

İML 313 İMAL USULLERİ-II

PLASTİK ŞEKİL VERME TEKNOLOJİSİ

Ders Notları

Hazırlayan:
Prof. Dr. Mehmet DEMİRKOL
İTÜ Makina Mühendisliği Bölümü

(Bu ders notları Mikell P. Groover'ın "Fundamentals of Modern Manufacturing" adlı, John Wiley & Sons 2002 (2.Baskı) yayını olan ders kitabından yararlanılarak hazırlanmıştır)

Eylül-2010

İÇİNDEKİLER

Metallerin Plastik Şekil Değiştirmesi

Giriş	3
Sınıflama	4
Mekanik Esaslar	7
Malzeme Davranışı	12
Sıcaklık Etkisi	17
Deformasyon Hızı	23
Heterojen Şekil Değişimi	27
Sürtünme ve Yağlama	29

Kütlesel Şekil Verme Yöntemleri

Haddeleme	32
Dövme	44
Ekstrüzyon	63
Çubuk/Tel Çekme	73

Temel Sac Şekillendirme Yöntemleri

Kesme	80
Bükme	87
Derin Çekme	97

Diğer Sac Şekillendirme Yöntemleri

Germe	103
Sıvama	104
Yüksek Hızda Şekillendirme	106
Hidro-Şekillendirme	108
Merdanelerle Şekillendirme	109
Sac Şekillendirmede Kalıp ve Makineler	110

Saclarda Şekillendirilebilirlik

Hasar Türleri	115
Anizotropi	117
Şekillendirme Sınır Diyagramı	121

Yüzey Temizleme Yöntemleri

Kimyasal Temizleme Yöntemleri	126
Alkali Temizleme	127
Emülsiyonla Temizleme	127
Çözücüyle Temizleme	127
Asitle Temizleme	128
Ultrasonik Temizleme	128
Mekanik Temizleme Yöntemleri	129
Yayınma ve İmplantasyon İşlemleri	131

Yüzey Kaplama Yöntemleri

Elektrolitik Kaplama	135
Dönüşümle Kaplama	139
Fiziksel Buhar Biriktirme	141
Kimyasal Buhar Biriktirme	145
Organik Kaplama	147
Emaye Kaplama	149
Isıl Kaplama	149
Mekanik Kaplama	150

METALLERİN PLASTİK ŞEKİLLENDİRİLMESİ

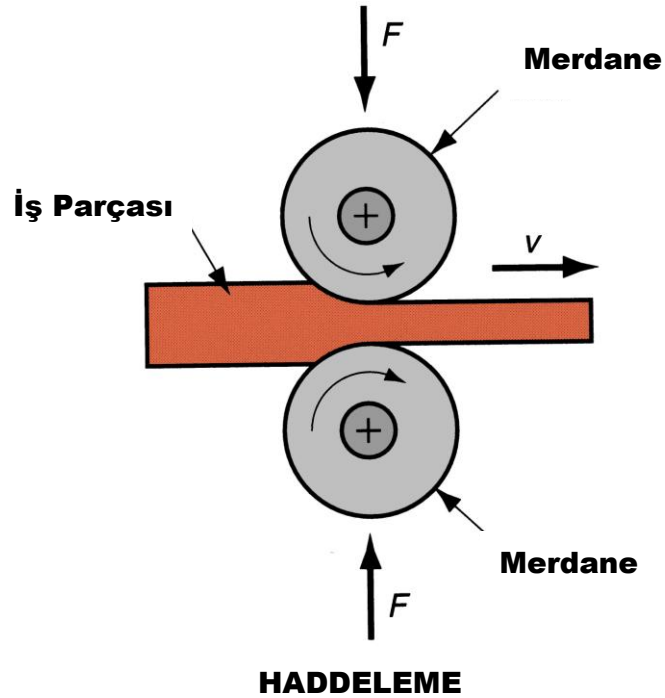
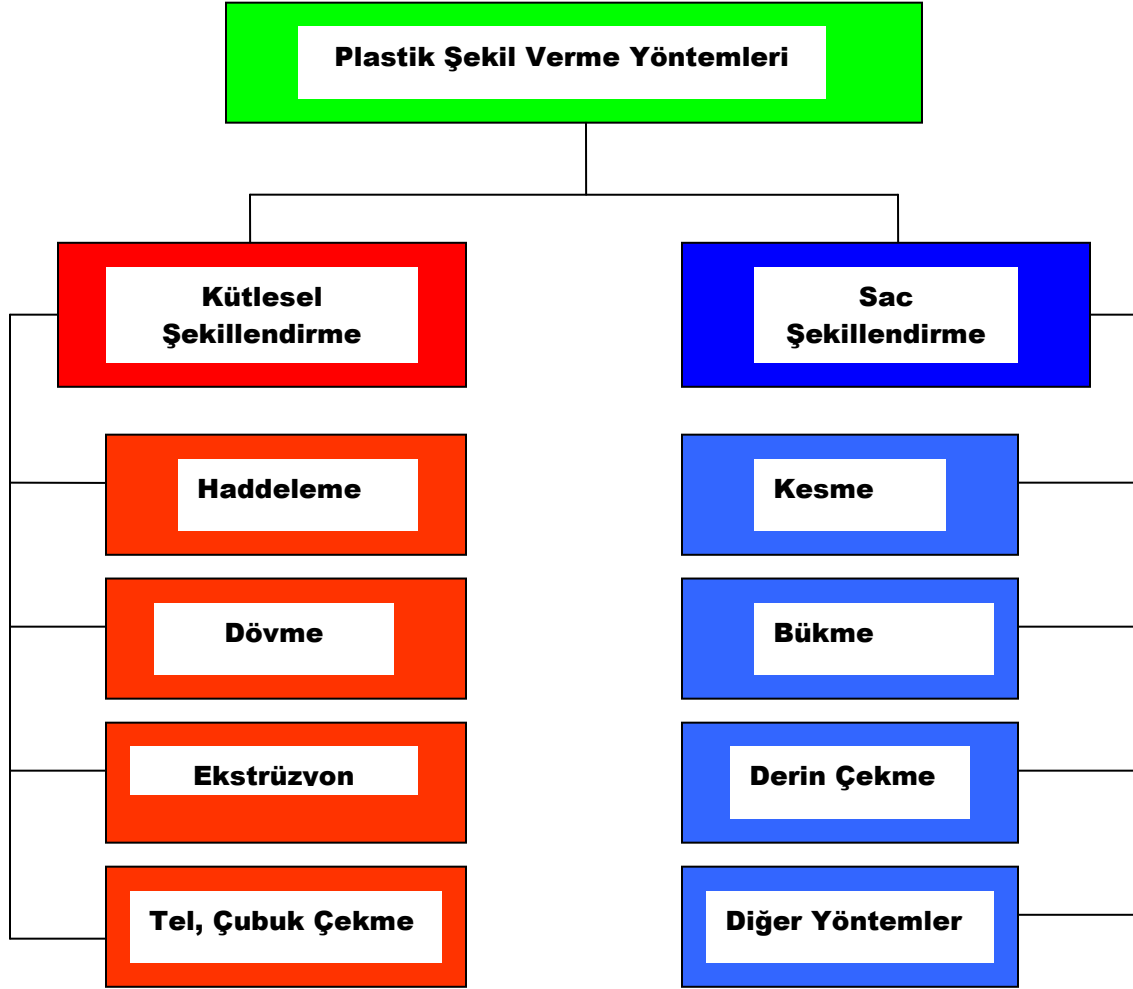
(Ders Kitabı 18. Bölüm)

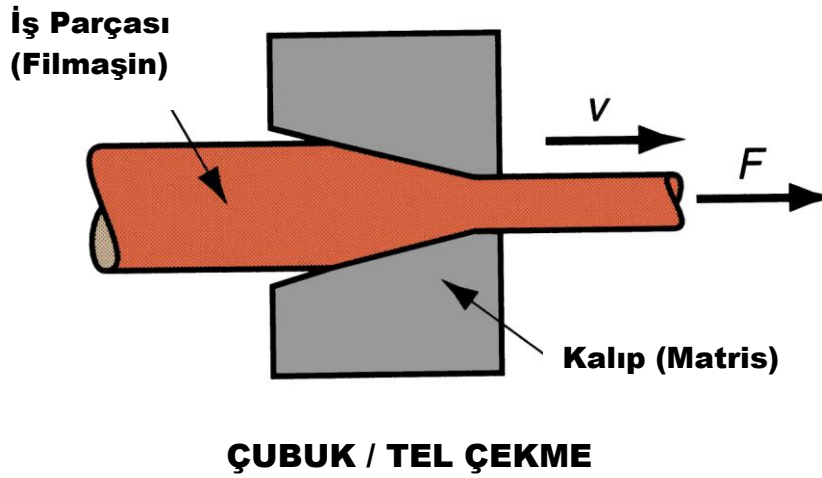
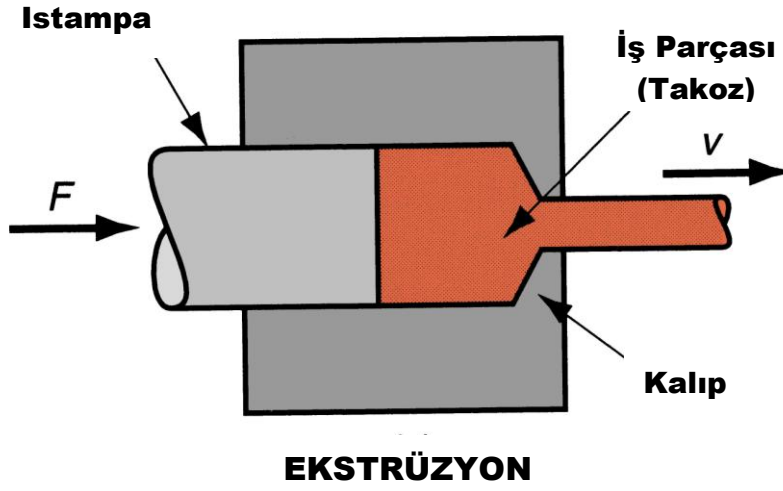
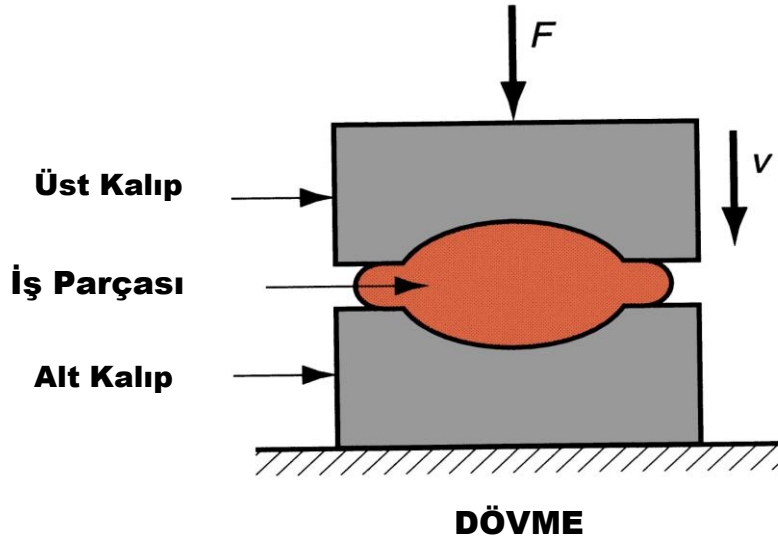
GİRİŞ

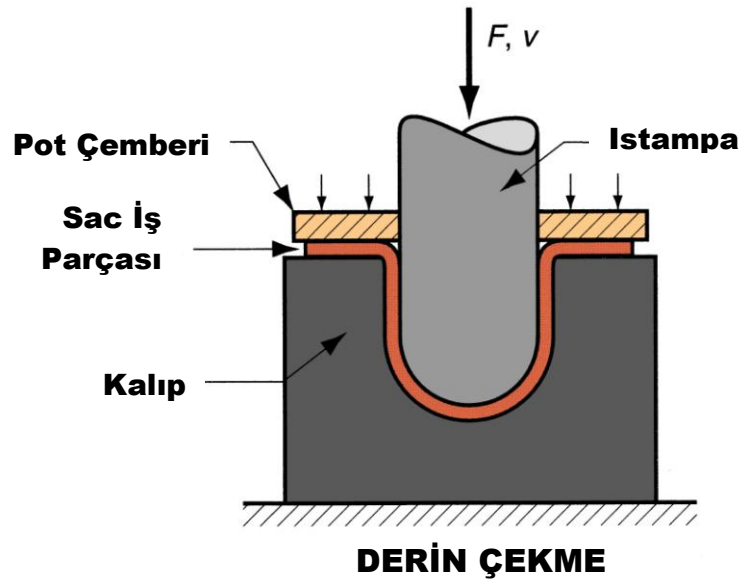
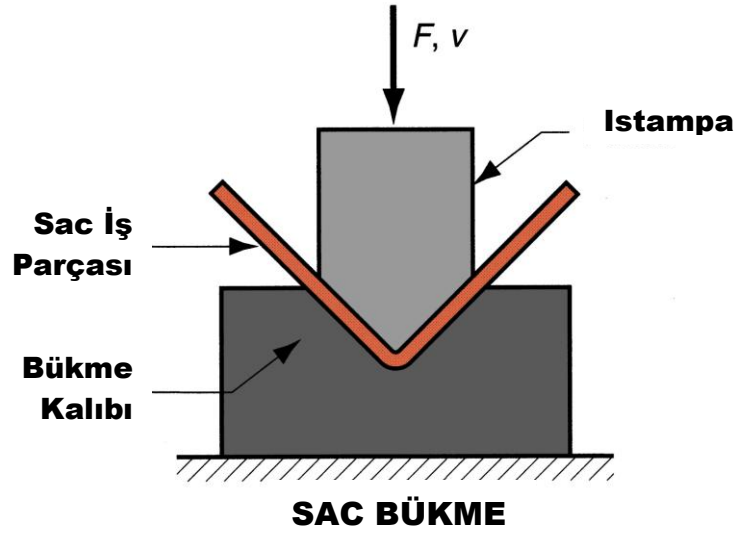
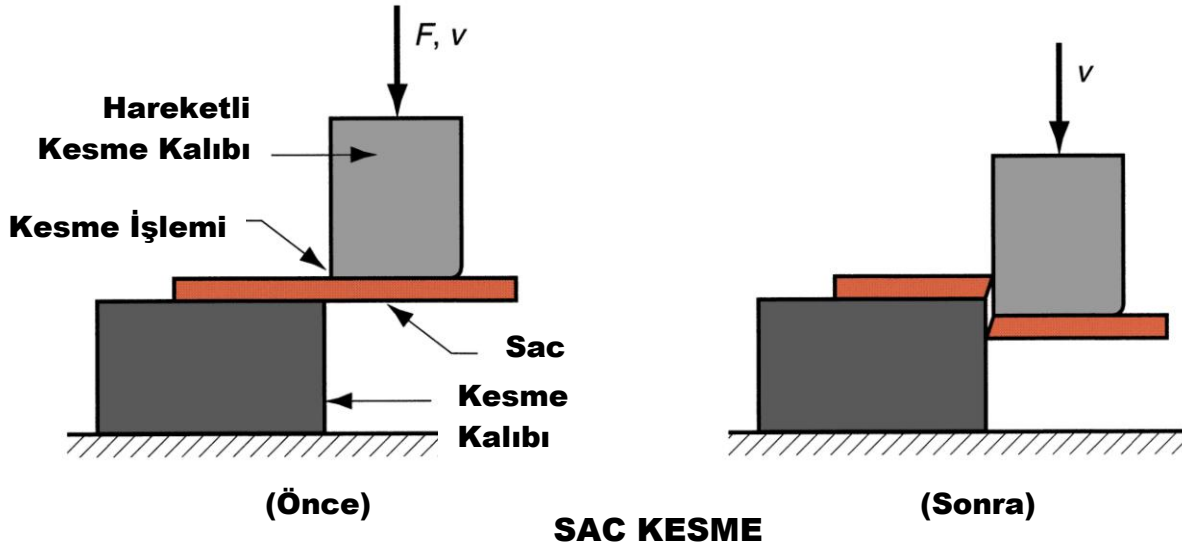
Plastik şekillendirilmede malzeme katı halde, hacim değişikliğine uğramadan, kristal yapı özelliklerini koruyarak ve kırılma gibi herhangi bir süreksizlik yaratmadan kalıcı olarak şekil değiştirmektedir. Şekillendirme işlemlerinde gereç olarak kalıplardan yararlanılmaktadır. Kalıpların malzeme ile doldurulması (kalıbın belirlediği şeklin malzemeye verilmesi) malzeme katı halde olduğundan yüksek gerilmelere, dolayısıyla kuvvetlere ihtiyaç göstermektedir. Dolayısıyla plastik şekillendirmede malzemeyi süreksizlik yaratmadan şekillendirebilmenin (malzeme özellikleri) yanı sıra gerekli kuvvet ve enerjinin de sağlanması (mekanik analiz) ve bunların önceden belirlenebilmesi çok önemlidir.

Plastik şekil verme yöntemleri genellikle iki ayrı bölüme ayrılmaktadır. Kütlesel Şekillendirme olarak isimlendirilen ilk bölümde malzeme her üç yönde de şekil değişimine uğramaktadır. Bu yöntemleri tanımlayan diğer bir ölçüt de parçanın “yüzey alanı/hacim” oranıdır. Kütlesel şekillendirme yöntemlerinde bu oran düşüktür. Sac şekillendirme olarak isimlendirilen ikinci grupta ise şekillendirme genellikle 5 mm’ den daha ince levhalar olarak tanımlanan saclara verilmektedir. Şekil değişimi yüzeyde yer alan iki yönde gelişmekte, kalınlıktaki değişim ise genelde ihmal edilmektedir. Sac şekillendirme işlemlerini belirleyen diğer ölçüt ise oldukça yüksek olan parçanın yüzey alanı/hacim oranıdır.

PLASTİK ŞEKİL VERME YÖNTEMLERİNİN SINIFLANDIRMASI







MEKANİK ESASLAR

Malzemeye plastik şekil verme kalıplar vasıtasıyla gerçekleştirilir. Diğer bir deyişle uygulanan gerilmeler kalıplar vasıtasıyla parçaya iletilir ve gerilmelerin (çekme gerilmeleri pozitif, basma gerilmeleri negatif işaret almaktadır) malzemenin akma dayanımını aşması durumunda plastik şekil değişimi başlar. Gerilme halinin sürdürülmesiyle malzeme kalıbın sahip olduğu şekli alır. Bu ders kapsamında yapılan gerilme ve kuvvet analizleri çok hassas sonuçlar vermemekle birlikte $\pm\%20$ hassasiyet aralığında yer aldığı görülmektedir. Kalıp imalatında ve işlemleri yapacak makinenin seçiminde belli oranlarda “Emniyet Katsayısı” kullanılması halinde yeterli doğrulukta sonuçlara ulaşılabilmektedir. Plastik şekil verme işleminde malzemeye çok eksenli gerilme hali etkimektedir. Bu nedenle basit tek eksenli zorlama hali için kullanılan analiz burada geçerli olamamaktadır. Çok eksenli gerilme hali için yapılan analizlerde sadece asal gerilmelerin (en büyükten en küçüğe doğru σ_1 , σ_2 ve σ_3 olacak şekilde sıralanan ve kayma gerilmeleri içermeyen durum) etkidiği varsayılarak basitleştirmeye gidilmektedir. Böyle bir durumda akmanın başlayabilmesi için gerilmelerin bazı kombinasyonlarının “Akma Kriterleri” olarak tanımlanan şartları sağlaması gerekmektedir. Metaller için iki önemli akma kriterinden önemli ölçüde yararlanılmaktadır:

a. Tresca (En Büyük Kayma Gerilmesi) kriteri:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_0$$

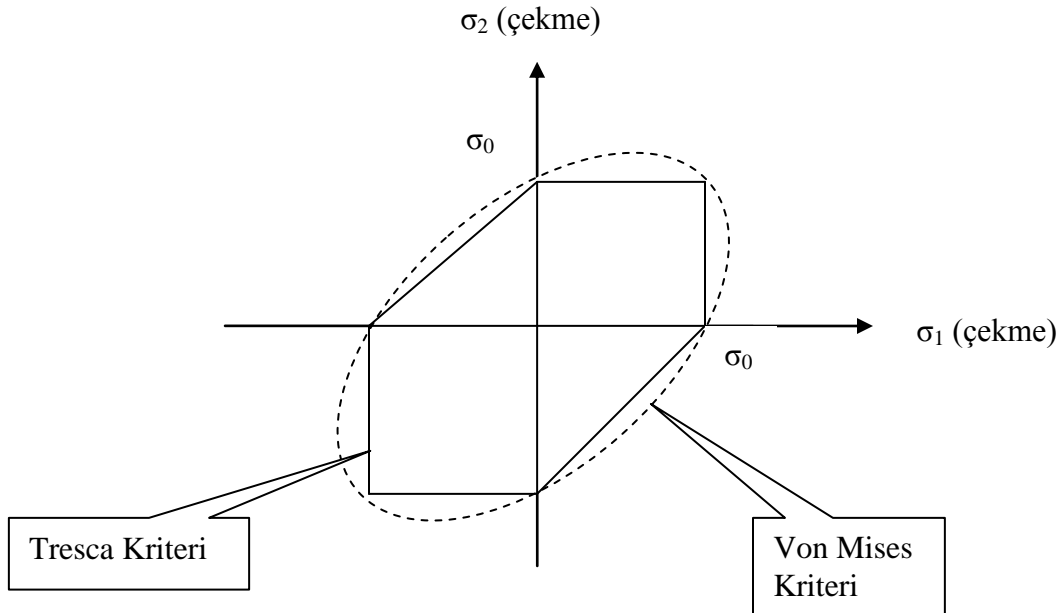
Buna göre eşitliğin sol tarafındaki ifadede yer alan malzemeye uygulanan aritmetik olarak en büyük ve en küçük asal gerilmelerin farkı eşitliğin sağ tarafında yer alan

malzemenin akma dayanımı σ_0 değerini aştığında akma olayı başlamaktadır.

b. Von Mises (Distorsiyon Enerjisi) Kriteri:

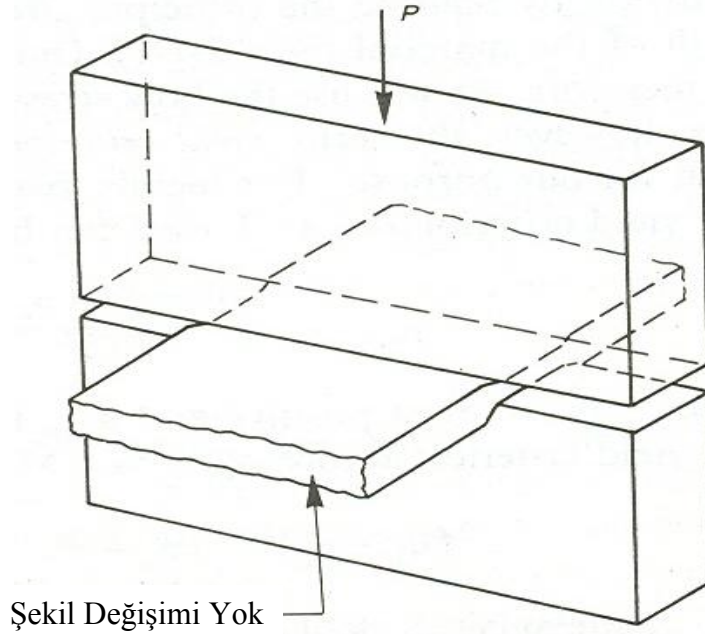
$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2.\sigma_0^2$$

Burada da eşitliğin sol tarafında yer alan ifade malzemenin akma dayanımının karesinin iki katından büyük olduğunda akmanın başlayacağı ifade edilmektedir.



