

ÇELİKLERE UYGULANAN TRİP İŞLEMİ İLE MEKANİK ÖZELLİKLERİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Alpay ÖZER*

Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06570, Maltepe,
Ankara

Özet

TRİP işlemi belirli kimyasal kompozisyona sahip çeliklere uygulanabilen termo-mekaniksel bir işlemdir. TRİP işleminin uygulandığı çelikler TRİP çelikleri olarak adlandırılır. TRİP çelikleri ile ilgili uluslararası literatürde bilimsel yayınlar bulunmasına karşın, ülkemizde bu konu ile ilgili çalışmalara rastlanılmamıştır. Bu nedenle, yapılan bu literatür taramasının amacı TRİP çeliklerini tanıtmak ve sağladığı avantajları belirtmektir. Mühendislik malzemeleri ile ilgili yaşanan olumsuzluklardan biri de artan dayanımla birlikte şekillendirilebilirliğin azalmasıdır. Oysa mühendislik malzemelerinden yüksek dayanım ve süneklik kombinasyonu istenir. Bu optimum mekanik özellikler TRİP çelikleriyle karşılanmaktadır. Uygun kimyasal bileşime sahip çeliğe uygulanan TRİP işlemi ile 800-1000 MPa aralığında yüksek dayanım ve % 30'a varan uzamalar elde edilebilmektedir. TRİP etkisi nedeniyle yüksek dayanıma ve süneklığe sahip çelikler boru hatlarından otomotiv endüstrisine kadar çok geniş bir alanda kullanılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: TRİP çelikleri, martensitik dönüşüm, mekanik özellikler

IMPROVEMENT OF MECHANICAL PROPERTIES OF STEELS WITH TRIP PROCESS

Abstract

TRIP process is a thermo-mechanical process which is appropriate for steels which have specific chemical composition. Steels which are suitable for TRIP process are known as TRIP steels. Although there are studies about TRIP steels in international literature, this topic have not been researched in our country yet. The aim of this literature review is to introduce the TRIP steels and show their advantages. One of the difficulties concerning the engineering materials the ductility decreases with increasing strength. As is well known in engineering materials both high strength and ductility is required. These requirements are TRIP steels having good combination of strength-ductility. Steels with appropriate chemical composition and applied TRIP process has 800-1000 MPa strength and up to 30% elongation. Due to TRIP effect these steels have wide speared uses in pipelines and automobile industry.

Key Words: TRIP steels, martensite transformation, mechanical properties

* E-posta: aozer@gazi.edu.tr

1. Giriş

Yüksek mukavemetli çelik malzemelerle yapılan üretimlerde karşılaşılan zorluklardan biriside bu malzemelerin şekillendirilebilirliğidir. Genelde mühendislik malzemelerinde yüksek dayanım ve süneklik kombinasyonu en çok aranan özelliklerdir. Fakat, günümüzde teorik ve ampirik yaklaşımların büyük bir bölümü bize dayanım ve sünekliğin birbirleriyle ters bağımlı olduğunu göstermektedir. Özellikle 1300 MPa ve üzerinde yüksek dayanıma sahip çelik malzemelerde sünekliğin sınırlı ve dolayısıyla şekillendirilebilirliğin zayıf olması genel bir problemdir [1-5]. Buradaki zorluk, süneklikten taviz vermeden mukavemetin artırılmasıdır. Fırında sertleşebilen çelikler, çift fazlı çelikler ve TRİP çelikleri mukavemet-uzama çelişmesini kıran öncü çelik türlerindedir [6,7].

Malzeme bilimciler mevcut ve yeni teknolojik uygulamalar ile optimum mekanik özellikleri elde edebilmek amacıyla malzemelerin geliştirilmesi ve tasarlanması ile ilgili oldukça yoğun araştırmalar yapmaktadırlar. Optimum mekanik özelliklere sahip malzeme ihtiyacını, teoride ve pratikte yüksek dayanım ve iyi süneklik ilişkisine sahip TRİP çelikleri karşılamıştır. TRİP çelikleri, uygun kimyasal kompozisyona sahip çeliklere, termo-mekaniksel bir işlem olan TRİP işleminin uygulanması ile elde edilen çeliklerdir. TRİP etkisini ilk olarak bulan Zackay ve arkadaşları olmuştur [8-18]. TRİP etkisinin bulunmasıyla yüksek dayanım ve sünekliğe sahip çelikler, boru hatlarından otomotiv sanayine kadar geniş üretim alanlarında ve ayrıca son yıllarda depreme dayanıklı çelik olarak da inşaat sektöründe kullanılmaya başlanmıştır [9,19].

TRİP çeliklerinin elde edilmesinde de, diğer malzemelerde olduğu gibi işlem-yapı-özellik arasında oldukça yakın bir ilişki vardır. Uygulanan termo-mekaniksel işlemler sonucunda yapıdaki östenit fazı, deformasyonun etkisiyle martensit fazına dönüşür ve bu da mekanik özelliklerin (dayanım ve süneklik) artmasına neden olur.

