

# **MODERN OTOMOBİLLERDE GÖVDE YAPISI VE GÖVDE ÜRETİMİNDE KULLANILAN ÇELİK TÜRLERİ (I. BÖLÜM)**

**Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER**

- Araç ağırlığını azaltmadaki en büyük fırsat araç ağırlığının % 60'ını oluşturan gövde ve şasi bileşenlerindedir.
- Motor ve şanzımanı içeren güç aktarım (powertrain) sistemleri ise araç ağırlığının % 25-30'luk bir kısmını oluşturmaktadır.
- Araçların ağırlığını azaltmak için son 25-30 yıl içerisinde çok çeşitli yeni malzemeler ve imalat teknikleri geliştirilmiştir.

- 1970'li yıllardan itibaren başlayarak çoğu yolcu araçlarının üretiminde kullanılan şasi üstü gövde (body on frame) tipi birleşik gövde (unibody, biw) ile değiştirilmiştir.
- Birleşik gövde şasi üstü gövdeye göre hem daha hafif hem de daha rijittir.
- Şasi üstü gövde tipinde genellikle iki uzunlamasına kiriş arasında farklı noktalarda bağlantılar bulunmaktadır ve bu yapı ana yük taşıma elemanı olarak görev yapmaktadır. Gövde ayrıca üretilip şasi üzerine monte edilmektedir.

- Birleşik gövde ise bir kutu formundadır ve bu form tavan, çamurluk, ve zemin gibi dış panellerden (skin panels) ve zemin çapraz kirişleri, tavan rayları, A ve B sütunları gibi bölümlerden oluşur. Ve bu bileşenlerin tamamı az ya da çok rijitliğe katkıda bulunur. Aktarma organları ve süspansiyon destekleri için kısa alt çerçeveler (takviye şasisi) kullanılır ancak bunlar gövdeye herhangi bir destek sağlamaz.
- Birleşik gövde bir aracın ağırlığının yaklaşık %25'ini oluşturur.
- Çelik birleşik gövdelerde, kutu yapısı ve bölmeler çeşitli ölçülerdeki saclardan şekillendirilen parçaların punto kaynağı ile birleştirilmesiyle oluşturulur.

# Gövde Panelleri

- Araçlarda iki çeşit gövde paneli mevcuttur.
1. Dış gövde panelleri. Motor kaputu, bagaj kapağı ve tavan gibi yatay paneller ile kapı ve çamurluklar (köşeler) gibi dik paneller.
  2. İç gövde panelleri. Tekerlek yuvaları ve arka zemin gibi paneller ile motor kaputu içi ve bagaj kapağı içi gibi birleştirilmiş kapatıcı paneller.

# Gövde yapısından beklenen özellikler

- Eğilme rijitliği
- Burulma rijitliği
- Titreşim sönümleme (eğilme ve burulma)
- Kaza güvenliği
- Yorulma dayanımı
- Korozyon direnci
- Şekillendirilebilme
- Birleştirilebilme
- Geri dönüşüm

## **Gövde panellerinden beklenen özellikler**

- Eğilme rijitliği
- Dalgalanma direnci (oil canning) (dıştan)
- Göçük (çökük) direnci (dıştan)
- Titreşim sönümleme
- Yüzey bitimi ve düzgünlük (dıştan)
- Boyanabilme
- Şekillendirilebilme
- Geri dönüşüm

# Çelik

Tipik bir otomobilde yaklaşık %55 oranında kullanılan çeliğin diğer malzemelere göre avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Düşük maliyet ve yüksek elastiklik modülü. (207 GPa ile diğer malzemelerin hemen hepsinden üstündür.)
- Alaşımlama, soğuk şekillendirme ve ısıt işlemler ile çeşitlendirilebilen geniş dayanım ve süneklik aralığı. Çeliklerde dayanım aralığı 200 MPa'dan 1500 MPa'a kadar çıkabilmektedir.
- Düşük karbonlu çeliklerin ve yeni geliştirilen yüksek dayanımlı çeliklerin mükemmel şekillendirilebilirliği.



Material	Density (g/cm <sup>3</sup> ) ( $\rho$ )	Tensile modulus ( $E$ ) (GPa) (MPa)	Yield strength ( $S_y$ ) (MPa)	Tensile strength ( $S_t$ ) (MPa)	Coeff. of thermal expansion (10 <sup>-6</sup> /°C)
DQ Low carbon steel	7.87	207	186	317	11
DP 400/700 Steel	7.87	207	400	700	11
TRIP 450/800 Steel	7.87	207	450	800	11
5182-H24 Aluminum	2.7	70	235	310	23
6111-T62 Aluminum	2.7	70	320	360	23
AZ91 Magnesium	1.8	45	160	240	26
Ti-6Al-4V Titanium	4.43	114	827	896	9
304 Stainless steel	7.9	200	241	614	17
Nitronic 30 stainless steel	7.86	193	393	862	16
High strength CFRE (unidirectional)	1.55	138	–	1550	–
High modulus CFRE (unidirectional)	1.63	215	–	1240	–0.9 (L) 27 (T)
GFRE (unidirectional)	1.85	39	–	965	6 (L) 19 (T)
CFRE (quasi-isotropic)	1.55	45.5	–	579	0.9
Sheet molding compound (SMC-R50)	1.87	16	–	164	14.8

L is the longitudinal direction and T is the transverse direction.

CFRE is carbon fiber reinforced epoxy, GFRE is glass fiber reinforced epoxy.

- Son 25-30 yıl içinde alüminyum ve plastik gibi hafif malzemeler ile olan rekabeti otomotiv çeliklerinin çeşitlerini ve özelliklerini büyük oranda değiştirmiştir.
- Yeni geliştirilen çelik üretim prosesleri (vakum gaz alma gibi) düşük empürite seviyeli çeliklerin ucuza üretimini mümkün kılmıştır. (Geleneksel üretimde 200-400 ppm olan empürite seviyesi 10-20 ppm'e düşürülmüştür.)
- Yeni alaşımlama teknikleri ve sürekli tavlama gibi gelişmiş ısıl işlem prosedürlerinin birleşimi, hem dayanım ve süneklilikte çeşit aralığını genişletmiş hem de daha yüksek yüzey bitim kalitesine sahip sacların üretimine olanak sağlamıştır.