Her iki kriteri grafik olarak göstermek için “Düzlem Gerilme” halinde (örneğin ince saclarda düzlem içindeki iki yönde gerilmelerin etkidiği, kalınlı yönünde gerilme taşımadığı var sayılır), yani $\sigma_3=0$ olması durumunda yukarıdaki şekilden yararlanılabilir. Burada düzgün olmayan altıgen olarak uzanan çizgiler Tresca kriterine göre çizilmiş olup bu çizgilerin sınırladığı alanın dışında kalan gerilme kombinasyonlarında malzemenin plastik olarak akacağı kabul edilmektedir. von Mises kriteri ise kesikli çizgi ile belirtilen ve eğilmiş durumda konumlanan elips ile ifade

edilmektedir. Elipsin dışında kalan bölgede oluşacak gerilme kombinasyonları malzemenin akmasına neden olacaktır. Görüldüğü gibi bazı özel hallerde Tresca ve von Mises kriterleri aynı sonuçları vermektedir. Örneğin tek eksenli çekme ve basma, iki eksenli eşit çekme ve basma durumlarında her iki kriter de aynı sonucu vermektedir. Bunların dışında Tresca kriteri daha tutucu sonuçlar vermektedir. Bunun en önemli örneği “Düzlem Birim Şekil Değişimi” halinde karşımıza çıkmaktadır. Bu durum daha çok kalın parçaların deformasyonunda görülmekte olup bir yöndeki şekil değişiminin olmadığı ($\epsilon_3=0$) varsayımına dayanmaktadır.



Örneğin yukarıdaki şekilde olduğu gibi dar iki kalıp arasında sıkıştırılan bir malzemenin kalınlığı azalmakta, parça boyu deformasyon bölgesinde artmakta ancak parça genişliğinde sürtünme nedeniyle (sürtünmenin uzun kenar üzerinde kısa kenardan daha etkin olması ve hareketi kısıtlaması nedeniyle) herhangi bir değişim olmamaktadır. Bu durumda genişlik yönündeki birim şekil değişimi sıfır olup düzlem birim şekil değişimi şartı gerçekleşmektedir. Böyle bir durumda şekil değişiminin daha zor gerçekleşmesi ve daha

yüksek gerilmelerde bunun gerçekleşmesi beklenmelidir. Örneğin bu durumda şekil değişimine neden olan gerilme tek eksenli akma dayanımının % 15 fazlasına ulaşmaktadır. Diğer bir deyişle düzlem birim şekil değişimi şartlarında akma gerilmesi σ_0 değil bunun %15 fazlası olan $1.15\sigma_0$ gerilmesinin aşılması gerekmektedir. Bu durum von Mises kriterinde dikkate alınmıştır. Dolayısıyla düzlem birim şekil değişimi gibi bazı zorlanma hallerinde von Mises ve Tresca kriterleri arasındaki fark % 15'i bulmaktadır.

Plastik şekillendirme sırasında hacim sabitliği korunmaktadır. Bunun mekanik olarak açıklaması aşağıdaki gibi

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$$

üç yöndeki birim şekil değişimi miktarlarının aritmetik toplamının sıfır olması şeklinde yapılmaktadır.

Yuvarlak parçaların çekilmesinde ve basılmasındaki gibi aksenal simetrisinin olmadığı zorlanma şekillerinde (farklı doğrultularda farklı gerilmelerin etkimesi ve/veya farklı şekil değişimlerinin meydana gelmesi) efektif gerilme ve efektif birim şekil değişimi değerlerinin dikkate alınarak şekil değişimi analizlerinin yapılması gerekmektedir. von Mises tarafından efektif gerilme $\bar{\sigma}$;

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{1/2}$$

şeklinde ve efektif birim şekil değişimi $\bar{\varepsilon}$ ise;

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 \right]^{1/2}$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Karmaşık zorlanmanın söz konusu olduğu durumlarda akma eğrisini ifade etmek için kullanılan Holloman Bağıntısı efektif değerler cinsinden

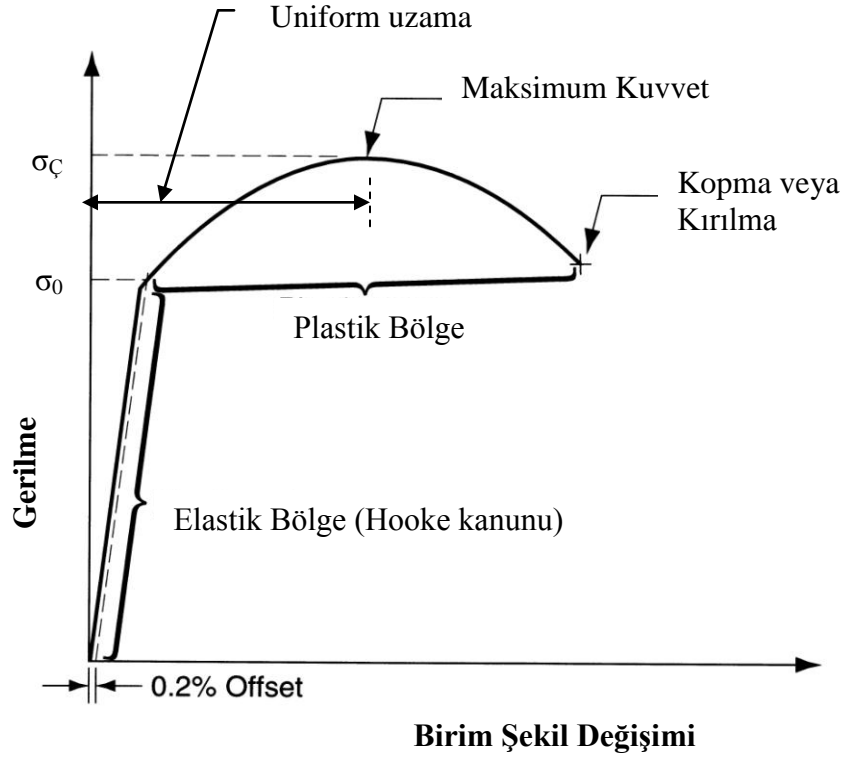
$$\bar{\sigma} = K.\bar{\varepsilon}^n$$

şeklinde ifade edilmektedir. Ancak tek eksenli simetrik zorlamalar sonucu oluşan şekil değişimlerinde (örneğin tek eksenli yığıma veya çekme türü zorlamalarda) efektif değerler o yöndeki birim şekil değişimi ve gerilme değerlerine eşit olmaktadır.

$$\bar{\sigma} = \sigma_1 \quad \bar{\varepsilon} = \varepsilon_1$$

Sonuç olarak tek eksenli çekme deneyleri sonunda elde edilen malzemeye ait gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrisi aynı zamanda karmaşık yükleme koşullarında kullanılması gereken akma eğrisi ile aynı özellikleri göstermektedir.

MALZEME DAVRANIŞI



Malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemede çekme deneylerinden yararlanır. Bu deneyler sırasında elde edilen gerilme-birim Şekil değişimi diyagramına ait bir örnek yukarıda verilmektedir. Burada belirtilen gerilme ve birim Şekil değişimi mühendislik değerleri olup deney parçasının başlangıçtaki değerlerine göre hesaplanmaktadır.

Mühendislik gerilmesi:

$$s = \frac{F}{A_0}$$

Mühendislik Birim Şekil Değişimi:

$$e = \frac{l - l_0}{l_0}$$

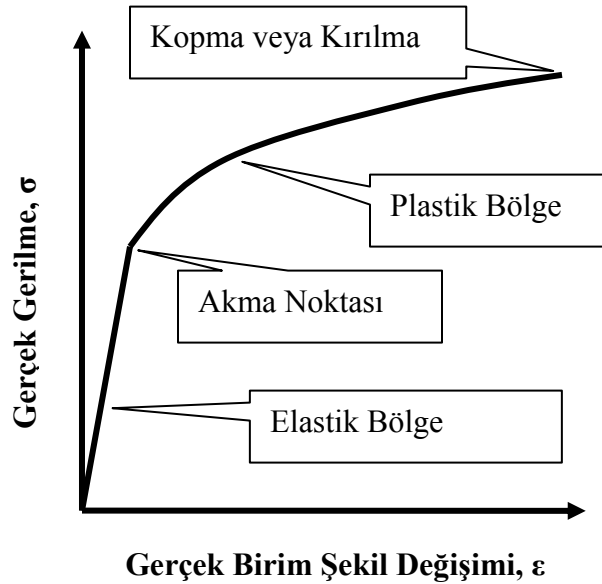
Şeklinde hesaplanmakta olup A_0 ve l_0 deney parçasının başlangıçtaki kesit alanı ile ölçü boyunu tanımlamaktadır. Küçük Şekil değişimlerinin geçerli olduğu, çoğunlukla elastik bølge içinde kalınması halinde bu bağıntılar yeterli

olmaktadır. Ancak büyük plastik şekil değişimlerinin gerçekleştiği hallerde (ki metal şekillendirmede durum böyledir) malzemenin başlangıç değerlerine dayanarak hesap yapmak anlamsız olmaktadır. Bu nedenle plastik şekil verme analizlerinde gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi verileri kullanılmaktadır.

Gerçek Gerilme:
$$\sigma = \frac{F}{A} = s(1 + e)$$

Gerçek Birim Şekil Değişimi:
$$\varepsilon = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln(1 + e)$$

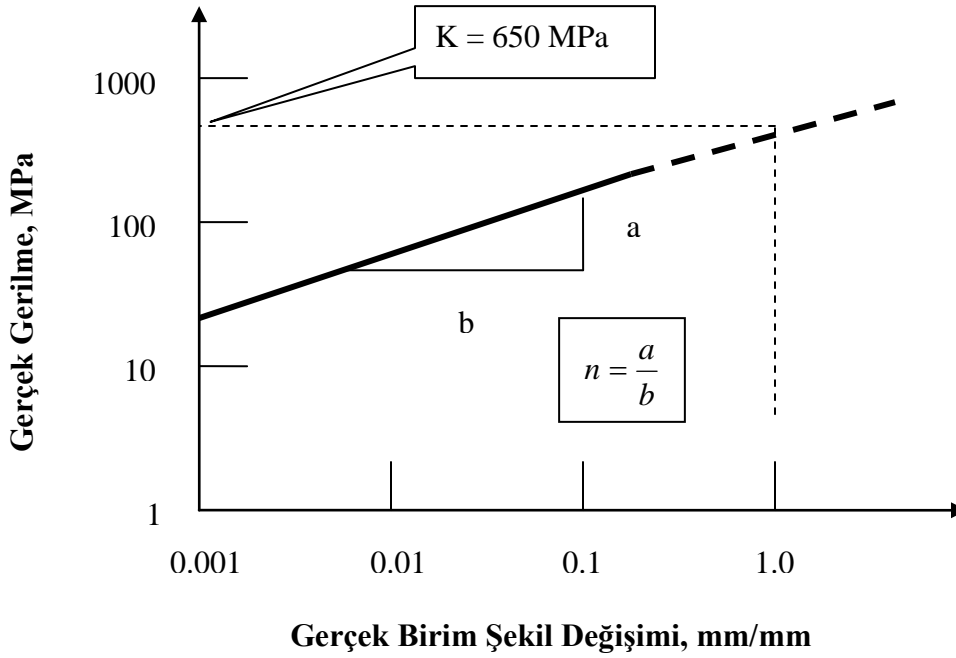
olarak belirlenmekte ve diyagram aşağıdaki görünümü almaktadır.



Bu diyagram aynı zamanda malzemelerin “akma eğrisi” olarak anılmakta ve esas olarak tek eksenli veriler içermesine rağmen çok eksenli zorlanma halleri için yapılacak analizlerde (efektif gerilme ve birim şekil değişimi değerlerinin kullanıldığı haller) de yararlanılmaktadır. Bu diyagramın matematiksel ifadesi, teknik literatürde “Holloman Bağıntısı” olarak bilinen aşağıdaki üstel bağıntı ile verilmektedir:

$$\sigma = K.\varepsilon^n \quad [\text{MPa}]$$

Burada K malzemenin dayanım sabiti [MPa] olup n ise pekleşme üsteli olarak tanımlanmaktadır. Eğer Holloman bağıntısı logaritmik ölçeğe taşınacak olursa aşağıda görüldüğü gibi bir doğru elde edilir.



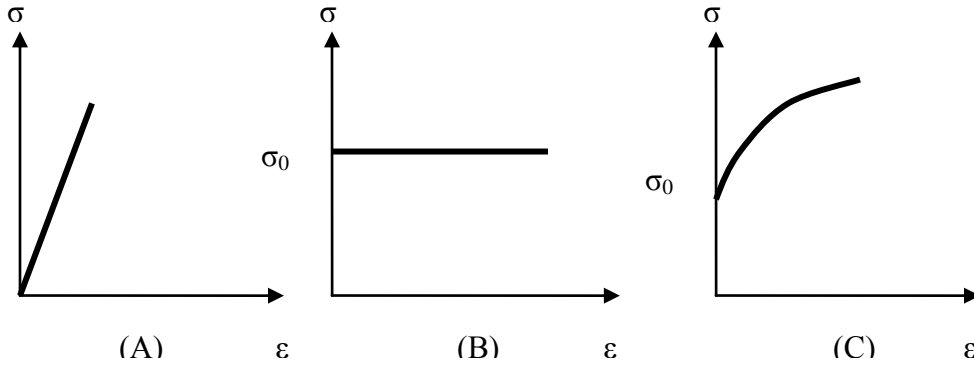
Bu diyagram sayesinde malzeme özellikleri olan K ve n değerleri hesaplanabilir. K malzemenin dayanımı hakkında doğrudan bilgi verir, n ise deformasyon sertleşmesinin o malzemede ne kadar etkili olduğu hakkında bilgi verir.

Basma durumunda ise, parçanın ilk yüksekliğinin h_0 ve son yüksekliğinin h olması halinde gerçek birim şekil değişimi

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{h}{h_0}\right)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bu durumda basma birim şekil değişimi negatif değer almaktadır.

Malzemelerin plastik şekil değişimini sağlayan gerçek gerilme değeri “Akma Gerilmesi” olarak isimlendirilir. Malzemelerin gerilme-şekil değişimi özelliklerinde bazı farklılıklar görülebilir. Aşağıda uygulamalarda karşılaşılabilecek veya basitleştirme yapılarak elde edilmiş diğer bazı akma eğrilerine örnekler verilmektedir.



A: İdeal Elastik $\sigma = E.\epsilon$ (elastik zorlanmada)

B: İdeal Plastik $\sigma = \sigma_0$ (sıcak şekillendirmede)

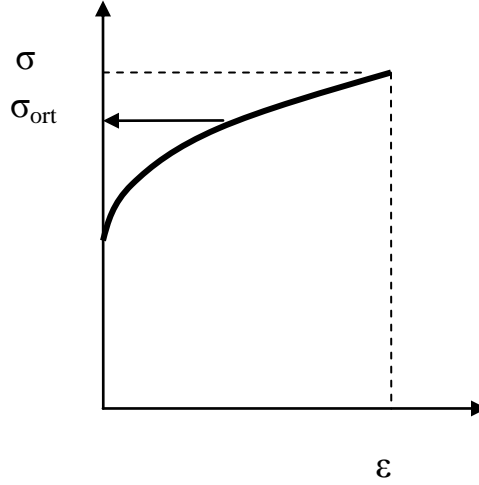
C: İdeal Pekleşen $\sigma = K.\epsilon^n$ (soğuk şekillendirmede)
veya

$$\sigma = \sigma_0 + K.\epsilon^n$$

Soğuk şekil değişiminin homojen olmadığı bir kesitte malzemenin akma dayanımını temsil etmesi amacıyla bir “Ortalama Akma Gerilmesi (σ_{ort})” değerine ihtiyaç duyulur. Bu değer az veya çok pekleşmiş bölgeleri içine alan bir ortalama değerdir. Hesaplanan bu değer zorlanan kesit alanının çarpılması ile kuvvet hesaplanabilir. Ortalama akma gerilmesi değeri malzeme sabitleri K ve n'nin bilinmesi ve en büyük birim şekil değişimi değerinin bilinmesi durumunda;

$$\sigma_{ort} = \frac{K \cdot \varepsilon^n}{1+n}$$

şeklinde yaklaşık olarak hesaplanabilir.



Pekleşme üsteli metalden metale bazı farklılıklar göstermekle birlikte genelde 0.05 ile 0.35 aralığındaki değerleri almaktadır.

Holloman üstel bağıntısında olduğu gibi akma dayanımı değerinin açıkça belirtilmediği durumlarda gerçek birim şekil değişimi değeri için ($\varepsilon = 0.002$) varsayımı yapılarak malzemenin akma dayanımı, yani şekil değişimi başlangıcındaki akma gerilmesi değeri yaklaşık olarak tahmin edilebilir.

SICAKLIĞIN ETKİSİ

Malzemelerin gösterdiği mekanik davranış sıcaklıkla değişmektedir. Özellikle metal şekillendirme işlemlerinde arzulanan düşük akma gerilmesi ve yüksek süneklik sıcaklıktan etkilenmektedir. Sıcaklığın etkisi malzemenin sıcaklığı (veya şekillendirme ortamının sıcaklığı) ergime sıcaklığına doğru yaklaştıkça daha da artmaktadır. Metalik veya kristal yapıya sahip malzemelerin ergime sıcaklıkları büyük farklılıklar gösterdiğinden sıcak/soğuk ayırımı için malzemelerin ergime sıcaklığını da içeren bir ölçüte ihtiyaç duyulmuştur. “Benzeş Sıcaklık” olarak adlandırılan bu parametre gerçekte birimsiz olup 0 ile 1 arasında değerler almaktadır. Benzeş Sıcaklık T_b ;

$$T_b = \frac{T_s [K]}{T_e [K]}$$

şeklinde mutlak sıcaklık cinsinden çalışma sıcaklığının T_s , malzemenin ergime sıcaklığına T_e oranı olarak tanımlanmaktadır. Sıcaklığın mutlak sıfır değerine yaklaşması durumunda benzeş sıcaklık da sıfır değerine yaklaşmakta, sıcaklığın malzemenin ergime sıcaklığına yaklaşması halinde ise benzeş sıcaklık bir değerine yaklaşmaktadır. Çalışma sıcaklığı aralıkları benzeş sıcaklığa göre;

- Soğuk (0 < T_b < 0.3)
- Ilık (0.3 < T_b < 0.5)
- Sıcak (0.5 < T_b < 0.8)

şeklinde sınıflandırılmaktadır.

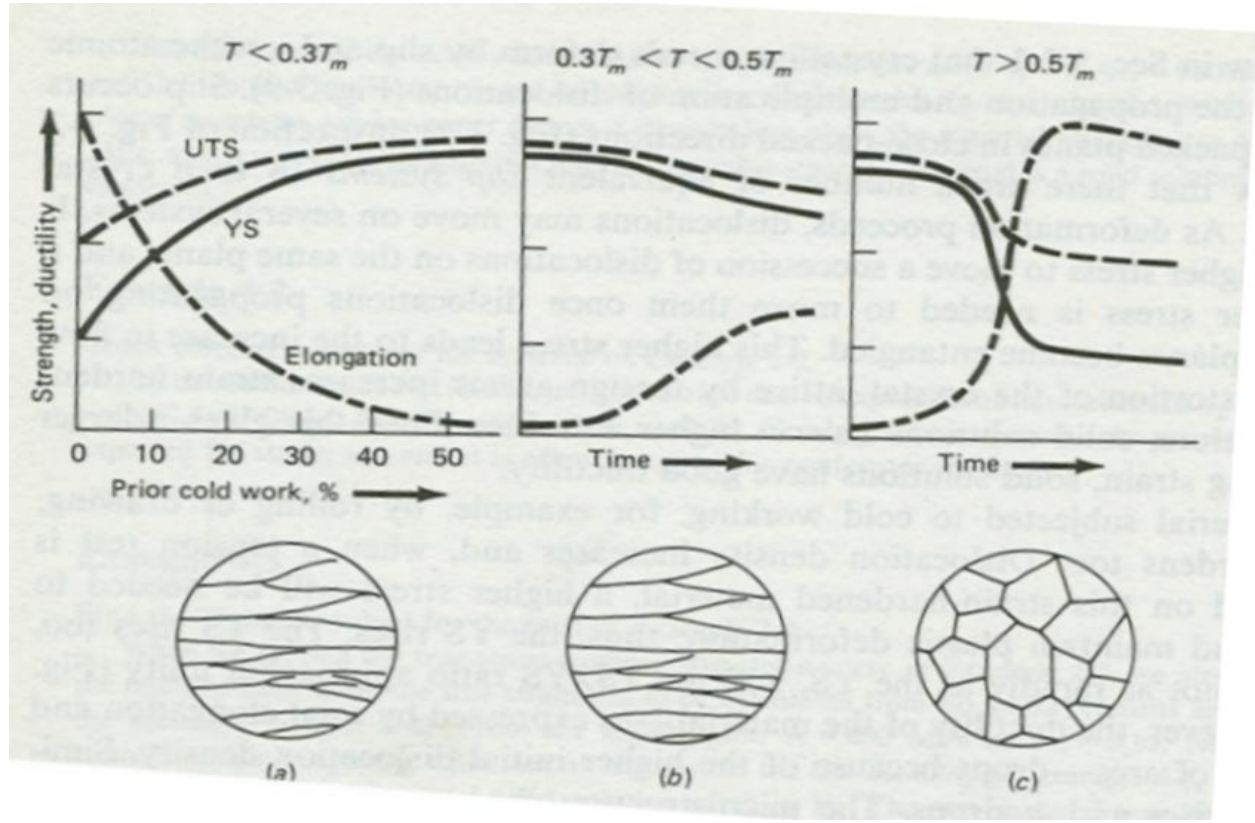
i. Soğuk Şekillendirme:

Çelik, alüminyum, bakır gibi birçok metal ve alaşım için oda sıcaklığı ve bunun altındaki sıcaklıklar soğuk şekillendirme aralığına girmektedir. Malzeme soğuk şekillendirildiğinde pekleşmektedir. Yani soğuk şekil değişimiyle birlikte dayanımını da arttırmaktadır. Bunun nedeni şekil değişimiyle yeni dislokasyonlar yaratılmakta bunların hareketleri gerek birbirleriyle gerekse başka engellerle git gide daha zor gerçekleşir hale gelmektedir. Önceki bölümde gösterilen çekme diyagramı soğuk bölgede görülen davranışı özetlemektedir. Dolayısıyla soğukta pekleşme sonrası ulaşılabilecek gerilme (dayanım) seviyesinin belirlenmesinde Holloman bağıntısından yararlanılmaktadır. Soğuk şekil değişimi sırasında oluşan pekleşme etkisinin yok edilmesi için malzemeye yeniden kristalleşme tavı uygulanmaktadır.