2. TRİP Çelikleri

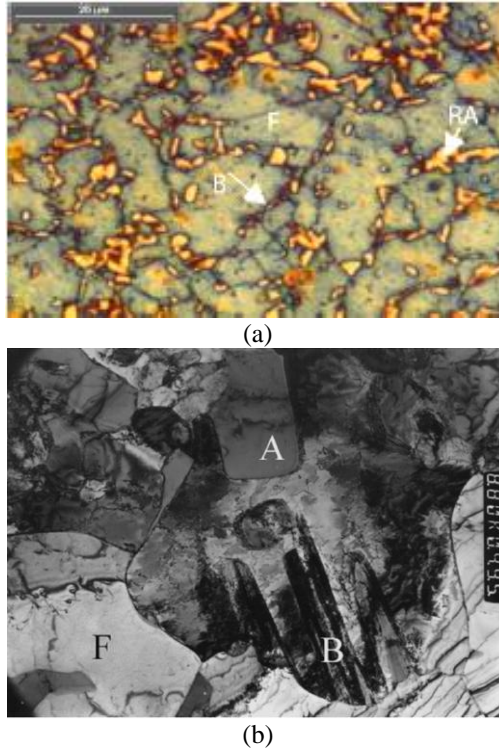
Çelikler üzerine yapılan çalışmalarda, karbon ve karbür yapıcı alaşım elementleri içeren östenit fazının oda sıcaklığının üzerinde fakat yeniden kristalleşme sıcaklığının altında yapısal değişime uğrayabildikleri belirlenmiştir. Yüksek dayanımlı öşkekillendirilmiş çeliklerde, deformasyonla ve sonrasında martensite dönüşümüyle sert alaşım karbürlerin ince dağılımı ve yüksek dislokasyon yoğunluğu sağlanmıştır. Alaşım karbürlerinin bu işlemlerle hızlı bir şekilde oluşması sonucunda, östenitte karbonca bir azalma meydana gelmiştir. Bu da M_s (martensit başlangıç) ve M_f (martensit bitiş) sıcaklıklarının bölgesel yükselmesine neden olmuştur [20-22]. Bu işlemler sırasında temel kural, dizayn edilen yarı kararlı östenitin deformasyon işlemi öncesi oda sıcaklığı altında olan M_s ve M_f sıcaklıklarını oda sıcaklığının üzerine çıkartmaktır. Böyle bir çelik, ideal termo-mekaniksel işlemlerden sonra tamamıyla östenitik yapıda olabilir ve öşkekillendirme işlemi ile arzu edilen yüksek dislokasyon yoğunluğu, alaşım karbürlerin ince dağılımı gibi yapısal özelliklerin bazısına sahip olabilir. Oluşturulan martensit ile dayanım ve sünekliğin yükselmesi sağlanır. Eşsiz karakteristik özellikler olan yüksek dayanım ve süneklik, deformasyon ile gerçekleşen yapısal dönüşüm ile elde edilir. Araştırmacılar bu gibi karakteristik özellikler gösteren alaşımlara TRİP çelikleri adını vermiştir. TRİP kısaltması “*transformation induced plasticity*” kelimelerinin ilk harflerinden oluşmaktadır [1,20-24].

Otomotiv endüstrisindeki uygulamalar için aranan yüksek dayanım-uzama kombinasyonu sağlayan (800-1000 MPa aralığında yüksek dayanım-%30 dan fazla uzama) TRİP çelikleri son 10-15 yıldır araştırmacıların büyük ilgisini çekmektedir. TRİP çelikleri temelde farklı bir yüksek dayanım çelik türü olup tipik kimyasal kompozisyonları % ağırlıkça Fe, 0.2C, 1.7Mn, 1.5Si’ dir [25-33].

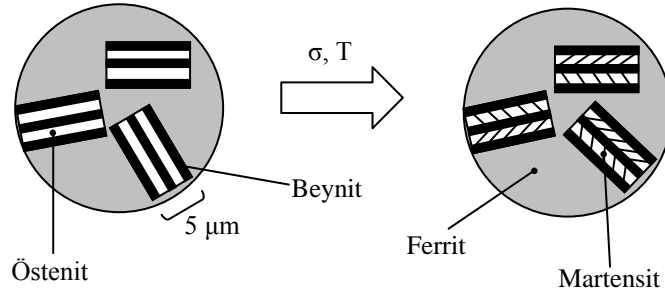
Artan dayanım ve süneklik mekanik yükleme altında martensit fazının oluşumu ile elde edilir. TRİP çeliklerinin mikroyapısını ferrit, beynit ve kalıntı östenit oluşturmaktadır (Şekil 1) [23,30,34-39]. Şekil 2’de şematik olarak gösterildiği gibi uygun termo-mekaniksel işlemlerle yapıdaki kalıntı östenit, sıcaklık ve deformasyonun etkisiyle, martensite dönüşür [34].

Tipik bir TRİP çeliğinin oda sıcaklığında mikroyapısı %55-60 ferrit, %25-40 beynit ve %5-15 yarı kararlı kalıntı östenitten oluşur. TRİP çeliklerinin mekanik özellikleri mikroyapıda bulunan düşük miktardaki kalıntı östenit tarafından kontrol edilir [40-41]. Plastik gerinim altında yarı kararlı östenitin martensite dönüşmesinden dolayı TRİP çelikleri, yüksek dayanım ve sünekliğe sahiptir [23,41-43]. Bu özellikler TRİP çeliklerine olan ilginin artmasının en önemli sebebidir. TRİP çeliklerinde deformasyon sırasında kalıntı östenitin martensite dönüşümü pekleşme katsayısında artışa neden olur. Bu tür çeliklerde kalıntı östenit hacim oranı arttıkça dayanım katsayısının arttığı gözlemlenmiştir [44]. Bu nedenle geçmiş yıllarda yapılan araştırmaların çoğunluğunda mekanik özellikler kalıntı östenit hacim oranıyla ilişkilendirilmeye çalışılmıştır. Uygun termo-mekaniksel işlemler sonucunda boyun verme ve

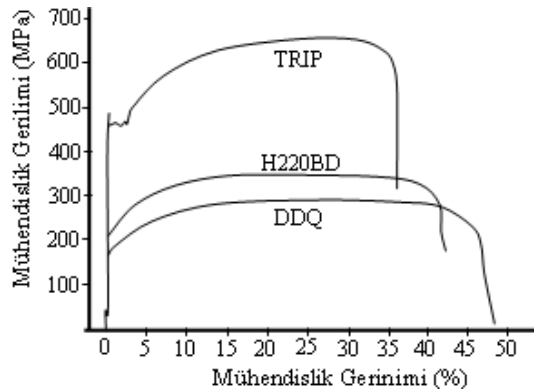
çatlak oluşumundaki gecikme, yüksek akma ve çekme dayanımı ile birlikte yüksek ve üniform bir toplam uzamaya neden olmaktadır (Şekil 3) [45].



Şekil 1. (a) 600 serisi TRİP çeliğine ait optik mikroskop fotoğrafı F: ferrit, B: beynit, RA: kalıntı östenit [39], (b) düşük alaşımlı TRİP çeliğine ait TEM fotoğrafı F: ferrit, B: beynit, A: kalıntı östenit [38]



Şekil 2. TRİP etkisinin mekanizması [34]



Şekil 3. TRİP 600, H220BD ve DDQ çeliklerine ait gerilim gerinim eğrileri [45]

TRİP çelikleri gerinim hızına duyarlı bir malzemedir. Bazı araştırmacılar gerinim hızının TRİP çelikleri üzerine olan etkisini incelemiştir. Kenji Saito ve arkadaşları [46] düşük karbonlu TRİP çeliklerinde gerinim hızının ve

sıcaklığın etkisini incelemişler, artan gerinim hızının ve sıcaklığın martensitik dönüşümü sınırlandırdığını belirlemişlerdir. Choi ve arkadaşları [47] kalıntı östenit hacim oranının ve gerinim hızının çekme özellikleri üzerine etkilerini incelemiştir. Kalıntı östenit hacim oranı arttıkça çekme dayanımı, toplam uzama ve absorbe edilen enerji miktarı artarken, akma dayanımının azaldığını belirlemişlerdir. Vuoristo ve arkadaşları [48] yüksek gerinim hızında çift fazlı çelik ile TRİP çeliğinin davranışlarını karşılaştırmışlardır. Deney sonuçları TRİP çeliklerinin enerji absorpsiyon kapasitelerinin çift fazlı çeliklerden daha yüksek olduğunu göstermiştir.

