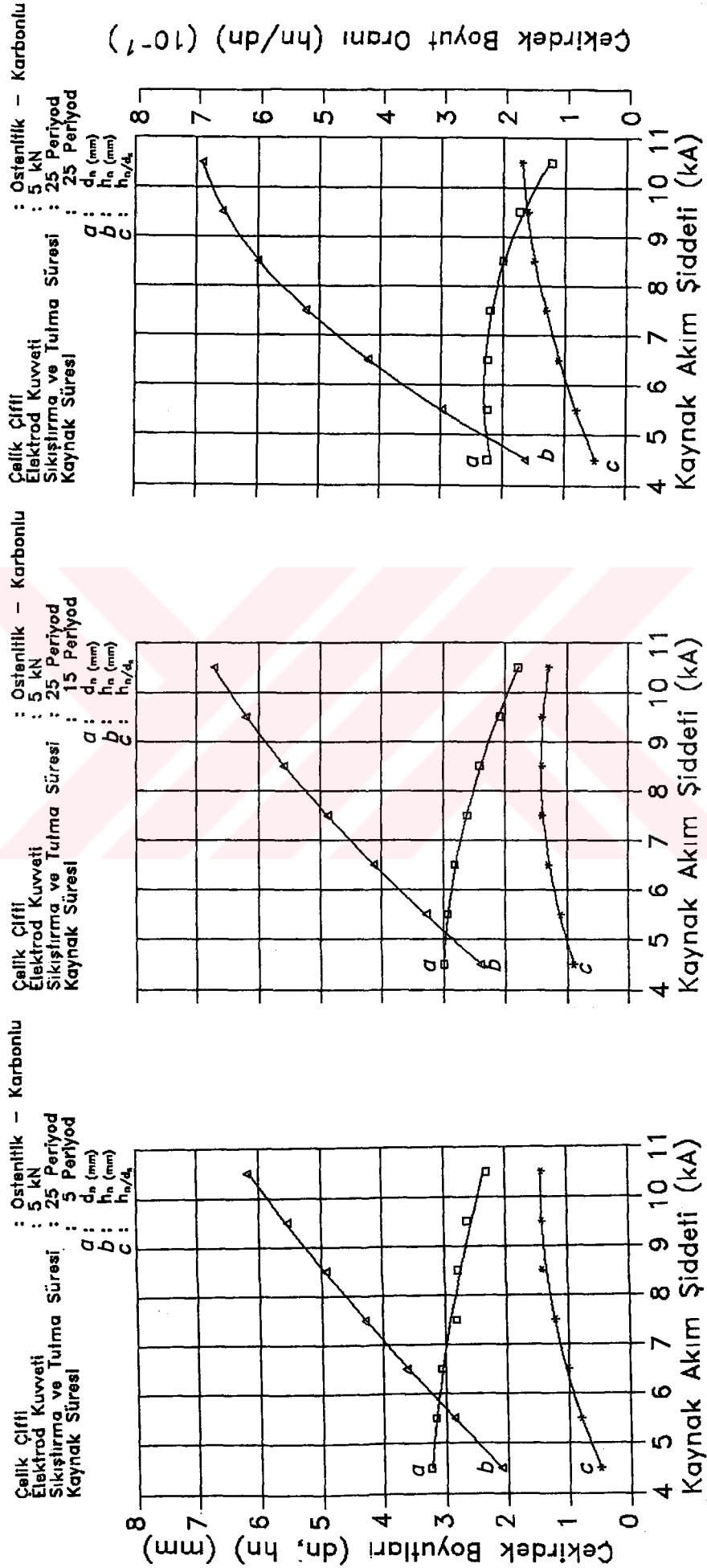


Şekil 8.13 : a) (devam)

Çelik Çifti	: Ferritik - Karbonlu	Çelik Çifti	: Ferritik - Karbonlu
Elektrod Kuvveti	: 5 kN	Elektrod Kuvveti	: 5 kN
Sıkıştırma ve Tutma Süresi	: 25 Periyod	Sıkıştırma ve Tutma Süresi	: 25 Periyod
Kaynak Süresi	: 5 Periyod	Kaynak Süresi	: 15 Periyod
Çekme-Makaslama Değerleri	: a Maksimum	Çekme-Makaslama Değerleri	: a Maksimum
	b Minimum		b Minimum



Şekil 8.13 : b) Çekirdek boyutlarının bağlantının çekme-makaslama dayanımı üzerine etkisi.



a) Çekirdek boyutları ve boyut oranları.