Soğuk Şekil Değişimi

Toparlanma

Yeniden Kristalleşme



**Soğuk Şekil değiştiren
Taneler**

**Kristal yapıda bir
değişiklik yok**

**Yeniden kristalleşmiş
taneler**

Ayrıca soğuk şekil değişiminin gerektirdiği yüksek kuvvet ve enerji kullanımının önüne sıcakta çalışarak geçilmektedir.

Soğuk Şekillendirmenin Avantajları:

- 1. Yüksek hassasiyet, daha yakın toleranslar,**
- 2. Daha iyi yüzey kalitesi,**
- 3. Dayanımda artış,**
- 4. Tanelerin yönlenmesiyle o yönde elde edilen daha iyi Mekanik performans özellikleri,**
- 5. Parçanın ısıtılmasına gerek duyulmaması.**

Soğuk Şekillendirmenin Dezavantajları:

- 1. Daha yüksek kuvvet ve/veya enerjiye ihtiyaç duyulması,**
- 2. İşlem öncesinde parçanın yüzeyinin temiz olması ve oksit gibi tabakaları içermemesi gereği,**
- 3. Düşük süneklik yüzünden şekillendirilmenin sınırlı olarak uygulanabilmesi.**

ii. Ilık Şekillendirme:

Benzeş sıcaklığın 0.3 ile 0.5 aralığındaki çalışma sıcaklıklarında yapılan şekillendirme işlemleri ılık şekillendirme olarak isimlendirilir. Pekleşme etkisinin soğuktaki kadar hissedilmeyip sünekliğin de soğuktakinden daha yüksek olduğu işlemlerdir. Çok yaygın olarak kullanılmayıp daha çok özel durumlarda yararlanılmaktadır.

Ilık Şekillendirmenin Avantajları:

- 1. Soğuk şekillendirmedekinden daha düşük kuvvet ve enerjiye ihtiyaç duyulması,**
- 2. Soğuk şekillendirme sırasında ara yumuşatma (yeniden kristalleştirme) tavına olan gereksinimi azaltması,**
- 3. Çok hızlı pekleşen malzemelerin (Hadfield Çeliği gibi) talaşlı imalatı ve şekillendirilmesinde kolaylık sağlaması,**
- 4. Daha karmaşık parçaların şekillendirilmesinde kolaylık sağlaması.**

iii. Sıcak Şekillendirme:

Sıcak şekillendirme, benzeş sıcaklığın 0.5 değerinin üzerinde ve yaklaşık olarak 0.8'e kadar olan çalışma sıcaklıklarında gerçekleştirilen işlemleri kapsar. Yeniden kristalleşme benzeş sıcaklığın 0.5 veya üzerindeki sıcaklıklarda gerçekleşmektedir. Yeniden kristalleşme yayınma kontrollü bir proses olup burada yayınmanın katkısıyla dislokasyon yoğunluğu azalmakta, dolayısıyla dayanım azalırken süneklik artmakta ve yapı dislokasyon yoğunluğu azalan ve yeniden kristalleşen bir görünüm almaktadır. Böylece yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda yapılan şekillendirme işlemlerinde malzeme pekleşmemekte ve süneklik önemli ölçüde artmaktadır. Ayrıca sıcaklık malzemenin akma dayanımını düşürmekte ve şekillendirme sırasında daha düşük kuvvetlere ihtiyaç duyulmaktadır. Sıcak şekil değişimi sırasında oluşan dislokasyonlar anında ve dinamik olarak etkin olan yayınmanın katkısıyla yok olmakta ve dislokasyon sayısı deformasyonla birlikte artmamaktadır. Bu nedenle malzeme pekleşmemekte, şekillendirebilme kabiliyeti artmaktadır.

Sıcak Şekillendirmenin Avantajları:

- 1. Bir defada parçaya büyük şekil değişimi verilebilmesi,**
- 2. Daha düşük kuvvet ve enerjiye ihtiyaç duyulması,**
- 3. Malzemelerin daha yüksek şekillendirilebilirliğe sahip olması,**
- 4. Parçanın dayanımının artmaması ve sonraki işlemlere daha uygun özellikler göstermesi.**

Sıcak Şekillendirmenin Dezavantajları:

- 1. Düşük boyut hassasiyeti,**
- 2. Daha yüksek toplam enerjiye (parçanın ısıtılmasından kaynaklanan) ihtiyaç duyulması,**
- 3. Kötü yüzey kalitesi,**
- 4. Daha kısa kalıp ömrü.**

Bazı malzemelerin şekillendirilebilme özellikleri sıcaklıktan ve ani sıcaklık değişimlerinden olağanüstü şekilde etkilenebilmektedir. Örneğin yüksek hız çelikleri, ferritik paslanmaz çelikler vb. metaller sıcak şekillendirilmeleri sırasında soğuk kalıplarla temas ederler ve aniden yüzeyleri soğur ve şekillendirilebilirliklerini bu bölgede kaybederler. Sonuçta şekillendirme sırasında kırılmayla biten hasarlar oluşur. Bunu önlemek amacıyla kalıpların sıcaklığının da parça sıcaklığına yakın tutulduğu “İzotermal Şekillendirme” uygulamalarına gidilmektedir. Ancak bu uygulama doğal olarak kalıp ömürlerinde büyük azalmaya neden olmaktadır.

Sıcak şekillendirme sırasında bazı özel şartların sağlanması durumunda polikristal yapıdaki metal ve alaşımlarda çok büyük süneklik veya şekillendirilebilme özelliği kazandığı görülür. “Süper plastiklik” adı verilen bu olayda malzemenin çok ince tane yapısına sahip olması ve şekillendirme sırasında deformasyon hızının oldukça yavaş uygulanması gerekmektedir. Böylece şekil değişimi sırasında kayma mekanizmasının yanı sıra tane sınırı kayma mekanizmasıyla dislokasyon sürünmesi (tırmanma-kayma mekanizması) mekanizmaları da aktif hale geçerek parçanın hasara uğramadan alabileceği şekil değişimi miktarını % 1000 gibi (başlangıç boyunun 10 katı) olağan üstü değerlere arttırması gerçekleştirilmektedir.

Kristal yapıya sahip malzemelerin, özellikle metal ve alaşımların üretimlerinde İngot Metalürjisi (İ/M) yöntemi kullanıldığında malzeme önce kimyasal bileşiminin ayarlanabilmesi için ergitilmekte, daha sonra ise katılaştırılmaktadır. Katılaşma sonrası yapı “Döküm Yapı” özellikleri göstermektedir. Döküm yapıyı karakterize eden özellikler şunlardır:

- 1. Katılaşmanın ve soğumanın genelde yavaş olması sonucunda iri tane yapısı,**
- 2. Katılaşma sırasında katılaşan tanelerin sütünsal ve ağaç dalları şeklinde (dendritik yapı) gelişmesi,**
- 3. Yapıda kimyasal bileşim farkı olarak nitelendirilen segregasyonların oluşması,**
- 4. Döküm sırasında gaz boşluklarının oluşması,**
- 5. Genelde bu yapısal özelliklerden kaynaklanan kırılğan bir yapı.**

Döküm yapıya sahip malzemeler şekil verme işlemlerine uygun değildir. Bunun için döküm yapı kırılarak “Yoğruk Yapı” elde edilir. Yoğruk yapının elde edilebilmesi için döküm yapıdaki malzemeye en az % 75 oranında sıcak şekil değişimi uygulanması gerekmektedir. Sıcak dövme, haddeleme ve ekstrüzyon işlemleri buna örnektir.

Yoğruk yapının en belirgin özellikleri şunlardır:

- 1. Sıcak şekillendirme sonrası soğumanın kontrol edilmesiyle daha küçük taneli ve eşeksenel yapı,**
- 2. Yüzeğe açılmamış döküm boşluklarının kapanması,**
- 3. Segregasyonların dağıtılarak kimyasal bileşimin daha homojen hale gelmesi,**
- 4. Sülfür esaslı katışkıların deformasyon yönünde uzayarak lifli bir yapı oluşturması ve neticede yapıda “Mekanik Anizotropi” yaratması,**
- 5. Genelde daha sünek ve tok bir yapı.**

Yoğruk yapıya sahip metal ve alaşımlar soğuk veya sıcak şekillendirme yöntemlerinin gerektiği gibi uygulanması için olması gereken özelliklere sahiptir.

DEFORMASYON HIZININ ETKİSİ

Şekillendirme işlemlerinde deformasyon hızı da önemli rol oynamaktadır. Sıcak şekillendirmede pekleşme gerçekleşemediğinden pekleşme üsteli yaklaşık olarak sıfır değerini almaktadır. Bu şekillendirme işleminde akma gerilmesine ulaşıldıktan sonra şekillendirmenin başladığını ve işlem süresince akma gerilmesinin bir daha değişmediğini göstermektedir (malzemenin ideal plastik davranışında olduğu gibi). Ancak gene sıcak şekillendirmede bir başka faktörün malzemenin akma gerilmesini etkilediği görülmektedir. Bu parametre “Birim Şekil Değişimi Hızı” veya kısaca “Deformasyon Hızı” olarak bilinmekte ve birim zamandaki malzemede yaratılan birim şekil değişimi miktarındaki değişiklik olarak tanımlanarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$$

Örneğin bir basit çekme veya basma deneyinde geçerli olan gerçek deformasyon hızı şu şekilde tanımlanmaktadır:

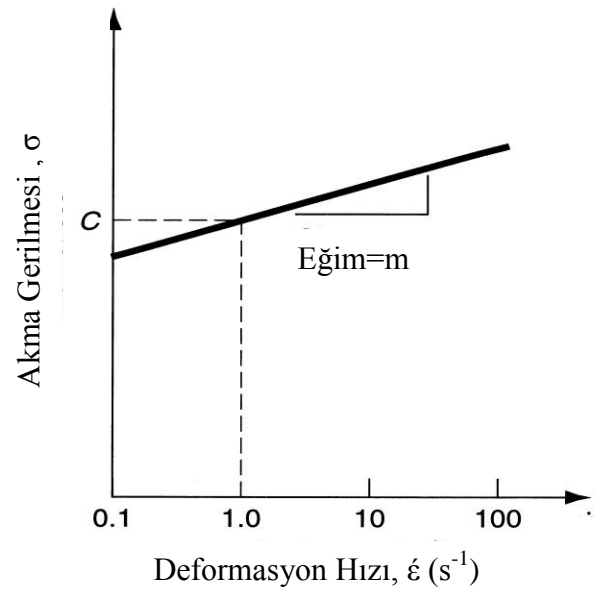
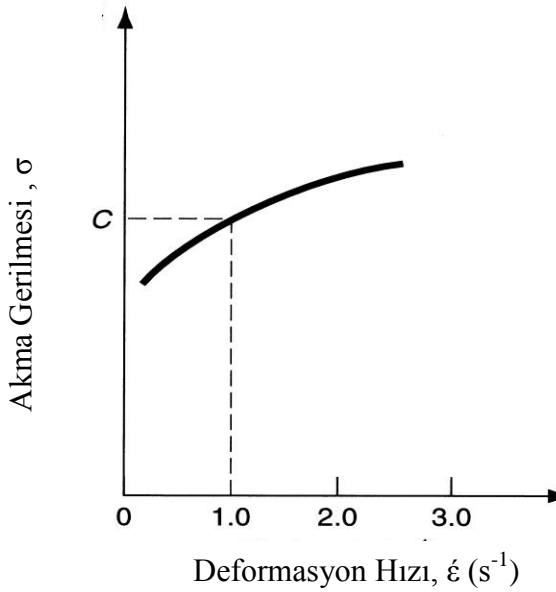
$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{h}$$

Burada v kalıbın veya makinenin çekme veya basma işlemi sırasındaki parçaya göre bağlı hızını, h ise parçanın o andaki boyu veya yüksekliğini ifade etmekte olup birimi s^{-1} 'dir (mm/s/mm). Bazı şekillendirme işlemlerinde deformasyon hızı $1000 s^{-1}$ mertebelerine ulaşabilmektedir. Yukarıdaki bağıntıdaki değişkenlerden de görüleceği gibi sabit bir deformasyon hızında şekillendirmeyi gerçekleştirmek oldukça güçtür. Sıcak şekillendirmede malzemenin akma dayanımı deformasyon hızına duyarlılık göstermekte olup

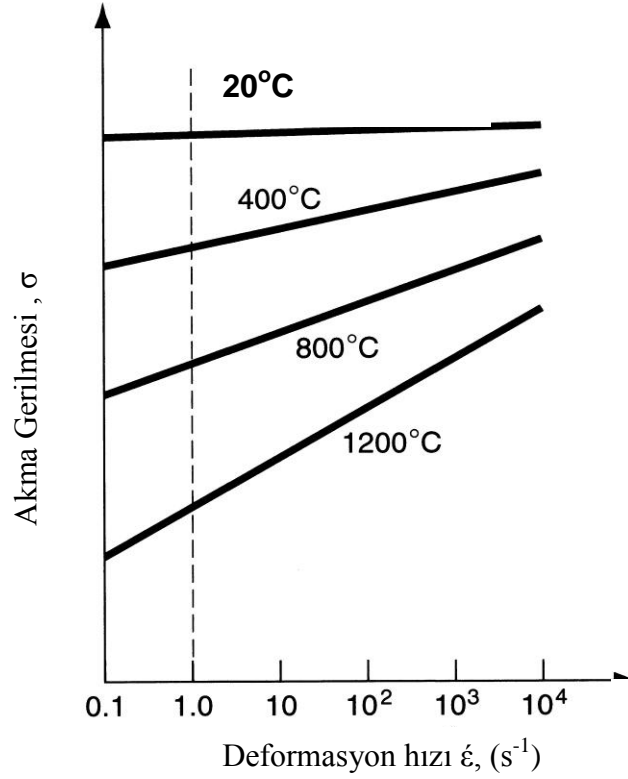
deformasyon hızı arttıkça malzemenin akma gerilmesi de yükselmektedir. Akma dayanımının deformasyon hızına olan duyarlılığı aşağıdaki üstel ifade ile gösterilmektedir:

$$\sigma = C \cdot \dot{\epsilon}^m$$

Burada C malzemenin söz konusu sıcaklıkta dayanım sabiti ve m ise gene o malzemenin söz konusu sıcaklıkta uygulanan “deformasyon hızına duyarlık üstelidir”. Dolayısıyla bu değerler malzemenin kimyasal bileşimine, içyapısına ve işlem sıcaklığına bağlıdır. Soğuktaki akma eğrisine benzer şekilde bir analiz yapılacak olursa bu bağıntının normal ve logaritmik ölçeklerdeki görünüşleri aşağıdaki gibidir:



Malzemenin akma gerilmesinin sıcaklık ve deformasyon hızıyla değişimi aşağıdaki grafikte gösterilmiştir. Buradan da görüleceği gibi artan sıcaklık C değerinin azalmasına ve m değerinin artarak malzemenin deformasyon hızına daha duyarlı hale gelmesine yol açmaktadır.



Bu durum sıcak şartlarda deformasyonun hızla gerçekleştirilmesine karşı koyan mekanizmalarla açıklanmaktadır. Sıcak şartlarda dislokasyonlar kayarak kalıcı şekil değişimine neden olurlar ve engellerle karşılaştıklarında bunları örneğin kenar dislokasyonlarda olduğu gibi tırmanma mekanizmasıyla aşarlar. Tırmanma mekanizmasının çalışabilmesi için yayınma dolayısıyla ısı aktivasyon gerekmektedir. Bu şartların sağlanması durumunda mekanizmanın çalışabilmesi için zamana da ihtiyaç vardır. Hızlı deformasyon şartlarında buna imkân tanınmadığı için mekanizma gerektiği gibi çalışmamakta ve dislokasyon hareketleri zorlaşmakta dolayısıyla malzemenin akma dayanımında artışı beraberinde getirmektedir. Yukarıdaki diyagramdan da görüleceği gibi çalışma sıcaklığı azaldıkça malzemenin deformasyon hızına duyarlılığı da azalmakta ve soğuk ortamlarda m yaklaşık olarak sıfır değerine ulaşmaktadır. Sonuç olarak soğuk şekillendirmede deformasyon hızı etkisinin ihmal edilebilecek ölçüde çok

düşük olduğu söylenebilir. Ancak bazı durumlarda soğuk şekillendirme için ama özellikle ılık şekillendirme sırasında malzemenin akma gerilmesini belirlemede aşağıdaki birleştirilmiş ifadeye başvurulabilir:

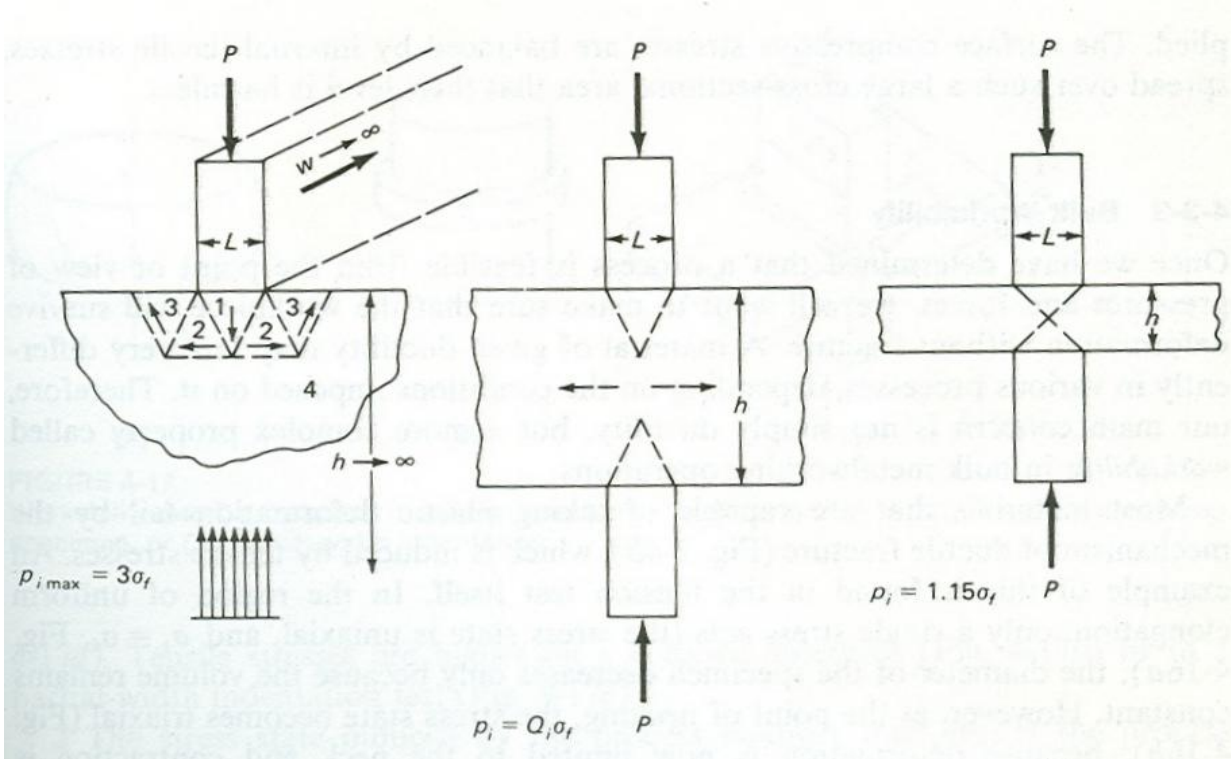
$$\sigma = A.\varepsilon^n .\dot{\varepsilon}^m$$

Burada A katsayısı malzemeye ait C ve K katsayılarının bileşimidir. Deformasyon hızına duyarlık üsteli m 'nin aldığı değerler çalışma sıcaklığı alanlarına göre yaklaşık olarak aşağıdaki gibi verilebilir:

Soğuk	0.00 < m < 0.05
Ilık	0.05 < m < 0.10
Sıcak	0.10 < m < 0.40

HETEROJEN ŞEKİL DEĞİŞİMİNİN ETKİSİ

Şekillendirme sırasında uygulanacak gerilme ve kuvveti etkileyen diğer bir unsur da homojen olmayan şekil değişimleridir.



$$\frac{h}{L} \geq 9$$

(a) Tam Batma

$$9 > \frac{h}{L} > 1$$

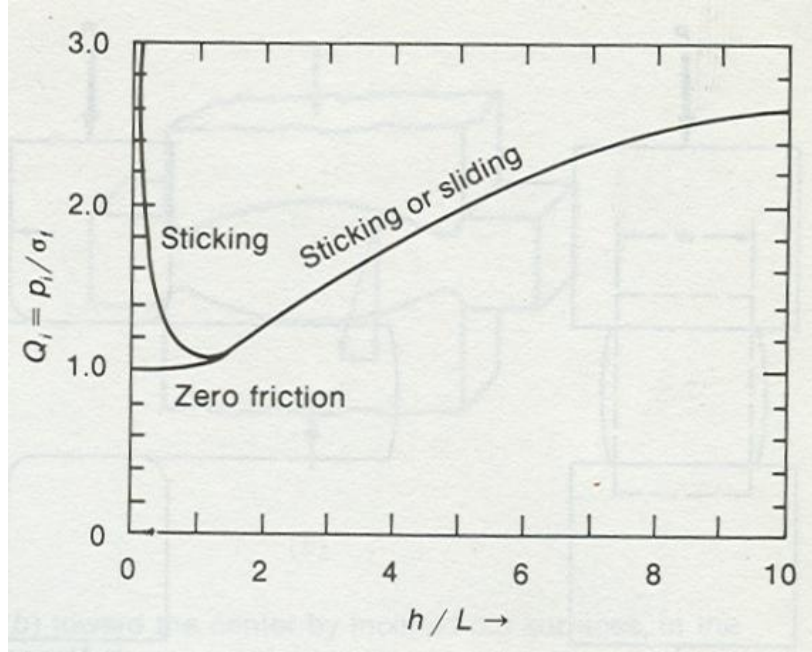
(b) Batma

$$\frac{h}{L} \leq 1$$

(c) Homojen

Örneğin yukarıdaki (a) şeklinde görüldüğü gibi L kalınlığında dar bir kalıp sonsuz yükseklikteki (çok büyük) bir malzemeye bastırılmaktadır. Bunun neticesinde malzeme akışı çok zorlaşmaktadır. Bu durumda kalıbın malzemeye batabilmesi için malzemenin akma dayanımının yaklaşık 3 misli bir gerilmeyi uygulaması gerekecektir. Diğer bir deyişle heterojen şekil değişimi şartlarında uygulanması gereken basınç veya gerilmeler yaklaşık olarak malzemenin akma dayanımının üç katına çıkmaktadır. Parça büyüklüğü

azaldığında yani (parça yüksekliği / kalıp genişliği) oranı 9 dan 1'e doğru azaldığında katsayı da 3'ten 1.15'e doğru azalmaktadır. Bu katsayı (b) şeklinde Q_f ile gösterilmekte olup grafik olarak aşağıda verilmiştir.