2.1. Termo-mekanik işlemler

TRİP çeliklerinde mekanik özelliklerin malzemenin kimyasal bileşimine güçlü bir şekilde bağlı olduğu bilinen bir gerçektir. Fakat yapıda görülen fazlar ve hacim oranları da, örneğin kalıntı östenitin morfolojisi, tane boyutu ve karbon içeriği, mekanik özellikler üzerinde oldukça etkilidir. Ayrıca yapıda bulunan bu fazlar, deformasyon sırasında TRİP çeliğinin davranışını da belirlemektedir [49].

TRİP işlemi, malzemeye uygulanan deformasyon sonucu, östenitin martensite dönüşümü sırasında deformasyon sertleşme katsayısının artmasıyla, homojen deformasyon bölgesinin genişletilmesidir. Çeliklerde östenit mukavemetle birlikte özellikle süneklik sağlar. Karbonun % 0.3'e kadar yükseltilmesi TRİP işleminde mukavemet artışına neden olur. TRİP çeliğini üretmek için iki yöntem vardır:

- Çeliğin kimyasal kompozisyonu, yapının oda sıcaklığında tamamen östenit olarak kalmasını sağlayacak biçimde ayarlanır. Bu durumda M_F sıcaklığı oda sıcaklığının üzerindedir. Östenit fazını içeren çelik daha sonra M_F sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıkta termo-mekanik bir işlem görür. Bunun için çeliğe 250-550 °C sıcaklıkları arasında % 80 deformasyon uygulanır. Östenitik yapıdaki malzemeye uygulanan yüksek miktardaki deformasyon sonucu M_S ve M_F sıcaklıklarında artış olur. Dönüşümü hızlandıran bu artışlara rağmen oda sıcaklığına kadar soğutulan yapıda östenit kararlı olarak kalır. Oda sıcaklığındaki çeliğe uygulanan ikinci bir deformasyonla östenitin büyük bir miktarının martensite dönüşümü sağlanır. Oluşan martensit yüksek mukavemet ve süneklik özellikleri gösterir. İşlem sonucu istenilen düzeyde mukavemet artışı elde edebilmek için çeliğin karbon miktarı % 0.3 olarak sınırlandırılmaktadır.
- Bileşiminde % 0.3 civarında karbon ve karbür oluşturu elementler bulunan çeliğin kimyasal kompozisyonu, M_S ve M_F sıcaklıkları oda sıcaklığının altında kalacak biçimde ayarlanır. Östenitleme sonrası çeliğe 250-550 °C arasında deformasyon uygulanır. Bu termo-mekanik işlem hem östenitin deformasyonunu, hem de karbür oluşumunu sağlar. Bu da M_S ve M_F sıcaklıklarını yükseltir. Daha sonra oda sıcaklığında uygulanan ikinci bir deformasyon ile östenitin martensite dönüşümü sağlanır. Oluşan yapı yüksek mukavemetli ve sünektir [6].

TRİP çeliklerinin elde edilmesinde ilk işlem istenilen kompozisyondaki çeliğin M_F sıcaklığını oda sıcaklığının üzerine çıkarmaktır. Daha sonra çelik M_F sıcaklığının üstünde, 250- 550 °C arasında, % 80 deforme edilir ve oda sıcaklığında kararlı östenitik yapı oluşturulur. Deney sırasında gerçekleşen martensitik dönüşünden dolayı oda sıcaklığında yüksek dayanım ve süneklik elde edilir [50].

2.2. Deney parametrelerinin etkileri

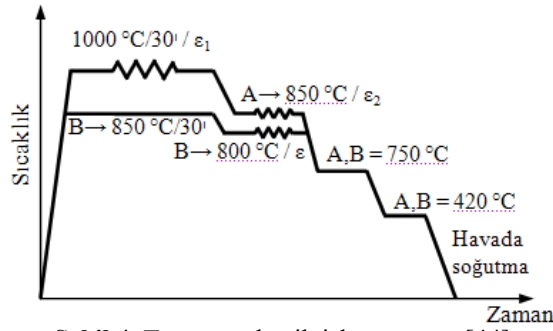
J. Zrník ve arkadaşları [44] yapmış oldukları deneylerde % ağırlıkça Fe, %0.18 C, %1.45 Mn, %1.9 Si, %0.02 P, %0.002 S, %0.04 Cu, %0.003 Nb, %0.02 Al kimyasal bileşimine sahip düşük alaşımlı Si-Mn TRİP çeliğinden hazırladıkları numunelere iki farklı termo-mekanik işlem uygulamışlardır (Şekil 4);

2.2.1. TM_A işlemi:

- 1)1000 °C sıcaklığa ısıtma ve 1800 s bekleme → 2) $\epsilon_1 = %50$ ilk deformasyon → 3) 850 °C sıcaklığa havada soğutma → 4) 90° çevrilerek $\epsilon_2 = %64$ ikinci deformasyon → 5) $T_{\gamma \rightarrow \alpha} = 750$ °C' de 300 s bekleme → 6) Suda soğutma → 7) 420 °C' de 600 s bekleme → 8) Havada soğutma

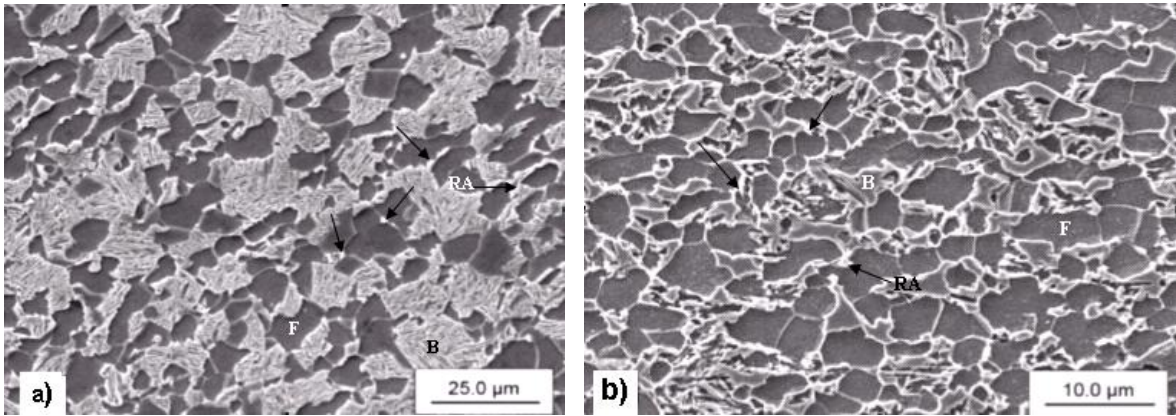
2.2.2. TM_B işlemi:

