



SAE MÜHENDİSLİK
ENGINEERING & CONSULTING

TEKNİK YAYINLAR • No. 11

Kaynak Metalurjisi

Kaynak bölgeleri ve ITAB, ısı girdisi ve $t_{8/5}$, soğuk ve sıcak çatlak mekanizmaları, kusur-neden-önlem ilişkisi, paslanmaz ve alüminyumda özel durumlar

Hazırlayan: Ahmet Asım ESER — SAE Mühendislik ve Danışmanlık Hizmetleri

Sürüm: 1.0 • **Tarih:** Ekim 2026 • **saemuhendislik.com**

Bu doküman SAE Mühendislik tarafından özgün olarak hazırlanmıştır. Kaynak gösterilerek alıntı yapılabilir.

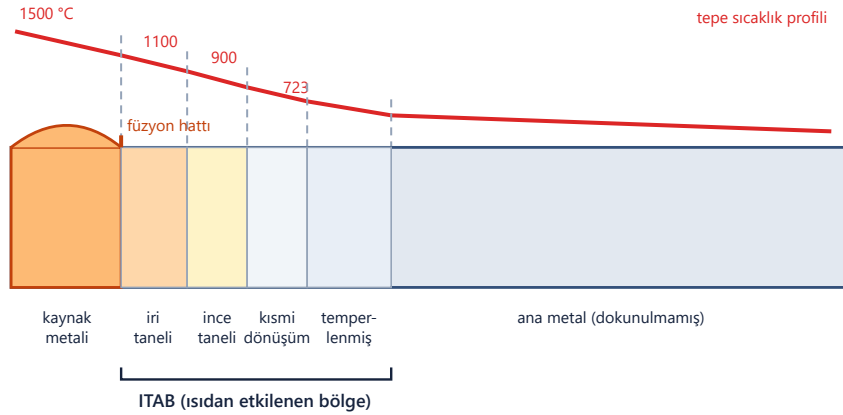
1. Giriş: Kaynak, Yerinde Döküm ve Yerinde Isıl İşlemdir

Kaynak, iki parçayı birleştirmekten ibaret bir montaj işlemi değildir. Ergiyen bölgede **küçük bir döküm** gerçekleşir: sıvı metal katılaşır, segregasyon yapar, gaz tutar. Hemen yanındaki bölgede ise **kontROLSÜZ bir ısıtım işlemi** uygulanır: malzeme saniyeler içinde östenitleme sıcaklığına çıkar ve yine saniyeler içinde soğur.

Bu nedenle kaynaklı bir bağlantıda malzeme artık tek bir malzeme değildir: aynı kesit üzerinde **döküm yapısı, iri taneli bölge, ince taneli bölge, kısmen dönüşmüş bölge ve dokunulmamış ana metal** yan yana durur. Kaynak hasarlarının neredeyse tamamı bu geçiş bölgelerinde başlar.

Temel ilke: Kaynakta kalite, ergitme anında değil **soğuma sırasında** belirlenir. Isı girdisi, ön ısıtma ve pasolar arası sıcaklık; hangi mikroyapının oluşacağını ve çatlakların doğup doğmayacağını tayin eder.

2. Kaynak Bölgeleri



Şekil 1 — Kaynak bağlantısının simetrik yarım kesiti ve tepe sıcaklık profili. ITAB tek bir bölge değil, farklı tepe sıcaklıkları görmüş alt bölgelerin dizisidir. (SAE Mühendislik özgün çizimi, şematiktir.)