Günümüzde otomotiv tasarımcılarının ağırlık azaltmak ve kaza enerjisi sönmlemeyi arttırmak için kullandıkları çok çeşitli çelikler mevcuttur. Bu çelikler mikroyapılarına bağlı olarak üç genel kategoride sınıflandırılabilir.

- Birinci kategori düşük karbonlu çelikler ve geleneksel yüksek dayanımlı çelikleri (high strength steels HSS) kapsamaktadır ve bu grup on yıllarca otomotiv tasarımının bel kemiğini oluşturmuştur.

- İkinci kategori genellikle birinci nesil ileri yüksek dayanımlı çelikler (advanced high strength steels AHSS) olarak adlandırılır. Bu gruptaki çeliklerin çekme dayanımı 550 MPa'ın üzerindedir.
- Üçüncü kategori de ikinci nesil ileri yüksek dayanımlı çelikleri kapsamaktadır.

Bu kategorilerin her biri çok sayıda malzeme içermektedir ve bunlar kendilerini diğer kategorilerin malzemelerinden ayıran özel fiziksel ve metalurjik özellikleri paylaşmaktadır.

*Table 2.1* Types of automotive steels

---

Low carbon and conventional high strength steels (HSSs)

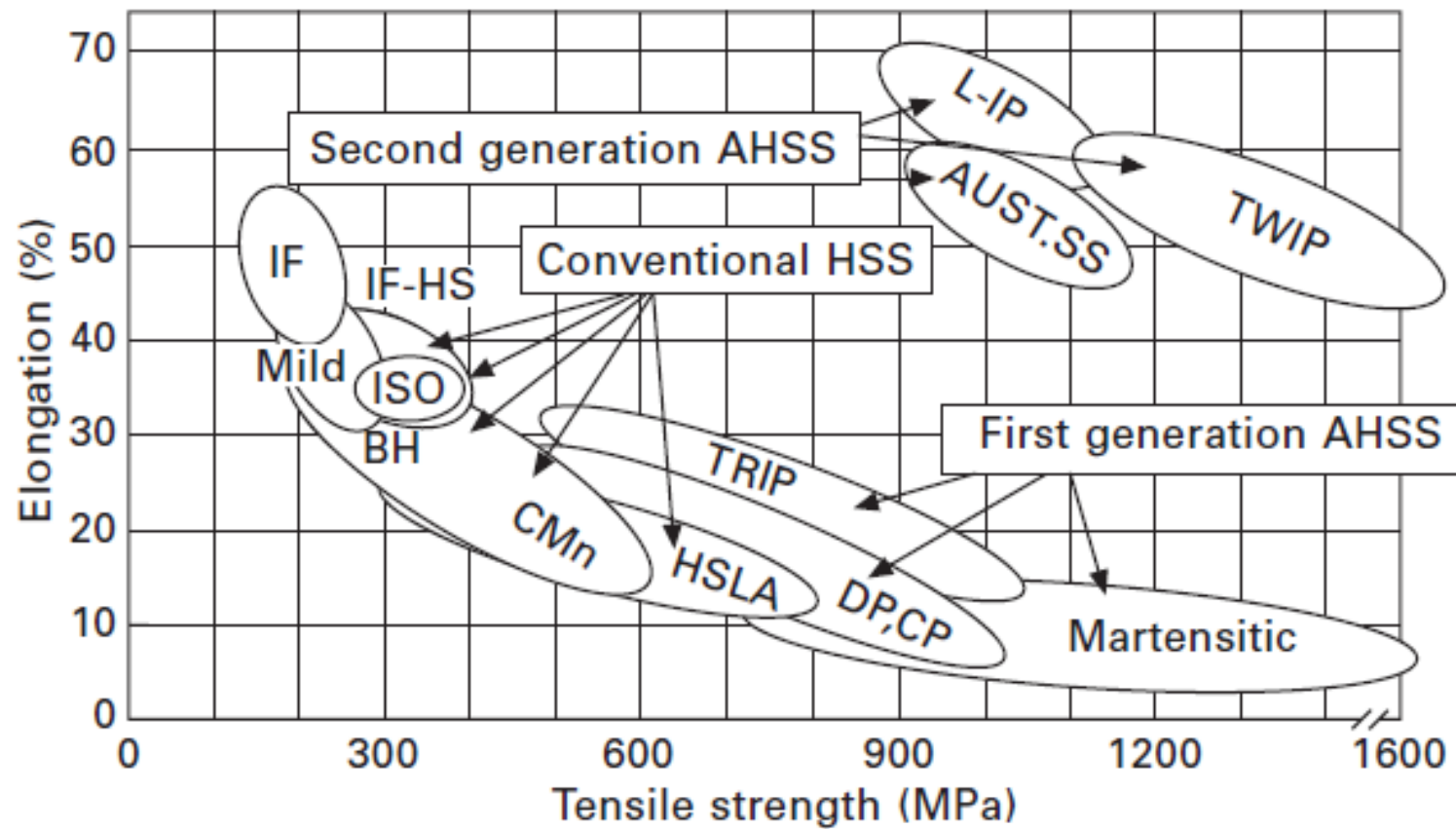
- Low carbon steels (LC)
- Solid solution strengthened (SSS)
- Bake hardenable (BH)
- High strength low alloy (HSLA)