- 1)850 °C sıcaklığa ısıtma ve 1800 s bekleme → 2) 800 °C sıcaklığa havada soğutma → 3) $\epsilon = %70$ deformasyon → 4) $T_{\gamma \rightarrow \alpha} = 750$ °C' de 300 s bekleme → 5) Suda soğutma → 6) 420 °C' de 600 s bekleme → 7) Havada soğutma

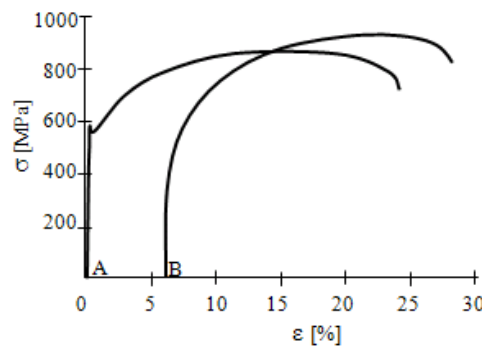


Şekil 4. Thermo-mekanik işlem şeması [44]

Uygulanan thermo-mekanik işlemlere ait sıcaklık-zaman ilişkisine bağlı olarak farklı mikro yapılar meydana gelmiştir. Deformasyon şartlarının değişmesi ile farklı hacim oranı, dağılım, boyut ve morfolojide ferrit ve beyritten oluşan kompleks yapılar sahip numuneler elde edilmiştir. TM_A şemasına göre uygulanan her iki deformasyon işlemi yeniden kristalleşmenin kendi kendine gerçekleştiği sıcaklık bölgesinde ($850\text{ }^\circ\text{C}$ ' nin üzerinde) olup Şekil 5.a da görüldüğü gibi, yapı kaba tanelerden ve küçük adacıklar şeklindeki kalıntı östenitten oluşmaktadır. Optimum östenit tane boyutu çözündürme sıcaklığından $800\text{ }^\circ\text{C}$ ' ye soğutma ve bu sıcaklıkta numuneye uygulanan sadece bir deformasyon ile elde edilebilmiştir (Şekil 5.b).



Şekil 5. Çok fazlı yapı SEM fotoğrafları a) TM_A , b) TM_B [44]



Şekil 6. Farklı thermo-mekanik işlemlerle üretilen TRİP çeliklerinin gerilim-gerinim eğrileri [44]

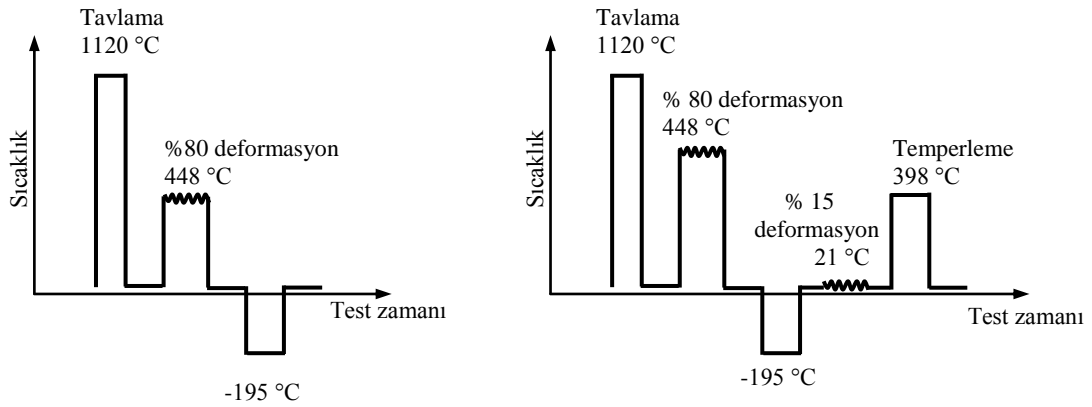
Şekil 6 da TM_A - TM_B proseler uygulanmış olan TRİP çeliği numunelerine ait gerilim-gerinim eğrileri görülmektedir. Verilerden süneklikteki artışla beraber yüksek bir dayanım ve yüksek bir akma gerilmesinin elde edildiği görülmektedir.

Zackay ve arkadaşları [1] ise yapmış oldukları çalışmalarda Çizelge 1' de kimyasal kompozisyonu verilen bir seri TRİP çeliğine farklı sıcaklıklarda değişik deformasyonlar uygulayarak, uygulanan deformasyonun malzemenin mekanik özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. Değişmeyen deformasyon sıcaklığında uygulanan deformasyon miktarındaki artışın etkisi 1-6 numaralı testler ile Çizelge 2'de gösterilmiş olup, artan deformasyon oranıyla birlikte

akma dayanımında artış gözlenmiştir. Fakat oda sıcaklığında gerçekleşen deformasyon miktarıyla süneklik arasında karmaşık bir ilişki ortaya çıkmıştır.

Çizelge 1. Çeliklerin kimyasal kompozisyonları [1]

Adlandırma	Kimyasal Kompozisyon (%)					
	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	C
A-1	8.89	8.31	3.80	2.02	1.92	0.31
A-2	8.88	7.60	4.04	2.08	1.96	0.25
A-3	8.80	7.80	4.00	0.92	1.90	0.25
B	....	24.40	4.10	....	....	0.25
C	....	22.0	4.00	1.48	....	0.23
D	....	20.97	3.57	1.48	....	0.24



Şekil 7. Alaşım A1 test 8 ve test 23 için şematik işlem [1]

Çizelge 2. Testten önce magnetik olmayan çeliklerin işlem verileri ve çekme özellikleri[1]

