METALİK YAPILARDA KALINTI GERİLİMLER VE ETKİLERİ

Emre Turan[1], Süleyman Bektaş[2]

1. GİRİŞ

Kaynaklı imalatlarda kalıntı gerilimlerin oluşum mekanizmasına ve sonuçlarına dönük değerlendirme yapılması hedeflenmiştir.

Kaynaklı imalatlarda kalıntı gerilimlerin oluşum mekanizması, etkin olan değişkenlerin karakteristikleri ile birlikte değerlendirilmiştir. Ayrıca, çekme-çarpılma ile olan ilişkisi ve doğurduğu sonuçlar da mercek altına alınmaya çalışılmıştır.

Kısıtlanmış alandaki malzemeler üzerine olan yüklemeler;

- Elastik bölge içerisinde hapsolan gerilimler şeklinde karşımıza çıkar.
- Plastik bölge içerisinde çekme mukavemetine kadar olan sınır içerisinde boyutsal değişimler şeklinde kendini gösterir.

2. KALINTI GERİLİM VE ÇARPILMA KAVRAMI

2.1 Kalıntı Gerilimi Tetikleyen İşlemler

Birçok imalat süreci, malzemeye uygulandığında malzeme içerisinde kalıntı gerilimlerin oluşmasını tetiklemektedir. Bu süreçler kısıtlanmış malzeme üzerinde oluşturduğu kalıntı gerilim yüklemeleri;

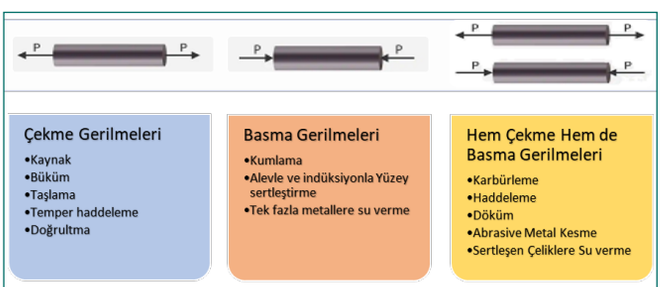
- Isıl
- Mekanik
- Isıl + Mekanik (Termomekanik)
- Faz değişimleri (Östenitden martensite ani faz geçişlerindeki mikro gerilimler)

Ayrıca malzemenin kısıtlanması, dâhil olduğu sürecin prensiplerine de bağlıdır.

Yükleme tipi ve kısıt kaynağı birlikte düşünüldüğünde Resim 1'de oluşturulmuştur.

[1] Makina /Kaynak Mühendisi, Nurol Makina ve Sanayi A.Ş - *Emre.Turan@nurolmakina.com.tr*
[2] Makina /Kaynak Mühendisi), Nurol Makina ve Sanayi A.Ş - *Suleyman.Bektas@nurolmakina.com.tr*

Resim 1. Yükleme Tipi ve Kısıt Kaynağı Göre Kalıntı Gerilim Oluşturan Süreçler [3]



Resim 2. İmalat Yöntemlerine Göre Kalıntı Gerilim Tiplerine Örnekler [3]

Isıl yüklemeler özelinde bir sıcak şekillendirme işlemi olan Kaynak İşlemi asıl odaklanacağımız nokta olmuştur [1, 5].

2.2 Kalıntı Gerilim ve Çarpılmayı Etkileyen Faktörler

Isıl yüklemelerde kalıntı gerilim ve çarpılmayı etkileyen 5 malzeme özelliği vardır. Bunlar:

Elastisite modülü E (N⁄(mm)^2)

Akma mukavemeti Rm (N⁄(mm)^2)

Isıl genleşme katsayısı α (mm/(m.K))

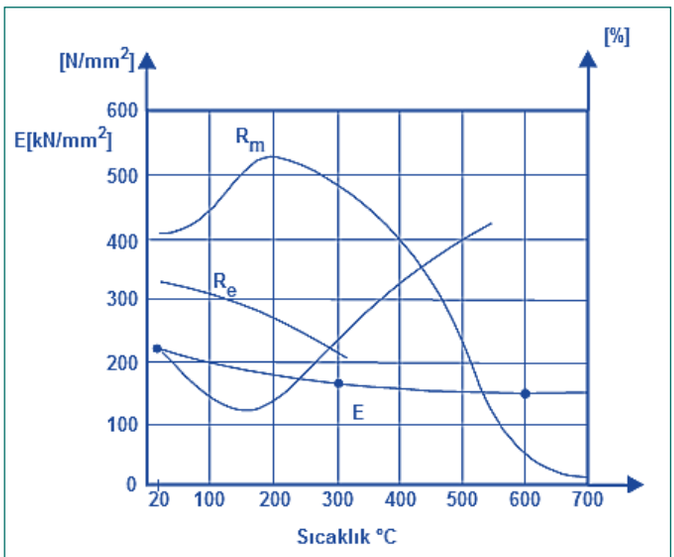
Isıl iletkenlik λ (W⁄(m.K))