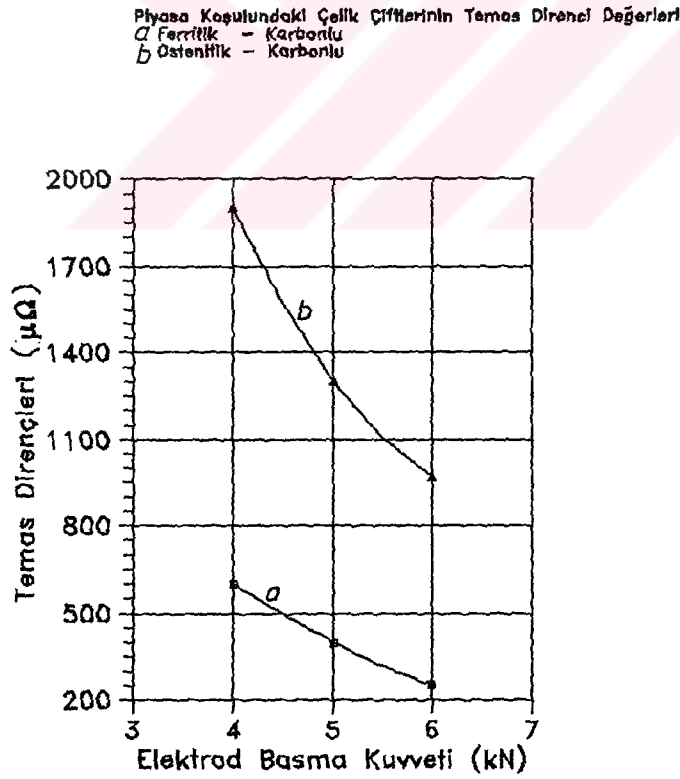
Şekil 8.14 : Elektrik direnç nokta kaynağı yapılmış ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelik-karbonlu çelik çiftinde kaynak parametrelerinin çekirdek boyutları ve bağlantının çekme-makaslama dayanımı üzerine etkisi (a, b).

Kaynak akım şiddetinin artmasıyla çekirdek çapının (d_n) arttığı, çekirdek yüksekliğinin (h_n) ve çekirdek boyut oranının (h_n/d_n) azaldığı, yani çekirdeğin yassılaştığı görülmektedir.

Çekirdek boyut oranı, azalan kaynak akım şiddetine bağlı olarak arttıkça, bağlantının çekme-makaslama dayanımı azalmaktadır. Çekirdek boyut oranının büyümesi, malzemedeki nüfuziyetin artması; azalması ise malzemelerin birleştiği ara kesitin büyümesi anlamını taşır.

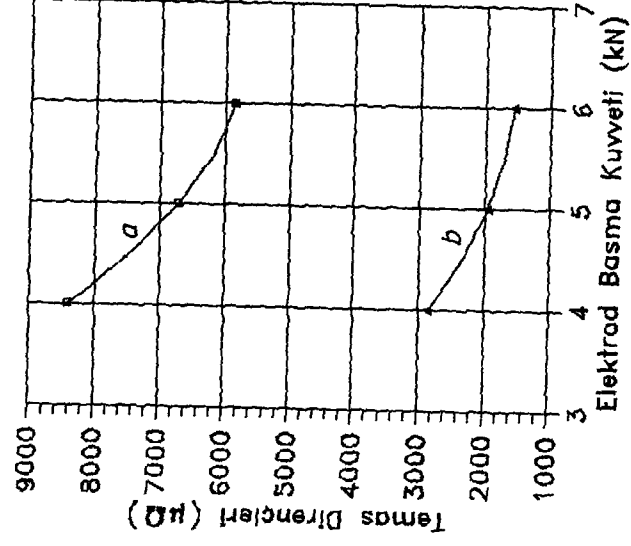
8.6 Çelik Çiftlerinin Temas Dirençleri

Şekil 8.15'teki diyagramlardan yüzeyleri kimyasal olarak hazırlanıp fırçalanmış sacların en yüksek temas direncine sahip olduğu görülmektedir.