Bölge	Tepe sıcaklığı	Oluşan yapı ve davranış
Kaynak metali	Ergime üstü	Döküm yapısı: sütunsal taneler, segregasyon, gaz ve cüruf tutma riski
İri taneli ITAB	≈ 1100 °C – ergime	Östenit tanesi kabalaşır; en kritik bölge — en sert ve en gevrek yapı burada doğar
İnce taneli ITAB	≈ 900–1100 °C	Yeniden tanelenme; genellikle ana metalden daha tok
Kısmen dönüşmüş	≈ 723–900 °C	Kısmi östenitlenme; karışık ve düzensiz yapı
Temperlenmiş	< 723 °C	İslah edilmiş ana metalde yumuşama (dayanım kaybı) görülebilir

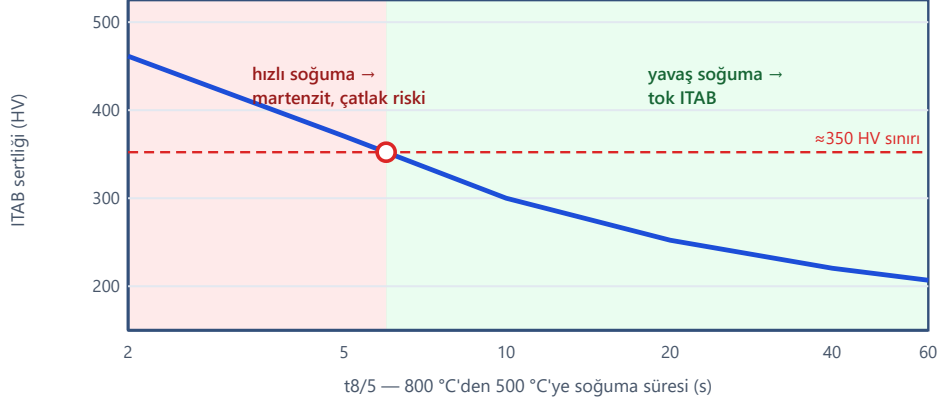
3. Isı Girdisi ve Soğuma Süresi $t_{8/5}$

Kaynak sırasında birim uzunluğa verilen enerji **ısı girdisi** ile ifade edilir:

$$Q = \eta \cdot (U \cdot I) / (v \cdot 1000) \text{ [kJ/mm]}$$

Burada U gerilim (V), I akım (A), v kaynak hızı (mm/s) ve η yöntemin ısı verimidir. EN 1011-1'de kullanılan tipik verim değerleri: **tozaltı $\approx 1,0$ · örtülü elektrot ve MIG/MAG $\approx 0,8$ · TIG $\approx 0,6$.**

Isı girdisinin pratikteki karşılığı $t_{8/5}$ 'tir: kaynak bölgesinin **800 °C'den 500 °C'ye soğuması için geçen süre**. Yapı çeliklerinde dönüşüm bu aralıkta olduğundan, ITAB'ın mikroyapısı doğrudan bu süreyle belirlenir.



Şekil 2 — $t_{8/5}$ uzadıkça ITAB sertliği düşer. Çok kısa süre martenzit ve soğuk çatlak riski doğurur; aşırı uzun süre ise tane kabalaşması ve tokluk kaybı getirir — pencere iki yönden sınırlıdır. (SAE Mühendislik özgün çizimi, şematiktir.)

İki yönlü sınır: Isı girdisini artırmak soğuk çatlakları önler ama sınırsız artırılamaz — aşırı ısı girdisi iri taneli ITAB'ı büyütür, darbe tokluğunu düşürür ve distorsiyonu artırır. Doğru uygulama, **WPS'te alt ve üst sınırı birlikte tanımlamaktır.**

4. Soğuk Çatlak (Hidrojen Kaynaklı Çatlama)

Kaynaklı yapılarda en çok karşılaşılan ve en sinisi hasar türüdür; kaynaktan **saatler, hatta günler sonra** ortaya çıkabilir. Oluşması için dört koşulun **aynı anda** bulunması gerekir:

1. **Difüzyon yapabilen hidrojen** (nemli elektrot, yağ, pas, boya, nemli hava)
2. **Hassas mikroyapı** (hızlı soğuma sonucu oluşmuş sert martenzit)
3. **Çekme gerilmesi** (artık gerilme veya dış yük)
4. **Uygun sıcaklık** (yaklaşık 150 °C'nin altı, oda sıcaklığı dâhil)