Özgül ısı C (KJ⁄(kg.K))

2.2.1 Elastisite Modülü

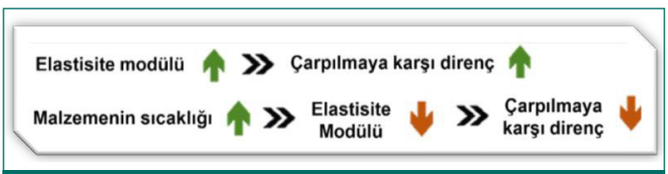
Malzemenin yük altındayken şekil değiştirme direncidir. Resim 3'te akma/çekme mukavemeti ve elastisite modülünün sıcaklığa bağlı olarak değişimi görülmektedir.

Bir malzemenin elastisite modülündeki değerin yüksek veya düşük olması çekme çarpılma etkilerine karşı direncini etkilemektedir. Ayrıca malzeme üzerine uygulanan



Resim 3. S355JR Malzemenin Sıcaklığa Bağlı Elastisite Modülündeki Değişim Grafiği [1]

termal etkilere bağlı olarak malzemenin elastisite modülünde de ters orantılı bir ilişki bulunmaktadır. Tüm bu ilişkiler Resim 4'te kısaca özetlenmiştir.



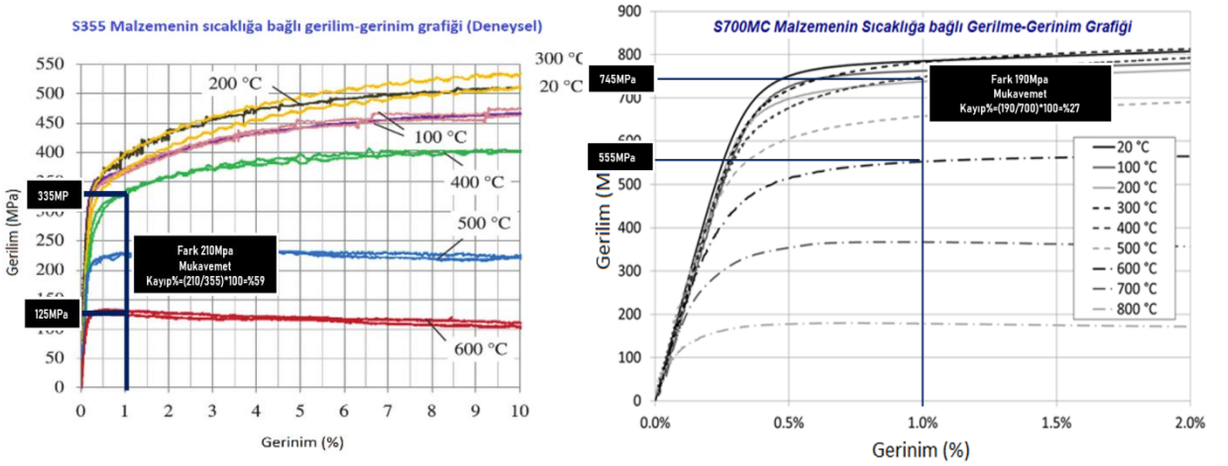
Resim 4. Elastisite Modülündeki Değişimin Kalıntı Gerilimle İlişkilendirilmesi

2.2.2 Akma Mukavemeti

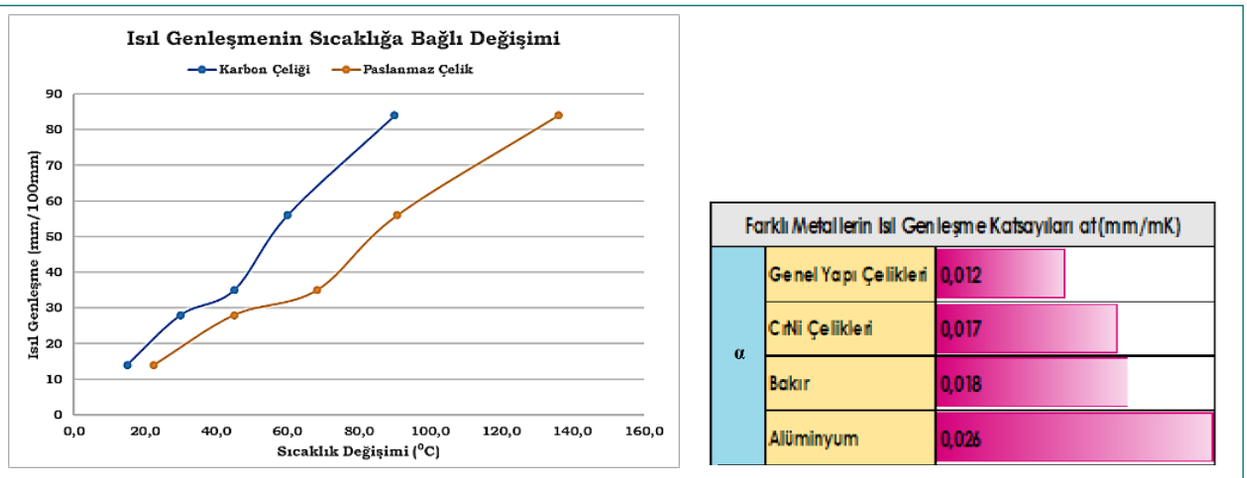
Akma mukavemeti, sünek malzemelerde kopma olmaksızın deformasyona müsaade edilen üst sınırı belirler.