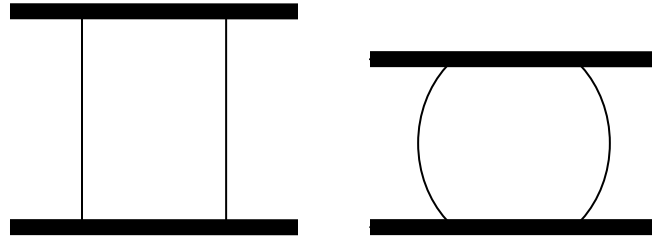


Oran 1 ve bundan az olduğunda artık şekil değişimi homojen olarak gerçekleşmekte ve düzlem birim şekil değişimi hali olduğundan katsayı (c) şeklinde görüldüğü gibi 1.15 değerini almaktadır.

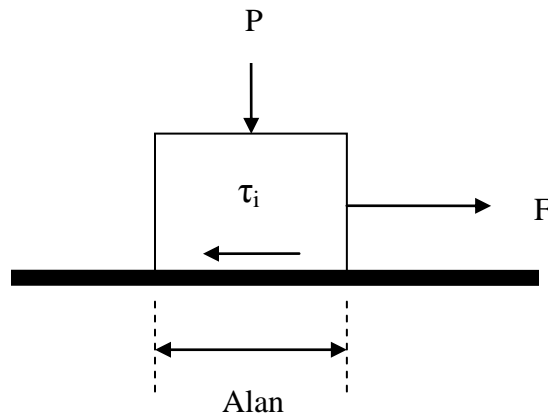
Daha büyük gerilme ve kuvvetler gerektirmesinin yanı sıra heterojen şekil değişimi parçada deformasyonun yerel olarak yığılmasına neden olarak artık iç gerilmeler meydana getirmektedir. Bu gerilmeler çok büyük değerlere ulaştığında parçada yerel olarak çatlama ve hatta kırılmalar görülebilmektedir. İstenmeyen artık iç gerilmelerin etkisinin azaltılması için parçaya "gerilme giderme tavlama" (veya duruma ve malzemeye göre "normalleştirme" tavlama) uygulanmaktadır.

SÜRTÜNME ve YAĞLAMANIN ETKİSİ

Şekillendirme işleminde kalıplar parçaya baskı uygulayıp onu deformasyona zorlamak için öncelikle temas etme durumundadır. Örneğin iki düz kalıp arasında bir silindiri basarak yığmaya zorladığımızda silindirin yüksekliği azalmakta ancak plastik şekil değişiminde hacim sabit olduğu için kesit alanı büyümeye çalışmaktadır. Bu durumda malzemenin kalıplar arasında yayılabilmesi için ara yüzeyde oluşan sürtünme kuvvetini yenmesi gerekmektedir. Bu ise şekil değişimini zorlaştırmakta ve uygulanan gerilmeyi arttırmaktadır. Silindirin yığılması sırasında görülen fıçılamaın nedeni kalıp yüzeylerinde meydana gelen ve sürtünmeden kaynaklanan büyük kayma gerilmeleridir.



Sürtünmeyi tanımlayan değişken sürtünme katsayısı olup aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

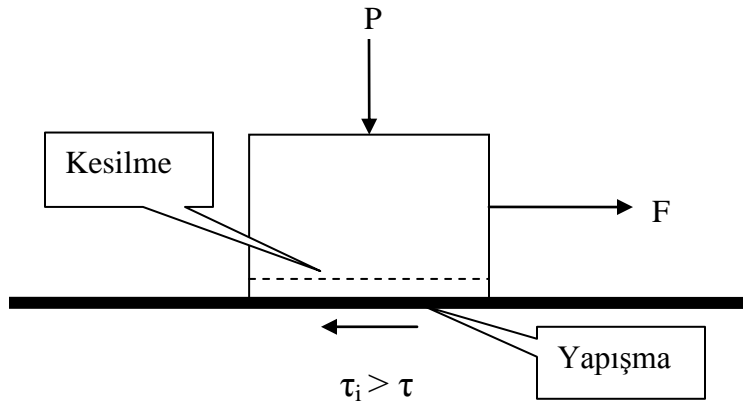


$$\mu = \frac{F}{P} = \frac{\tau_i}{p}$$

Burada μ ara yüzeydeki sürtünme katsayısı, P normal kuvvet ve F ise sürtünme kuvvetidir. Sürtünme katsayısının büyük olduğu durumlarda deformasyon sırasında malzemenin yayılmasına engel olmaya çalışan sürtünme kuvveti ve gerilmesi de artmaktadır.

Sürtünme nedeniyle şekillendirme sırasında gerekenden daha büyük normal kuvvetlerin uygulanması gerekmektedir. Sürtünmeden kaynaklanan ikincil gerilmeler malzemede yırtılma ve hatta kırılmalara yol açmaktadır. Ayrıca yüksek kayma gerilmeleri ve normal gerilmelerin şekillendirme işleminde kullanılması durumunda kalıplar erken hasara uğramaktadır. Tüm bu nedenlerden dolayı şekillendirme işlemlerinin büyük çoğunluğunda yağlama yapılarak sürtünmenin etkisinin azaltılması amaçlanmaktadır.

Ara yüzeyde sürtünmeden kaynaklanan kayma gerilmesinin çok büyük değerlere ulaşması durumunda, örneğin malzemenin kesme dayanımının üstüne çıkması durumunda malzeme sanki kalıp yüzeyine yapışmış ve onun altındaki tabaka kesilerek deformasyon devam etmiş gibi bir durum görülür. Buna metal şekillendirme işlemlerinde “Yapışma” veya “Yapışma Sürtünmesi” hali adı verilmektedir.



Bu durumda malzemenin kesme dayanımının normal dayanımının yarısı olduğu varsayımıyla ($\tau = 0.5 \sigma$) ve normal basıncın malzemenin akma dayanımına eşit olduğu ($p = \sigma$)

kabulü ile sürtünme katsayısı μ nün 0 ile 0.5 arasında değişebileceği, ideal sürtünmesiz koşulda sürtünme katsayısının sıfır değerine yaklaşacağı ve yapışma sürtünmesi durumunda ise sürtünme katsayısının 0.5 mertebelerine çıkacağı anlaşılmaktadır.

Yağlama yaparak şekillendirme kuvvetinin azaltılmasının yanı sıra kalıp aşınması azaltılmakta, parçalarda daha iyi yüzey kalitesi sağlanmakta, sıcak şekillendirme işlemlerinde kalıpların soğutulması sağlanmakta ve iş parçasının kalıba yapışması önlenmektedir.

Yağlayıcı seçiminde:

- 1. Şekillendirme işleminin türü,**
- 2. İşlem sıcaklığı,**
- 3. Şekillendirilen malzeme türü,**
- 4. Kimyasal özellikleri,**
- 5. Uygulama kolaylığı,**
- 6. Maliyet unsurları dikkate alınmalıdır.**

Aşağıdaki tabloda şekillendirme işlemlerinde kullanılan yağlayıcılar ve sürtünme katsayısı aralıkları verilmektedir.

	μ	Yağlayıcı
Soğuk	0.02 – 0.05	Sabun, hayvansal yağ, polimerler
Ilık	0.05 – 0.10	Hayvansal yağ, mineral yağlar
Sıcak	0.10 – 0.20	Grafitli yağ, mineral yağ, cam yünü, talaş, grafit tozu

Yağlayıcı kullanılmaması durumunda ise katsayı soğukta 0.1, ılıkta 0.2 ve sıcakta 0.40–0.50 aralığındaki değer mertebelerine ulaşmaktadır.

KÜTLESEL ŞEKİL VERME YÖNTEMLERİ

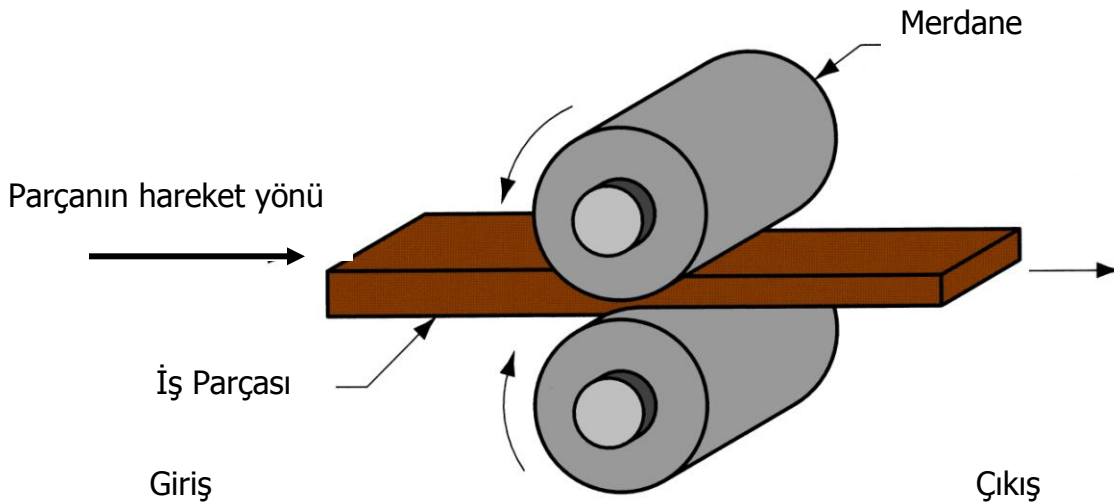
(Ders Kitabı 19. Bölüm)

Kütlesel şekillendirmede malzemeye her üç yönde de çok büyük miktarlarda şekil değişimleri uygulanmaktadır. Başlangıç malzemeleri olarak silindirik kütükler, çubuklar veya filmaşın, kare kesitli kütükler ve blumlar ile dikdörtgen kesitli slablar kullanılmaktadır.

Kütlesel şekillendirmenin dikkat çeken özellikleri şunlardır:

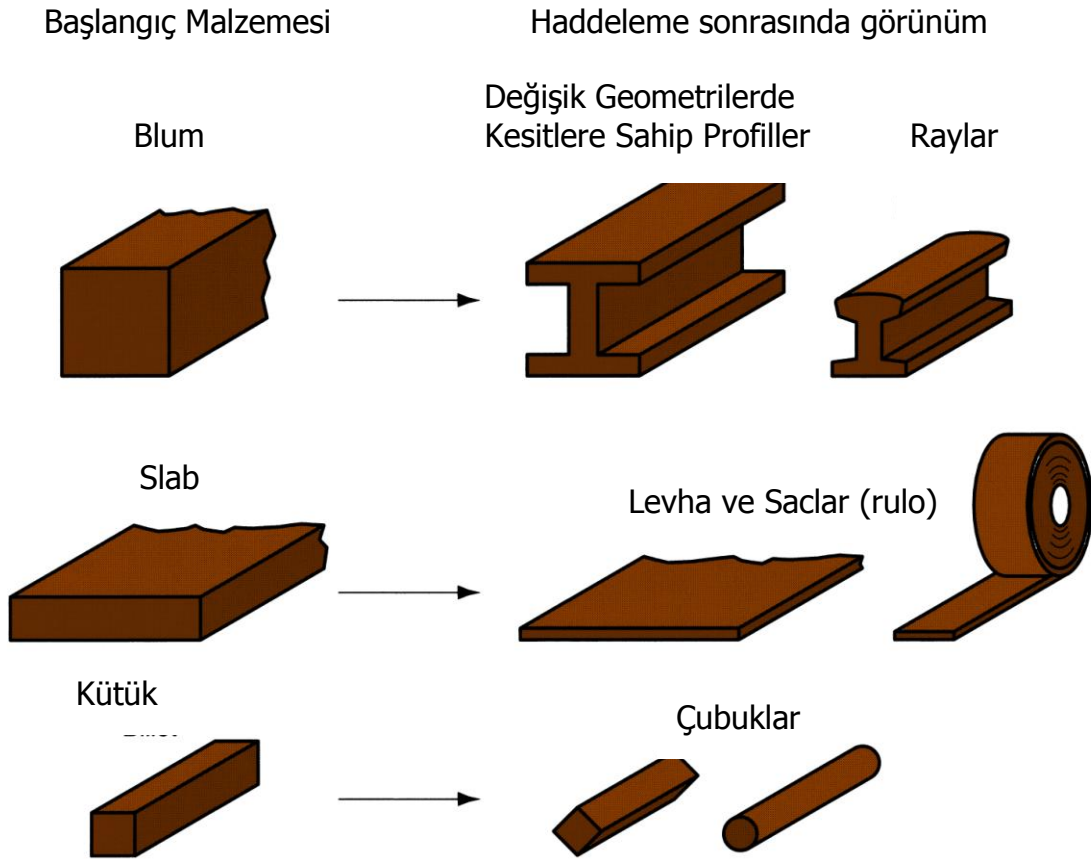
1. Sıcak şekillendirmelerde çok büyük şekil değişimleri uygulanabilmekte,
2. Soğuk şekillendirme işlemlerinde şekil vermenin yanı sıra dayanım artışı da elde edilmekte,
3. Son ürünlerde çoğu zaman son şekil ve boyuta ulaşılabilmekte ve ek talaşlı imalat uygulaması gerekmemektedir.

1. HADDELEME



Haddeleme, yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi birbirine karşı döndürülen iki merdane arasında parçayı ezerek şekillendirme işlemi olarak tanımlanmaktadır. Yukarıdaki şekil düz (yassı) haddeleme işlemi şematik olarak vermektedir. Bunun dışındaki geometriye sahip (örneğin ray, I-Profil, U-Profil gibi) ürünlerde buna uygun merdane veya merdaneler kullanılarak haddeleme yapılır.

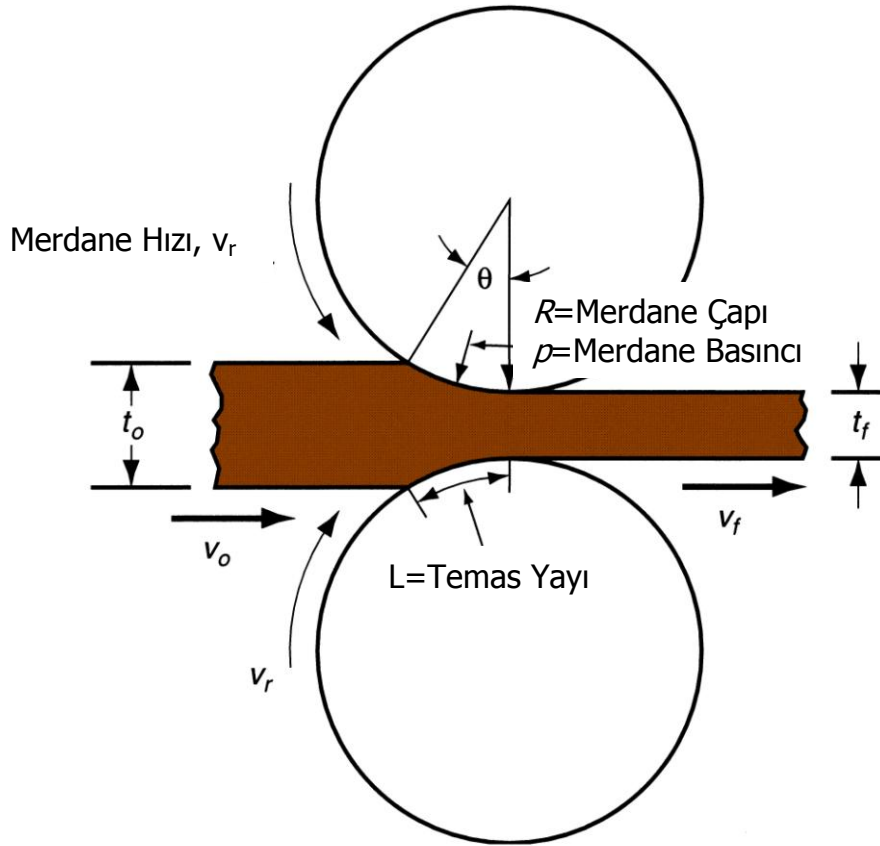
Şekil olarak haddeleme “yassı” ve “profil” haddeleme olarak ikiye ayrılmaktadır. İşlem sıcaklığı olarak ise çok büyük şekil değişimlerinin verilebildiği “sıcak haddeleme” ve daha sınırlı olarak sacların yassı haddelenerek üretildiği “soğuk haddeleme” olarak ikiye ayrılır.



Başlangıç Malzemesi	Boyutları	Elde edilen Ürünler
Blum	> 150x150 mm	Muhtelif profiller
Kütük	> 50x50 mm	Çubuklar
Slab	> 50x250 mm	Levha ve Saclar

Yassı haddedeleme gerilme analizi yapılacak olduğunda bazı tanımlamalara ihtiyaç vardır:

Giriş kalınlığı:	t_0
Çıkış Kalınlığı:	t_f
Haddeleme Miktarı:	$\Delta t = t_0 - t_f$
Redüksiyon:	$r = \frac{\Delta t}{t_0}$
Yayıma Miktarı:	$\Delta w = w_f - w_0$
Giriş Hızı :	v_0
Çıkış Hızı:	v_f
Merdane Teğetsel Hızı:	v_r
Temas Yayı Boyu:	$L = \sqrt{R \cdot (t_0 - t_f)}$



Yukarıdaki şekilde haddeleme sırasında meydana gelen ezme geometrisi şematik olarak yassı haddeleme için verilmektedir. Haddeleme sırasında oluşturulan gerçek birim şekil değişimi;

$$\varepsilon = \ln \frac{t_0}{t_f}$$

şeklinde tanımlanmakta, soğuk haddeleme için ortalama gerilme değerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun nedeni temas yayı boyunca girişinden çıkışına kadar malzemenin farklı bölgelerinde farklı şekil değişimlerine ve dolayısıyla farklı pekleşmeye uğramasıdır.

$$\sigma_{ort} = \frac{K \cdot \varepsilon^n}{1+n}$$

Böylece soğuk haddeleme sırasında gerçekleşen düzlem birim şekil değişimi de (yayılmaya gerek kalmadan) dikkate alınacak olursa yaklaşık olarak merdanelere haddeleme sırasında etkiyen ezme kuvveti hesaplanabilmektedir:

$$F = (1.15) \cdot \sigma_{ort} \cdot w_0 \cdot L$$

Sıcak haddeleme sırasında ortalama gerilmeye ihtiyaç yoktur. Ancak deformasyon hızına gereksinin duyulur. Haddeleme sırasında ortalama deformasyon hızı;

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_r}{L} \ln \left(\frac{t_0}{t_f} \right)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bundan ve malzeme özelliklerinden yararlanarak malzemenin akma gerilmesi;

$$\sigma = C.\dot{\epsilon}^m$$

bağıntısıyla bulunur. Böylece sıcak haddeleme kuvveti aynı şekilde;

$$F = (1.15).\sigma.w_0.L$$

olarak hesaplanır. Haddeleme sırasında her bir merdaneye uygulanması gereken moment, ezme kuvvetinin temas yayının yarısında etkidiği varsayımı ile;

$$M = \frac{1}{2}F.L$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Toplam moment ise iki merdane için

$$M_t = F.L$$

olmaktadır. Haddeleme işlemi için güç gereksinimi ise;

$$P = F.L.\frac{2.\pi.N}{60} = F.L.\frac{v_r}{R}$$

bağıntısıyla belirlenmektedir. Burada N merdane hızı (dev/dak), v_r merdanelerin teğetsel hızı (m/s), F ezme kuvveti (N), L temas yayı uzunluğu (m), R merdane çapı (m), P güç ihtiyacı (W, J/s veya N-m/s) birimleriyle ifade edilmektedir. Bir beygir gücünün yaklaşık olarak 746 W olduğu dikkate alınacak olursa haddeleme için güç gereksinimi beygir gücü cinsinden

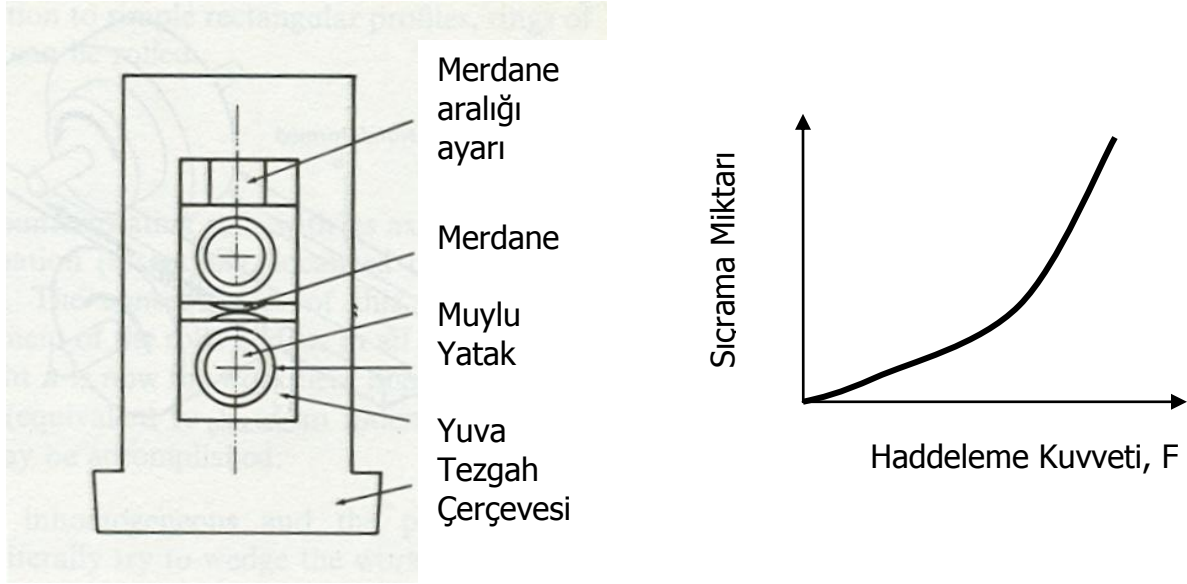
$$BG = \frac{P}{746}$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Haddeleme işleminde bazı sorunlar yaşanabilir. Bunlar aşağıda özetlenmektedir:

1. Merdane sıçraması: Haddeleme sırasında merdaneleri tutan tezgâha yüksek kuvvetler etkimektedir. Bu kuvvetler gerek yataklara etkiyerek gerekse tezgâhı elastik olarak şekil değiştirerek merdanelerin işlem sırasında açılmasına

neden olmaktadır. Böylece merdane aralığı tarafından belirlenen mamul kalınlığına ulaşamamakta daha kalın mamuller elde edilmektedir. Bunun önlemini almak için hadde tezgâhına ait “kuvvet-sıçrama” eğrisinin bilinmesi gerekir. Eğer bu veri varsa buna uygun olarak sıçrama miktarı belirlenebilir ve bu miktar kadar merdane aralığı azaltılmak suretiyle istenilen kalınlıkta mamuller elde edilebilir.