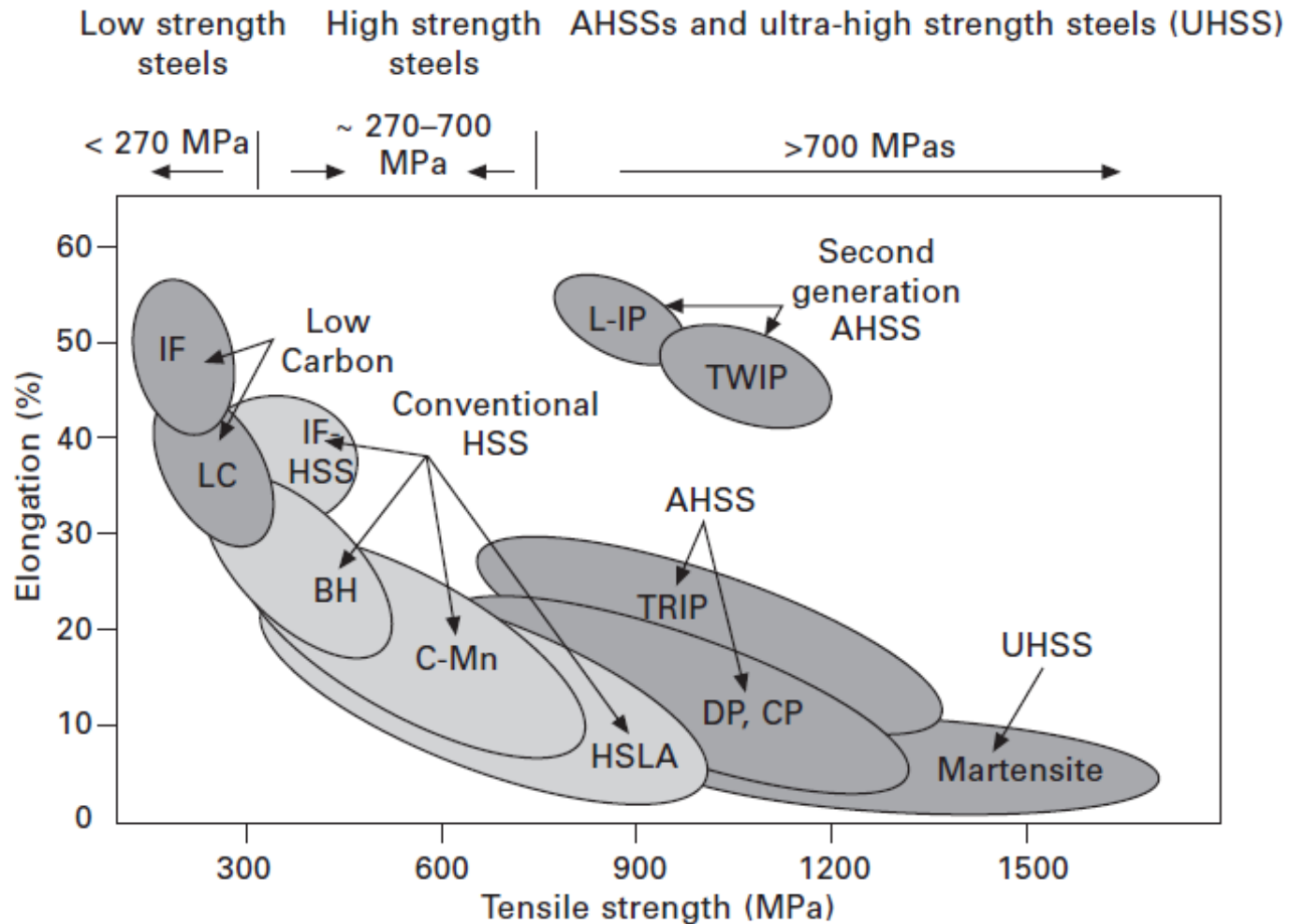
First generation advanced high strength steels (AHSSs)

- Dual phase (DP) – ferrite/martensite
- High hole expansion (HHE) – ferrite/bainite
- Stretch flangeable (SF)
- Transformation induced plasticity (TRIP)
- Complex phase (CP)
- Fully martensitic (MS)
- Boron heat treatable steels

Second generation advanced high strength steels

- Twinning induced plasticity (TWIP)
  - Lightweight steels with induced plasticity (L-IP)
-





2.8 Automotive steel strength/ductility ladder.

## Düşük karbonlu çelikler

- % 0,13 veya daha düşük karbon içerikleri ile düşük karbonlu çelikler, otomobil gövde panellerinin ve yapısal parçalarının üretiminde uzun yıllar en çok kullanılan malzemeler olmuştur.
- Düşük maliyet, mükemmel şekil alma ve kaynaklanabilme, boyadan sonra yüksek kaliteli görünüm ve genel imalat kolaylıklarının birleşimi bu malzeme grubunun yaygınlaşmasına katkıda bulunmuştur



- Otomotiv sanayinde çok çeşitli kalitelerde düşük karbonlu çelikler kullanılmaktadır. Bunların büyük bir kısmı sıcak veya soğuk hadde ürünündür ve karbon oranları oldukça düşüktür.
- SAE1005 gibi çok düşük karbonlu çelikler yüksek şekillenme kabiliyetine sahip ultra düşük karbonlu IF (interstitial free) çelikleri halen günümüz araçlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.
- Özellikle son 10-15 yıl içinde yapısal parçalarda düşük karbonlu çelik kullanımı belirgin olarak azalmış ve kritik pres parçaların tasarımında yüksek dayanımlı çelikler araç ağırlığını azaltmak, dayanımı ve araç performansını arttırmak için tercih edilmeye başlanmıştır.

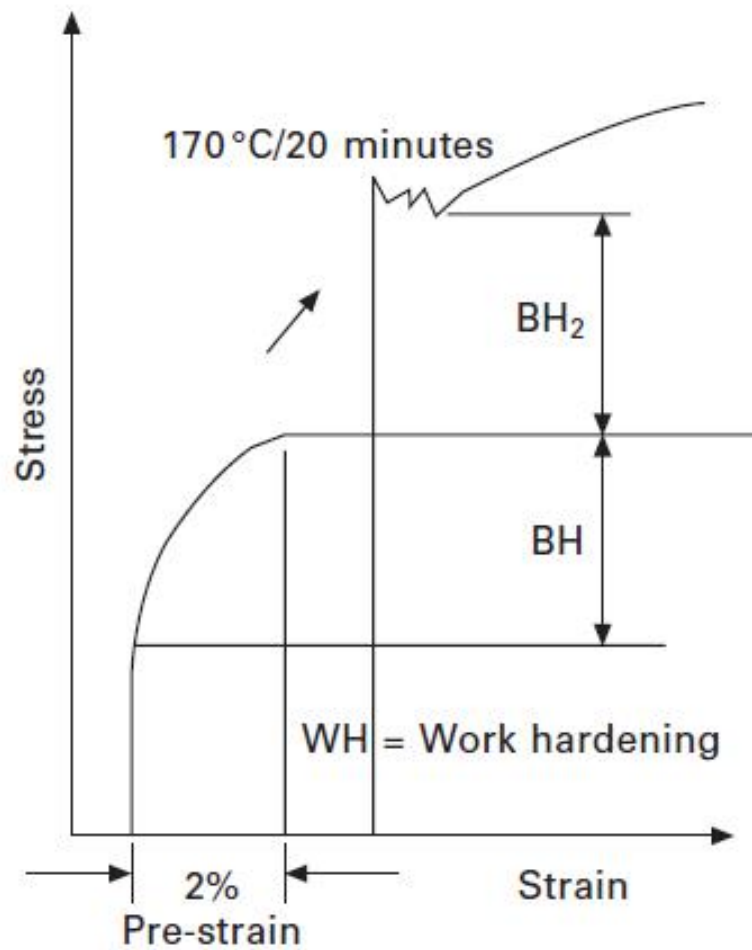
## **IF (Interstitial Free), SSS(Solid Solution Strengthened) ve BH (Bake Hardenable) Çelikleri**