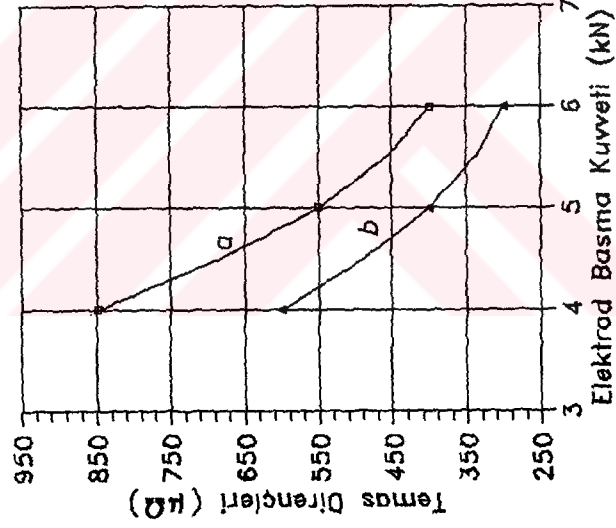


Şekil 8.15 : Yüzeyleri farklı şekillerde hazırlanan çelik çiftlerinin temas dirençleri.

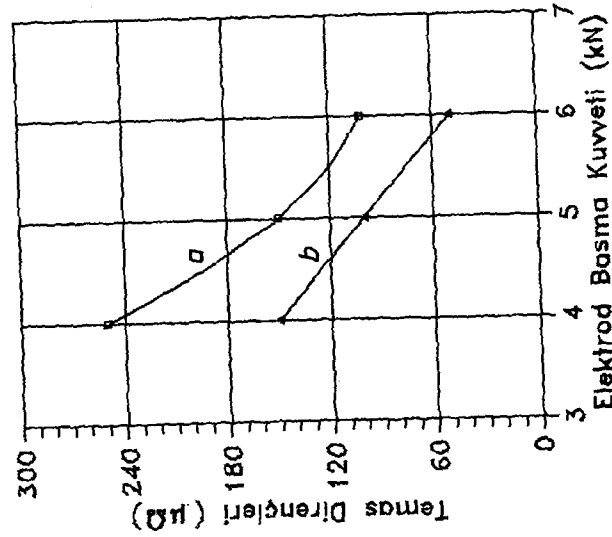
Kimyasal Olarak Temizlendikten Sonra Fırçalanmış
Çelik Çiftlerinin Temas Direnç Değerleri
a Ferritik - Karbonlu
b Ostenitik - Karbonlu



Kimyasal Olarak Temizlendikten Sonra Zımparalanmış
Çelik Çiftlerinin Temas Direnç Değerleri
a Ferritik - Karbonlu
b Ostenitik - Karbonlu



Kimyasal Olarak Hazırlanmış Çelik Çiftlerinin
Temas Direnç Değerleri
a Ferritik - Karbonlu
b Ostenitik - Karbonlu



Şekil 8.15 (devam)

Kimyasal yöntemle saclara gres giderme işlemi uygulandığında temas direncinde önemli derecede birazalma saptanmıştır. Bu azalmanın nedeni, yüzey üzerindeki yağ filminin ve yalıtkan toz ve pisliklerin gres giderme işlemi sonunda ortadan kalkmasıdır. En yüksek temas direnci değerleri, kimyasal yöntemle yüzeyleri temizlendikten sonra fırçalanan saclarda elde edilmiştir. Bunun nedeni ise, yüzey pürüzlüğünü diğer bütün yüzeylerden daha düşük oluşuyla açıklanabilir.