Dört koşuldan **herhangi birini** ortadan kaldırmak çatlakları önler; pratikte en kolay kırılan halkalar hidrojen ve mikroyapıdır:

Önlem	Nasıl çalışır
Ön ısıtma	Soğuma hızını düşürür (martenziti azaltır) ve hidrojenin kaçmasına zaman tanır. Gerekli sıcaklık; CEV, kalınlık, hidrojen seviyesi ve ısı girdisine göre EN 1011-2'den belirlenir.
Düşük hidrojenli sarf malzeme	Bazık örtülü elektrot; üretici talimatına göre kurutma ve sıcak dolapta saklama şarttır — kuru elektrot kullanmak, yöntemin yarısıdır.
Yüzey temizliği	Pas, yağ, nem, boya ve galvaniz hidrojen kaynağıdır; kaynak ağzı ve çevresi temizlenir.
Pasolar arası sıcaklık	Ön ısıtma sıcaklığının korunması; soğumuş bağlantıya devam paso atmak riski geri getirir.
Kaynak sonrası ısıtma işlemi	Hidrojen giderme tavlama (≈200–250 °C) ve/veya gerilim giderme; kalın ve kritik kesitlerde.
Malzeme seçimi	Karbon eşdeğeri düşük çelik seçmek en kalıcı çözümdür (bkz. Teknik Yayınlar No.8).

5. Sıcak Çatlak (Katılma Çatlağı)

Soğuk çatlağın aksine sıcak çatlak, kaynak banyosu **henüz katılma** olur. Mekanizma şudur: düşük ergime sıcaklıklı filmler (özellikle **kükürt** ve **fosfor** bileşikleri) tane sınırlarında en son katılma; katılma bütülmesi bu zayıf filmleri çeker ve ayırır.

- Bileşim:** Yüksek S ve P içeriği riski doğrudan artırır; mangan kükürdü bağlayarak etkiyi azaltır.
- Dikiş şekli:** Derin ve dar dikişlerde (genişlik/derinlik oranı küçük) katılma cepheleri ortada karşılaşır ve safsızlıkları merkez hattında toplanır — **merkez hattı çatlağı** tipik sonuçtur.
- Krater:** Ark sönerken oluşan krater, yıldız biçimli krater çatlağının klasik yeridir; krater doldurma programı kullanılır.
- Östenitik paslanmazlar:** Tam östenitik kaynak metali sıcak çatlağa çok yatkındır; kaynak metalinde **%5–10 δ-ferrit (yaklaşık 3–10 FN)** bulunması çatlağı büyük ölçüde engeller.

6. Kusurlar: Neden ve Önlem

Kusur	Tipik nedeni	Önlem / tespit
Gözenek	Nem, yağ, pas; gaz koruması yetersiz veya rüzgâr; yanlış gaz debisi	Temizlik, gaz debisi ve siper; RT/UT ile tespit
Cüruf kalıntısı	Pasolar arası temizlik yapılmaması, uygunsuz paso dizilişi	Her pasodan sonra temizlik; RT
Yetersiz nüfuziyet	Düşük akım, geniş kök aralığı hatası, yanlış ağız açısı	WPS parametreleri, kök açıklığı kontrolü; UT/RT
Yetersiz ergime	Düşük ısı girdisi, hatalı torç açısı, kirli yüzey	Parametre ve el becerisi; UT (RT bu kusuru kaçırabilir)
Yanma çentiği	Yüksek akım/hız, hatalı torç açısı	Parametre düzeltme; gözle muayene + yorulmada çentik etkisi (bkz. No.9)
Soğuk çatlak	Hidrojen + martenzit + gerilme	Ön ısıtma, kuru elektrot; kaynaktan 48 saat sonra MT/UT ile ara
Sıcak çatlak	S/P segregasyonu, dar-derin dikiş, krater	Sarf seçimi, dikiş şekli, krater doldurma; PT/MT
Lamel yırtılma	Levha kalınlığı yönünde çekme + inklüzyon düzlemleri	Bağlantı tasarımı, Z kalite levha; UT