2. Kapma Açısı: Malzemenin haddeleme sırasında merdaneler tarafından kapılabilmesi ve merdane aralığına doğru içeri çekilebilmesi için yeterli sürtünme kuvvetlerinin yaratılması gerekmektedir. Kapma şartı olarak haddeleme açısı θ 'nın tanjantının, malzeme ile merdaneler arasındaki sürtünme katsayısı μ 'den daha küçük olması gerekmektedir.

$$\tan \theta \leq \mu$$

Ve verilen pasonun geometrisinden bir pasoda verilebilecek en büyük haddeleme miktarı Δt aşağıdaki gibi hesaplanır:

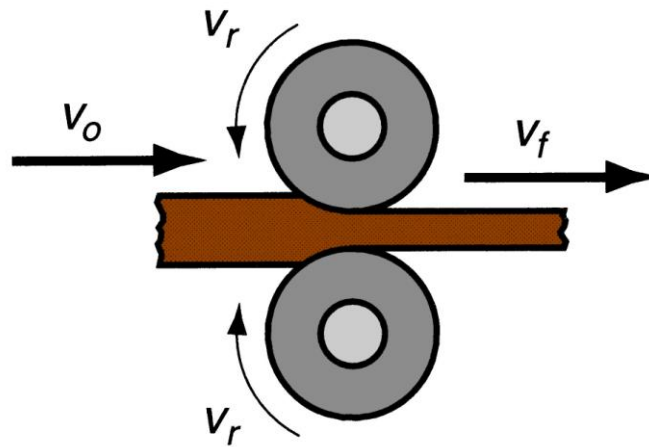
$$(\Delta t)_{maks} = (t_0 - t_f)_{maks} = \mu^2 \cdot R$$

Redüksiyonu arttırmak için merdane çapının ve sürtünme katsayısının artırılması gerekmektedir.

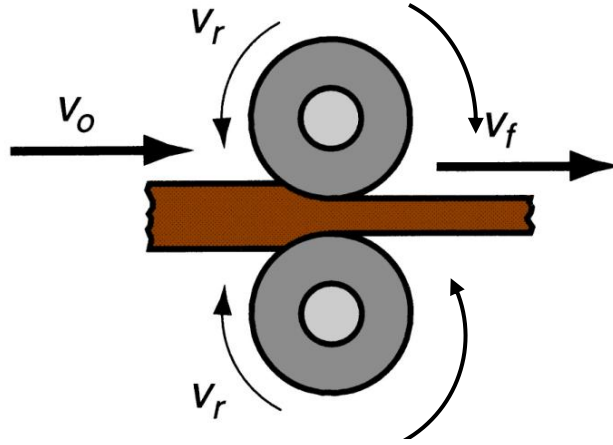
3. Merdanelerin Yassılaştırılması: İnce malzemelerin soğuk haddelenmesi sırasında merdanelerin yassılaştırılması ve istenilen redüksiyonların verilememesi riski oluşur. Bunun için küçük çaplı merdaneler, etkin yağlama ve elastiklik modülü oldukça yüksek olan sinterlenmiş SiC merdanelerin kullanımına gidilebilir.

4. Merdanelerin Bükülmesi: Özellikle küçük çaplı merdaneler haddeme sırasında bükülebilir ve fıçılaştırılmış (ortası daha kalın kenarları daha ince dikdörtgen) kesitler kesitlerde hadde ürünleri verebilir. Ayrıca bu ürünlerde kenarlar uzamaya çalışacağından merkez de buna izin vermeyeceğinden kenarların ve merkezin dalgalı olmasına neden olur. Bunun etkisini azaltmak için dayama merdanelerinden (dörtlü sistem) veya hafif bombeli merdanelerden yararlanılabilir.

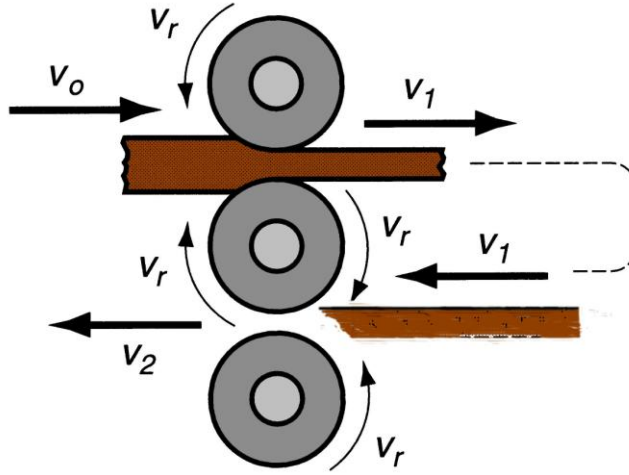
Haddeme işleminin yapıldığı haddeme tezgâhları oldukça pahalı ve kütleli tezgâhlardır. Bu tezgâhlarda çok çeşitli merdane düzenlerinden yararlanılmaktadır.



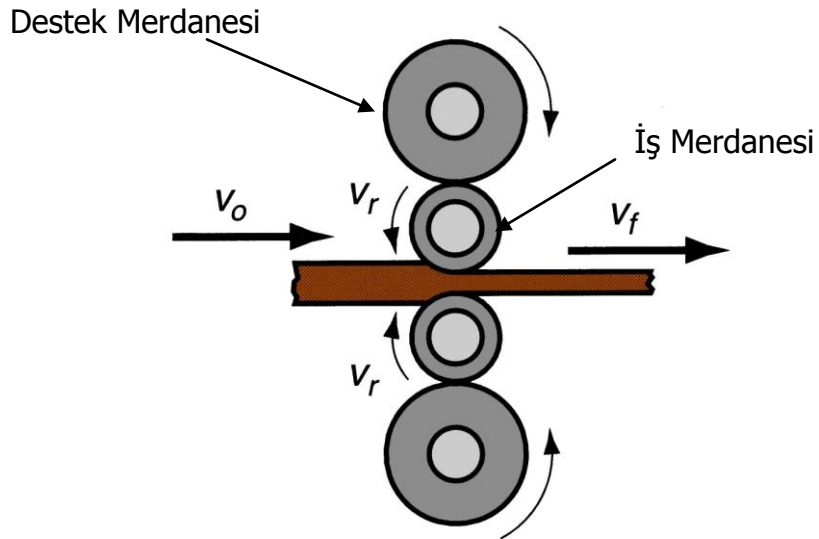
İkili (Düo) Merdane Düzeni



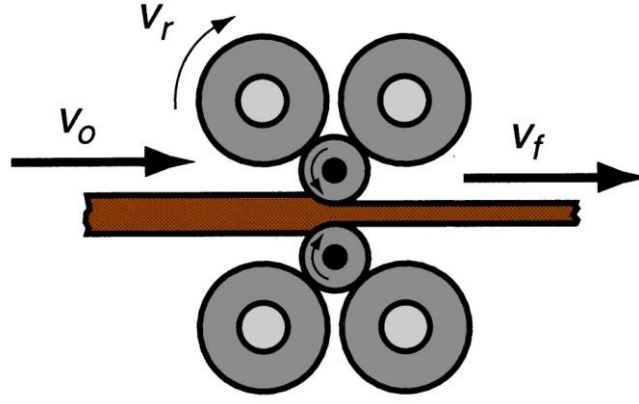
Tersinir İkili (düo) Merdane Sistemi



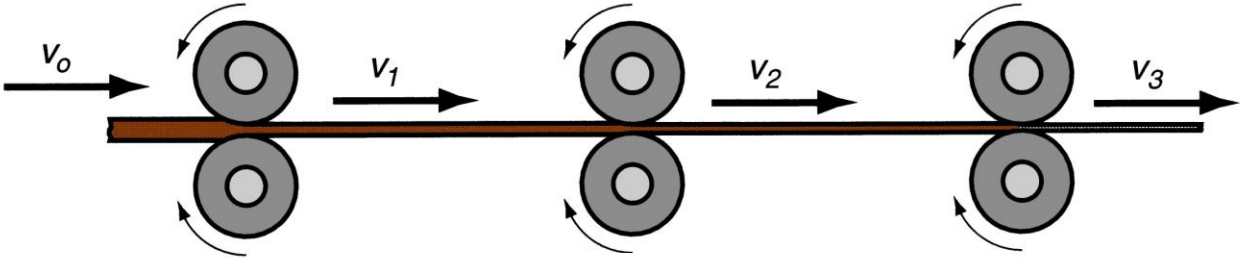
Üçlü (trio) Merdane düzeni



Dörtlü (quarto) Merdane Sistemi



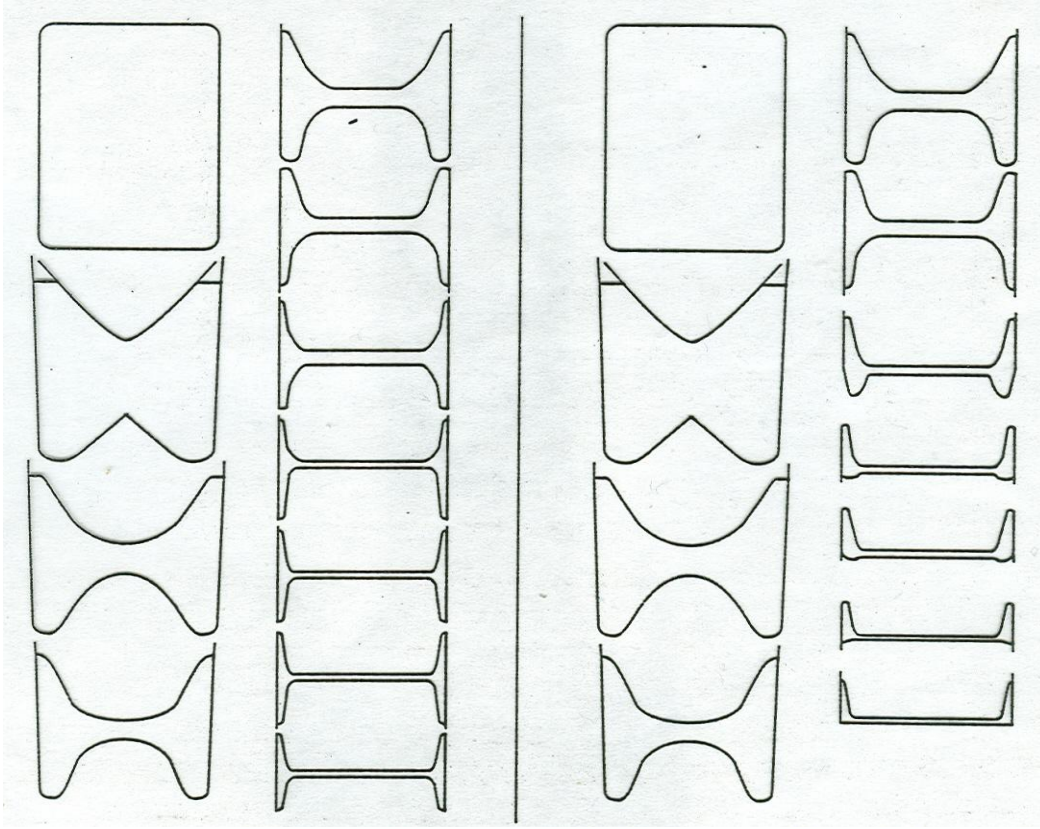
Demet Haddesi



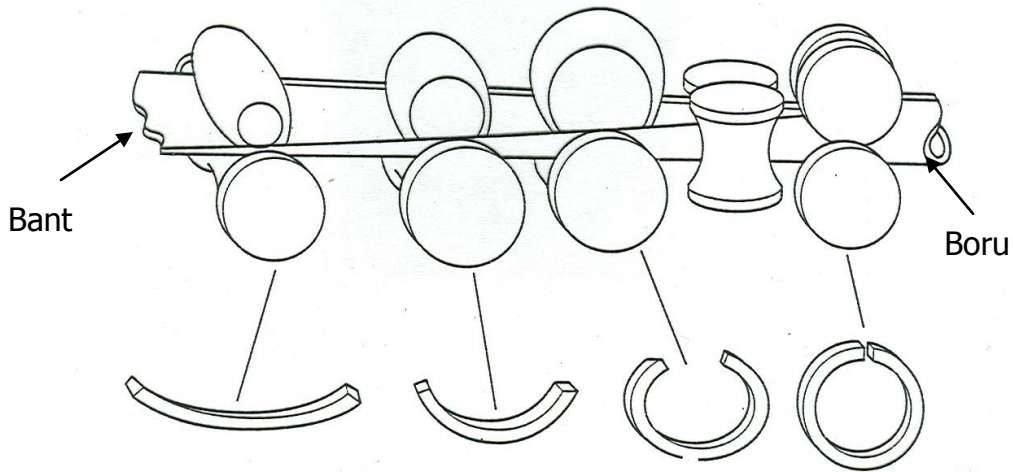
Tandem Hadde Tezgâh Düzeni

Profillerin haddelenmesinde istenilen kesitlere tek bir pasoda ulaşılamaz. Bunun için şekil değişimlerinin belirli noktalara yığılmadığı ve tüm kesite olabildiğince dağıtıldığı uygun bir “paso tasarımı” yapılır. Bu tasarımda elde edilen kesitleri haddelenecek merdane takımları imal edilir ve bunlar birbirini takip edecek şekilde arka arkaya tandem hadde düzeninde dizilirler.

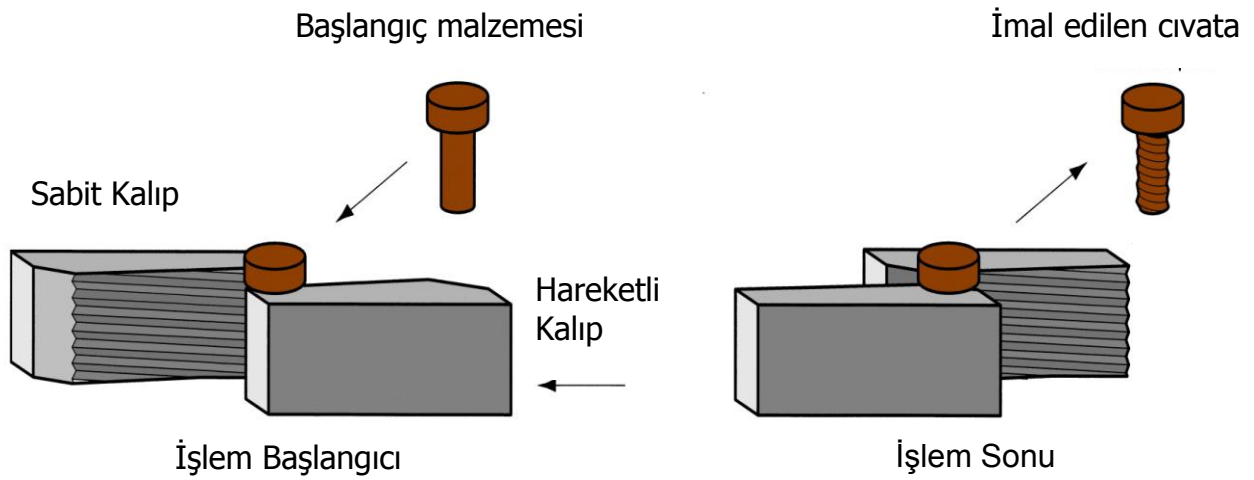
Çoğunlukla imalat sıcak haddelemeye gerçekleştirildiğinden ısıtma fırınından çıktıktan sonra son kesit geometrisini alana kadar arka arkaya haddelenirler. Aşağıda U ve I profillerin haddelemeye imalatında kullanılan örnek iki paso tasarımı verilmektedir. Her bir profilin imalatı için 11'er adet paso tasarlanmıştır.



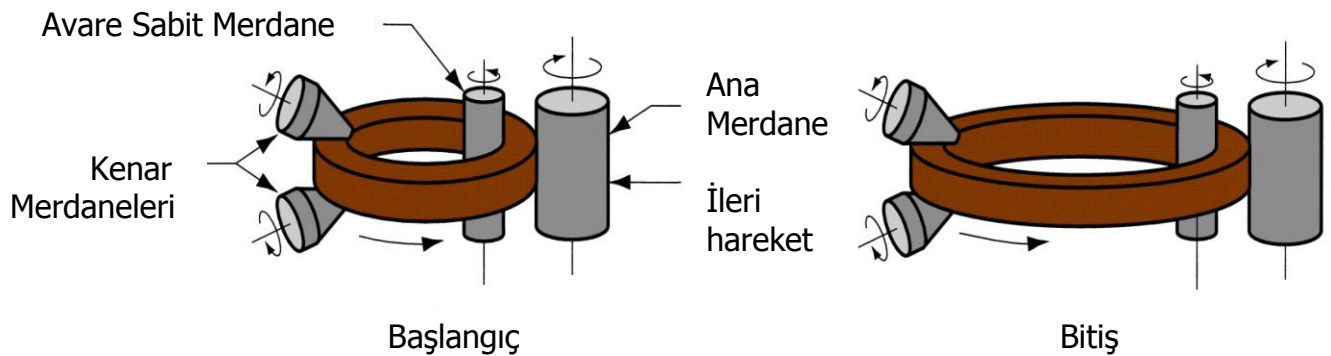
Hadde merdaneleri sacların kademeli şekillendirmelerinde de kullanılmaktadır. Örneğin sacdan dikişli boru üretiminde aşağıdaki merdane gurubundan yararlanılabilir. Merdaneli bükme olarak isimlendirilen bu yöntemle muhtelif tipte profiller sürekli olarak imal edilebilmektedir.



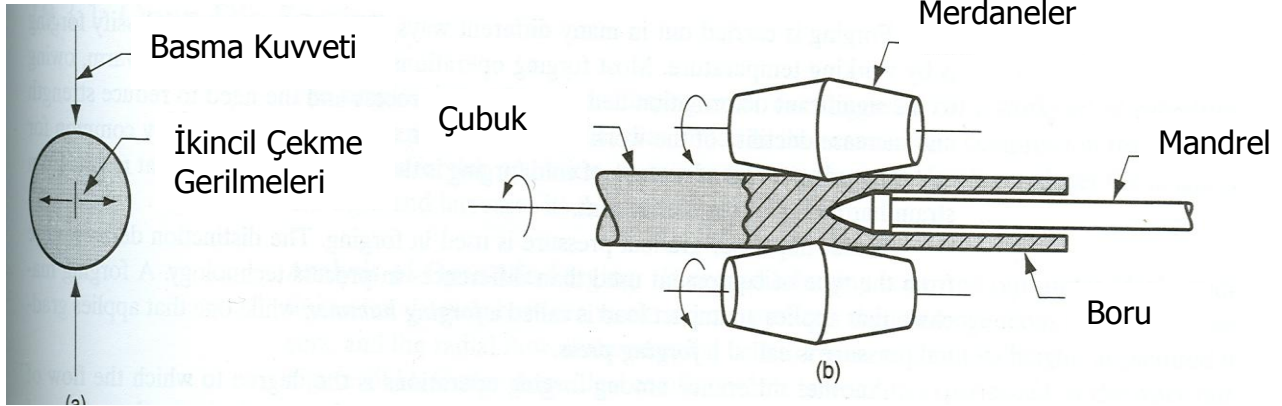
Haddeleme teknolojisinden yararlanılarak geliştirilen bir diğer imalat yöntemi de “Ovalama” ismini almaktadır. Bu yöntem çok sayıda ve hızlı bir şekilde kaliteli cıvata ve vida üretimine uygundur. Bu şekilde ovalama tezgâhları kullanılarak yapılan cıvata imalatında hurda malzeme kayıpları yok denecek kadar azalmakta, dişler ezilerek açıldığından pekleşme nedeniyle dişlerin dayanımı artmakta ve malzemenin akış çizgileri talaşlı imalatta olduğu gibi kesilmediğinden özellikle yorulma açısından çok daha iyi bir performans elde edilmesine neden olmaktadır.



Haddeleme teknolojisinin diğer bir uygulaması da “Halka Haddeleme” yöntemidir. Et kalınlığı fazla halkanın daha ince cidar kalınlığına muhtelif merdane düzenekleri kullanılarak getirilmesi sağlanmaktadır.



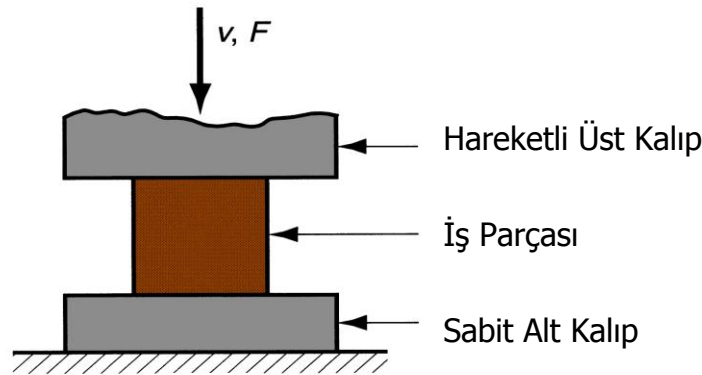
Haddeleme teknolojisinden yararlanılarak dikişsiz boru imalatı gerçekleştirmek de mümkündür. “Mannesmann Yöntemi” olarak da isimlendirilen bu teknolojiye basma gerilmeleri sonucunda oluşan ikincil çekme gerilmelerinin malzemeyi çatlatması ana prensiptir. Çubuk aynı zamanda eğimli merdaneler tarafından hem bastırılmakta hem de döndürülmekte olduğundan tüm yönlerdeki çatlama eğilimi delinme eğilimine dönüşmektedir. Çubuğun merkezine doğru yönlendirilmiş olan sivri uçlu bir mandrel kendine doğru gelen çatlak oluşmuş çubukta delme işlevi görmektedir. Bu yöntem aynı zamanda “Döndürerek Boru Delme” yöntemi olarak da isimlendirilmekte olup ancak kalın cidarlı boruların üretimine olanak sağlamaktadır.