BÖLÜM 9

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzde özellikle otomotiv, kimya ve gıda endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan çelik sacların nokta kaynağı bağlantılarında kaynak parametrelerinin bağlantının çekme-makaslama dayanımı, sertlik ve korozyon özelliklerine etkisi önemlidir. Yukarıda belirtilen endüstri dallarında çokça kullanılan ferritik kromlu ve ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelik saclarla karbonlu çelik sacların nokta kaynağı bağlantılarında kaynak parametrelerinin bağlantının dayanımı ve korozyon özelliklerine etkisini araştırmak ve bu tür bağlantılar için uygun kaynak parametreleri saptamak amacıyla yapılan bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Bağlantının çekme-makaslama dayanımı, kaynak süresi uzadıkça ve kaynak akım şiddeti yükseldikçe artmaktadır.

Maksimum çekme-makaslama dayanımı her iki çelik çifti için de 25 periyodluk kaynak süresi ve 10.5 kA kaynak akım şiddeti değerinde elde edilmiştir.
2. Maksimum çekme-makaslama dayanım değerlerinin elde edildiği kaynak parametrelerinde çekirdek oluşumu tamamlandığından çekirdek boyutları ve boyut oranları bu sonuçları doğrulamaktadır.
3. Kısa kaynak süresi ve düşük kaynak akım şiddeti ile birleştirilmiş parçalarda, kaynak çekirdeği oluşumu tamamlanmadığından bağlantının çekme-makaslama dayanımı

yetersiz kalmakta ve ayrılma tipinde bir kopma ortaya çıkmaktadır.

4. Nokta kaynağı yapılmış ferritik kromlu paslanmaz çelik-karbonlu çelik çiftinde belirli kaynak koşullarından başlayarak, örneğin 8.5-9.5 kA kaynak akım şiddetinden sonra tanelerarası korozyonun olduğu ve bağlantının çekme-makaslama dayanımını olumsuz yönde etkilediği saptanmıştır.
5. Gerek ferritik kromlu paslanmaz çelik-karbonlu çelik çiftinde gerekse ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelik-karbonlu çelik çiftinde 9.5 kA akım şiddetinin üstündeki akım şiddeti değerlerinde saclar arasında aşırı fışkırma ile bağlantının çekme-makaslama dayanımının azaldığı tesbit edilmiştir.
6. Çok yüksek kaynak akım şiddeti değerlerinde ise, sacların yüzeylerinde derin elektrod izleri olduğu ve üst yüzeylerden fışkırma nedeniyle bağlantının kalitesi ve çekme-makaslama dayanımının önemli ölçüde düştüğü görülmüştür. Her iki tür çelik çiftinde de 12.5 kA kaynak akım şiddetinden itibaren sac üst yüzeylerinden fışkırmanın başladığı saptanmıştır. Bu nedenle yukarıda belirtilen uygun kaynak parametrelerinin üzerine kesinlikle çıkılmamalıdır.
7. Özellikle ferritik kromlu paslanmaz çelik-karbonlu çelik sacların nokta kaynağın da tanelerarası korozyona neden olan krom karbürün oluşmasına önlemek için ferritik kromlu paslanmaz çelik sacların stabilize edilmiş türleri önerilmektedir.
8. Ayrıca kaynak çekirdeğinde yapılan kimyasal analizler sonucunda çekirdeğin krom kaybına uğradığı (% 9.19 Cr)

ve paslanmaz özelliğini önemli ölçüde yitirdiği anlaşılmaktadır.

9. Her iki tür çelik çiftinde de yüzeyleri kimyasal olarak hazırlandıktan sonra fırçalanan sacların temas dirençlerinin oldukça yüksek olduğu, bu sonucun kaynak işlemi açısından avantaj sağladığı belirlenmiştir.



