

KAYNAKLI API 5L X65 BORU HATTI ÇELİKLERİNİN KIRILMA TOKLUĞU

Hüseyin UZUN

Özet - Petrol ve doğal gaz boru hatlarında yaygın olarak kullanılan ve tandem tozaltı kaynak metodu ile birleştirilen API 5L X65 dual fazlı çeliğin kırılma tokluğu tespit edilmiştir. Kırılma tokluğu, çentikli üç nokta kırılma tokluğu deneyi kullanılarak belirlenmiştir. Çentik, hem kaynak dikişinin ortasına hem de ısının tesiri altındaki bölgesi (ITAB) içerisinde içine gelecek şekilde açılarak deney uygulanmıştır. Her bir numuneye gerilim giderme tavlama uygulanarak, kırılma tokluğu değerlerinin nasıl etkilendiği değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, gerilim giderme tavlama uygulanmamış ve uygulanmış numunelerde, kaynak dikişinin kırılma tokluğu, ITAB bölgesinin kırılma tokluğundan daha yüksek çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler - API 5L X65 çeliğinin kırılma tokluğu, spiral dikişli borular, tandem tozaltı kaynağı.

Abstract -The fracture toughness of API 5L X65 dual-phase steel welded by tandem submerged arc welding process, which is used widely petroleum and natural gas pipelines, was investigated. The fracture toughness values were obtained using by three point bend fracture toughness test specimens. The notch was machined either in the center of weld metal or the heat affected zone (HAZ). It was employed stress relief annealing in order to investigate the effect heat treatment on the fracture toughness values. The results show that the fracture toughness values of weld metal with both heat treatment and non-heat treatment are higher than that of the heat affected zone.

Keywords – Fracture toughness of API 5L X65 steel, spirally welded pipeline, tandem submerged arc welding.

I. GİRİŞ

Doğal gaz ve petrol taşıma borularında, sistemin emniyeti için API 5L standardına uygun sertifikalı borular tercih edilmektedir. Bu standarda göre, boyuna veya

spiral kaynak dikişli olabilecek bu borular, çift fazlı çeliklerden imal edilmektedirler. Kaynaklı birleştirme ile imal edilen boruların, kaynak dikişi etrafındaki ısının tesiri altındaki bölgesi (ITAB) sertleşme eğilimi gösterir. Sertleşen mikro yapılar, hidrojen gevrekleşmesine, tokluğun azalmasına ve gerilim korozyonu çatlama olma oldukça hassastırlar. Bu tehlikeli mikro yapıdan kaçınmak için, çeliğe ya karbon eşdeğerine uygun olarak ön bir tavlama uygulanmalı veya az alaşım elementi ilaveli düşük karbon içerikli çelikler tercih edilmelidir [1,2]. Yapılan araştırmalara göre, 0.01-0.05 % karbon içeren yüksek mukavemetli çeliklerde, ITAB'ın sertliğinin ve hidrojen gevrekliği riskinin azaldığı tespit edilmiştir [2]. Özellikle petrol ve doğal gaz boru hatlarında kullanılmak üzere, çeliklerin kaynak kabiliyetini ve tokluğunu arttırmak için termo-mekanik kontrollü yöntem ile çift fazlı çelikler üretilmektedir. Bu yöntemde, çelik ostenit fazında iken kontrollü bir sıcak haddeleme ile mukavemet kazandırılıp, sonra su verilerek martenzitik bir yapı elde edilmektedir. Böylece ferrit yapısı ile martenzitik adacıklarının bulunduğu bir iğneli yapı elde edilir. Hızlı soğumadan dolayı çeliğin mikroyapısı incelmekte, böylece mukavemet ve tokluk artmaktadır. Düşük alaşım elementleri ve karbon içermesinden dolayı, çeliğin kaynak kabiliyeti de artmaktadır [1, 3, 4].

Bu çalışmada dual fazlı API 5L X65 çelik levhadan, tandem tozaltı kaynak yöntemi ile üretilen spiral dikişli boruların kırılma tokluğu incelenmiştir. Gerek kaynak metalinin gerekse ITAB'ın kırılma toklukları tespit edilerek, kaynak sonrası uygulanan gerilim giderme tavlama yönteminin kırılma tokluğunu ve mikro yapıyı nasıl etkilediği değerlendirilmiştir.

II. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

II.1 Kullanılan Malzeme ve Kaynak Parametreleri

Doğal gaz ve petrol taşıma hatlarında tercih edilen spiral dikişli borular, API 5L X65 çeliğinden imal edilmiştir. 1016 mm boru çapında ve 12 mm et kalınlığındaki spiral dikişli borular, LINCOLN marka tandem tozaltı kaynak makinesi kullanılarak üretilmişlerdir. Kaynak dikişi, ikisi alternatif kutba (AC) ve biri doğru akım kutbuna (DC) bağlı, üçlü elektrot sistemi kullanılarak yapılmıştır.

Kullanılan API 5L X65 çeliğinin spektral analiz sonucunda elde edilen ve API 5L standardına göre olması gereken kimyasal içeriği, Tablo 1'de verilmiştir. Üçlü elektrot kullanılarak yapılan kaynak işleminde, OE-S2 Mo (OERLIKON) kaynak teli ve bazik karakterli OS

1150 (OERLIKON) kaynak tozu kullanılmıştır. Tablo 2'de kaynak telinin ve tozunun kimyasal içeriği verilmektedir. Kaynak işleminde kullanılan kaynak parametreleri, her üç elektrot için Tablo 3'de gösterilmiştir.