Test No	Alaşım No	Deformasyon *		Deformasyon sonrası soğutma sıcaklığı °C	Temperleme °C	Dak.	Akma Dayanımı, Çekme Dayanımı, Uzama		
		%	°C				MPa	MPa	%
1	A1	...	...	....	...	....	365	551	35
2	A2	10	448	-195	...	...	710	1192	58
3	A2	15	448	-195	...	...	758	1179	56
4	A2	20	448	-195	...	...	841	1158	81
5	A2	25	448	-195	...	...	972	1137	48
6	A2	30	448	-195	...	...	1020	1137	42
7	A1	80	398	-195	...	...	1489	1647	26
8	A1	80	448	-195	...	...	1530	1751	41
9	A1	80	448	-195	...	...	1544	1771	36
10	A2	80	448	-195	...	...	1365	1668	35
11	B	80	498	0	498	30	1103	1179	49
12	B	80	498	-195	...	...	1130	1219	41
13	B	80	498	-195	...	...	1100	1219	40
14	B	80	498	-195	...	...	1151	1219	41
15	A3	83	498	21	...	...	1434	1944	27
16	A3	83	498	-195	...	...	1406	1937	30
17	A3	83	498	-195	448	30	1482	2006	27
18	A3	83	498	21	...	...	1234	1985	25
19	A3	83	598	-195	...	...	1282	1999	25
20	A3	83	598	-195	448	30	1275	2040	26

Bütün alaşımlar 1120 °C de 1 saat östenitleme işleminden sonra oda sıcaklığına soğutulmuşlardır

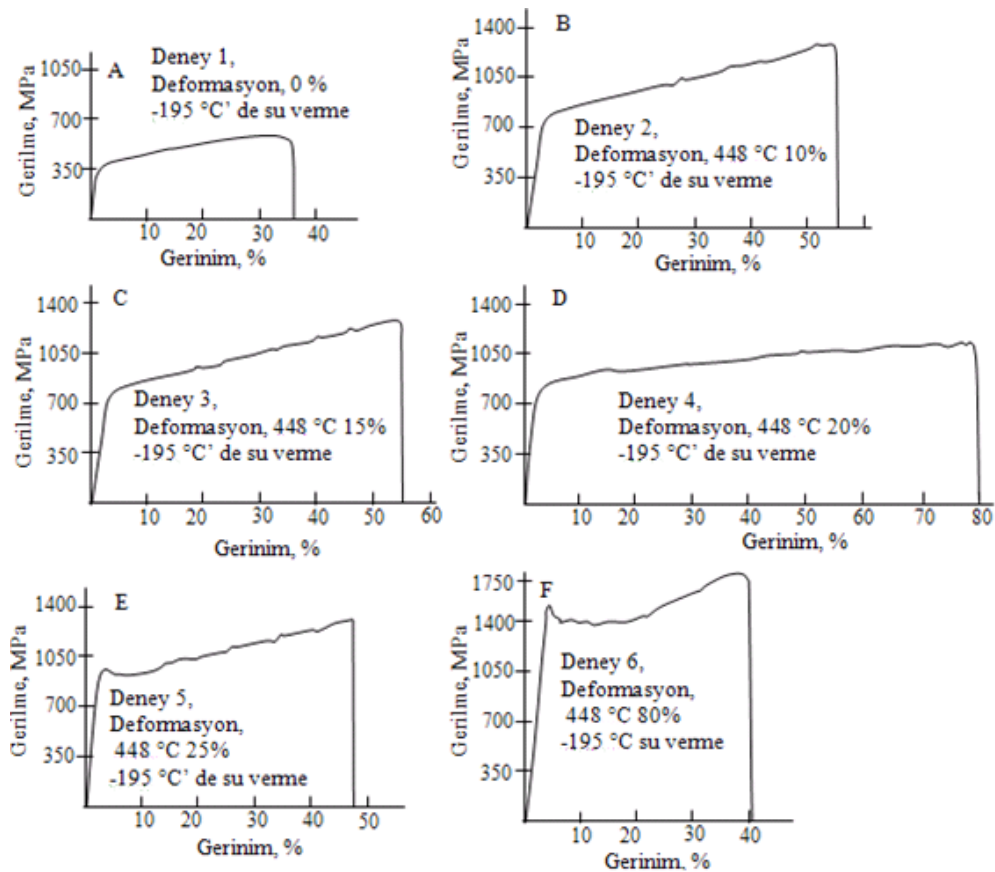
*Deformasyon tipi haddelemedir.

Çizelge 3. Testten önce magnetik olan çeliklerin işlem verileri ve çekme özellikleri [1]

Test No	Alaşım No	İlk Deformasyon %	İlk Deformasyon °C	Deformasyon sonrası soğutma °C	İlk Temper °C	Son Temper Dak	Son Deformasyon* %	Son Deformasyon* °C	Son Temper °C	Son Temper Dak.	Akma Dayanımı, MPa	Çekme Dayanımı, MPa	Uzama %
21	A1	80	448	-195	...	...	15	26	248	30	1882	1882	26
22	A1	80	448	-195	...	...	15	21	348	30	1999	1999	24
23	A1	80	448	-195	...	...	15	21	398	30	2020	2020	26
24	A1	80	448	-195	398	30	15	21	298	30	1958	1958	26
25	A2	76	448	-195	...	...	4	-195	248	60	1978	2054	22
26	A2	76	448	-195	...	...	4	-195	348	60	2123	2130	21
27	A2	76	448	-195	...	...	4	-195	448	60	2089	2227	22
28	A2	14	248	-195	...	...	...	...	...	...	710	972	36
29	A2	15	248	...	448	30	...	...	...	...	765	1261	73
30	A2	27	248	...	...	...	...	...	...	...	837	1061	38
31	A2	27	248	...	248	30	...	...	...	30	806	1123	45
32	A2	27	248	...	448	30	...	...	...	...	837	1289	75
33	A2	60	248	-195	...	...	10	-195	...	...	1785	2116	19
34	C	80	498	-70	498	10	...	...	498	30	972	1006	46
35	B	80	498	...	498	10	..	...	498	10	1082	1165	48
36	D	80	498	-195	498	30	...	...	498	30	1075	1144	30
37	B	80	21	...	...	...	...	...	448	30	2068	2068	27

Bütün alaşımlar 1120 °C de 1 saat östenitleme işleminden sonra oda sıcaklığına soğutulmuşlardır

* Deformasyon tipi haddelemedir.