Resim 5'te iki grafikte S355JR ve S700MC yapı çeliklerinin gerilim gerinim değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimini görmektesiniz. Her iki grafik deneysel verilere göre oluşturulmuş grafiklerdir.

İki malzemenin %1 gerinim oluşturduğu değer temel alınarak 400 ˚C ve 600 ˚C arasındaki mukavemet farklarına bakılarak 20 ºC'deki mukavemet değerine oranlanmıştır. Netice olarak S355JR malzeme %59 S700MC malzeme %27 düzeyinde bir mukavemet kaybı yaşamıştır. Buradan yola çıkarak malzemenin mukavemet değeri ne kadar yüksek olursa ısıya bağlı mukavemetindeki yüzde kayıp o kadar az olur [2].



Resim 5. S355JR Ve S700MC Malzemenin Sıcaklığa Bağlı Gerilim-Gerinim Grafikleri [2]



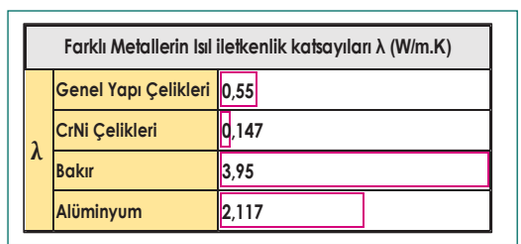
Resim 6. Sıcaklığın Karbon Ve Paslanmaz Çeliğin Isıl Genleşme Katsayısı Üzerindeki Etkisi (Solda). Bazı Metallerin Isıl Genleşme Katsayısı Değerleri. (Sağda) [5]

Resim 7. Isıl Genleşme Katsayısının Kalıntı Gerilim İle Olan İlişkisi

2.2.3 Isıl Genleşme Katsayısı

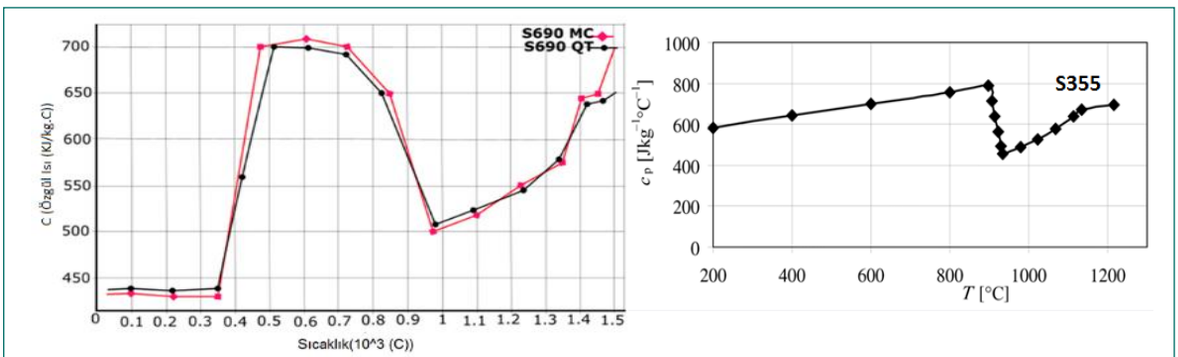
Isıl genleşme katsayısı, ısıtılan malzemenin genleşme karakteristiğini belirler.

Malzemenin ısıl genleşme katsayısı arttıkça genleşme büzülme eğilimi artacaktır. Aynı zamanda çekme çarpılma eğilimi de doğru orantılı şekilde artacaktır. Resim 6'da bu ilişki özetlenmiştir.