Tablo 1. API 5L X65 çeliğinin, spektral analiz sonucunda elde edilen ve API 5L standardına göre [5] olması gereken kimyasal içeriği

API 5L X65 Çeliği	Kimyasal bileşim (% Kütlesel)												
	C	Mn	Si	Nb	P	S	V	Cr	Ni	Ti	W	Al	Cu
Spektral analiz sonucu	0.10	1.53	0.27	0.045	0.02	0.05	0.06	0.02	0.15	0.02	0.003	0.03	0.19
API 5L standardındaki değerler	0.26	1.40	--	0.005	0.03	0.03	0.02	--	--	0.02	--	--	--

Tablo 2. AWS A 5.17' ye göre kaynak tozu ve kaynak telinin kimyasal içeriği [6]

Kullanılan kaynak elektrotu ve tozu	Kimyasal içerik (% Kütlesel)							
	C	Mo	Si	Mn	SiO ₂ +TiO ₂	CaO+MgO	Al ₂ O ₃ +MnO	CaF ₂
OE – S2 Mo kaynak elektrotu	0.09	0.50	0.17	1.05	----	----	----	---
OS 1150 kaynak tozu	---	---	---	---	15	40	20	25

Tablo 3. Spiral dikişli boruların birleştirilmesinde kullanılan tandem tozaltı kaynak parametreleri

Kaynak hızı, cm/dak	Tel çapı (mm)	Boru et kalınlığı (mm)	Kaynak ağzı formu	İç Dikiş 1 (DC)		İç Dikiş 2 (AC)		Dış Dikiş (AC)	
				Amp.	Volt	Amp.	Volt	Amp.	Volt
170	3.2	12	X- ağzı	800	30	600	34	500	31

II.2 Üç Nokta Kırılma Tokluğu Deneyi

API 5L X65 spiral dikişli borunun, radyografi cihazı ile belirlenen hatasız kaynaklı bölgesinden, kırılma tokluğu numuneleri kesilmiştir. API 5L standardına uygun şekil ve ebatlarda hazırlanan numune Şekil 1'de gösterilmektedir. Kaynak tokluğu deneyinde, çentik yeri farklı olan iki değişik numune grubu kullanılmıştır. Birinci grup numunelerde çentik, kaynak dikişinin tam ortasına ve ikinci grup numunelerde ise çentik ısının tesiri altında kalan bölgesi (ITAB) içerisine açılmıştır. Kırılma tokluğu deneyinde kullanılan hem birinci hem de ikinci grup deney numunelerinin bir kısmına, gerilim giderme

tavı uygulanmış, bir kısmına ise uygulanmamıştır. Gerilim giderme tavlamasında, numuneler 600°C' ye kadar fırında ısıtılıp 60 dakika bekletildikten sonra, fırından beraber oda sıcaklığına ininceye kadar yavaş soğutulmuştur. Kırılma tokluğu oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş olup, DARTECT marka çekme-basma cihazı kullanılmıştır. Basma hızı 0.03 mm/sn olarak seçilmiştir.

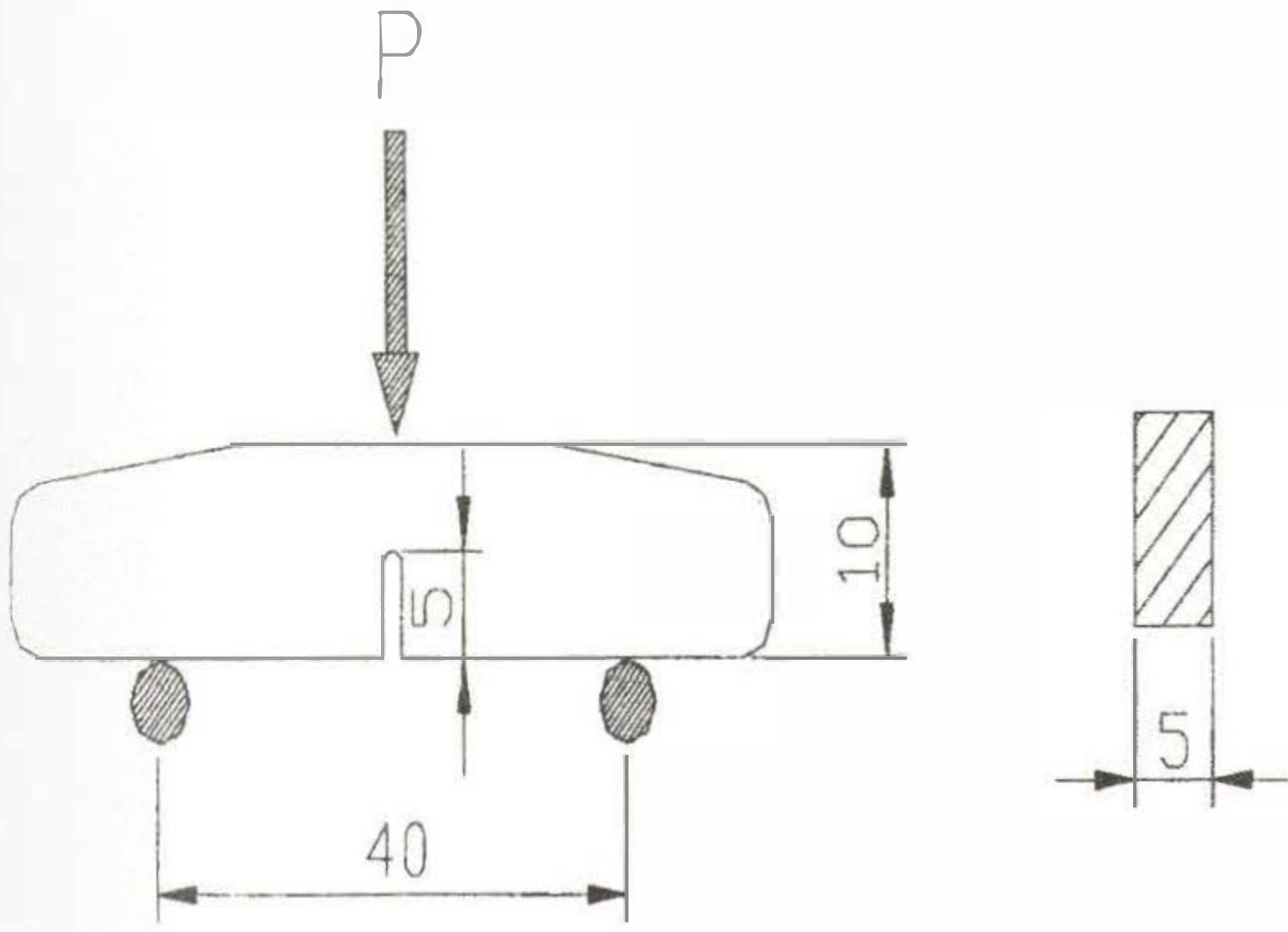
Kırılma tokluğunu tespit etmek için, AWS E-399 standardında Şekil 1'de gösterilen numune için öngörülen aşağıdaki formüller kullanılmıştır.