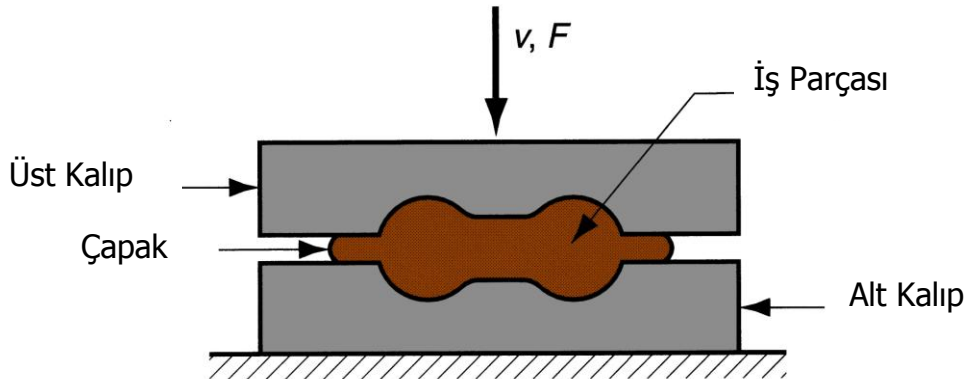
2. DÖVME

En eski metal şekillendirme yöntemidir. İki kalıp arasında basınç uygulanarak şekillendirme gerçekleştirilmektedir. Genelde daha büyük şekil değişimlerine olanak sağladığı için ve kuvvet gereksinmesi daha az olduğundan büyük parçaların dövülmesine olanak sağladığı için sıcak dövme uygulamaları daha çok tercih edilmekle birlikte getirdiği dayanım artışı ve hassas boyutlar ve yüzey kalitesi nedeniyle küçük parçalara uygulanan soğuk dövme uygulamaları da vardır. Sıcaklık dışında dövme yöntemlerini üç kategoriye ayırmak mümkündür:

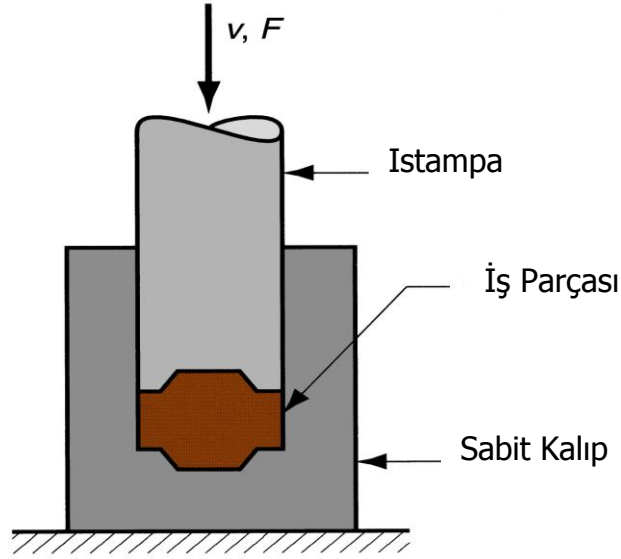
1. Açık Kalıpta Dövme



2. Kapalı kalıpta çapaklı dövme,

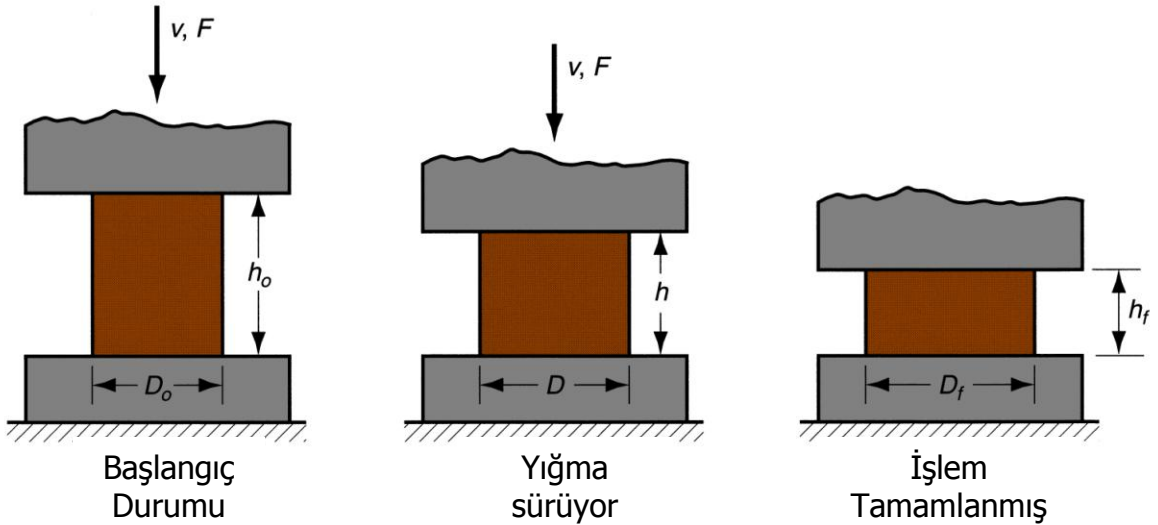


3. Kapalı kalıpta çapaksız dövme.



A) AÇIK KALIPTA DÖVME

Yöntemin uygulanması iki düz kalıp arasında yapılan basma deneyindeki duruma benzemektedir. "Yığma" olarak da isimlendirilir. Basma ile parça yüksekliği azalırken kuvvete dik olarak uzanan kesit alanı artmaktadır. Çoğunlukla aksenal simetriye sahip yuvarlak kesitli parçaların yığılması söz konusudur. Yığmanın ideal koşullarda yani sürtünmesiz olması durumunda silindirik bir parçanın açık kalıpta yığılması aşamaları aşağıdaki şekilde verilmektedir.



Burada sürtünme etkisi olmadığından silindirik görünüm korunmakta ancak yükseklik azalırken çap da hacim sabitliğini sağlayacak şekilde artmaktadır. Yığıma sırasında herhangi bir h yüksekliğinde yaratılan birim şekil değişimi miktarı:

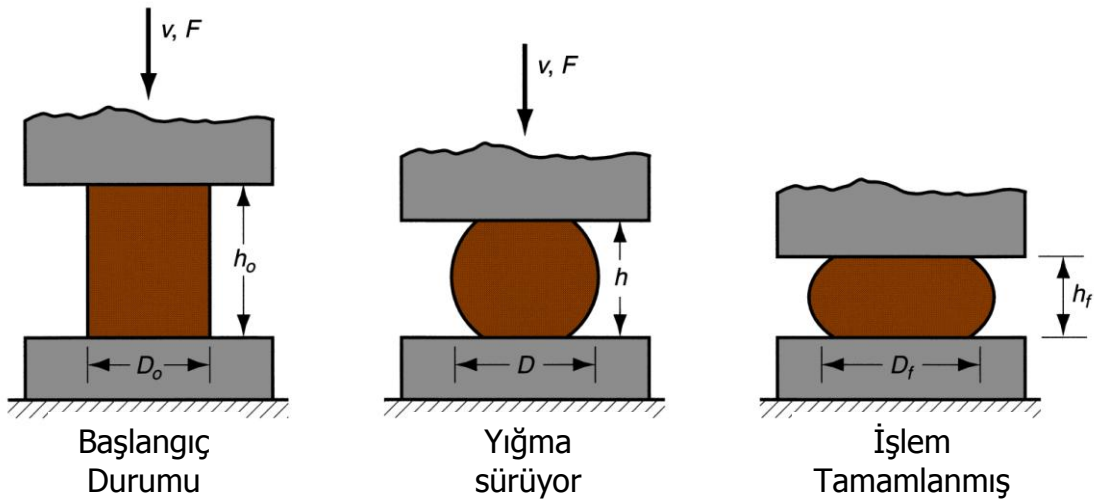
$$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h}$$

Şeklinde tanımlanmaktadır. Burada h_0 parçanın başlangıçtaki yüksekliğidir. Yığıma kuvveti ise;

$$F = \sigma \cdot A$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada ise σ malzemenin akma dayanımı, A ise basma gerilmesine dik olarak uzanan parçanın kesit alanıdır. Sıcak yığımda deformasyon hızına bağlı akma gerilmesinin, soğukta ise pekleşme neticesinde artmış olan akma gerilmesinin dikkate alınması gerekmektedir.

Ancak gerçekte kalıp yüzeyleri ile yığılan iş parçası yüzeyleri arasında sürtünme söz konusudur. Bu durumda yığıma aşamaları aşağıdaki gibi olmaktadır:



Yüzeylerde dairesel alanın yayılma hareketine karşı oluşan sürtünme genişlemeye izin vermemekte ve parça fiçi şeklini

almaktadır. Buna “fiçilaşma” adı verilir. Sürtünme kuvvetleri ne kadar azaltılırsa fiçilaşma o kadar önlenmiş olur. Sıcak yığıma işlemlerinde fiçilaşmayı destekleyen diğer bir faktör de kalıpların iş parçasının temas yüzeylerini soğutmasıdır. Böylece soğuyan yüzey ve ona yakın bölgelerde malzeme dayanımı artmakta ve şekil değişimi zorlaştırarak fiçilaşma eğilimi göstermektedir. Yığıma kuvveti analizi sürtünmesiz duruma göre önemli farklar göstermektedir. Yığıma kuvveti;

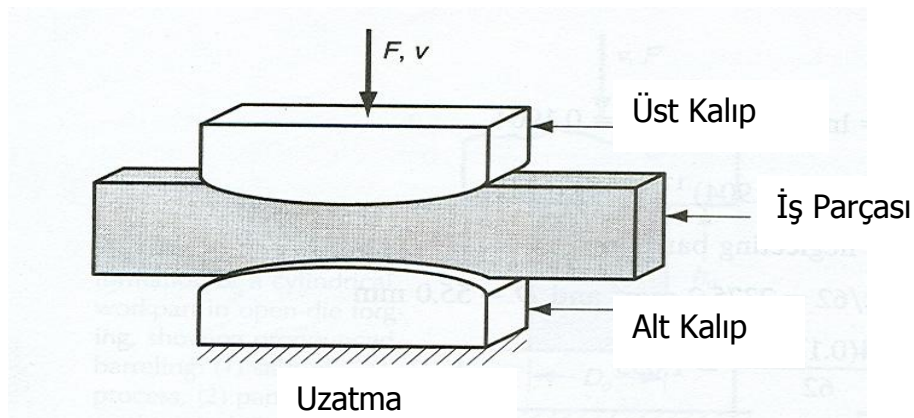
$$F = K \cdot \sigma \cdot A$$

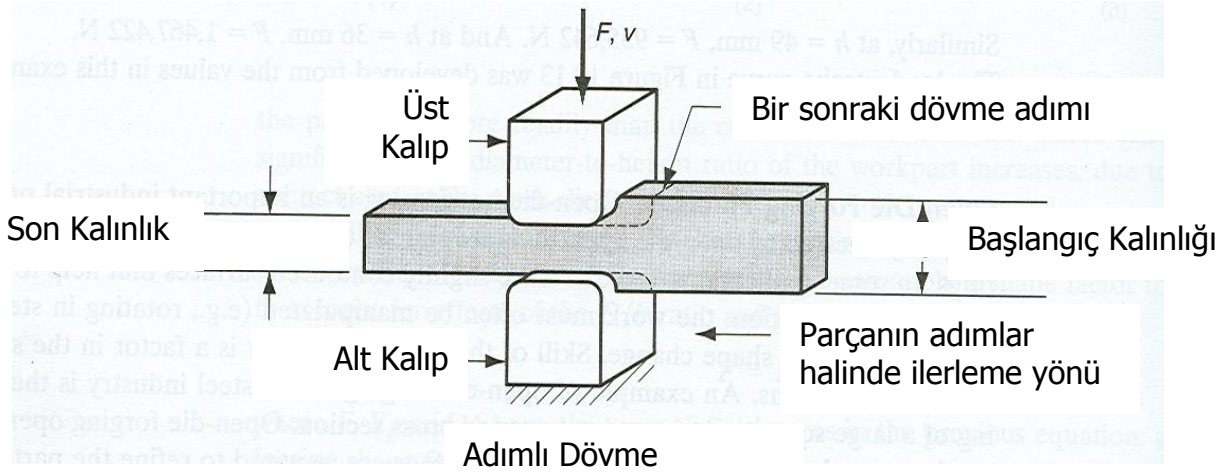
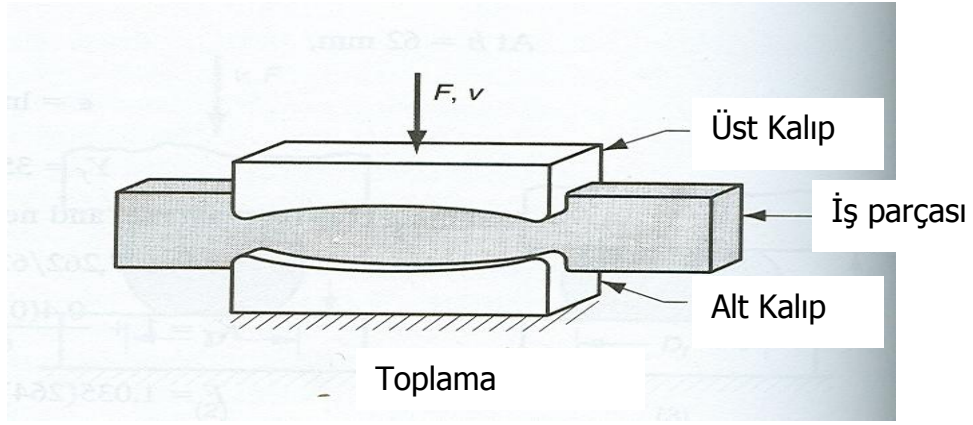
şeklinde belirlenmekte olup burada öncekinden farklı olarak K “şekil faktörü” kullanılmaktadır. Şekil faktörü birimsiz bir katsayı olup parçanın şekline ve parça ile kalıplar arasındaki sürtünme koşullarına bağlıdır:

$$K = 1 + \frac{0.4 \cdot \mu \cdot D}{h}$$

Burada μ sürtünme katsayısını, D parçanın o andaki çapını ve de h parçanın o andaki yüksekliğini ifade etmektedir. K değerinin artması yığıma kuvvetinin artmasına neden olmaktadır. Kısa ve geniş parçaları yağlayıcı kullanmadan yığımak gerekli olan kuvveti arttırmaktadır. Alan ve çap hesaplarında hacim sabitliği kullanılmakta ve fiçilaşma ihmal edilmektedir.

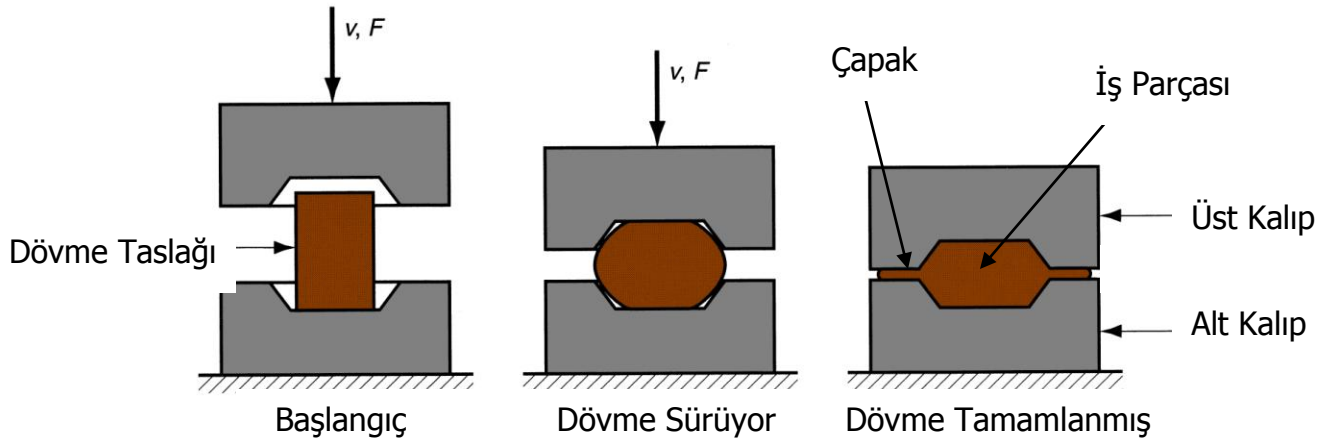
Diğer açık kalıpla dövme uygulamaları aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir.





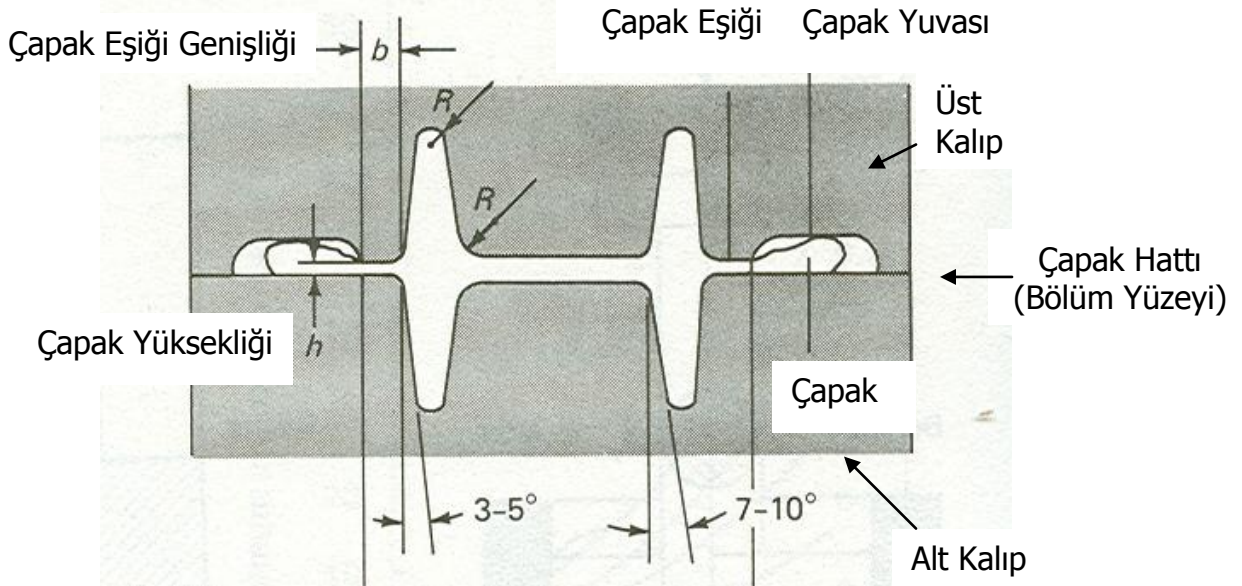
(B) KAPALI KALIPTA ÇAPAKLI DÖVME

Şekillendirilecek parça geometrisinin tersi işlenmiş iki yarım kalıp arasında malzemeyi basma gerilmeleriyle sıkıştırarak akıtılması ve kalıp boşluklarının doldurulması şeklinde tanımlanmaktadır.



Kapalı kalıpta dövmede en önemli nokta dövmenin uygulanacağı kalıpların tasarımı ve imalatıdır. Kapalı kalıpta çapaklı dövme işlemlerinde kullanılacak kalıplarda bazı özelliklerin sağlanması gerekir:

1. Kapalı kalıpta çapaklı dövmede çapak tasarımı çok önemlidir. Genelde dövme taslakları hazırlanırken hacim olarak biraz fazla pay bırakılır. Böylece dövme sırasında malzemenin kalıbın tüm boşluklarını doldurması ve sonra da fazlasının çapak eşliğinden dışarı atılması amaçlanır. Çapak eşiği geniş ve çapak kalınlığı düşük tutulursa çapağın dışarı akması zorlaşır ve dövme işlemi sırasında kalıba çok büyük basınçlar etkiler. Bu da erken aşınma ve hatta kalıbın kırılmasına yol açabilir. Eğer çapak kalınlığı fazla, eşik de dar tutulacak olursa bu defa malzeme kalıp boşluklarını doldurmadan çapak olarak kolaylıkla dışarı akar ve istenilen parça geometrisi elde edilmemiş olur.



Genel bir kural olarak çapak kalınlığı h (mm;

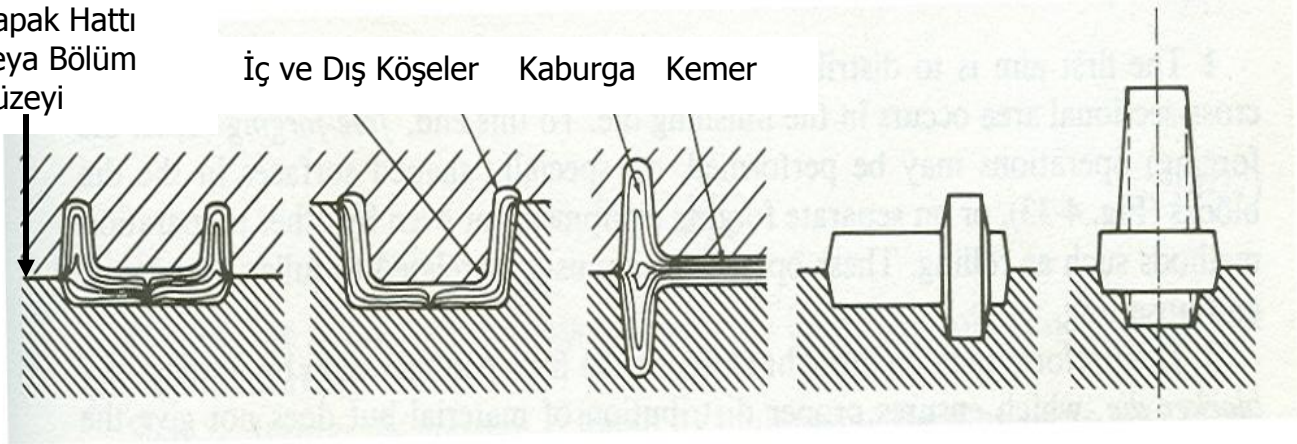
$$h = 0.015 \cdot (A)^{1/2}$$

olarak dövme alanı A 'nın (dövme kuvvetine dik olarak uzanan parça kesitinin alanı) bir fonksiyonu şeklinde ampirik olarak belirlenebilmektedir. Çapak eşiği genişliği b ise çapak yüksekliğinin 3 ile 5 katı arasında olacak şekilde seçilmektedir.

2. Kalıplarda sıcak dövme sonrasında malzemenin çekmesini ve tufal kayıplarını tolere edecek kadar hacim fazlalığı bırakılmalıdır.

3. Malzeme akışını kolaylaştıracak, kalıbı dengeli zorlayacak ve malzemenin dövme sonrasında kalıptan kolay çıkmasını sağlayacak çapak hattı veya bölüm yüzeyi seçilmelidir.