Resim 8. Bazı Metallerin Isıl İletkenlik Değerleri [5]

Resim 9. Isıl İletkenlik Katsayısının Kalıntı Gerilim İle Olan İlişkisi



Resim 10. S690QT Ve S690MC Malzemeler İle S355 Malzemenin Sıcaklığa Bağlı Özgül Isısındaki Değişim Grafikleri [2]

2.2.4 Isıl İletkenlik

Isıl iletkenlik, malzemenin ısıyı yayma kabiliyetidir.

Isıl iletkenlik malzeme özelliğinin kalıntı gerilmeler üzerindeki etkisi Resim 9'da özetlenmiştir.

2.2.5 Özgül Isı

Özgül ısı, 1kg malzemeyi 1K ısıtmak için gerekli ısı miktarıdır. Sıcaklıkla orantılı olarak değişim göstermektedir.

Yapılan bir deneysel çalışmaya göre, S690MC ve S690QT malzemelerin sıcaklığa bağlı özgül ısılarındaki değişim Resim 10'da sağdaki ilk grafikte gösterilmiştir.

Farklı Metallerin Özgül Isı Kapasiteleri (C) (KJ/kg.K)		
C	Genel Yapı Çelikleri	0,477
	CrNi Çelikleri	0,504
	Bakır	0,385
	Alüminyum	0,92

Resim 11. Bazı Metallerin Özgül Isı Değerleri [5]

Aynı şekilde S355 malzemenin deneysel olarak sıcaklığa bağlı özgül ısı değerinin değişimi sağdaki ikinci grafikte gösterilmiştir.

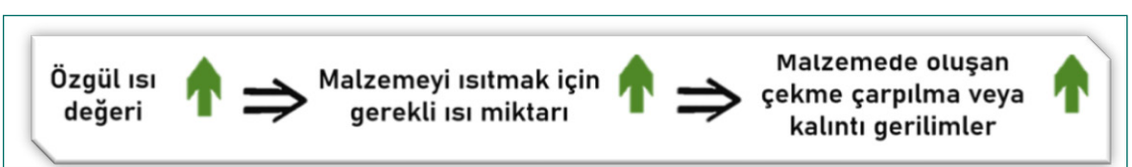
Malzemenin özgül ısı değeri o malzemeyi ısıtmak için gerekli ısı miktarının doğrudan etkilemekte olup doğrusal bir ilişkiye sahiptir. Aynı şekilde özgül ısı değeri ne kadar yüksekse malzemenin çekme çarpılma eğilimi o kadar yüksek olacaktır. Bu iki ilişki aşağıda özetlenmiştir.

2.3 Kalıntı Gerilim ve Çarpılmanın Mekanizması

2.3.1 Serbest Genleşme Serbest Büzülme

Resim 13'te gösterilmiş olan serbest genleşme – serbest büzülmede kalıntı gerilim ve çarpılma mekanizması aşağıdaki gibi olacaktır:

- Serbest halde bulunan malzeme üzerine etkiyen ısıl yükleme, serbest ucun uzamasına neden olacaktır.
- Isı kaynağının ortadan kalkması ile malzeme oda sıcaklığına kadar soğuyarak asıl uzunluğuna yeniden ulaşacaktır.
- Çubukta kalıntı gerilmeye rastlanmayacaktır.



Resim 12. Özgül Isı Değerinin Kalıntı Gerilim İle Olan İlişkisi

$\Delta L = L_0 x \Delta T x \alpha$

ΔL = Malzemedeki boyuna değişim miktarı

L_0 = Malzemenin ilk boyu

ΔT = Malzemedeki ilk ve son sıcaklık arasındaki fark

α = Isıl genleşme katsayısı

2.3.2 Serbest Genleşme Kısıtlanmış Büzülme

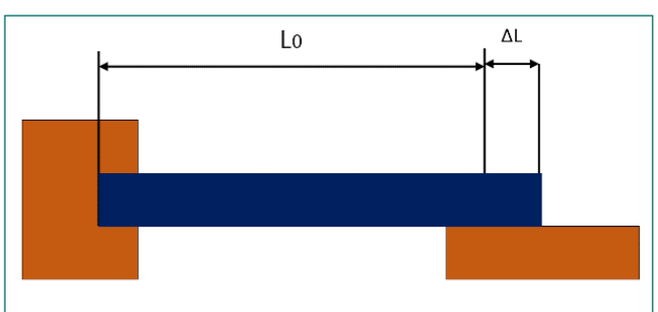
Resim 14'te gösterilmiş olan serbest genleşme – kısıtlanmış büzülmede kalıntı gerilim ve çarpılma mekanizması aşağıdaki gibi olacaktır:

- Serbest halde bulunan malzeme üzerine etkiyen ısıl yükleme, serbest ucun uzamasına neden olacaktır.
- Genleşmiş halde iken çubuğun serbest uç kenetlenir.
- Isı kaynağının ortadan kalkması ile birlikte malzeme oda sıcaklığına soğuyarak asıl uzunluğuna ulaşmaya çalışacaktır. Bu noktada malzeme içinde iç gerilmeler meydana gelir.
- Malzeme sünekse, kenet ile tutulan malzemede kesit alanda daralma meydana gelir ve gerilimler büyük oranda düşer. Kalıntı beklenmektedir.
- Malzemenin gevrek davranış sergilediği durumlarda ise çatlama ya da kırılma meydana gelir. Kalıntı beklenmektedir.