Şekil 8. 448 °C' de farklı deformasyon miktarlarında oluşan mühendislik gerilim-gerinim eğrileri [1]

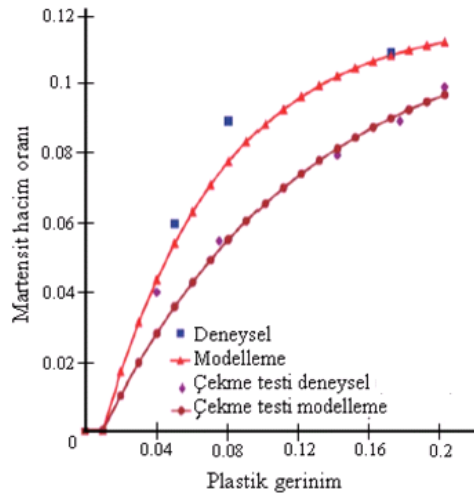
A2 alaşımına uygulanan % 10 veya daha fazla deformasyon işlemi ile alaşımın gerilim-gerinim eğrisinde girinti çıkıntılarının arttığı görülmüştür (Şekil 8). % 20'den daha fazla yapılan deformasyon neticesinde akma noktası belirginleşmektedir. % 80 deformasyondan sonra akma noktası oldukça belirginleşir ve kayma bantları oluşmaya

başlar. Kayma bantlarındaki aşırı artış gerilim-gerinim eğrisini dikleştirilmekte ve eğri üzerindeki girinti çıkıntıları arttırmaktadır.

Çizelge 4. Dönüşüm kontrollü çeliklere uygulanan ısı işlemleri ve elde edilen mekanik özellikler [50]

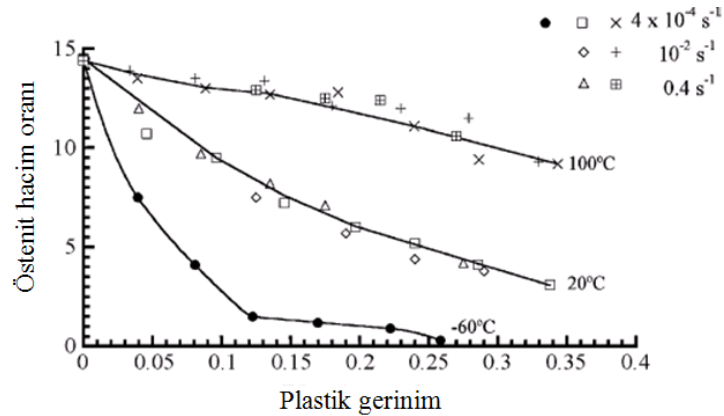
Kimyasal Bileşim	Isıl işlem	%0.2 proof akma gerilmesi (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Uzama %
0.1C, 17Cr, 4Ni, 3Mn	(1) 925 °C' de çözündürme işlemi, % 40 soğuk deformasyon, 450 °C' de 3 saat temperleme	1670	1700	3.5
	(2) 950 °C' de çözündürme işlemi, -78 °C' ye soğutma, 400 °C' de 1 saat temperleme	1200	1440	19
0.06C, 16.5Cr, 5Ni, 2Mn, 1.5Mo, 2Co, 1Al	(1) 1050 °C' de çözündürme işlemi, 700 °C' de 2 saat yaşlandırma, oda sıcaklığına soğutma, 450 °C' de 4 saat temperleme	1270	1430	3
	(2) 950 °C' de çözündürme işlemi, -78 °C' ye soğutma, 450 °C' de 4 saat temperleme	1240	1520	21
0.07C, 17.5Cr, 3Ni, 2Mn, 2Mo, 2Co, 1Cu	(1) 1050 °C' de çözündürme işlemi, 700 °C' de 2 saat yaşlandırma, oda sıcaklığına soğutma, 450 °C' de 4 saat temperleme	1110	1250	10
0.07C, 17.5Cr, 3Ni, 2Mn, 2Mo, 2Co, 1Cu	(2) 950 °C' de çözündürme işlemi, -78 °C' ye soğutma, 450 °C' de 4 saat temperleme	1240	1380	20

Aynı kimyasal kompozisyona sahip çeliğe uygulanan TRİP işleminin dayanım ve sünekliğe olan etkisi Çizelge 4' de verilmiştir. TRİP işlemi sonucunda malzemelerin % gerinim miktarlarında önemli derecede artışlar sağlanmıştır [50].



Şekil 9. Deneyel ve modelleme sonuçlarının karşılaştırılması [51]

Lani ve arkadaşlarının [51] deneysel çalışmaları ile Thibaud ve arkadaşlarının [34] yapmış olduğu modelleme çalışmalarının birlikte karşılaştırıldığı plastik gerinime bağlı olarak martensit hacim oranındaki değişimi gösteren grafik Şekil 9' da verilmiştir. Modelleme ve deneysel çalışmaların uyumlu olduğu bu grafikten görüldüğü üzere, uygulanan gerinim miktarı arttıkça martensit hacim oranı artmakta ve artan martensit hacim oranına bağlı olarak dayanım ve süneklik de artmaktadır.



Şekil 10. -60 ile 100 °C sıcaklık aralığında ve çeşitli gerinim hızlarında plastik gerinimin bir fonksiyonu olarak kalıntı östenit hacim oranı [41]

Mukherjee ve arkadaşları [52] yapmış oldukları çalışmada, östenit hacim oranının sıcaklığa ve plastik gerinim hızına bağlı olarak değişimini incelemiştir. Plastik gerinime bağlı olarak östenit hacim oranının azaldığı gözlenmiştir. Östenit hacim oranındaki bu azalma sabit gerinim hızında, artan deney sıcaklığı ile azalmıştır. Sabit deney sıcaklıklarında ise plastik gerinim hızının artmasıyla östenit hacim oranındaki azalma hızlanmıştır (Şekil 10). Azalan östenit hacim oranı ile ters orantılı olarak martenzit hacim oranı artmıştır.

3. Sonuçlar

Literatür taraması şeklindeki bu çalışmanın sonuçları için aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir;

- 1-TRİP çeliklerine uygulanan termo-mekanik işlemler yapı-özellik ilişkilerini belirlemektedir.
- 2-Kompleks mikroyapıya sahip TRİP çeliklerinde fazların hacim oranı ve morfolojisi mekanik özellikleri ve kararlılığı belirlemektedir. Kalıntı östenitin modifikasyonu daha belirleyici rol oynamaktadır.
- 3-Günümüzde seri üretim açısından pek çok malzemenin şekillendirilmesindeki zorluk, şekillendirme esnasında malzemenin dayanımının artması ve sünekliğinin azalmasıdır. Bu olumsuzluğun giderilmesinde TRİP çelikleri öncü çelikler sınıfındadır.
- 4- Termo-mekanik işlemlerden sonra, belirli kimyasal kompozisyona sahip çelik malzemede, plastik deformasyon nedenli dönüşüm sağlanabilir. TRİP etkisi ile 1000 ile 2000 MPa arasında yüksek akma dayanımına ve %25 ile %49 arasında iyi derecede % uzamaya sahip malzemeler üretilebilir.
- 5- TRİP çeliklerinde dönüşüm kontrolündeki zorluk bu yöntemi pahalı bir işlem haline getirmektedir.