$$K_{IC} = \frac{P.S}{B(W)^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad [1]$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} \left[1.99 - \left(\frac{a}{W}\right) \cdot \left(1 - \frac{a}{W}\right) \cdot \left(2.15 - 3.93 \left(\frac{a}{W}\right)\right) + 2.7 \left(\frac{a}{W}\right)^2 \right]}{2 \cdot \left(1 + 2 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{a}{W}\right)\right)^{3/2}} \quad [2]$$

K_{IC} : Kırılma tokluğu (MPa m)
P : Maksimum kırılma kuvveti (MN)
S : Numune altına yerleştirilen destekler arasındaki mesafe (m)

B : Numunenin genişliği (m)
W : Numunenin kalınlığı (m)
f(a/w) : Düzeltme faktörü



Şekil 1. Kırılma tokluğu deneyinde kullanılan numune şekli ve ölçüleri

II.3 Mikroyapı Karakterizasyonu

Kaynak bölgesinin, ısının tesiri altındaki bölgenin (ITAB) ve ana metalin kaynaktan sonra meydana gelen mikro yapısal değişimlerinin neler olduğu, optik mikroskop yardımıyla tespit edilmiştir. Numuneler sırasıyla 200-400-800-1200 numaralı zımparalar ile zımparalandı. Sonra 3 µm ve 6 µm alümina tozu kullanılarak parlatıldı ve daha sonra % 3'lük Nital dağlama işlemi yapılarak numuneler optik mikroskopta incelemek üzere hazırlandı.

III. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELENMESİ

III.1 Üç Nokta Kırılma Tokluğu Deneyi Yük Mesafe Eğrileri

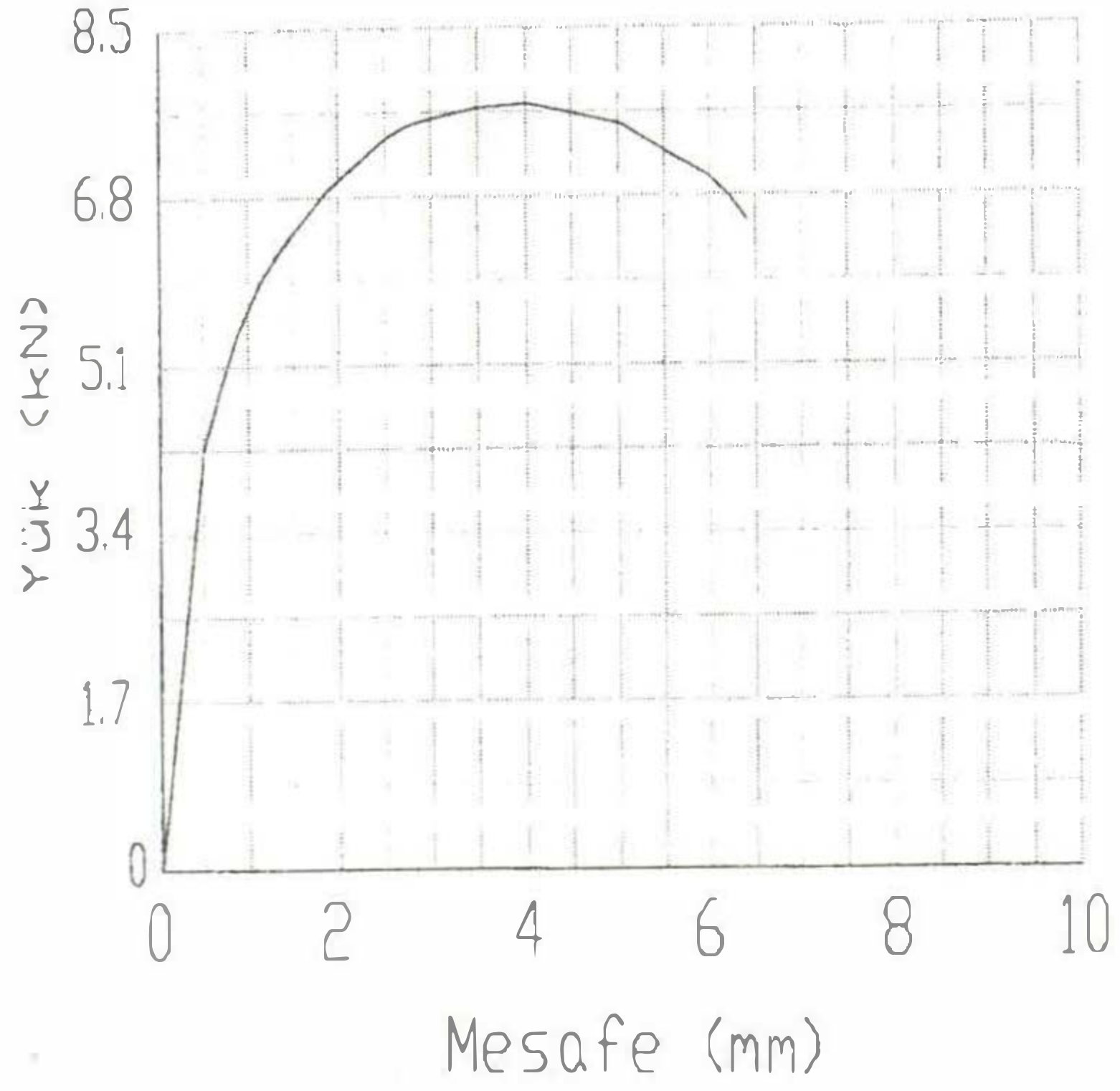
Şekil 2'de, çentiğin kaynak dikişi içerisine açılmış ve gerilim giderme tavlaması yapılmamış ve Şekil 3'de de gerilim giderme tavlaması yapılmış, API 5L X65 kaynaklı numunesine ait yük-mesafe eğrileri görülmektedir.