KAYNAKLAR

- (1) ANIK, S., "Kaynak Tekniği", Cilt 3, İTÜ Matbaası, Sayı:1030, İstanbul, 1975.
- (2) OĞUZ, B., "Karbonlu ve Alaşımlı Çeliklerin Kaynağı, Metalurji-Uygulama", Oerlikon A.Ş. Yayını, İstanbul, 1985.
- (3) N.N., "Resistance Welding Manual", Resistance Welder Manufacturers' Association, İSA, 1947.
- (4) LESLIE, W.D., "The Physical Metallurgy of Steels", Second Edition, Mc Graw-Hill, International Student Edition, 1983.
- (5) DECROIX, M.J., "Les produits longs en aciers inoxydables a 17 % de chrome, crit res de choix et mise en oeuvre", Centre Technique d'U gine Aciers, s. 16-28.
- (6) KÜPPERS, W., DÜCHTING, W., "Arbeitsbedingungen für das Punktschweißen nichtrostender ferritischer Feinbleche", DEW-Technische Berichte, 11.Band (1971), H.11, s.251-258.
- (7) STRASSBURG, F.W., "Schweißen nichtrostender Stähle", DVS, 67.Band (1976), Düsseldorf.
- (8) HIGGINS, R.A., "Engineering Metallurgy 1. Applied Physical Metallurgy, Part 1", The English Universities Press Ltd., London, 1975.
- (9) DONALD'S, C., VARNEY, W.R., "Physical Metallurgy for Engineers", 2nd Edition, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1969.
- (10) HONEYCOMBE, R.W.K., HANCOCK, P., "Steels-Microstructure and Properties", Second Edition, Edward Arnold Publishing, London, 1982.
- (11) COTTRELL, A., "An Introduction to Metallurgy", Second Edition, English Language Book Society, London, 1985.
- (12) GUY, G.A., HREN, J.J., "Elements of Physical Metallurgy", Third Edition, Addison-Wesley Publishing Company, USA, 1974.
- (13) STRASSBURG, F.W., "Schweißen nichtrostender Stähle", DVS, 67.Band (1982), Düsseldorf.
- (14) TULBENTÇİ, K., "Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı", Böhler Kaynak Dünyası, Sayı:11, 1985, s.6-10.

- (15) KALUÇ, E., "Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı", YÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Kaynak Tekniği Yaz okulu, YÜ Matbası 1986, s.65-83.
- (16) N.N., "UK Patent Application", Published by the Patent Office, London, 1982.
- (17) AVNER, S.H., "Introduction to Physical Metallurgy", Second Edition, Mc Graw-Hill, 1984.
- (18) DORUK, M., "Korozyon ve Önlenmesi", ODTÜ Mühendislik Fakültesi, Yayın No: 70, Ankara, 1982.
- (19) OĞUZ, B., "Karbonlu ve Alaşımlı Çeliklerin Kaynağı, Metalurji-Uygulama", Genişletilmiş 2. Baskı, Oerlikon A.Ş. Yayını, İstanbul, 1987.
- (20) CALLISTER, W.D., "Materials Science and Engineering", John Wiley and Sons Inc., Published in Singapore, 1985.
- (21) BRICK, R.M., PENSE, A.W., GORDON, R.B., "Structure and Properties of Engineering Materials", Edition, Mc Graw-Hill, 1977.
- (22) TEKİN, E., "Çelikler ve Çelik Standartları", Mühendis ve Makina, Cilt 25, Sayı: 292, Mart-Nisan 1984, s.3-11.
- (23) DAUFIN, J., DESESTRET, A., KERHER ve, A., MICHEL, F., VALLIER, G., "Utilisation des aciers ferritiques a 17 % Cr dans l'industrie laitiere", MESRM, 12(1981), s.647-662.
- (24) SATO, S., SHIMOYAMA, T., MATSUMOTO, O., KAWAGUCHI, S., URABE, M., KAMIYA, T., "Weldability of 18 pct. chromium ferritic stainless steel stabilized with titanium", IIW-Doc. IX-1235, Mitsubishi Heavy Industries Ltd., Tokyo, 1982.
- (25) BERNHARDSSON, S., NORBERG, P., ERIKSSON, H., FORSSELL, O., "Selection of Stainless for Refineries and the Petrochemical Industry", Anti-Corrosion, January 1986, s.14-17.
- (26) GEMMEL, G., "Svetsning av rostfria ferritiska kromstal", Sveiseteknik, Sayı: 6, November 1977, s.125-128.
- (27) HOFFMANN, T., ROCKEL, M.B., WILKEN, K., "Schweisseignung hochlegierter Staehle under chemischen Industrie und im Apporetebau", DVS-Berichte Band 105, 1986, s.112-118.
- (28) N.N., "Weldability of materials by spot welding", Data Sheet, No: 263, Engineering-Materials and Design, August 1970, s.991.