- IF çelikleri 30-50 ppm arası çok düşük karbon oranına sahiptir ve genellikle Mn oranları %0,25'in altındadır.
- Yüksek oranda şekil alabilme kabiliyetleri karmaşık şekilli parçaların preslenmesine olanak sağlamaktadır.
- Bu çeliklerin uzama değerleri % 50'ye yaklaşmakta ve bazı durumlarda da bu değeri aşmaktadır.
- IF çeliklerinin deformasyon sertleşmesi üssü görece yüksektir ve bu durum zor parçaların preslenmesinde bir avantaj yaratmaktadır.

- Çelik üretiminde vakum gaz alma teknolojisi ile üretilen ultra düşük karbonlu (ultra low carbon, ULC) çelikler, ağırlık azaltmada önemli işlevi olan yüksek dayanım ve yüksek şekillenme kabiliyetine sahip yeni nesil çeliklerin geliştirilmesine temel sağlamıştır.
- Bu çeliklerde yüksek dayanım ve şekillenebilme bileşimi katı çözelti sertleşmesi (solid solution strengthening SSS) ve tane boyutu kontrolü ile sağlanmaktadır. Yeniden fosforlanmış ultra düşük karbonlu çelikler ve BH çelikleri bunlara iyi bir örnektir.

- Bazı durumlarda çoklu dayanım artış mekanizmaları ultra düşük karbon teknolojisi ile birlikte kullanılmaktadır.
- Fosfor, mangan ve silisyum gibi katı çözelti sertleşmesi sağlayan elementler ile mikro alaşımlama elementi olan niyobyum birlikte kullanılarak 7-8  $\mu\text{m}$  tane boyutunda yüksek dayanım ve şekillenme kabiliyeti olan çelikler üretilebilmektedir.
- Karbonun kararlaştırılması için niyobyum miktarının arttırılması durumunda, elde edilen çelik sadece bir IF çeliği olmaz aynı zamanda iyi dağılmış ince karbo-nitrür çökeltileri içerir, çekme dayanımını arttıran ince taneli bir yapıya sahip olur ve çökelme sertleşmesi gösterir.

- BH çelikleri otomotiv sanayinde dış gövde panellerinde ve bazı yapısal pres parçalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.
- Fırında sertleşme (bake hardening) işlemi göçük direncini arttırma etkisi göstermektedir.
- Oldukça düşük karbonlu olan bu çeliklerde az bir miktar karbon çözelti içinde bulunur ve bu çözünmüş karbon atomları ısıtıl işlem sırasında yayınarak dislokasyonları hareketsiz hale getirir. Bu mekanizma deformasyon yaşlanması (strain aging) olarak adlandırılmaktadır.
- BH çelikleri önce soğuk deformasyon işlemine tabi tutulur sonrasında boya kurutma fırınlarındaki işlem sırasında dayanım artışı gösterir. Bu kurutma işlemi 175 °C'de 20-30 dakika sürede yapılmaktadır.
- Soğuk şekillendirmedeki deformasyon sertleşmesine bağlı olarak, bu çeliklerde akma dayanımı 30-50 MPa arası yükselmektedir.



2.1 Bake hardening measurement (source: General Motors Corp., 2007).

*Table 2.2* Mechanical properties and chemistries of selected solid solution strengthened and bake hardenable steels (source: Toshiaki, 2003 and General Motors Corp., 2008)

	Mechanical properties					Chemistry				
	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%) <sup>*</sup>	<i>n</i> -value	<i>r</i> -value	C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	Nb (%)
180 MPa SSS	186	340	37	0.22	1.6	.005 max	0.4	n/a	0.05	–
210 MPa SSS	223	335	35	0.20	1.5	.005 max	0.4	n/a	0.07	–
240 MPa SSS	252	363	34	0.19	1.4	.005 max	0.4	n/a	0.09	–
180 MPa BH	193	342	37	0.21	1.5	0.005 max	0.5	n/a	0.04	–
210 MPa BH	218	337	35	0.18	1.3	0.005 max	0.6	n/a	0.05	–
240 MPa BH	245	344	34	0.18	1.3	0.005 max	0.6	n/a	0.06	–
440 IF HSS	290	446	34	n/a	1.9	0.005	0.62	0.01	0.04	0.068