Şekil 4'de, çentiğin kaynak dikişi içerisine açılmış ve gerilim giderme tavlaması yapılmış ve Şekil 5'de de gerilim giderme tavlaması yapılmamış, API 5L X65 kaynaklı numunesine ait yük-mesafe eğrileri görülmektedir. Diyagramlardaki tüm eğrilerde görüleceği gibi, yük belirli bir mesafeye kadar lineer olarak çıkmış, daha sonra maksimum seviyeye ulaşmaya kadar lineer olmayan bir yol izlemiş ve maksimum seviyeden sonra düşüşe geçmiştir. Eğrinin lineer bölgesinde, çok küçük mikro gözenekler oluşmuştur. Eğrinin lineer olmayan bölgesinde ise bu mikro gözenekler büyüyüp kalıcı bir deformasyon meydana gelecek boyuta ulaşmışlardır. Yük ne zaman maksimum seviyeye ulaşırsa, bu oldukça büyümüş ve birleşerek kocaman çatlaklar meydana getirmeye başlamıştır diyebiliriz. Böylece malzeme kırılmıştır.

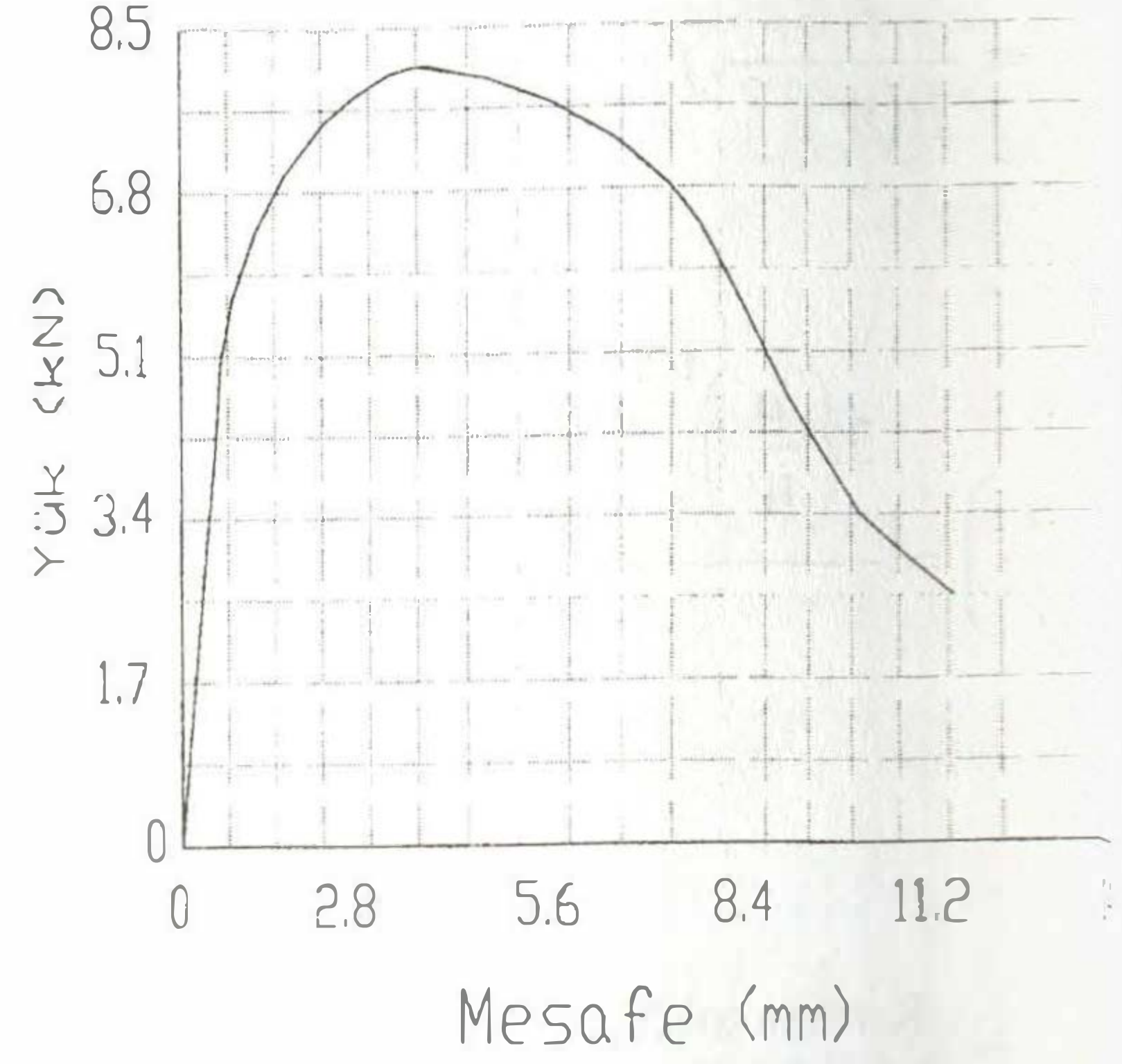
III. 2 Kırılma tokluğu sonuçları

Tablo 4 de üç nokta kırılma deneyi sonucunda elde edilen ve gerilim giderme tavlama uygulanmış ve uygulanmamış numunelere ait kırılma tokluğu (K_{IC}) değerleri verilmiştir. Tablodaki sonuçlar, hem çentik ITAB içerisinde, hem de kaynak dikişi içerisindeki numunelere ait sonuçları da içermektedir.