- (29) ERYÜREK, B., "Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Temas Direncinin Etüdü", Doktora Tezi, İTÜ Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, 1976.
- (30) N.N., "Metals Handbook, Volume 6, Welding and Brazing", ASM, Ohio, 1972.
- (31) N.N., "Welding Handbook, Volume 4, Metals and Their Weldability", Seventh Edition, AWS, Miami, 1982.
- (32) HENRY, O.H., CLAUSSEN, G.E., "Welding Metallurgy-Iron and Steels", Second edition, AWS, USA, 1949.
- (33) ANIK, S., DORN, L., "Metallphysikalische Vorgänge beim Schweissen hochlegierter, insbesondere rostbeständiger Stähle-Schweissen", Schweissen und Schneiden, 34(1982), H.11,s.530-534.
- (34) GÜLEÇ,Ş., ARAN, A., "Malzeme Bilgisi", Cilt 2, MBEAE Matbaası, Gebze, 1987.
- (35) N.N., "Schedules for Spot Welding Austenitic Type Stainless Steels", Data Sheet, No: 59 b, AWS, Welding Handbook, Volume 4, Seventh edition, January 1985, s.58.
- (36) GRIGOLEIT, G., "Pratische Erfahrungen mit dem Widerstands-Punktschweissen von dunnen Austenitischen Chrom-Nickel-Stähle-Blechen im Flugzeug-und Raumfahrtbau", Schweissen und Schneiden, 17(y985),H.3, s.113-118.
- (37) ANIK, S., DORN, L., "Metallphysikalische Vorgänge beim Schweissen hochlegierter, insbesondere rostbeständiger Stähle-Gefügeaufbau", Schweissen und Schneiden, 34(1982), H.10, s.485-490.
- (38) NIEBEL, B.W., DRAPER, A.B., WYSK, R.A., "Modern Manufacturing Process Engineering", First edition, Mc Graw-Hill, Singapore, 1989.
- (39) DeGARMO, E.P., BLACK, J.J., KOHSER, R.A., "Materials and Processes in Manufacturing", Sixth Edition, Macmillan Publishing Company, New York, 1984.
- (40) ROLLASON, E.C., "Metallurgy for Engineers", Fourth Edition, English Language Book Society, London 1985.
- (41) AGWAN, V.S., "Resistance Welding-A Reliable Technology for Productivity", Tool and Alloy Steels, July-August 1989, S.243-247.

- (42) ANIK, S., "Kaynak Tekniği El Kitabı-Yöntemler ve Donanımlar", Gedik Holding A.Ş. Yayını, İstanbul, 1991
- (43) ROSSENHEIMER, Von M., "Punktschweissen von verzinkten Blechen", ZIS-Mitteilungen, H.1. 1968, s.42-51.
- (44) RIVETT, R.M., "Resistance Welding of Sheet Steels", Nederlands Instituut Voor Lastechnick, Juni 1984, s.13-33.
- (45) ROBERTS, W.L., "Resistance Variations During Spot Welding", Welding Journal, November 1951, s.1004-1019.
- (46) WOOD, R.T., BAUER, L.W., BEDARD, J.E., BERNSTEIN, B.M., CHECKOWSKI, J., D'ANDREA, M.M., HOGLE, R.A., "A Closed-Loop Control System for Three-Phase Resistance Spot Welding", Welding Journal, December 1985, s.26-30.
- (47) CHAKALEV, A.A., KAZAKOV, S.M., EROFEEV, V.A., "Self-Regulation of the Resistance Welding Process", Welding Production, August 1986, s.3-6.
- (48) PHILLIPS, A.L., "Modern Joining Process", AWS, New York, 1966.
- (49) THOMASSON, H., "The How and Why of Resistance Welding", Canadian Welder and Fabricator, May 1970, s.10-14.
- (50) LHEUREUX, G.E., BELOTTE, E.J., "Soudage par Resistance", Dunod, Paris. 1965.
- (51) GOULD, J.E., "An Examination of Nugget Development During Spot Welding, Using Both Experimental and analytical Techniques", Welding Journal 66(1), Research Supplement, 1987, s.1-10.
- (52) KRAUSE, H.J., SIMON, G., "Ergaenzung der Modellvorstellungen zur Linsenbildung am Beispieldes Widerstandspunktschweissen von weichen unlegierten Staehlen", Schweissen und Schneiden, (34) 1982, H.1, s.20-24.
- (53) ANIK, S., ERYÜREK, B., "Effects of Contact Resistance in Resistance Spot Welding", IIW/IIS-Dac. II-563-77, 1977.
- (54) N.N., "Welding Hadbook, Welding Processes-Resistance and Solid-State Welding and Other Joining Processes", Volume 3, Seventh Edition, AWS, Miami, 1980