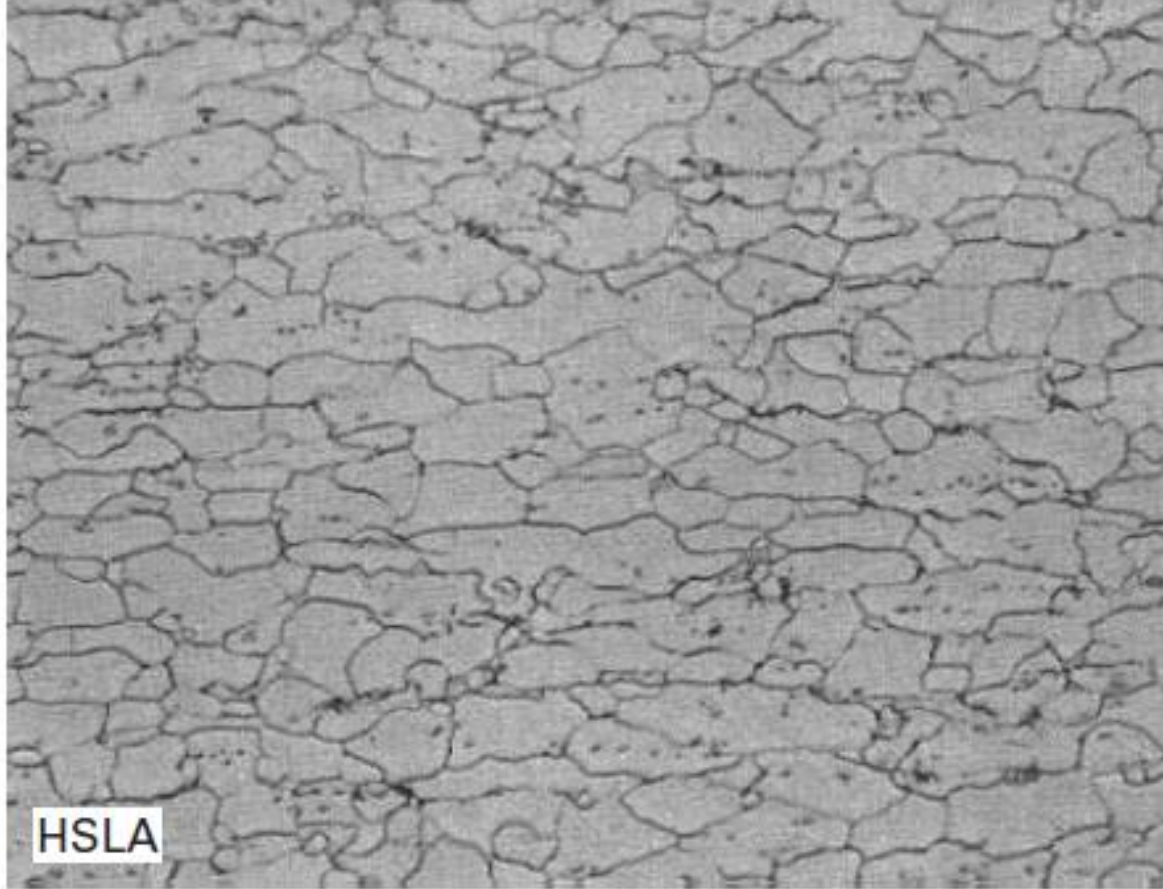
<sup>\*</sup>Total elongations are in 50 mm with an ISO #1 tensile bar.

# Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşımlı Çelikler (High Strength Low Alloy Steels, HSLA)

- HSLA çelikleri 300-550 MPa arasında görece yüksek akma dayanımına sahip çeliklerdir.
- Akma dayanımındaki yükselme ince taneli ferritik mikroyapıda dağılmış az miktardaki ( $\sim$  % 0,005) karbür ve nitrürlerin sonucudur. (Çökelme sertleşmesi mekanizması ile)
- HSLA çelikleri karbür ve nitrür yapıcı vanadyum, niyobyum ve titanyum mikro alaşım elementlerini düşük oranlarda içerir.
- Dayanım artışıdaki asıl sebep, oluşan bu nitrür ve karbürlerin çoğunlukla tane sınırlarında bulunması ve yüksek sıcaklık işlemlerinde tane büyümesine engel olmasıdır.



- Şekillenme ve kaynak kabiliyetini yükseltmek amacıyla HSLA çeliklerinde karbon oranı %0,13 ile sınırlandırılmıştır.
- HSLA çelikleri otomobillerde gövde boyunca özellikle ciddi miktarda yük taşıyan yapısal parçalarda yaygın olarak kullanılmaktadır ve punto kaynak kabiliyeti çok iyidir.
- Çok sayıda otomobil üreticisi tarafından tercih edilen bu çelikler yüksek dayanım ile düşük maliyeti birleştirmektedir.
- Bu çelik grubundan üretilen başlıca parçalara örnekler şunlardır: Motor bölümü taşıyıcı ayakları (şasi ön ayakları), kapı eşiği yan panelleri, arka boylamasına ayaklar (şasi arka ayakları), bazı çapraz kirişler ve kapı içi kirişler.



Tipik bir HSLA elik mikroyapısı

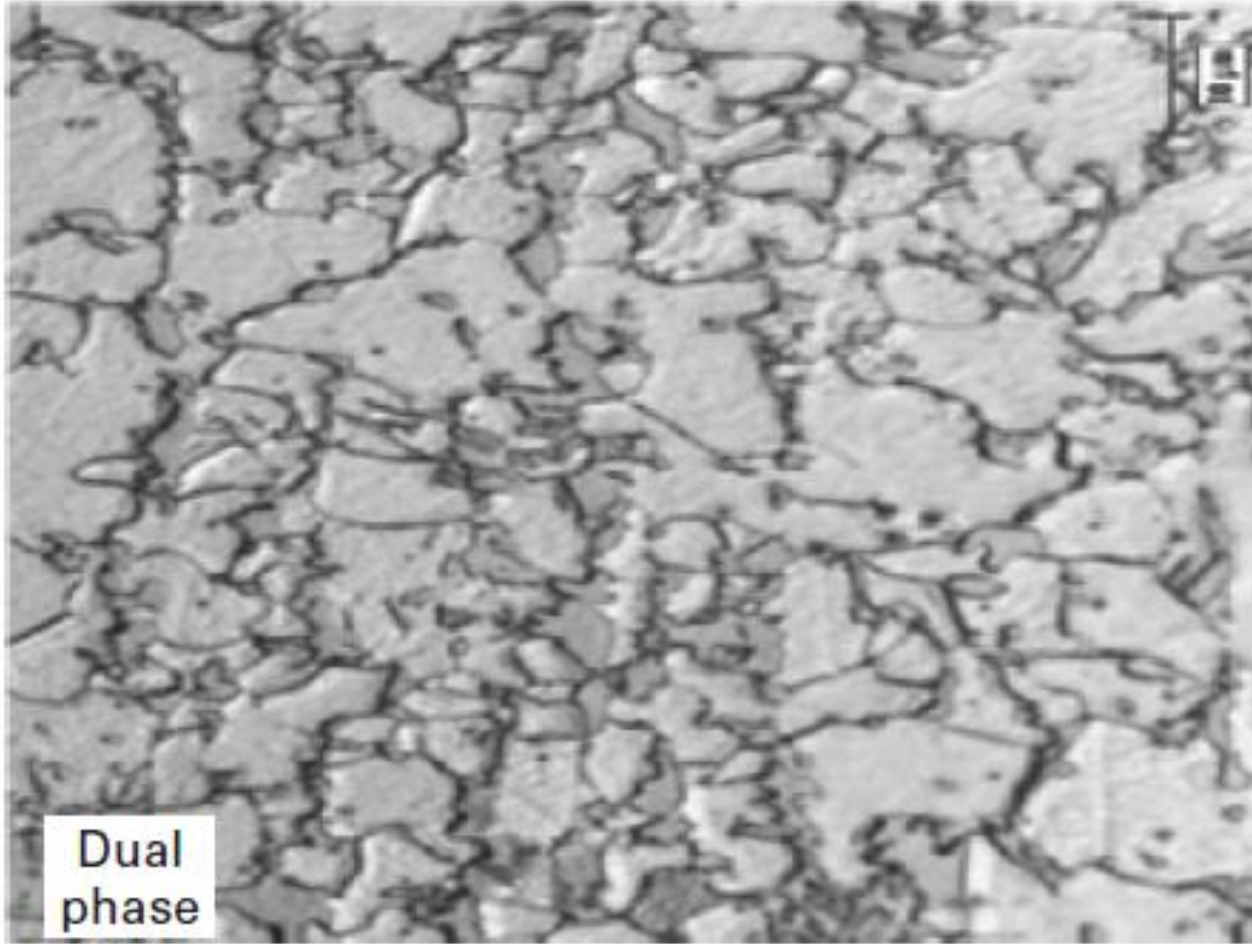
*Table 2.3* Mechanical properties of common HSLA steels (source: SAE, 1999 and General Motors Corp., 2007)