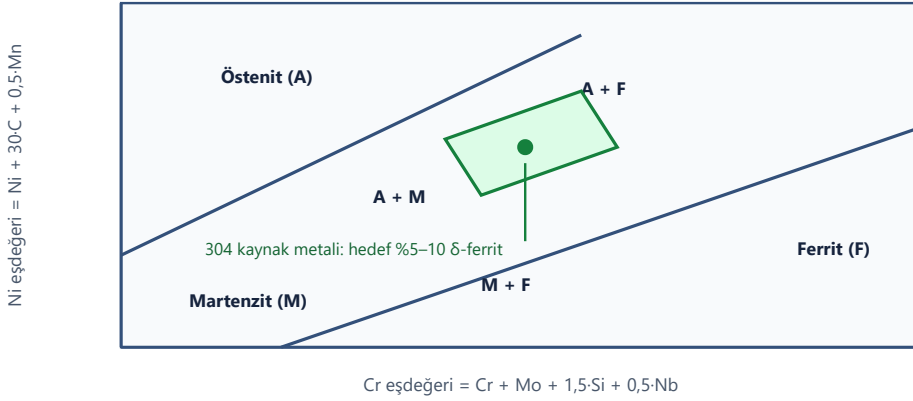
Kusur mu, hata mı? EN ISO 6520-1 kusurları sınıflandırır; **EN ISO 5817** ise B, C, D kalite seviyeleriyle hangi kusurun hangi boyuta kadar **kabul edilebilir** olduğunu söyler. "Kusursuz kaynak" bir şartname değildir; şartname, kalite seviyesinin seçilmesidir.

7. Artık Gerilmeler ve Distorsiyon

Kaynak bölgesi genişip büzülürken çevresindeki soğuk metal buna direnir; sonuçta dikiş boyunca **akma sınırına yakın çekme artık gerilmesi** kalır. Bu gerilme iki şeyi birden besler: çatlak oluşumunu ve çarpılmayı.

- **Tasarımla azaltma:** gereğinden kalın dikiş atmamak, simetrik dikiş düzeni, dikiş sayısını azaltmak.
- **Sırayla azaltma:** adım adım (geri adım) kaynak, dengeli sıralama, uygun bağlama aparatı.
- **İşlemlerle azaltma:** gerilim giderme tavı ($\approx 550-650$ °C), çekiçleme/peening, titreşimle gerilim giderme.
- **Ölçüm:** delik delme yöntemi veya X-ışını difraksiyonu ile artık gerilme ölçülebilir.

8. Paslanmaz ve Alüminyum Kaynağında Özel Durumlar



Şekil 3 — Östenitik paslanmaz kaynak metalinde bileşim-yapı ilişkisi. Hedef, tam östenitik yapıdan kaçınıp az miktarda δ-ferrit içeren bölgede kalmaktır. (SAE Mühendislik özgün çizimi, şematiktir; sayısal tahmin için WRC-1992 diyagramı kullanılır.)

Östenitik paslanmaz çelikler

- **Hassaslaşma (sensitization):** 450–850 °C aralığında krom karbür tane sınırlarına çöker, çevresi kromca fakirleşir ve tanelerarası korozyon başlar. Çözüm: **düşük karbonlu (L) kaliteler** veya **Ti/Nb ile stabilize** edilmiş kaliteler; ısı girdisini sınırlamak.
- **δ-ferrit dengesi:** Sıcak çatlağı önlemek için az miktarda ferrit istenir; ancak yüksek sıcaklıkta çalışacak parçalarda aşırı ferrit gevrekleşmeye yol açar.
- **Isıl genleşme:** Östenitik paslanmazın genleşmesi karbon çeliğinin yaklaşık 1,5 katıdır — distorsiyon ve artık gerilme daha büyüktür.