Kaynaklar

- [1]. Zackay, F. V., Parker, R. E., Fahr D., Bush R., "The Enhancement of Ductility in High Strength Steels", **The Metallurgical Evolution of Stainless Steels**, Editor: F.B. Pickering, by ASM and The Metal Society, 1979
- [2]. Wagoner, R.H., **Report: Advanced High-strength Steel Workshop**, Virginia, USA, 22-23, 2006
- [3]. Matlock, D.K., Speer, J.G., **Proceedings of the Third International Conference on Advanced Structural Steel**, 724-781, 2006
- [4]. Kwan, O., Kim, S-K., **Proceeding of the 21st Conference on Mechanical Behaviors of Materials**, Changwan, Korea, 2007
- [5]. Han, H.N., Oh, C-S, Kim, G., Kwan, O., "Design Method for TRIP-aided Multiphase Steel Based on a Microstructure-Based Modeling for Transformation-Induced Plasticity and Mechanically Induced Martensitic Transformation", **Materials Science & Engineering A**, 499A, 462-468, 2009
- [6]. Arıkan, M., Başman, G., "Otomotiv Endüstrisi İçin Yeni Çelik Ürünler ve Özellikleri", **TMMOB Metalurji Müh. Odası 1. Demir-Çelik Sempozyumu**, Bildiriler Kitabı 1. Yayın no: E-2001/271-1. Zonguldak-2001
- [7]. Tsuchida, N., Tomota, Y., "A Micromechanics Modeling for Transformation Induced Plasticity in Steels", **Materials Science & Engineering A**, 285A, 345-352, 2000
- [8]. Jimenez-Molero, E., Dijk, N.H., Zhao, L., et.al., "Martensitic Transformation of Individual Grains in Low-alloyed TRIP Steels", **Scripta Materialia**, 56, 421-424, 2007
- [9]. Yan-Qui, H., Xiu-Hui, L., Zhen-Hua, Z., Jian-Guo, L., "Bainite Transformation and TRIP Effect in 20Mn2SiVB Steel", **Materials Science & Engineering A**, 438, 158-161, 2006

- [10]. Tamura, I., Deformation-Induced Martensitic Transformation and Transformation-Induced Plasticity in Steels”, **Met. Sci.**, 116-5, 245-253, 1982
- [11]. Sugimoto, K., Kobayashi, M., Hashimoto, S., “Ductility And Strain-Induced Transformation in a High-Strength Transformation-Induced Plasticity-Aided Dual-Phase Steel”, **Metall. Trans. A.**, 23A-11, 3085-3091, 1992
- [12]. Zhao, L., N. H. Van Dijk, Brück, E., Sietsma, J., S. vander Zwaak, “Magnetic and x-Ray Diffraction Measurements for the Determination of Retained Austenite in TRIP Steels”, **Mater. Sci., Eng. A**, 313A, 145-152, 2001
- [13]. Baik, S.C., Kim, S., Jin, Y.S., Kwon, O., “Effects of Alloying Elements on Mechanical Properties and Phase Transformation of Cold Rolled TRIP Steel Sheets”, **ISIJ Int.**, 41 (3), 290-297, 2001
- [14]. Sugimoto, K., Sakaguchi, J., Lida, T., Kashinma, T., “Stretch-flange ability of a High-strength TRIP Type Bainitic Sheet Steel”, **ISIJ Int.**, 40(9), 920-926, 2000
- [15]. Li, Z., Wu, D., “Effect of Ht Deformation and Subsequent Austempering on the Mechanical Properties of Si-Mn TRP Steels”, **ISIJ Int.**, 46(1), 121-128, 2006
- [16]. Sugimoto, K., Usui, N., Kobayashi, M., Hashimoto, S., “Effects of Volume Fraction and Stability of Retained Austenite on Ductility of TRIP-aided Dual-Phase Steel”, **ISIJ Int.**, 32, 1311-1318, 1992
- [17]. Chen, H.C., Era, H., Shimizu, M., “Effect of Phosphorus on the Formation of Retained Austenite and Mechanical Properties in Si-containing Low-Carbon Steel Sheet”, **Metal. Mater. Trans. A**, 20, 437-445, 1989
- [18]. Han, T.K., Park, S.S., Kim, K.H., Kang, C.Y., Woo, I.S., Lee, J.B., “CO₂ Laser Welding Characteristics of 800 MPa Class TRIP Steel”, **ISIJ Int.**, 45(1), 60-65, 2005
- [19]. Bhadeshia, H.K.D.H., “TRIP-assisted Steels?”, Tech. Note, **ISIJ Int.**, 42(9), 1059-1060, 2002
- [20]. McEvilly, A.J., Bush, R.H., Shaller, F.W., Schmatz, D.J., “Formation of Alloy Carbides During Ausforming”, **ASM Trans. Quart**, Cilt: 56, No: 3, 757-767, 1963
- [21]. Raymond, L., Gerberich, W.W., Martin C.F., **:Proc. 2nd Berkeley Int. Materials Conf. on High-Strength Materials**, V.F. Zackay, ed., John Wiley & Sons, Inc., NY, 297-307, 1965
- [22]. Thomas, G., Schmatz, D., Gerberich, W.W., **:Proc. 2nd Berkeley Int. Materials Conf. on High-Strength Materials**, V.F. Zackay, ed., John Wiley & Sons, Inc., NY, 251-97, 1965
- [23]. Airod, A., Petrov, R., Colas, R., Haubaert, Y., “Analysis of the TRIP Effect by Means of Axisymmetric Compressive Tests on a Si-Mn Bearing Steel”, **ISIJ Int.**, 44(1), 179-186, 2004
- [24]. Bressanelli, J.P., Moskowitz, A., “Effect of Strain Rate Temperature and Composition on Tensile Properties of Metastable Austenitic Stainless Steel”, **Trans. of the ASM**, vol 59, 223-299, 1966
- [25]. Zrník, J., Stejskal, O., Novy, Z., Hornak, P., Fujda, M., “Structure Dependence of the TRIP Phenomenon in Si-Mn Bulk Steel”, **Materials Science&Engineering A**, 462, 253- 258, 2007
- [26]. Zrník, J., Stejskal, O., Novy, Z., Hornak, P., “Relationship of Microstructure and Mechanical Properties of TRIP Aided Steel Processed by Press Forging”, **Journal of Materials Processing Technology**, 192-193, 367-372, 2007
- [27]. Zackay, F.V., Parker, E.R., Fahr, D., Bush, R., “The Enhancement of Ductility in High Strength Steels” **ASM Trans. Quart**. Cilt:60, No: 2, 252-259, 1967
- [28]. Itami, A., Takahashi, M., Ushioda, K., “Cold-rolled High-Strength TRIP Sheet Steels and Plastic Stability of Their Retained Austenite” **High-Strength Sheet Steels for Automotive Industry**, Baltimore, 245-254, 1994
- [29]. Sugimoto, K., Kobayashi, M., et.al., “Influence of Deformation Temperature on the Bauschinger Effect of TRIP-aided Dual Phase Steel” **J. Jpn Inst. Met.**, 58,(5), 501-506, 1994
- [30]. Gerberich, W.W., Hemmings, P.L., Merz, M.D., Zackay, F.V., “Preliminary Toughness Result on TRIP Steel” **ASM. Trans. Quart.**, No: 161, 843-847, 1968
- [31]. Wu, D., Li, Z., “Effect of Thermo-mechanical Controlled Processing on the Microstructure and Mechanical Properties of Fe-C-Mn-Si Multiphase Steels”, **ISIJ Int.**, 46(7), 1059-1066, 2006
- [32]. Meyer, M.D., Vanderschueren, D., Cooman, D.C.B., “The Influence of the Substitution of Si-by Al on the Properties of Cold Rolled C-Mn-Si TRIP Steels”, **ISIJ Int.**, 39, 813-822, 1999
- [33]. Hojo, T., Sugimoto, K., Mukai, Y., Ikeda, S., “Effects of Aluminum on Delayed Fracture Properties of Ultra High Strength Low-alloy TRIP-aided Steels”, **ISIJ Int.**, 48(6), 824-829, 2008
- [34]. Thibaud, S., Boudeau, N., Gelin, C.J., “TRIP Steel: Plastic Behavior Modeling and Influence on Functional Behavior”, **Journal of Materials Processing Technology**, No: 177, 433-438, 2006
- [35]. Lui, S.K., Zhang, J., “The Influence of the Si And Mn Concentrations on the Kinetics of the Bainite Transformation in Fe-C-Si-Mn Alloys”, **Metal. Trans. A**, 21-6, 1517-1525, 1990
- [36]. Sakuma, Y., Matsumura, O., Takechi, H., “Mechanical Properties and Retained Austenite in Intercritically Heat-treated Bainite-transformed Steel and Their Variation with Si and Mn Additions”, **Metall. Mater. Trans A**, 22-2, 489-498, 1991