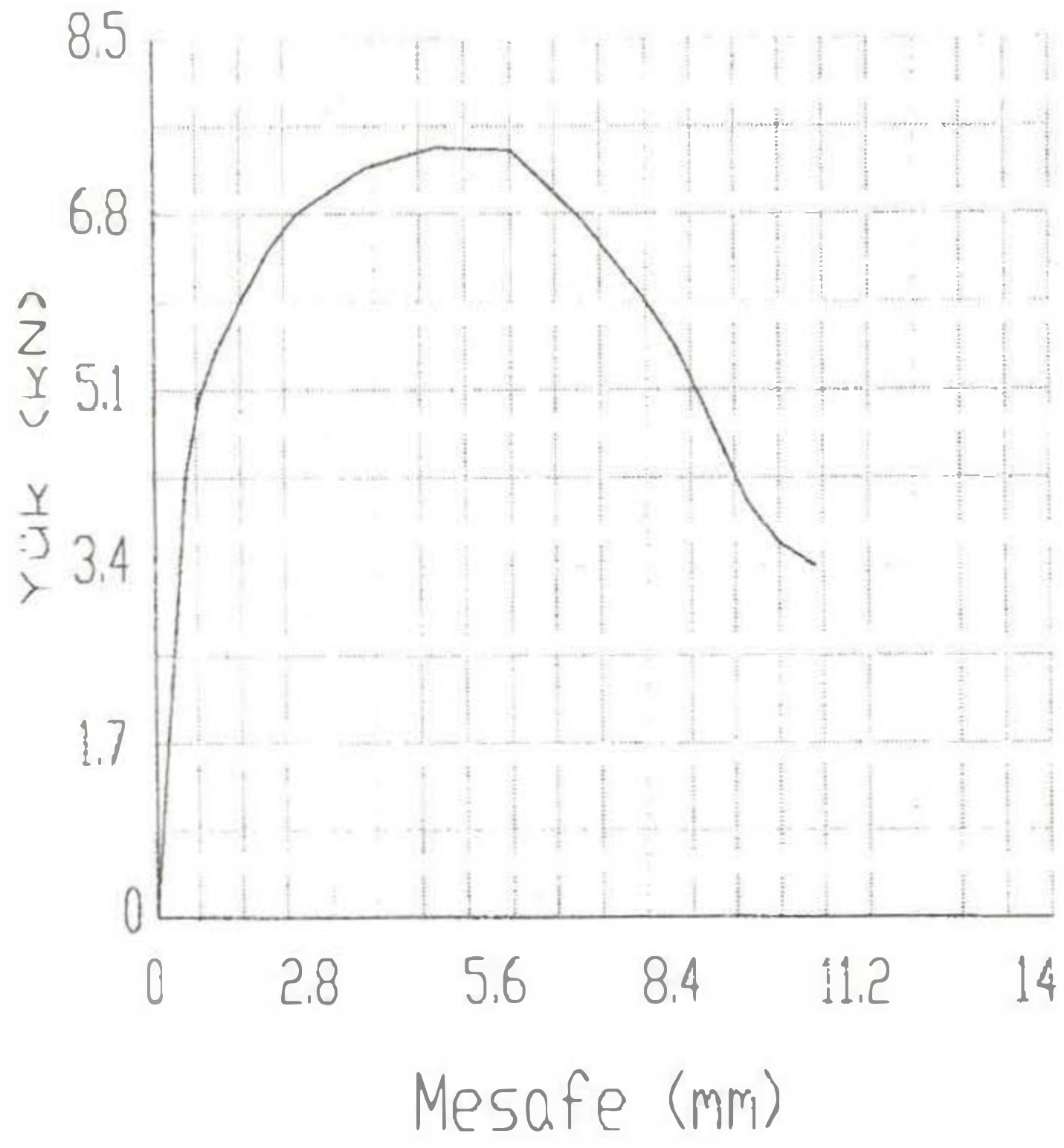
Tablo 4'de de görüleceği gibi, gerilim giderme tavlama uygulanmamış numunelerde, kaynak dikişinin kırılma tokluğu (164 MPa m), ITAB bölgesinin kırılma tokluğundan (145 MPa m) daha yüksek çıkmıştır. Mikro yapı incelemesinden de görüleceği gibi, ITAB bölgesinde çentik açıldığı kısımda tane irileşmesi meydana gelmiştir. Dolayısıyla daha ince tane yapısına sahip olan kaynak dikişinin kırılma tokluğu, ITAB'ın kırılma tokluğundan daha yüksek çıkacaktır. Sonuçlardaki aynı eğilim, gerilim giderme tavlama uygulanmış numuneler içinde geçerli olduğu yine bu tabloda görülmektedir.



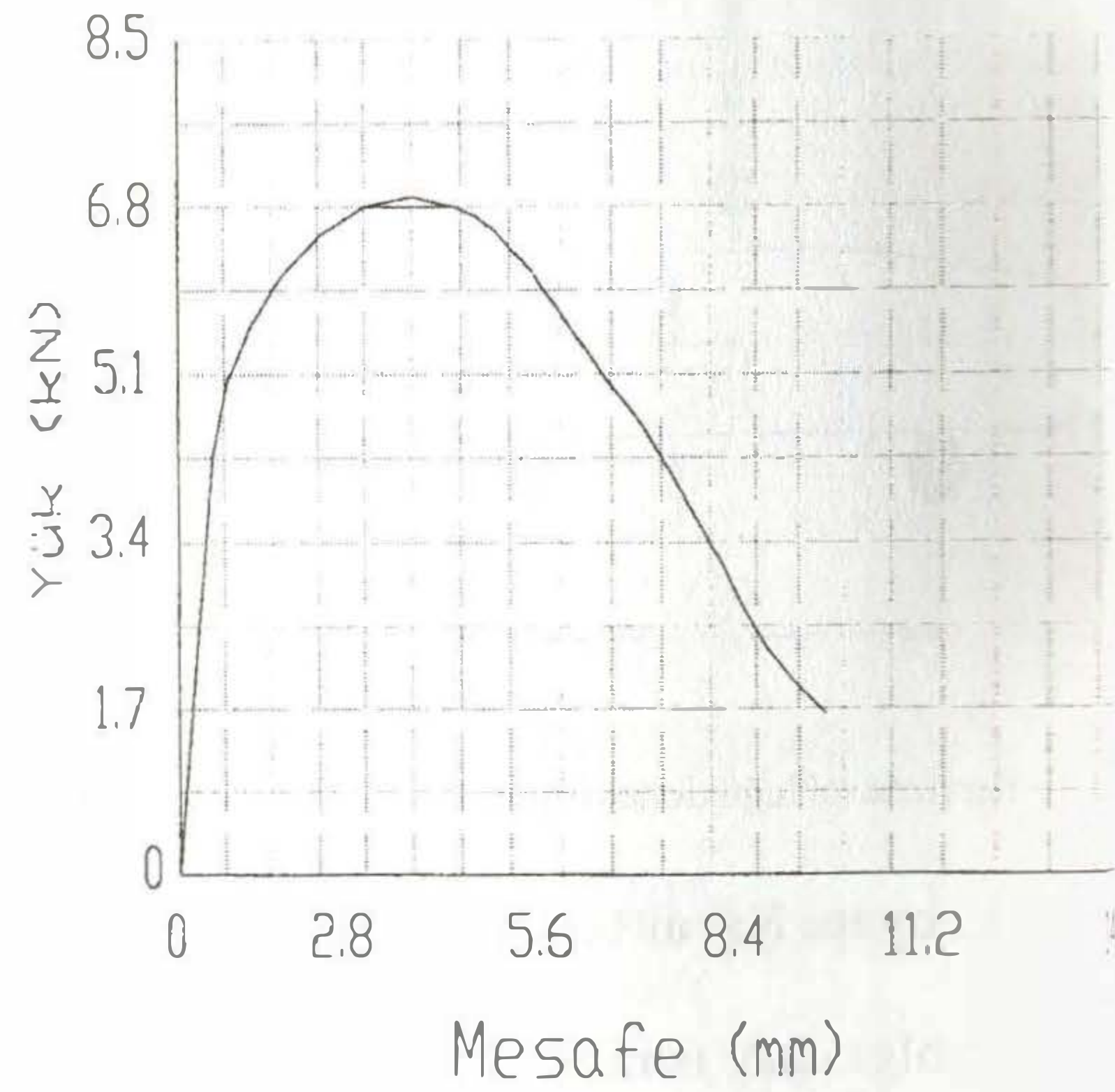
Şekil 2. Çentiğin kaynak dikişi içerisine açılmış ve gerilim giderme tavlaması yapılmamış API 5L X65 kaynaklı numunesine ait yük-mesafe eğrisi