Alüminyum alaşımları

- **Oksit tabakası:** Al₂O₃ yaklaşık 2050 °C'de erir, alüminyum ise 660 °C'de — oksit mekanik ya da kimyasal olarak **kaynaktan hemen önce** temizlenmezse ergime hatası kaçınılmazdır.
- **Hidrojen gözeneği:** Alüminyumun en yaygın kaynak kusurudur; nem ve yağ ana kaynaktır.
- **Sıcak çatlak:** 6xxx serisi çatlamaya yatkındır; uygun ilave tel seçimi (ör. 4043 veya 5356) bileşimi çatlak hassas aralığın dışına taşır.
- **Dayanım kaybı:** Isıl işlemle sertleşen alaşımlarda ITAB yumuşar; hesapta kaynak bölgesi için düşürülmüş dayanım kullanılır.

9. Muayene, Yeterlilik ve Standartlar

Konu	Standart
Kaynak yöntem şartnamesi (WPS) ve onayı (WPQR)	EN ISO 15609 · EN ISO 15614-1
Kaynakçı yeterliliği	EN ISO 9606-1
Kusur sınıflandırması / kalite seviyeleri	EN ISO 6520-1 · EN ISO 5817
Çelik kaynağı önerileri, ön ısıtma	EN 1011-1 · EN 1011-2
Radyografik muayene (RT)	ISO 17636-1/-2
Ultrasonik muayene (UT)	ISO 17640
Penetrant (PT) · Manyetik partikül (MT)	ISO 3452-1 · ISO 17638
Kaynakta sertlik ve darbe deneyi	ISO 9015 · ISO 9016
Kaynaklı çelik yapılarda yorulma	EN 1993-1-9

Kaynaklı bir bağlantıda hasar incelemesi yapılırken ilk istenen belgeler WPS/WPQR, kaynakçı sertifikası, sarf malzeme sertifikası ve ön ısıtma kayıtlarıdır. Kırık yüzeyin okunması için **Teknik Yayınlar No.6**, kesit incelemesi için **No.10** yöntemleri uygulanır.

10. Pratik Kontrol Listesi

- Malzemenin karbon eşdeğeri hesaplandı mı? Ön ısıtma gerekiyor mu, kaç derece?
- Elektrot/tel kuru mu, üretici talimatına göre mi saklanıyor?
- Kaynak ağzı ve çevresi pas, yağ, nem ve boyadan temizlendi mi?
- WPS'te ısı girdisi için **hem alt hem üst** sınır var mı? Pasolar arası sıcaklık tanımlı mı?
- Dikiş şekli (genişlik/derinlik) sıcak çatlak için uygun mu? Krater dolduruluyor mu?
- Hangi EN ISO 5817 kalite seviyesi sözleşmede yazılı?
- Soğuk çatlak araması kaynaktan **en az 48 saat sonra** planlandı mı?
- Paslanmazda L/stabilize kalite ve ferrit hedefi, alüminyumda ilave tel seçimi kararlaştırıldı mı?

11. Yararlanılan Temel Kaynaklar

- Kou, S., *Welding Metallurgy*, 2. baskı, Wiley, 2003.
- Lippold, J.C., *Welding Metallurgy and Weldability*, Wiley, 2015.
- Easterling, K., *Introduction to the Physical Metallurgy of Welding*, 2. baskı, Butterworth-Heinemann, 1992.
- American Welding Society, *Welding Handbook Vol. 1: Welding Science and Technology*, 9. baskı, AWS, 2001.
- ASM International, *ASM Handbook Vol. 6: Welding, Brazing and Soldering*, 1993.
- İlgili standartlar*: EN 1011-1/-2, EN ISO 5817, EN ISO 6520-1, EN ISO 15609, EN ISO 15614-1, EN ISO 9606-1, ISO 17636-1/-2, ISO 17640, ISO 3452-1, ISO 17638, ISO 9015, ISO 9016, EN 1993-1-9.