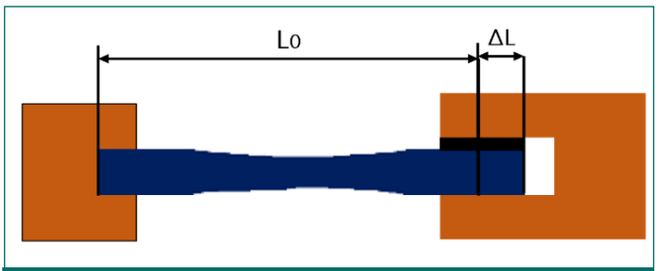
2.3.3 Kısıtlanmış Genleşme Serbest Büzülme

Resim 15'te gösterilmiş olan kısıtlanmış genleşme – serbest büzülmede kalıntı gerilim ve çarpılma mekanizması aşağıdaki gibi olacaktır:

- Isıtılan malzemenin her iki ucunda da uzama yatkınlığı kenetlenerek engellenmiştir.
- Malzemede basma gerilimleri oluşur. Gerilim artışı akma mukavemeti sınırına kadar devam eder.



Resim 13. Serbest Genleşme-Serbest Büzülme [5]



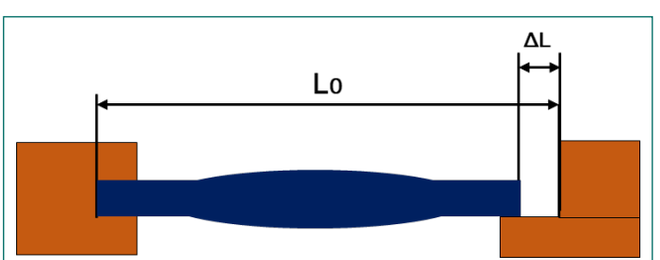
Resim 14. Serbest Genleşme-Kısıtlanmış Büzülme [5]

- Isıtılan malzemenin aynı esnada akma mukavemeti de düşmüştür.
- Malzemede yığılma şeklinde gözlenebilen plastik deformasyon meydana gelmiştir.
- Basma gerilimleri azalmıştır.
- Isı kaynağının ortadan kalkması ile birlikte malzeme oda sıcaklığına soğumaya başlamıştır.
- Malzeme boyunda kısalma olmuştur. Yığılma halen gözlenebilmektedir, ancak iç gerilimler ortadan kalkmıştır.

2.3.4 Kısıtlanmış Genleşme Kısıtlanmış Büzülme

Resim 16'da gösterilmiş olan kısıtlanmış genleşme – kısıtlanmış büzülmede kalıntı gerilim ve çarpılma mekanizması aşağıdaki gibi olacaktır:

- Isıtılan malzemenin her iki ucunda da uzama yatkınlığı kenetlenerek engellenmiştir.
- Malzemede sıkıştırma gerilimleri oluşur. Gerilim artışı akma mukavemeti sınırına kadar devam eder.
- Isıtılan malzemenin aynı esnada akma mukavemeti de düşmüştür.
- Gerilimlerin akma mukavemetini aştığı andan itibaren malzemede yığılma şeklinde gözlenebilen plastik deformasyon meydana gelmeye başlamıştır.
- Sıkıştırma gerilimleri azalmıştır.



Resim 15. Kısıtlanmış Uzama-Serbest Büzülme [5]

- Isı kaynağının ortadan kalkması ile birlikte malzeme oda sıcaklığına soğumaya başlamıştır. Malzeme kenetlendiği için asıl uzunluğuna dönemeyecek ve kalıntı gerilimler oluşacaktır.
- Sünek malzemelerde kesit daralması gerçekleşecek kalıntı gerilimlerin bir kısmı bu şekilde kompanse edilebilirken, gevrek malzemelerde bu durum çatlama/kırılma şeklinde sonuçlanabilir.

3. KAYNAKTA KALINTI GERİLİMLER

3.1 İç Yapı Değişimleri Kaynaklı Kalıntı Gerilimler

Kaynak işleminde soğumaya bağlı malzemenin içyapısında 2 önemli sertleşme gerçekleşir. Bu iki sertleşme içyapıda gerilimlere neden olur.