Şekil 3. Çentiğin kaynak dikişi içerisine açılmış ve gerilim giderme tavlaması yapılmış API 5L X65 kaynaklı numunesine ait yük-mesafe eğrisi



Şekil 4. Çentik ısının tesiri altındaki bölge (ITAB) içerisine açılmış ve gerilim giderme tavlaması yapılmış API 5L X65 kaynaklı numunesine ait yük-mesafe eğrisi



Şekil 5. Çentiğin ısının tesiri altındaki bölge (ITAB) içerisine açılmış ve gerilim giderme tavlaması yapılmamış, API 5L X65 kaynaklı numunesine ait yük-mesafe eğrisi

Tablo 4. API 5L X65 çeliğinden yapılmış spiral dikişli numunelere ait kırılma tokluğu ve kırılma enerji değerleri

API 5L X65 çelik numuneleri	Çentiğin açıldığı bölge	Kırılma tokluğu, K_{Ic} (MPa m)	Kırılma enerjisi (Joul)
Kaynaktan sonra gerilim giderme tavlama uygulanmamış	ITAB	145 ± 5	52 ± 2
	Kaynak dikişi	164 ± 3	60 ± 3
Kaynaktan sonra gerilim giderme tavlama uygulanmış	ITAB	155 ± 4	58 ± 2
	Kaynak dikişi	170 ± 3	66 ± 4

Gerilim giderme tavlama uygulanan ve aynı çentik bölgesine sahip numuneler karşılaştırıldığında ise, gerilim giderme tavlama uygulanmış numunelerin kırılma tokluğu daha yüksek çıkmıştır. Kaynaktan sonra, soğuma esnasında malzemede gerilmeler oluşmaktadır. Bu gerilmelerin varlığı, malzemenin gevrekleşmesini sağlayacaktır. Gerilme giderme tavlama ile bu gerilmeler azaltılacak ve kırılma tokluğu da yükselecektir.

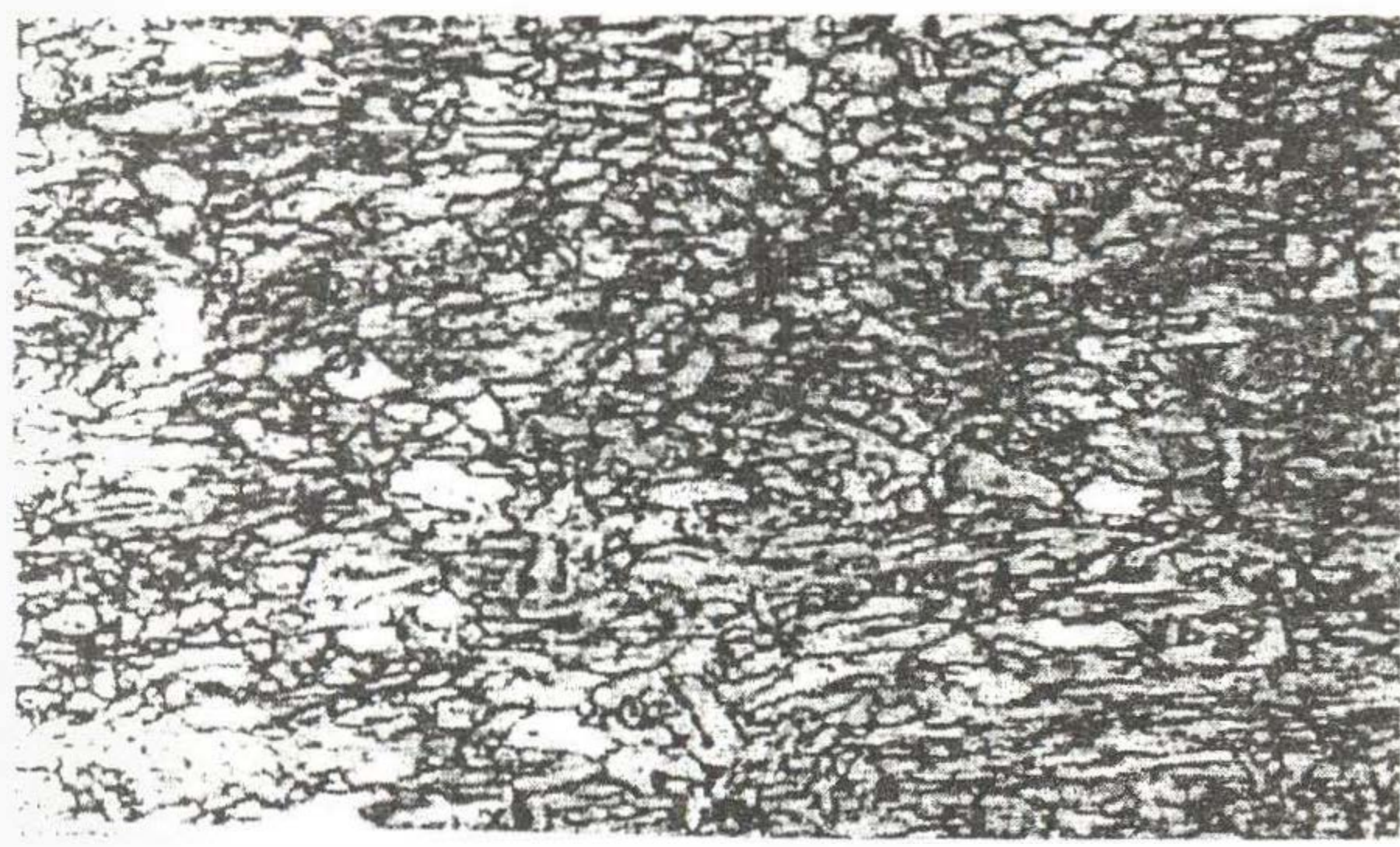
Ayrıca, Tablo 4' de üç nokta kırılma deneyi sonucunda elde edilen ve gerilme giderme tavlama uygulanmış ve uygulanmamış numunelere ait kırılma enerjileri gösterilmektedir. Kırılma esnasında emilen enerji, üç nokta kırılma tokluğu deneyi sonucunda elde edilen yük-mesafe eğrileri altında kalan alanın hesaplanması ile bulunmuştur. Çentik, gerek kaynak dikişi gerekse ITAB içerisine açılmış durumlarda, gerilim giderme tavlama uygulanmamış ve uygulanmış numuneler karşılaştırıldığı zaman, gerilim giderme tavlama uygulanmış numunelerin absorbe ettiği enerji, uygulanmamışlardan