Grade designation	Yield strength, (MPa) minimum	Tensile strength (MPa) minimum	%Total elongation, minimum, cold reduced*	%Total elongation, minimum, hot rolled
300	300	400	24	26
340	340	410	22	25
380	380	450	20	23
420	420	490	18	22
550	550	620	–	18

\*Total elongations are in 50 mm with an ISO #1 tensile bar.

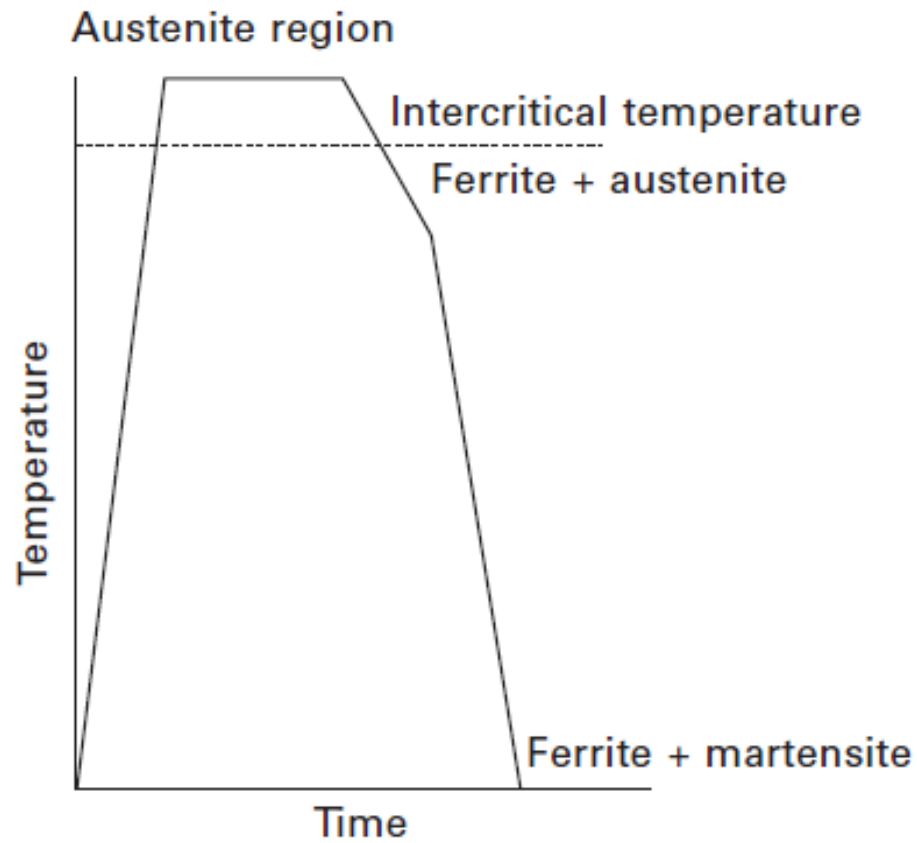
## Çift Fazlı Çelikler (Dual Phase Steels, DP)

- Geleneksel yüksek dayanımlı çelikler (HSS) ferrit yapısından oluşurken, ileri yüksek dayanımlı çelikler (AHSS) çok fazlı yapıları ile karakterize edilir ve bu durum onlara önemli mekanik, şekillenme ve enerji sönümleme özellikleri kazandırır.
- AHSS tipi çelikler içerisinde en yaygın kullanılanları çift fazlı çeliklerdir.
- Çift fazlı çelikler yumuşak ferrit matrisi içerisinde dağılmış % 10- 70 arasında martenzit fazı içerir. Martenzit fazı oranındaki artışa bağlı olarak dayanım değerleri de yükselmektedir.



Tipik bir çift fazlı çelik mikroyapısı

- Çift fazlı çeliklerin akma dayanımı genel olarak HSLA çeliklerinden düşüktür. Ancak sahip oldukları daha yüksek deformasyon sertleşmesi (pekleşme)(strain hardening) kapasitesi, çekme dayanımı değerlerinin daha yüksek olmasını sağlar.
- Çift fazlı çeliklerin dayanım değerini belirleyen martenzit miktarı, termo-mekanik işlem sırasında soğuma hızının kontrolü ile belirlenmektedir.
- Çift fazlı çelikler yüksek dayanımı sayesinde kazalarda daha fazla enerji sönümleyebilmektedir.
- Çift fazlı çelikler östenit veya östenit + ferrit bölgesinden kontrollü soğutularak bir miktar östenitin martenzite dönüşmesi sağlanır.