Çapak Hattı
veya Bölüm
Yüzeyi



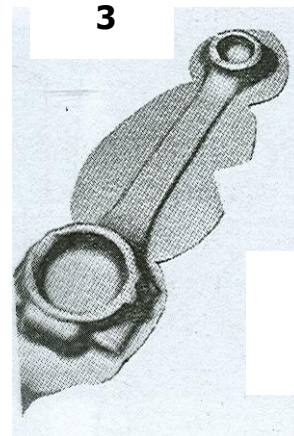
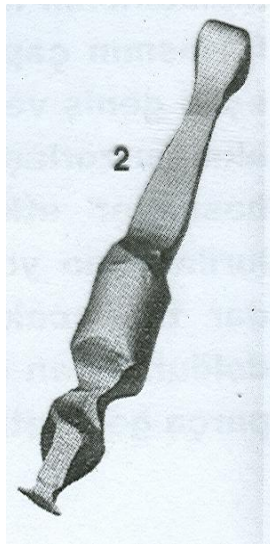
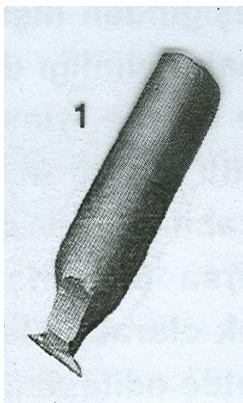
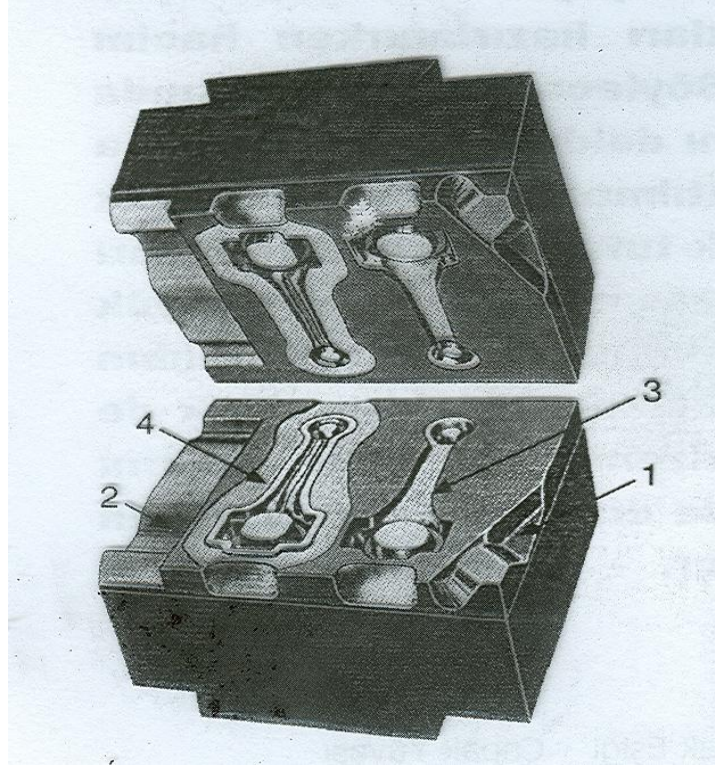
4. İç ve dış köşe radyüsleri çok küçük olmamalıdır. Keskin radyüslerin kullanılması durumunda köşelerde malzeme rahat akamaz ve katlanmalara ve çatlak oluşumuna sebebiyet verir.

5. Kaburgalar (dövme parçanın bölüm yüzeyine dik uzanan kısımları) kemerlerden (dövme parçanın bölüm yüzeyine paralel kısımları) hacim olarak daha fazla olacak şekilde tasarlanmamalıdır.

6. Kaburga şeklinde uzanan bölümler açılmalıdır. Genelde iç açılar dış açılardan biraz daha fazla olacak şekilde seçilir. Açı miktarı malzemenin cinsine de bağlıdır. Örneğin alüminyum için açılar $1-3^\circ$, çelik için $3-5^\circ$ ve süper alaşımlar için $7-10^\circ$ olacak şekilde seçilir. Açılmanın

esas amacı dövme sonrasında parçanın kalıptan kolaylıkla çıkarılmasıdır.

7. Parçanın karmaşık ve zor dövülebilir bir şekle sahip olması durumunda dövme işlemi kademelendirilerek bir kaç defada gerçekleştirilebilir.



Kalıp yan yüzeylerinin malzeme akışını kısıtlaması, farklı bölgelerde farklı deformasyon ve deformasyon hızlarının geçerli olması nedeniyle kalıbı zorlayan basınçları ve dövme kuvvetini hassas bir şekilde belirleyebilmek zordur. Ancak makul ölçülerde basitleştirmeler yaparak yaklaşık hesaplamalar yapmak mümkündür.

Farklı yükseklikleri olan bir parçanın deformasyon analizinde öncelikle bir ortalama yükseklik değeri h_{ort} belirlenmektedir:

$$h_{ort} = \frac{V}{A_t}$$

Burada V dövme taslağının hacmi, A_t ise çapak eşiği alanı dahil toplam dövme alanıdır. Buradan birim şekil değişimi;

$$\varepsilon_{ort} = \ln \frac{h_0}{h_{ort}}$$

Şeklinde hesaplanmaktadır. Buradaki h_0 dövme taslağının işlem öncesi yüksekliğidir. İşlemin sıcak yapılması durumunda ortalama deformasyon hızı;

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{h_{ort}}$$

Şeklinde hesaplanmaktadır. Buradaki v ise üst kalıbın kapanma hızıdır.

Kalıba etkiyen basınçları (işlem sırasında parçaya uygulanan basma gerilmeleri) veya gerekli olan kuvvetleri yaklaşık olarak hesaplamak için bazı ampirik katsayılardan (Q_K) yararlanılmaktadır. Enerjinin önemli olduğu bazı dövme makinelerinde kuvvetin yanı sıra dövme enerjisinin de hesaplanması gerekmektedir. Bunun da yaklaşık hesabında bazı ampirik katsayılardan (Q_E) yararlanılmaktadır.

Dövme Türü	Q_K	Q_E
Basit, çapaksız	3-5	2.0-2.5
Basit, çapaklı	5-8	3
Karmaşık, çapaklı	8-12	4

Böylece dövme kuvveti;

$$F = \sigma \cdot Q_K \cdot A_t$$

şeklinde, dövme enerjisi de;

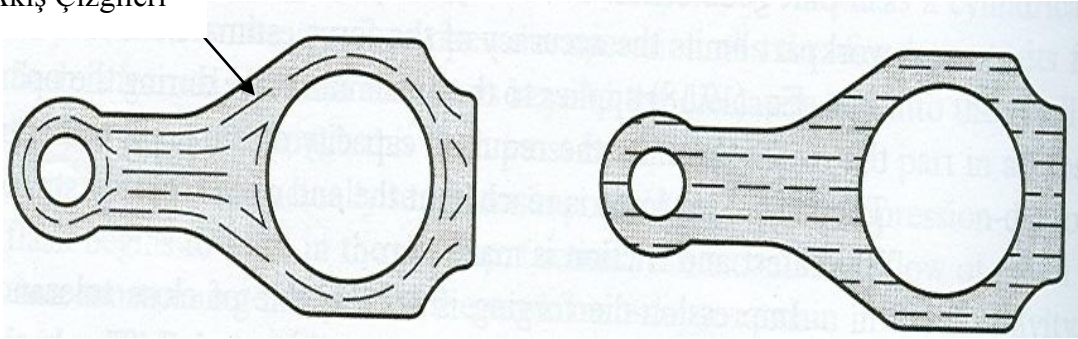
$$E = \sigma \cdot Q_E \cdot V \cdot \varepsilon_{ort}$$

olarak hesaplanabilmektedir.

Aynı geometrideki bir parçanın imalatında kapalı kalıpta dövme ile talaşlı imalat yöntemleri karşılaştırılacak olursa şu özellikler dikkati çeker:

- 1. Yüksek üretim hızı ve kapasitesi,**
- 2. Daha az malzeme kaybı,**
- 3. Tane yönlenmesiyle daha tok ve dayanımlı ürünler,**

Akış Çizgileri



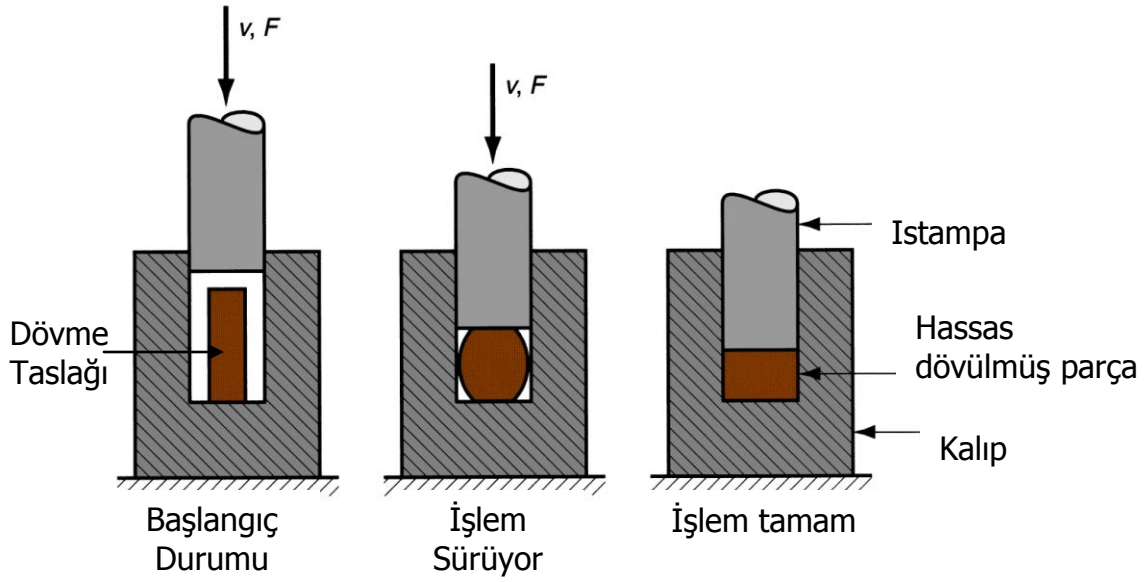
Dövülmüş

Talaşlı İmalat

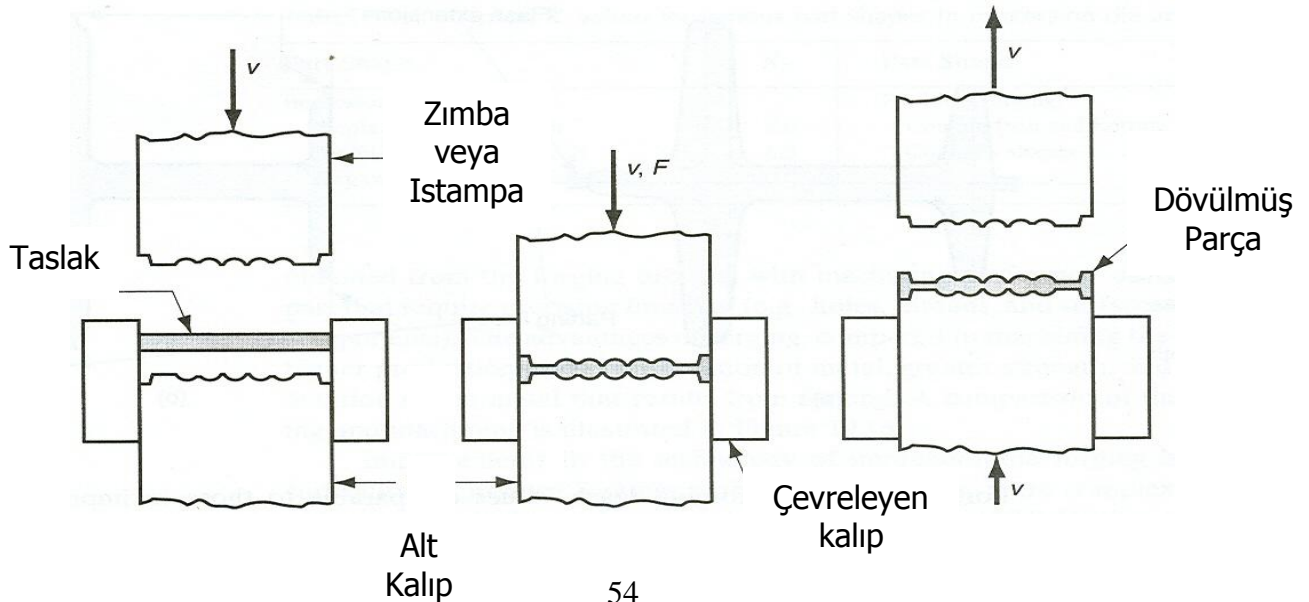
- 4. Daha düşük boyut hassasiyeti ve yüksek toleranslar,**
- 5. Daha kaba yüzey özellikleri.**

(C) KAPALI KALIPTA ÇAPAKSIZ DÖVME

Hassas dövme olarak da nitelendirilmektedir. Basit ve simetrik geometrilere sahip parçaların imalatına uygundur. Dövme taslağının hacminin dövme parçanın hacmine eşit veya çok yakın olması en önemli özelliğidir. Çapak gibi fazla malzemenin akacak yeri olmamasından dolayı işlem çok hassas olarak kontrol edilmelidir. Aksi takdirde kalıba veya makineye zarar verilme olasılığı vardır.



“Damgalama” tipik bir çapaksız dövme uygulamasıdır. Bu işlemden alt ve üst yüzeylerde dövme ve şekillendirme gerçekleştirilmektedir. Madeni paraların imalatında kullanılır.



Dövme işlemlerinde kullanılan makineler şu şekilde bir sınıflamaya tabi tutulurlar:

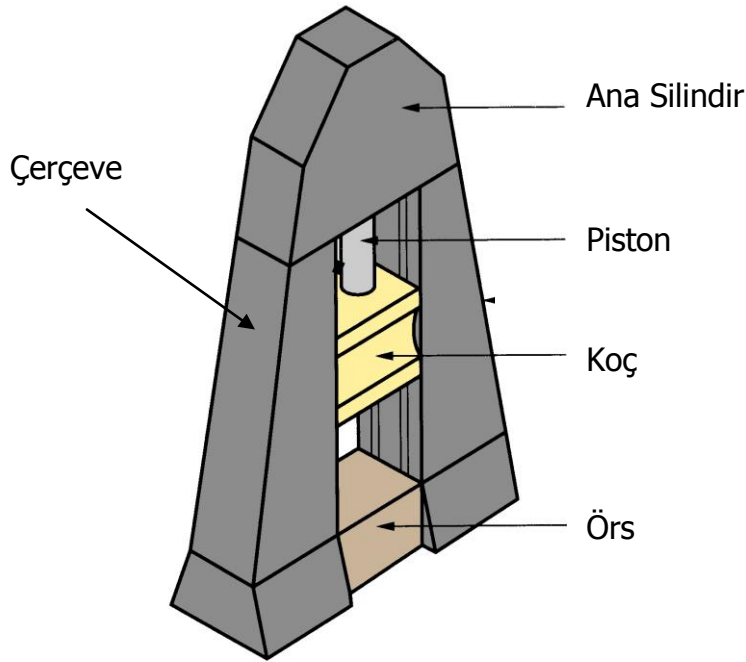
1. Çekiçler (Şahmerdanlar)

- a. Serbest Düşmeli Çekiçler
- b. Güç Düşmeli Çekiçler
- c. Karşı Vuruşlu Çekiçler

2. Presler

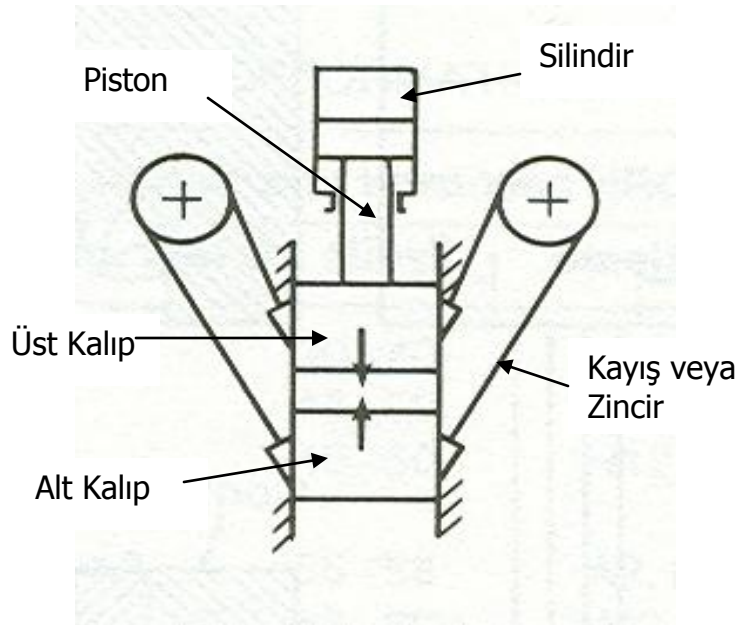
- a. Mekanik Presler
 - i. Eksantrik (veya kranklı) Presler
 - ii. Friksiyon (veya vidalı) Presler
- b. Hidrolik Presler

Çekiç veya şahmerdanlar enerji kısıtlı makinelerdir. Bir “güç düşmeli şahmerdan”ın şematik görünüşü aşağıdaki gibidir.



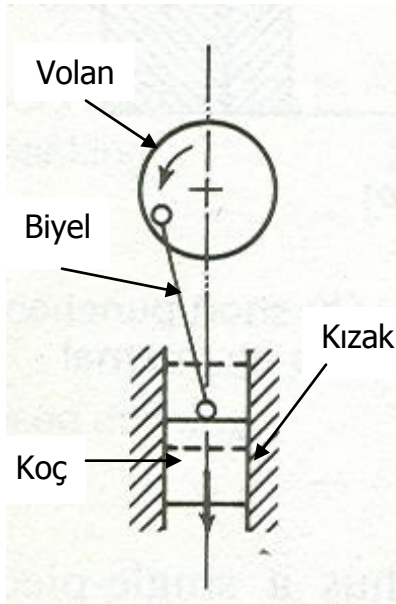
Üst kalıp koça bağlanır. Bağlantı kırlangıç kuyruğu şeklinde kalıp altlarının işlenmesi ve bunun koçtaki kızak şeklindeki yuvaya uydurulmasıyla gerçekleşir. Ana silindir yardımıyla basınçlı hava veya gaz kullanılarak koç aşağı doğru itilir ve

örs üzerine aynı şekilde bağlanmış olan alt kalıp üzerinde konmuş bulunan dövme taslağının üzerine düşmesi sağlanır. Eğer bu işlemde silindir ve piston mekanizması kullanılmazsa makine “serbest düşmeli çekiç” olarak adlandırılır. Parçaya vurdukları anda sahip oldukları potansiyel enerji ile şekillendirmeyi sağlarlar. Bu tür makinelerde enerji kaybı büyüktür. Enerjinin büyük bir bölümü (yaklaşık % 70) titreşimle birlikte temele giderek kaybolur. Enerji kaybının azaltılması için “Karşı Vuruşlu Çekiçler” geliştirilmiştir.

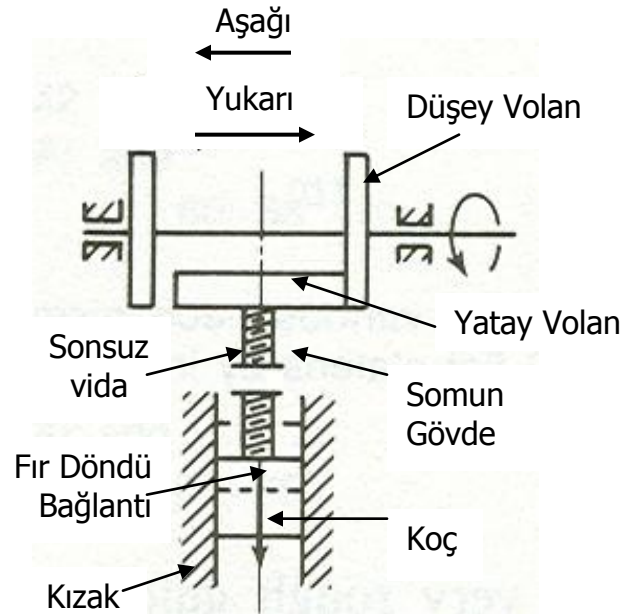


Kayışlı veya zincirli bir mekanizma vasıtasıyla alt ve üst kalıp birbirine bağlanmakta ve üst kalıp aşağı doğru yönlendirilirken alt kalıbın da yukarı doğru hareket etmesi sağlanmaktadır. Verim en az iki misli artmakta, daha zor parçaların dövülmesine olanak sağlamaktadır. Ancak alt kalıbın hareketli olması ve aksenal hassasiyetin sağlanmasında karşılaşılan zorluklar en önemli dezavantajlarıdır.

Mekanik presler de enerji kısıtlı makineler gurubuna girmektedir. Bu gurupta yer alan friksiyon ve eksantrik preslere ait şematik görünüşler aşağıda verilmiştir.



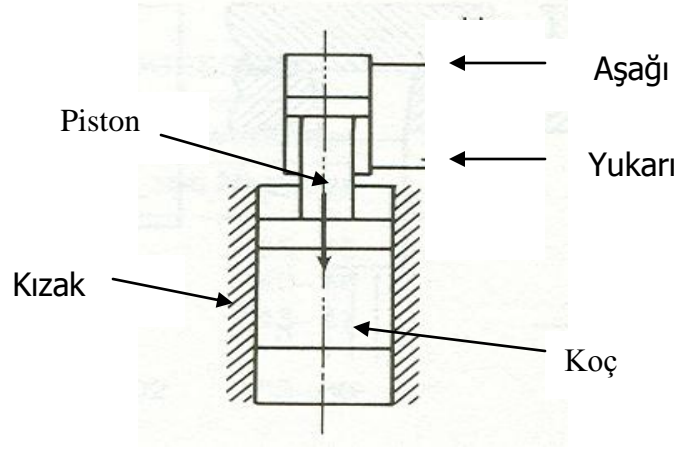
Eksantrik Pres



Friksiyon Pres

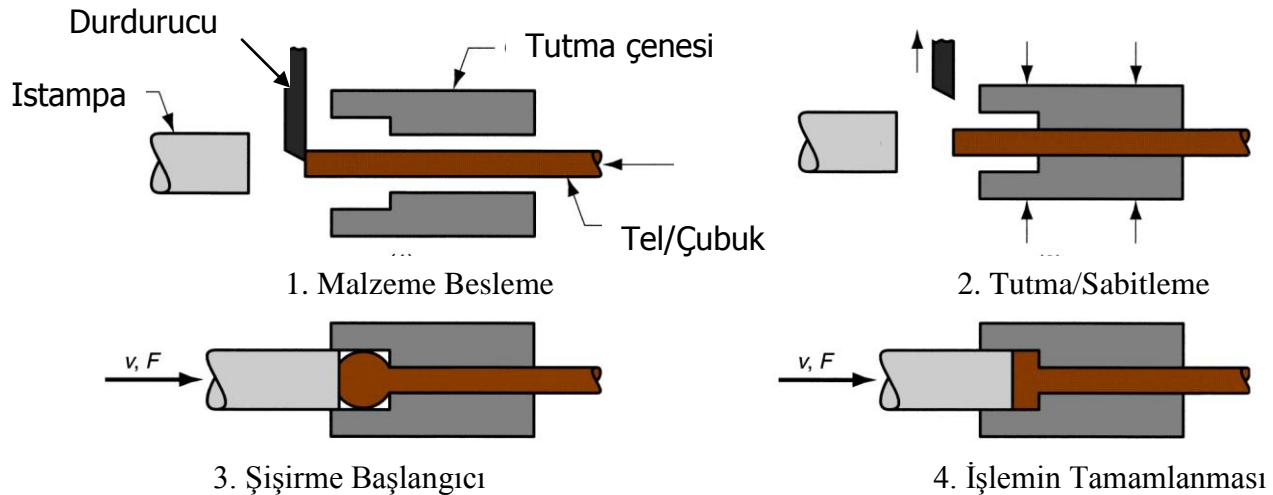
“Eksantrik preste” dönen volanın enerjisi biyel kolu yardımıyla koça aktarılmakta ve üst kalıp alt kalıp üzerine kapanmaktadır. Bu tür presler yüksek parçaları dövmeye müsait değildir. Ayrıca büyük kuvvetler gerektiren dövme işlemlerinde sık kullanılmazlar. **“Friksiyon preste”** ise sürekli olarak yatay konumda dönen volana düşey volanlar kaydırılarak temas ettirilir. Sürtünmeyle volan enerjisi yatay volana aktarılır. Yatay volanın altındaki sonsuz vida bir somun gövdeye bağlıdır. Dönüş yönüne göre vida aşağı veya yukarı hareket eder. Vidanın alt ucu bir fır döndü mekanizmayla koça bağlanmıştır. Bu şekilde üst kalıp alt kalıp üzerine kapanır. Üst kalıp yukarı alınmak istendiğinde diğer düşey volan yatay volanla temas ettirilir ve vida hareketinin yukarı olması sağlanır. Bu presler dövme sektöründe yaygın olarak kullanılmakta ve orta ile büyük parçaların dövülmesine olanak sağlamaktadır.