- (55) DICKINSON, D., TSAI, C.L., JAMMAL, O.A., "Study of Nugget Formation in Resistance Spot Welding Using Finite Element Method", Recent Trends in Welding Science and Technology Proceedings, 2. ud International Conference, 14-18 May 1989, USA.
- (56) BECKEN, O., HAVERS, K., "Beim Punktschweissen von Kohlenstoffstahl erreichbare Scherzugkrafte bei Blechdicken bis 6 mm", Schweissen und Schneiden, 13(1961), H.4, s.127-134.
- (57) MBIM, M.S., "Resistance Welding Equipment", Wire Industry, December 1986, s.817-821.
- (58) BROWN, B.M., "A Comparison of AC and DC Resistance Welding of Automotive Steels", Welding Journal, mJanuary 1987, s.18-23.
- (59) OPPENHEIMER, R., BRAND, W.D., "Bedingungen für das Widerstands-Punktschweissen von nichtrostenden 18/8 Chrom-Nickel-Stählen", Schweissen und Schneiden, 13(1961), H.2, s.61-70.
- (60) BURTON, C., "Resistance Welding of Stainless Steel", Sheet Metal Industries, February 1979, s.122-138.
- (61) DÜCHTING, W., KÜPPERS, W., ORTMANN, R., "Arbeitsbedingungen für das Punktschweissen Nichtrostender Ferritischer Feinbleche", DEW-Technische Berichte, 11.Band (1971), H.4, s.251-258.
- (62) SAVAGE, W.F., ARONSON, A.H., KRANTZ, B.M., "A Literature Review of the Physical Metallurgy of Electric Resistance Welding" Welding Journal, March 1964, s.140-144.
- (63) RAO, P.N., "Manufacturing Technology-Foundry, Forming and Welding", Second edition, Tata Mc Graw-Hill Publishing Company Ltd., New Delhi, 1990.
- (64) NIPPES, E.F., SAVAGE, W.F., IANNIELLO, L.C., OWCZARSKI, W.A., "Spot Welding of a 12 % Cr Martensitic Stainless Steel", Welding Journal, September 1959, s.360-366.
- (65) ANIK, S., ÇAPAN, L., GÜLBAHAR, B., "L'etude de la Corrosion Intergranulaire Appliquee au Soudage par points des Aciers au Chrome Ferritiques", Revue Pratique du Soudage, Volume 12, No: 6(1988), s.309-312.
- (66) KÜPPERS, W., DÜCHTING, W., "Untersuchungen zum Widerstandspunktschweissverhalten von Feinblechen aus Nichtrostenden Austenitischen Stählen", Schweissen und Schneiden, 24(1972), H.10, s.404-406.