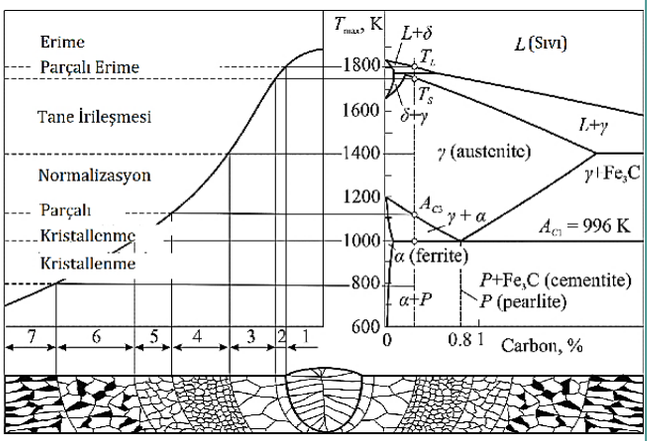
Birinci gerçekleşen sertleşme; 1100 °C'nin altına soğuma gerçekleştiğinde birlikte görülen çökelme ve karbon sertleşmesidir.

İkinci olarak görülen sertleşme ise ani soğumaya bağlı karbon sertleşmesidir. Bu sertleşme durumu 723°C sınırından aşağıya doğru sıcaklığın ani düşüşüyle gerçekleşir.

3.2 Dış Yüklemeler Kaynaklı Kalıntı Gerilimler

Dış yüklemeler kaynaklı kalıntı gerilimler, kaynak havuzundan birleşme çizgisi yönündeki ve/veya kaynak doğrultusundaki bitişik malzeme kütlesinin kısıtlaması ile ortaya çıkan gerilimlerdir.

- Kaynak, homojen olmayan anlık ısınma ve soğuma süreçlerinin birbirini takip ettiği bir işlemdir.

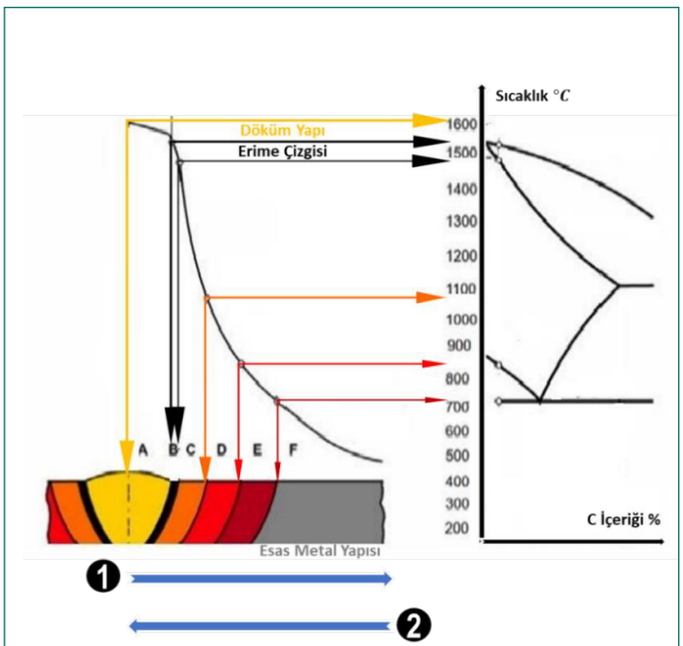


Resim 17. Demir Karbon Diyagramı İle İlişkilendirilmiş Kaynak Metalinin İçyapısı [1]

- Isınan malzeme her yönde genleşme eğilimi göstermektedir.
- Genleşme bitişiğinde yer alan görece daha soğuk malzeme kütlesi tarafından engellenir ve basma gerilimleri ortaya çıkar.
- 1 yönündeki sıcaklık düşüşü grafikte görülmektedir.