2.3 Typical dual phase steel cooling curve (Shaw, 2001).

- Uygun alaşım elementlerinin ilavesi ile çift fazlı çeliklerin sertleşebilirliği ayarlanır böylece soğuk hadde ürünleri için sürekli tavlama hatlarında veya sıcak hadde ürünleri için hadde çıkış tablalarında elde edilebilecek soğuma hızları ile östenit-martezit dönüşümü gerçekleşebilir.
- Gerekli sertleřebilirlięi sağlayan alaşım elementleri; karbon, mangan, krom, molibden, vanadyum veya nikeldir.
- Soğuma hızı ile sertleşebilirliği dengeleyen uygun miktarda alaşım elementi katılması gerekmektedir.
- Alaşım ilavesi sadece maliyeti arttırıcı etki göstermez ayrıca fazla alaşım elementi ilavesi karbon eşdeğerliğini yükselteceği için punto kaynak kabiliyetinin düşmesine neden olur.
- Bu sebepten dolayı özellikle yüksek dayanım kalitesindeki çift fazlı çeliklerde kaynak nokta yüzeylerinde ayrılma (kırılma) meydana gelebilmektedir.

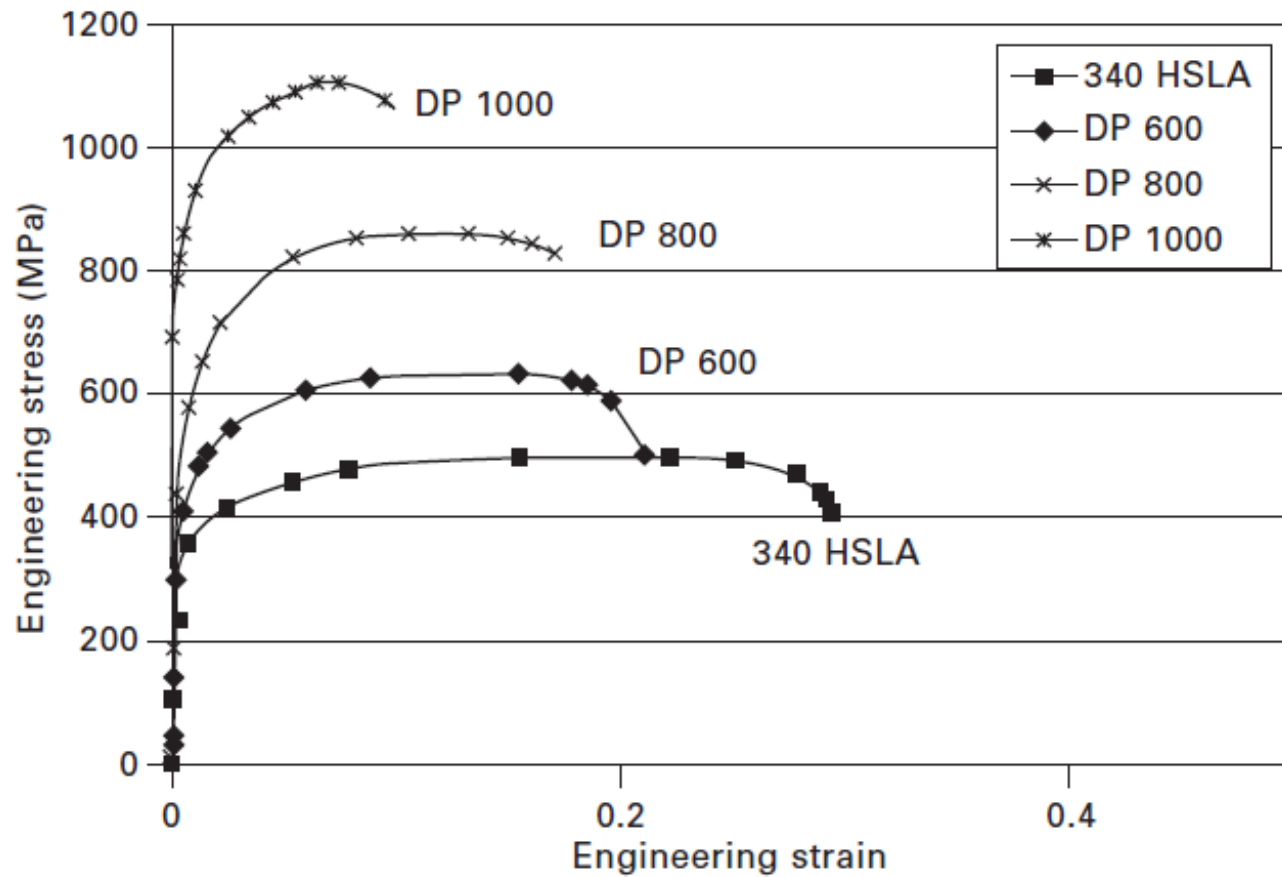


*Table 2.4* Comparison of dual phase and precipitation hardened steels (source: SAE, 1999 and General Motors Corp., 2007)

Grade designation	Yield strength (MPa, minimum)	Tensile strength (MPa, minimum)	%Total elongation, minimum, cold reduced*	YS/TS ratio
DP600	340	590	21	0.58
DP800	420	780	14	0.54
DP1000	550	980	8	0.54
340 HSLA	340	410	22	0.83
420 HSLA	420	480	18	0.88
550 HSLA	550	610	18 <sup>†</sup>	0.9

\*For 550 HSLA, the reported elongation value is for hot rolled substrate.

<sup>†</sup>Total elongations are in 50 mm with an ISO #1 tensile bar.