daha fazladır. Bu sonuçlar kırılma tokluğu değerleri ile de, uygunluk içerisinde ve aynı eğilimdedir.

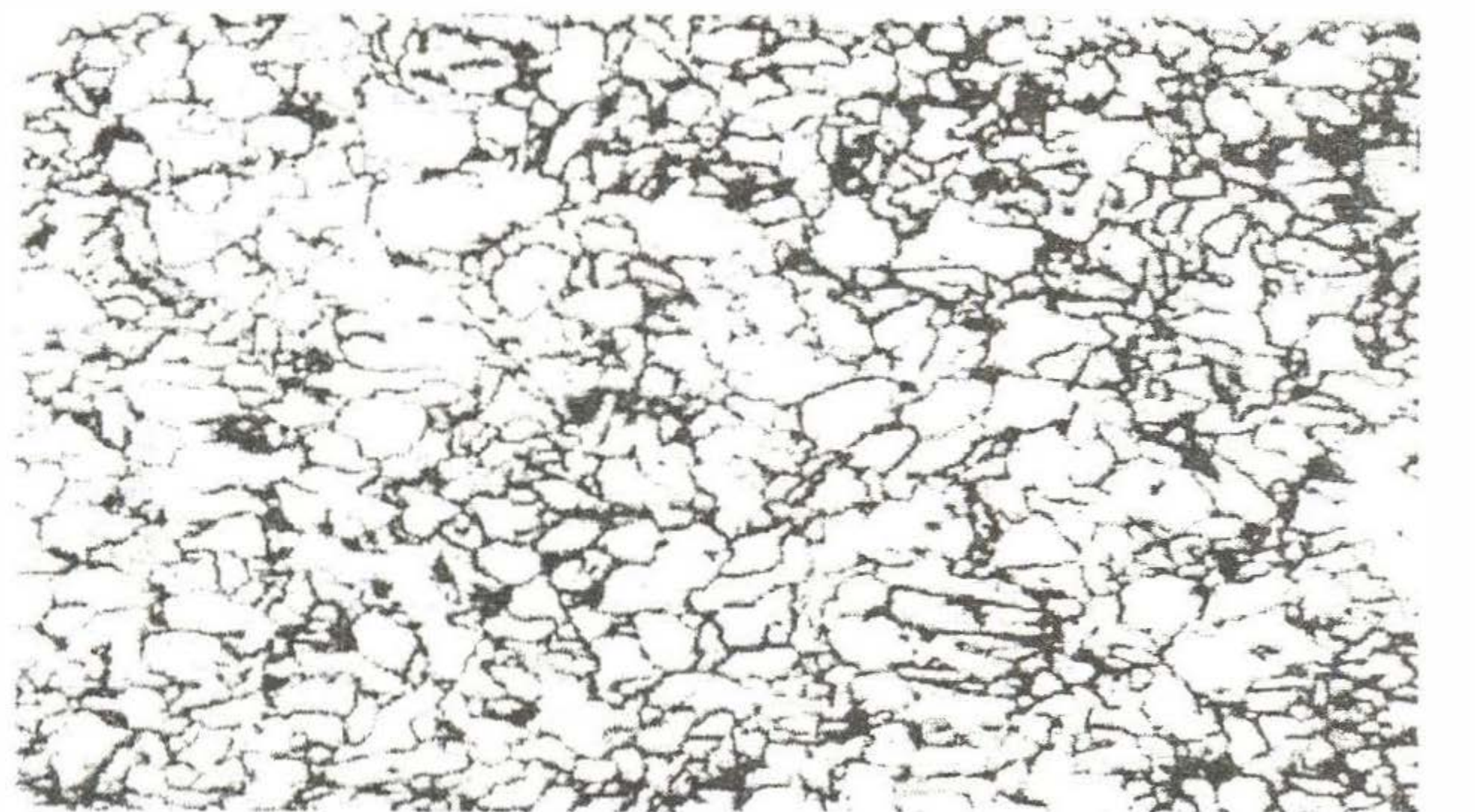
III.3 Mikro Yapı Karakterizasyonu

Şekil 8' de gerilim giderme tavlama uygulanmamış, API 5L X65 kaynaklı numunesinin ana metaline, ısının tesiri altındaki bölgesine (ITAB) ve kaynak metaline ait mikro yapılar görülmektedir.