  TF < TE < TD < TC < TB < TA

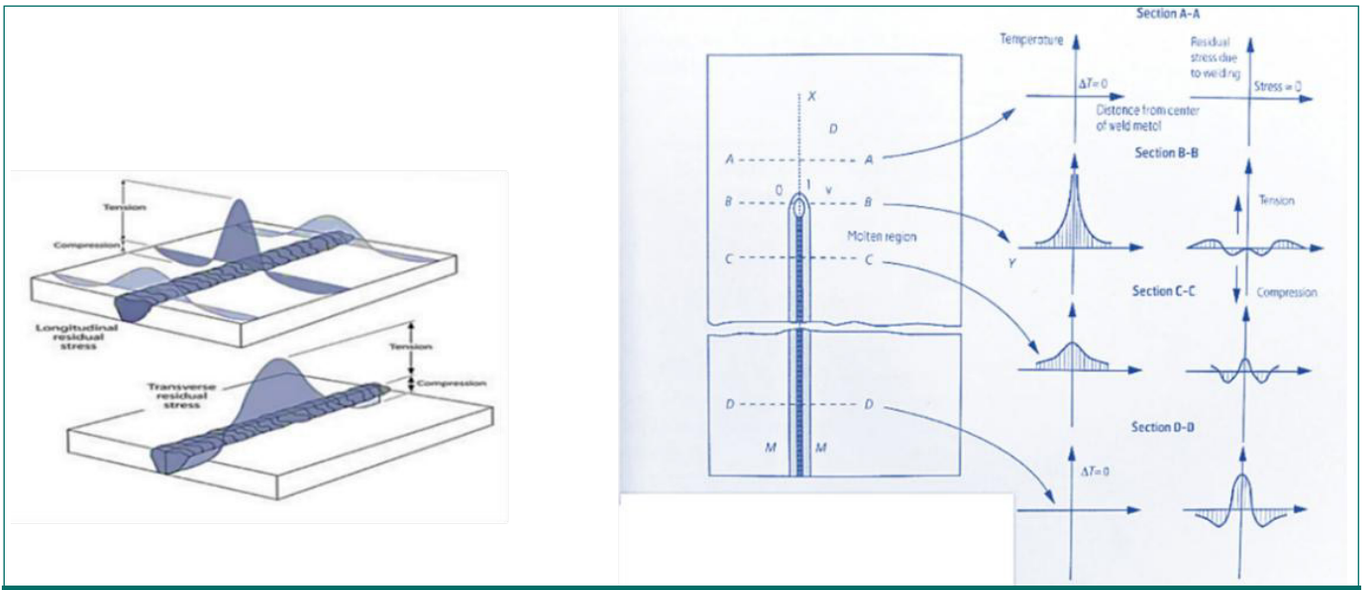
- Sıcaklığın arttığı Resim 18'deki 2 yönünde akma mukavemeti oldukça düşer ve bu nedenle yığılma şeklinde deformasyonlar görülür.
- Benzer şekilde soğuma esnasında büzülme de bitişik-



Resim 18. Dış Yüklemeler (Termal Yüklemeler-Kaynak-) Kaynaklı Kalıntı Gerilmelerin [3]

teki sıcaklık değişimi daha düşük olan malzeme tarafından engellenir.

- Sıcaklığın yüksek olduğu durumlarda büzülme gerilimleri yine plastik deformasyonlar ile telafi edilirken, soğumanın devam etmesi ile akma mukavemeti yeniden artar ve plastik deformasyon mümkün olmaz.
- Resim 18'deki 1 yönünde ilerledikçe şekil değiştirme (deformasyon) kabiliyeti kötüleşir.
- Bu esnada büzülme sırasında oluşan gerilimler kalıntı olarak bünyede kalır.



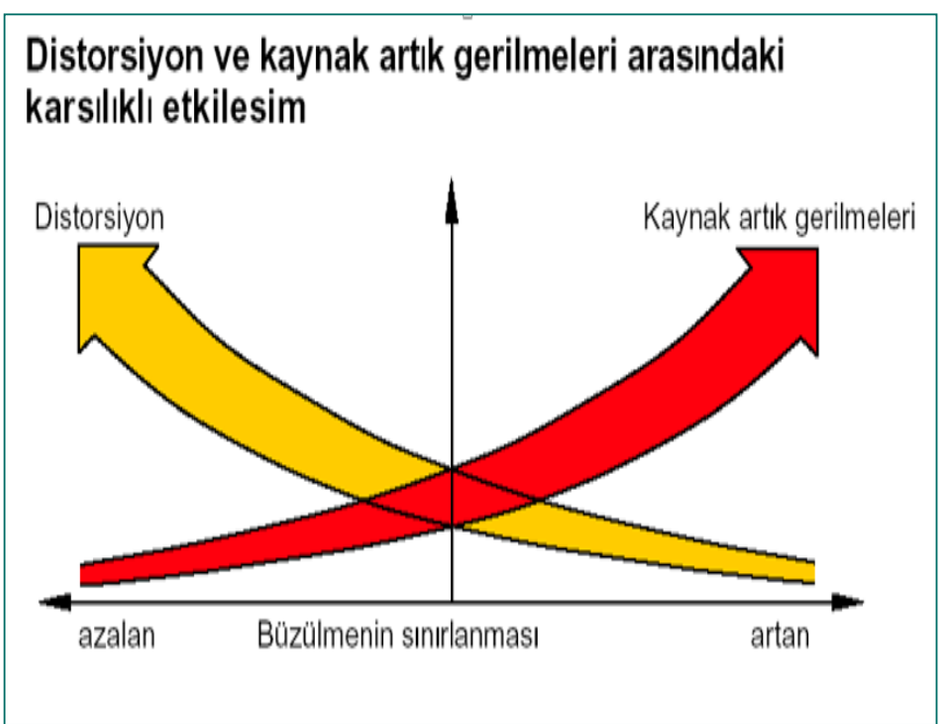
Resim 19. Alın Kaynağında Kalıntı Gerilimlerin Dağılımı [3]