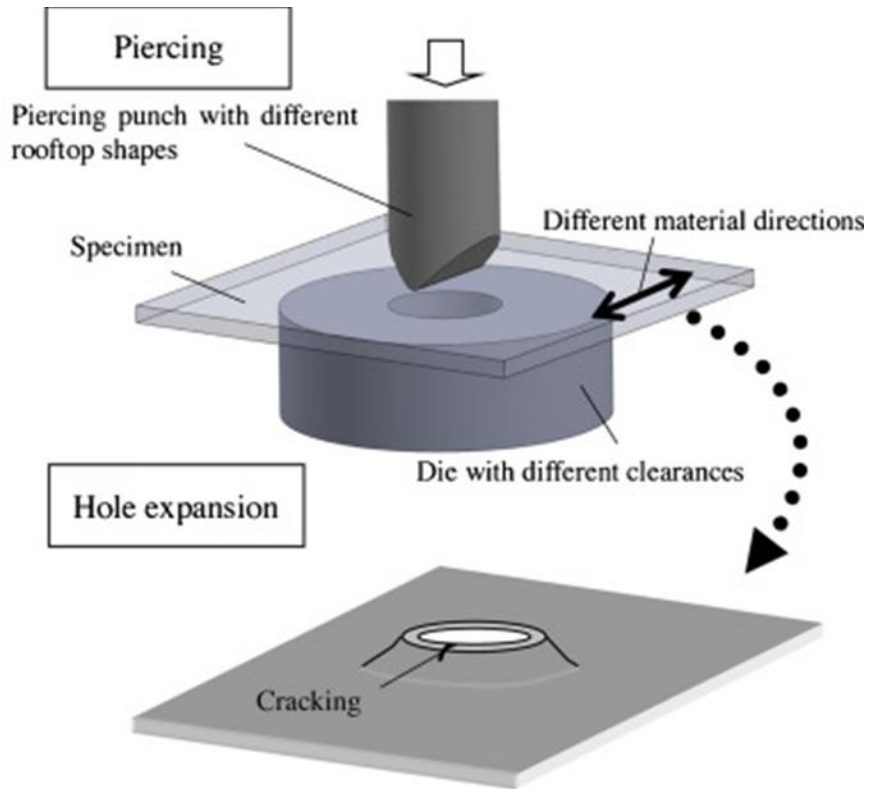


2.4 Engineering stress–strain curves of selected HSLA and dual phase steels (source: General Motors Corp., 2008).

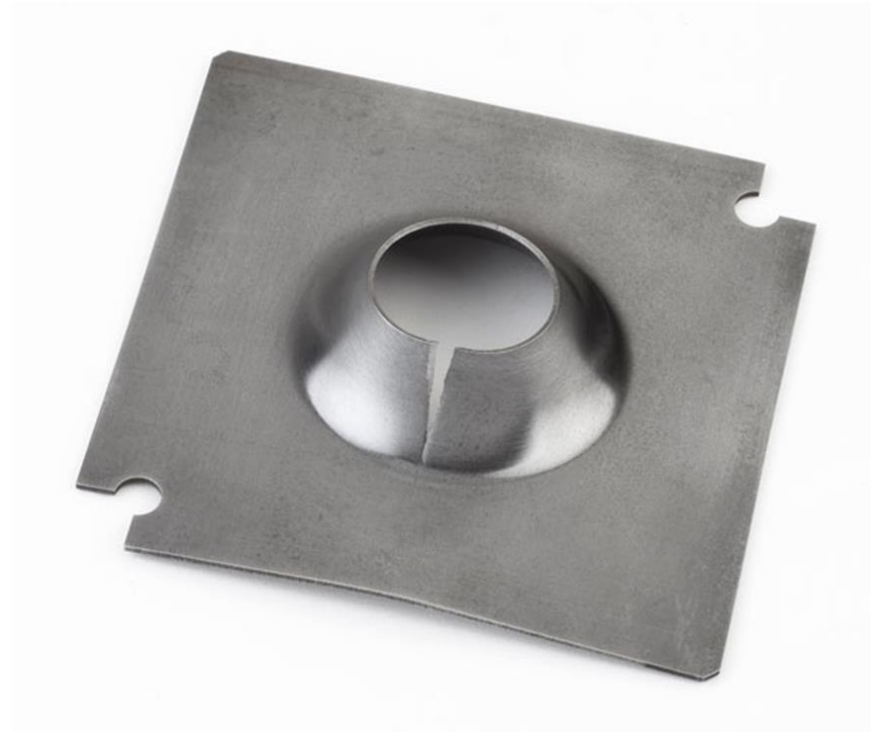
- Tablo ve diyagramda seçilmiş çift fazlı çeliklerin akma/çekme dayanımı (YS/TS) oranı çökelme sertleşmesi gösteren (HSLA) çeliklerine göre oldukça düşüktür.
- Bu durum ilk geliştirilen çift fazlı çeliklerin karakteristiğidir.
- Sonrasında metalurjistler çoklu dayanım arttırama mekanizmalarını kullanarak bu oranı yükseltmeye çalışmıştır.
- Bu çalışmalar sonunda çok fazlı (multiphase) çelikler olarak adlandırılan yeni sınıf AHSS çelikleri ortaya çıkmıştır.

# Ferritik-Beynitik Çelikler

- Diğer bir çift fazlı çelik türü ferritik ve beynitik yapıya sahiptir ve genellikle gerilebilir veya delinebilir (stretch flangable, SF or high hole expansion, HHE steels) çelikler olarak bilinirler
- Teknik olarak her iki çelik türü de çift fazlı olmasına rağmen otomotiv sanayinde adet olarak bu çeliklere ferrit-beynit çelikleri veya daha geleneksel olarak (hole expansion) çelikleri denilmektedir.
- Bu çeliklerde tipik ferrit-martenzit çeliklerine göre kenar çatlak oluşum direnci (resistance to edge cracking) daha yüksektir.
- Bu nedenle ferritik-beynitik çelikler gerilerek delinme işlemi içeren uygulamalara daha elverişlidir.



(b) Evaluation of effect of piercing conditions on hole-expansion ratio





Gerdirmeyeyle delinmiş salıncak (control arm) parçası

- Ferritik-beynitik çelikler genellikle 2mm'den daha kalın ve yaygın şekilde sıcak hadde ürünü olarak üretilirler.
- Kalınlık sınırları bu çelikleri gerdirmeye delinen ve ağır yük taşıyan parçalar için uygun malzeme yapmaktadır.
- Genellikle çeşitli şasi ve süspansiyon parçaları özellikle de salıncaklar (control arms) bu tip çeliklerden üretilebilmektedir.

- Otomotiv uygulamalarında kullanılan ferritik-beynitik çeliklerin çoğunun çekme dayanımı 580 MPa'dır. Bununla beraber yeterli süneklığe sahip ve çekme dayanımı 780 MPa olan türü geliştirilerek gelecekte düşük fiyatı ile hafif alüminyum parçalarla rekabet edebilecektir.
- Bu çeliklerin sınırlayıcı bir özelliği sıcak daldırma galvanizlemeye uygun olmamasıdır. Çinko banyosunun ve sonrasındaki tavlamanın (galvanneal) yarattığı ısı işlem bu mikro yapı ile uyumlu değildir. Bu korozyon korunma eksikliği kullanım sınırlamaları oluşturmaktadır.