- (67)- MAKAROV, V.P., BLINOV, V.E., ZHURAVLEVE, L.V., PAVLENKO, A.F., "The Corrosion Resistance of Welded Joints Between Low Alloy Steel 10 KhNDP and Corrosion-Resistance Steel 10 Kh14G14N4T", Svar, Proiz., 1977, No:4, s.34-35.
- (68) MAKAROV, V.P., FUKALOV, G.V., "The Fatigue of Welded Joints in the 12Kh1313G18D Steel", Svar. Proiz., 1980, No:1, s.28-29.
- (69) ANIK, S., DORN, L., KASSNER, W., "Beitrag zum Spannungsrisskorrosionsverhalten von Widerstandspunktschweisverbindungen aus nichtrostenden Austenitischen Chrom-Nickel-Stählen", Schweissen und Schneiden, 31(1979), H.1, s.4-7.
- (70) ANIK, S., DORN, L., GÜNAL TAN, A., "Untersuchungen zur Beständigkeit Widerstandspunktschweissetter verbindungen aus X12 CrNi 18 8 gegenüber interkristalliner Korrosion", Schweissen und Schneiden, 32(1980), H.1, s.5-9.
- (71) CABRERA, G., BLANCO, L., CHOY, R., "Determinacion de la sensibilidad a la corrosion inter cristalina de las soldaduras de punto en el acero inoxidable tipo 316", Revista Cenic, 7(1976), s.291-299.
- (72) ANIK, S., ÇAPAN, L., KALUÇ, E., "Etude de la Corrosion intergranulaire Applique au Soudage par points des Aciers Inoxydables Ferritiques et Austenitiques", Revue Pratique du Soudage, Volume 2, 2(1991), s.49-53.
- (73) HESS, W.F., RINGER, R.L., "Studies of the Spot Welding of Low Carbon and Stainless Steels", Welding Journal, October 1938, s.39-48.
- (74) HESS, W.F., WYANT, R.A., "Further Studies of the Spot Welding of Low Carbon and Stainless Steels", Welding Journal, October 1939, s.348-354.
- (75) UEDA, T., KAWATAKA, H., "Fatigue Strength of Spot Welded Joint", Transaction of National Research Institute for Metals, Volume 12, No: 5(1970), s.36-49.
- (76) BROOKS, R., "Quality Control of SPot Welded of Various Low Carbon Steel Sheet Types", Metals Australasia, August 1977, s.161-164.
- (77) DENK, V., "Widerstandsüberlappschweissen von Werkstoffkombinationen", ZIS-Mitteilungen, H.4, 1980, s.434-445.

- (78) KIMCHI, M., "Spot Weld Properties When Welding With Expulsion-A Comparative Study", AWS, Welding Journal, February 1984, s.58-63.
- (79) MINARIK, R., LEHKA, N., "Low Temperature Tests of Spot Welds of Dissimilar Steels in Different Thickness", Zvaracke Spravy, 3(1988).
- (80) N.N., "Fabrication and the Long-Life Car", Welding and Metal Fabrication, april 1976, s.190-192.
- (81) N.N., "Elektrod Uçları-Nokta Kaynağı İçin", TS 6062, Ekim 1988.
- (82) N.N., "Tensile-Shear Test on Resistance Spot Welded, Projection Welded and Fusion Welded Joints", DIN 50124, April 1977.
- (83) GEÇKİNLİ, E., "Metalografi -1.Kısım", İTÜ Kütüphanesi, Sayı: 1392, İstanbul, 1988.
- (84) N.N., "Metalik Malzemelerin Vickers Sertlik Deneyi", TS 207, Nisan 1965.
- (85) LIPA,M., DZURANYI, E., "Measurement of Sheet Metal Contact Resistance in Aluminium Alloys for Spot Welding", Doc.III-905-88, Bratislava, April 1988.
- (86) ROLFF, Von R., "Messung des Kontakwiderstandes mit Hilfe einer Kugel", Metalloberflaeche, 32(1978), H.3, s.110-113.

ÖZGEÇMİŞ

Vural Ceyhun, 1951 yılında Kırklareli'de doğdu. İlk ve orta öğrenimini İzmir'de, lise öğrenimini yine İzmir'de Buca Lisesi'nde tamamladıktan sonra girdiği Ege Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Fakültesi'nden 1978 yılında mezun oldu. 1984 yılında askerlik görevini yerine getirdikten sonra yüksek lisans öğrenimini Yıldız Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü-Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde tamamladı. 1987 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Anabilim Dalı Makina Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Programı'nda doktora öğrenimine başladı.

1979 yılında Edirne D.M.M. Akademisi Makina Bölümü'nde asistan olarak başladığı görevini, 1986 yılından beri Trakya Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde öğretim görevlisi olarak sürdürmektedir.