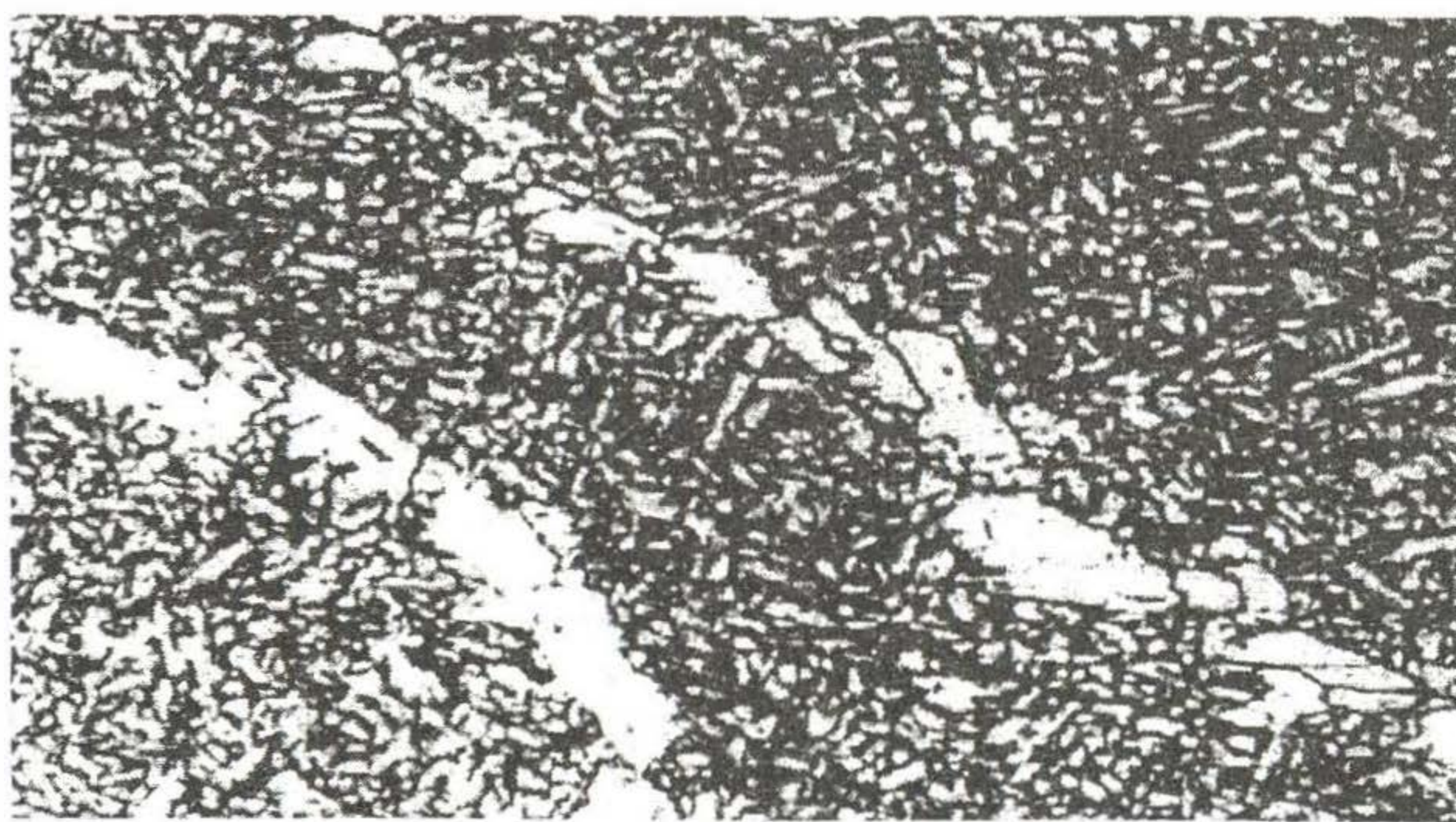
Kaynak metalinin mikro yapısı incelendiğinde, kaynak metalinin tane sınırı boyunca oluşmuş ferrit, Widmanstätten ferrit, eşeksenli ferrit ve küçük miktarda mikro fazlar içerdiği görülmektedir. Isının tesiri altındaki bölgesi (ITAB), kaynak metaline göre daha kaba taneli bir yapı içermektedir. Bu bölge üst ve alt beynit, az miktarda Widmanstätten ferrit içerdiği görülmektedir. Ana metal, ferritik bir matris içerisinde, dağılmış olarak bulunan martenzit yapıya sahip olup, ince taneli bir yapı söz konusudur. Tanelerin ise haddeleme yönüne paralel olduğu görülmektedir.



(a) Kaynak metal x250



b) ITAB x250



c) Ana metal x250

Şekil 8. Gerilim giderme tavlama uygulanmamış, API 5L X65 kaynaklı numunesinin (a) kaynak metaline, (b) ITAB'ına ve (c) ana metaline ait mikro yapı fotoğrafları

IV. GENEL SONUÇLAR

Gerilim giderme tavlama uygulanmamış ve uygulanmış numunelerde, kaynak dikişinin kırılma tokluğu, ITAB bölgesinin kırılma tokluğundan daha yüksek çıkmıştır.

Gerilim giderme tavlama uygulanan numunelerin kırılma toklukları, gerilim giderme tavlama uygulanmamış ve aynı çentik bölgesine sahip numuneler karşılaştırıldığında ise, gerilim giderme tavlama uygulanmış numunelerin kırılma toklukları, daha yüksek çıkmıştır.

Gerilim giderme tavı uygulanmamış ve uygulanmış numunelerin, aynı çentik bölgelerine sahip numunelerle karşılaştırıldığında, kaynaklı numunelerin absorbe ettiği enerjinin daha fazla olduğu görülmüştür.

[1] Tsay, L.W., Chen, Y.C., and Chan, S.L.I., "Sulfide stress corrosion cracking and fatigue crack growth of welded TMCP API 5L X65 pipe-line steel", International Journal of Fatigue, 23 (2001), pp 103-113.

[2] Abbade, N.P., and Crnkovic, S.J., "Sand-water slurry erosion of API 5L X65 pipe steel as quenched from intercritical temperature", Tribology International, 33 (2000), pp. 811-816.

[3] Yükler, A.İ., "Alaşımız dual fazlı çeliklerin mekanik ve nokta kaynağı özellikleri", Doktora tezi, İTÜ Kimya Metalurji Fakültesi, Ekim 1983.

[4] Smith, W.F. Çeviri:Türker, M. , "Mühendislik alaşımlarının Yapı ve özellikleri" Cilt I, Nobel yayım Dağıtım, Ankara, 2000.

[5] API 5L specification for line pipe, forty-first edition, April 1, 1995, American Petroleum Institute, Washington.

[6] İnternet sayfası: www.oerlikonweld.com