- [37]. Bleck, W., in: B.C. De Cooman (Ed.) **Int. Conf. On TRIP-aided High Strength Ferrous Alloys**, GRIPS Sparkling Word of Steel, vol 1: Proceeding, Aachen, 13-24, 2002
- [38]. Wasilkowska, A., Petrow, R., Kestens, L., Wener, E.A., Krempaszky, C., Traint, S., Pichler, A., “Microstructure and Texture Changes in a Low-alloyed TRIP-aided steel Induced by Small Plastic Deformation”, **ISIJ Int.**, 46(2), 302-309, 2006
- [39]. Berrahmoune, M.R., Berveiller, S., Inal, K., Moulin, A., Patoor, E., “Analysis of the Martensitic Transformation at Various Scales in TRIP Steel” **Materials Science & Engineering A** No: 378, 304-307, 2004
- [40]. Zrník, J., Stejkal, O., Novy, Z., Hornak, P., Fujda, M., “Iron and Steel” 40, supplement, 587-893, 2005
- [41]. Jimenez, J.A., Carsi, M., Ruano, O.A., Frommeyer, G., “Effect of Testing Temperature and Strain Ration the Transformation Behavior of Retained Austenite in Low-alloyed Multiphase Steel”, **Materials Science and Engineering A**, in press, 2009
- [42]. Matsumura, O., Sakuma, Y., Takechi, H., “Enhancement of Elongation by Retained Austenite in Intercritical Annealed 0.4C-1.5Si-0.8Mn Steel”, **ISIJ Int.**, 27-7, 570-579, 1987
- [43]. Matsumura, O., Sakuma, Y., Ishii, Y., Zhao, J., “Effect of Retained Austenite on Formability of High Strength Sheet Steels”, **ISIJ Int.**, 32-10, 1110-1116, 1992
- [44]. Zrník, J., Muransky, O., Stejkal, O., Lukas, P., Hornak, P., “Effect of Processing Conditions on Structure Development and Mechanical Response of Si-Mn TRIP Steel”, **Materials Science & Engineering A**, vol 483-484, 71-75, 2008
- [45]. Dan, W.J., Li, S.H., Zhang, W.G., Lin, Z.Q., “The Effect of Strain-Induced Martensitic Transformation on Mechanical Properties of TRIP Steel” **Materials and Design**, 29-3, 604-612, 2008
- [46]. Saito, K., Ikeda, S., Maki, K., et.al., “Strain-rate and Temperature Dependent Plastic Deformation Behavior of Low Carbon TRIP Steel” **Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers A**, Cilt: 71, No: 3, 465-471, 2005
- [47]. Choi, J.D., Bruce, D.M., Kim, S.J., et. al., “Deformation Behavior of Low Carbon TRIP Sheet Steels at High Strain Rates” **ISIJ Int.**, Cilt: 42, No: 12, 1483-1489, 2002
- [48]. Vuoristo, T., Kuokkalo, V-T., Apostol, M., et. al. “Deformation and Work Hardening of Cold-Formed High Strength Steel at High Rates of Strain”, **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt: 1, 471-480, 2004
- [49]. Muransky, O., Zrník, J., Lukas, P., Jencus, P., Novy, Z., **Acta Metal**, Cilt: 10, 228-234, 2004
- [50]. Honeycombe, R.W.K., “Steels Microstructure and Properties” , **Metallurgy and Materials Science Series**, UK, 1981
- [51]. Lani, F., Furnemont, Q., Jacgues, P.J., Delannay, F., Pardoën, T., “Modelle Micromecanique du Phase”, **Materiaux**, 1-5, 2005
- [52]. Mukherjee, M., Mohanty, O.N., Hashimoto, S., Hojo, T., Sugimoto, K., “Strain-induced Transformation Behavior of Retained Austenite and Tensile Properties of TRIP-aided Steels with Different Matrix Microstructure”, **ISIJ Int.**, 46-2, 316-324, 2006