- Malzemenin gevrekliğine bağlı olarak gerilim çatlakları ve/veya kırılma gibi sonuçlar ortaya çıkabilir.
- Kaynak havuzundan birleşme çizgisi yönündeki ve/veya kaynak doğrultusundaki bitişik malzeme kütlesinin kısıtlaması ile ortaya çıkan gerilimlerdir.

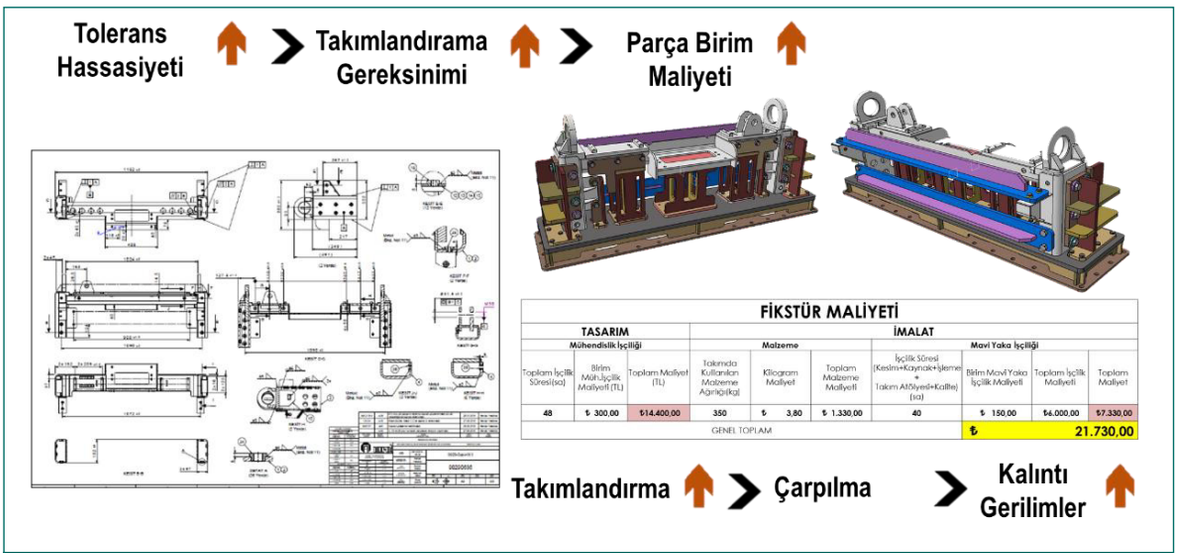
4. ÇIKARIMLAR

Kaynakta kalıntı gerilimler ile çarpılma arasındaki ilişki Resim 20'gösterilmiştir.

Kalıntı gerilme ve çarpılma üzerinde takımlandırmanın ciddi etkisi vardır.



Resim 20. Kalıntı Gerilim ve Çekme Çarpılma Arasındaki Ters Orantılı İlişki [3]



Resim 21. Tolerans Hassasiyetinin Takımlandırma ve Takımlandırmanın Çekme Çarpılma Üzerindeki Etkisi [6]

Resim 22. Kalıntı Gerilimlerin Dinamik Yüklemeler Altında Malzeme Üzerinde Oluşturduğu Etkilerin İlişkisi [4]

Kalıntı gerilmeler malzemenin dinamik yüklemelere maruz kaldığı durumlarda göstereceği reaksiyonlar üzerinde ciddi olumsuz etkiler oluşturmaktadır. Bu etkilerin orantısal ilişkisi Resim 22 kısaca özetlenmiştir.

KAYNAKÇA

1. Totten G., Howes M., Inove T. 2002. "Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel"
2. **Masubuchi K., Papazoglou V.J.** 1980. "Study of Residual Stresses and Distortion in Structural Weldments in High-Strength Steels"
3. **Stemne D., Narström T., Hrnjez B.** 2009. "SSAB-Welding Handbook. A Guide To Better Welding of Hardox and Weldox"
4. **Withers P.J.** 2017 "Residual Stress and its Role in Failure," School of Materials, University of Manchester, Grosvenor St. Manchester. P. 2211-2264
5. **Akçam Ö.** GSI-SLV TR Bilgi Merkezi "Kaynak Mühendisliği Eğitim Ders Notları"
6. Nurol Makina San. A.Ş' deki bilgi birikimi ve tecrübeler.