“Hidrolik presler” kuvvet sınırlı makinelerdir. Silindire gelen basınçlı sıvının pistonu etkimesiyle piston ve buna bağlı koç ve de ona bağlı üst kalıp aşağı doğru hareket eder.

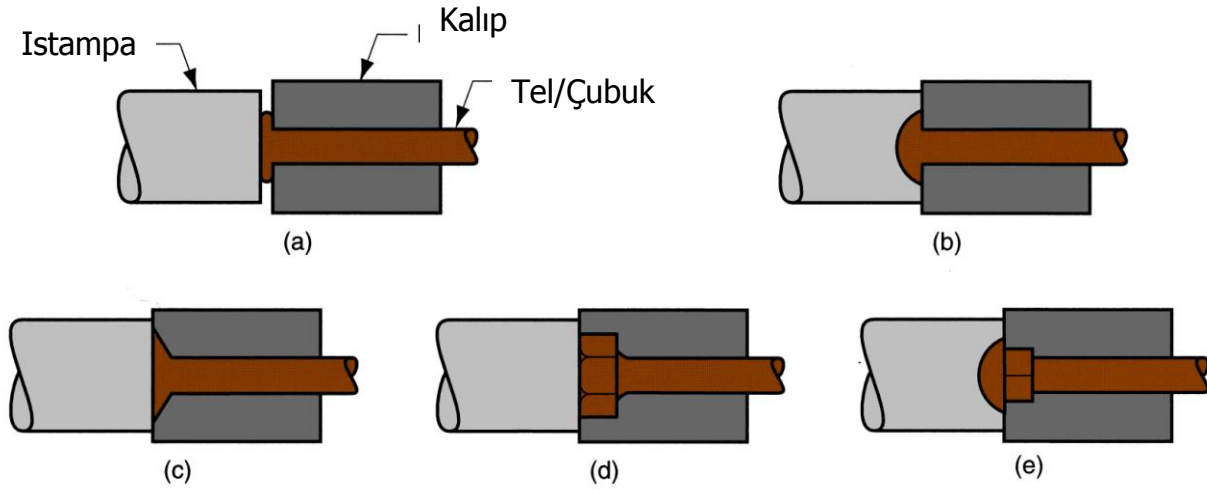


Uygulayabildiği kuvvet piston alanı ile sıvının basıncı çarpımına eşittir. Koçun yukarı kaldırılmasında basınçlı sıvı (genelde yağ) bir yön değiştirici valf yardımıyla silindirin altına yönlendirilir ve pistonun yukarı hareketi sağlanır. Çok büyük kuvvetlerin uygulanması mümkün olmakla birlikte yavaş hareket ettiklerinden dövme işlemlerinde çok sık kullanılmazlar.

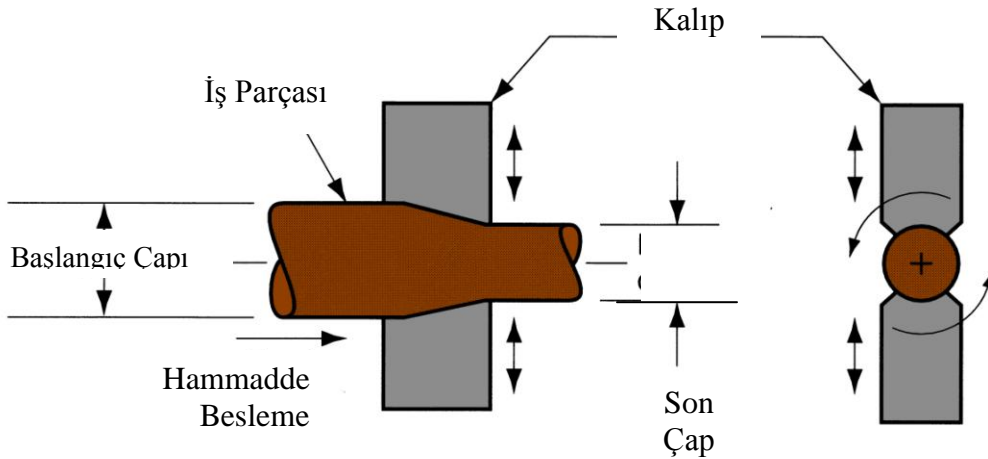
Önemli dövme uygulamalarından birisi de “Kafa Şişirmek (veya yığmak)”tır. Özellikle çivi başları, perçin başları, civata başlarının şekillendirilmesinde kullanılır. Tel veya çubuk şeklindeki malzeme makineye yüklenir. Sıcak şişirme yapılması halinde endüksiyonla ısıtma donanımı kullanılır. Kafa şekillendirildikten sonra ürün olması gereken boyuna kesilir. Civata ve vidaların imalatında bundan sonra ovalama yöntemi kullanılır.



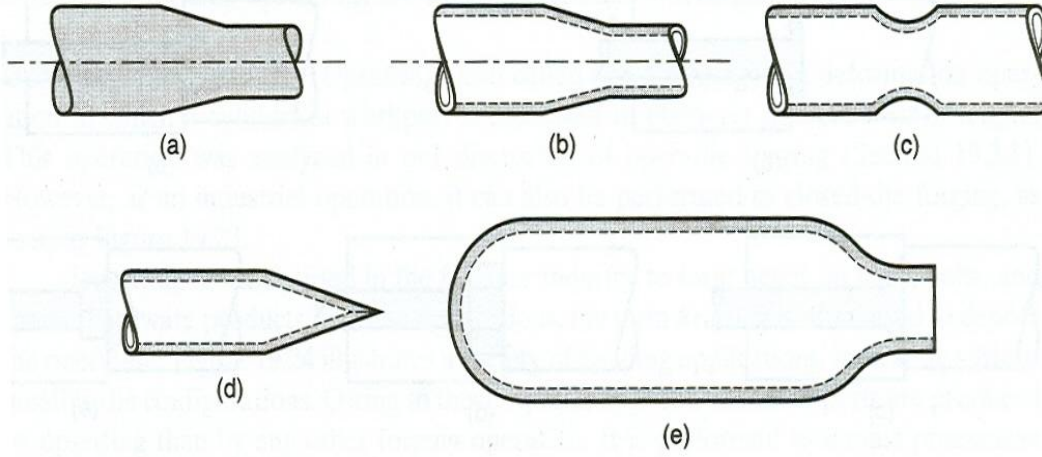
Kafa şişirme veya yığma işlemlerine ait bazı örnekler aşağıda şekilde verilmektedir:



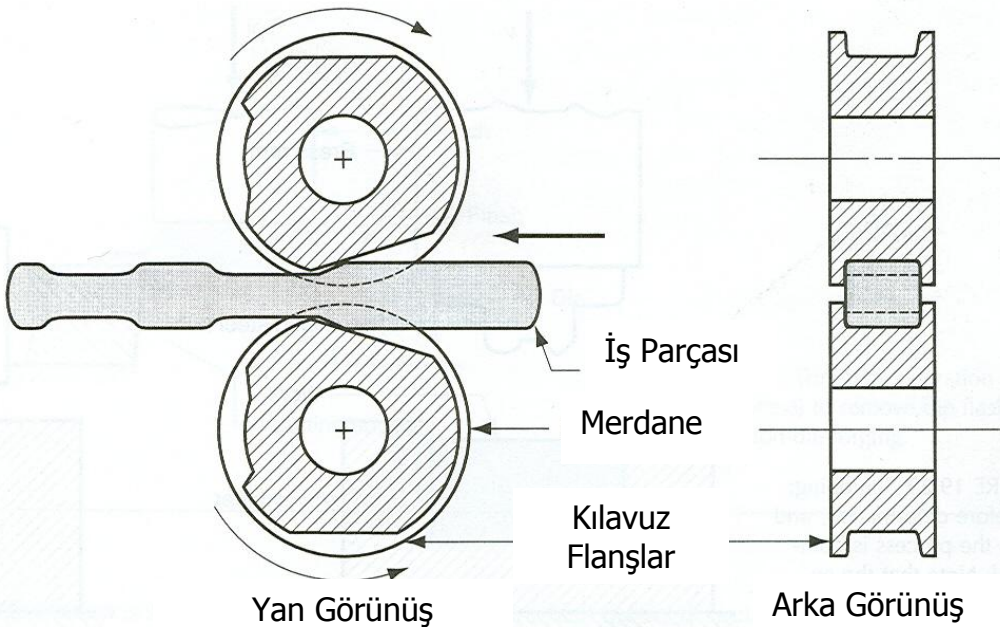
Diğer bir soğuk dövme işlemi “Tokaçlama” olarak isimlendirilen yöntemdir. Daha çok yuvarlak çubuk ve borulara koniklik vermek için geliştirilmiş bir tekniktir. Karşılıklı iki kalıbın yuvarlak malzemeye radyal olarak karşılıklı ve tekrarlı bir şekilde vurmasıyla gerçekleştirilir. Boruların tokaçlanmasında belirlenen iç çap değerinin sağlanması için mandrel kullanılır.



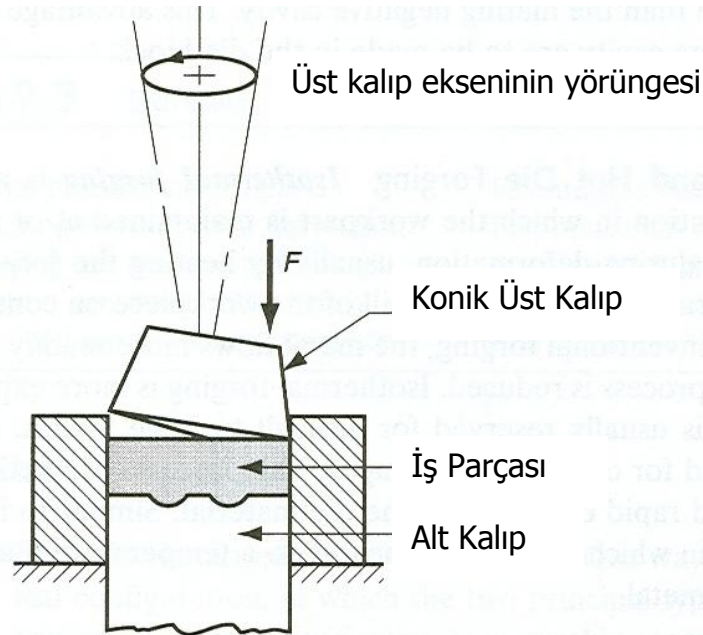
Tokaçlama yöntemiyle boru ve çubuk malzemelerden üretilen bazı mamullere ait örnekler aşağıdaki şekilde verilmektedir:



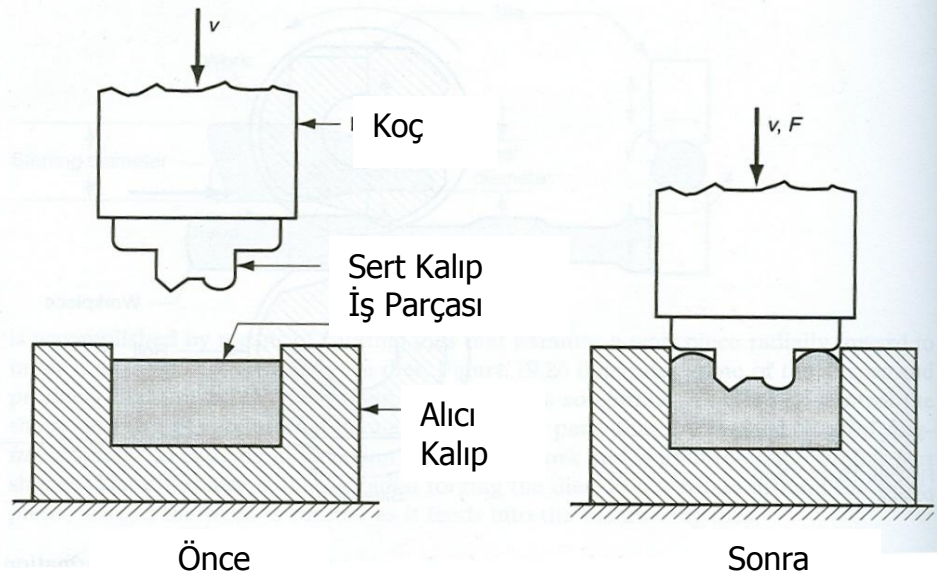
“Haddeleyerek Dövme” işleminde yuvarlak veya dörtgen kesitli parçalar birbirine karşı dönen ve üzerlerine şekillendirilme yapılacak geometrinin tersi işlenmiş merdaneler arasından geçirilerek imalat yapılır. Bu işlemde merdaneler haddelemede olduğu gibi sürekli dönmez. Sadece işlem tamamlanana kadar dönmeyi sürdürür. Dövülecek parça uzunluğu da (tekrarlar yoksa) merdane çevresi boyunca aşamaz.



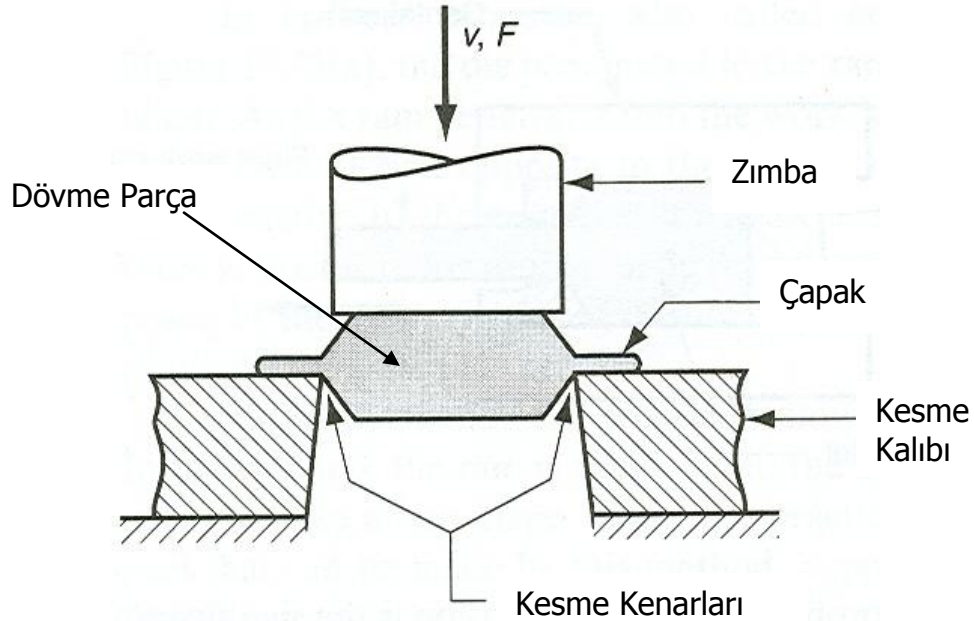
“Orbital Dövme” işleminde konik bir üst kalıp eksenini etrafında döndürülerek iş parçası üzerine bastırılmaktadır. Ayrıca üst kalıbın dönme eksenine de yörüngesel bir hareket verilmektedir. Kalıp konik olduğu için her dönme sırasında parçanın belli bir alanına kuvvet uygulamakta ve böylece dövme işlemi kademeli olarak gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem özellikle büyük dövme kuvvetleri gerektiren işlemler için kullanışlıdır. Çoğunlukla tekerlek gibi radyal simetriye sahip parçaların dövülmesinde bu yöntemden yararlanılmaktadır.



“Ezerek Dövme” veya **“Çökertme”** işleminde sert metalden hazırlanmış bir erkek kalıp daha yumuşak malzemeye sahip iş parçasına bastırılmaktadır. Böylece erkek kalıp yüzünün sahip olduğu şeklin tersi parça üzerine çökertilerek şekillendirilmiş olur. Genelde plastik parça kalıplarındaki veya basınçlı döküm kalıplarındaki boşlukları işlemede kullanılan bir tekniktir. Kalıp boşluğunun tam olarak elde edilmesi birkaç işlem kademesi gerektirebilir. İşlem tamamlandıktan sonra yüzeye çıkan fazla malzeme talaşlı imalat ile alınır. Gerektiğinde uygulanacak yeniden kristalleşme tavlama ile pekleşme etkisi yok edilebilir.



Son olarak çapaklı dövme sonrasında çapakların dövme parçadan ayrılması için “Çapak Kesme” işlemine başvurulmaktadır. Bunun için hazırlanan kesme kalıpları daha çok eksantrik preslere bağlanmakta ve kesme işi gerçekleştirilmektedir.

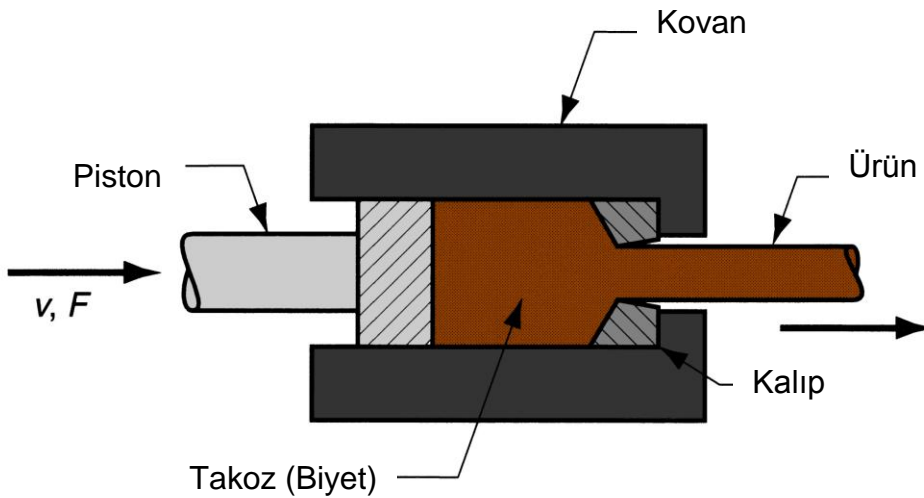


3. EKSTRÜZYON

Basma gerilmeleri ile malzemenin sıkıştırılması ve bir kalıptan o kalıbın şeklini alarak akmaya zorlanması ile gerçekleştirilen şekillendirme işlemidir. Diş macunu tüpüne uygulanan basınç ile diş macununun akıtılması işlemine benzer. Belirli bir kesite sahip malzemenin uzun boylarda üretilmesini sağlar. Başlıca iki türü vardır:

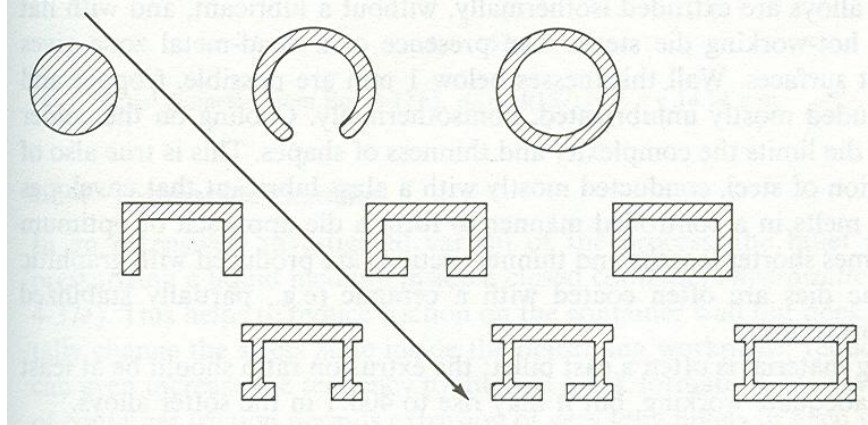
- a. Direk Ekstrüzyon**
- b. Endirekt Ekstrüzyon**

1. Direk Ekstrüzyon

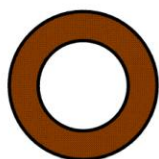
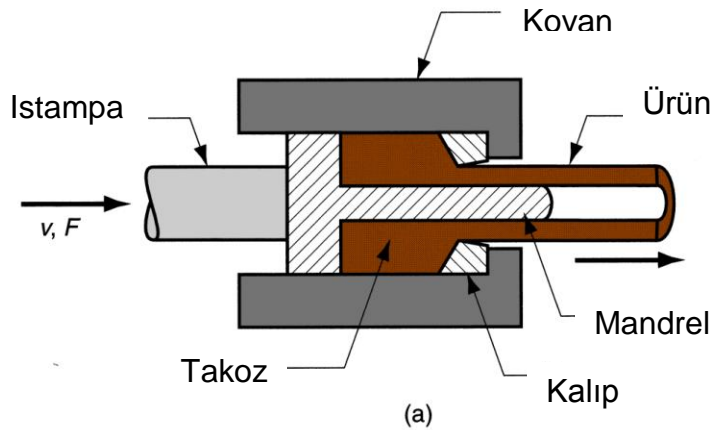


Ekstrüzyonun ham maddesi olan ve genelde yuvarlak kesite sahip takozlar kovan adı verilen kalın cidarlı bir silindirik kabın içine konur. İşlem ileri ekstrüzyon olarak da anılır. İşlem sıcak veya soğuk koşullarda gerçekleştirilebilir. Mamul kesit özelliklerini kalıp belirler. Direk ekstrüzyonda ürünün hareket yönü ile pistonun hareket yönü aynıdır. Ekstrüzyon işlemi sırasında takoz sonuna kadar basılmaz ve kovan içinde bir miktar artık malzeme kalır. Direk ekstrüzyonda dolu kesitli ürünler elde edilebildiği gibi içi boş, örneğin tüp veya boru şeklinde ürünler de elde edilir.

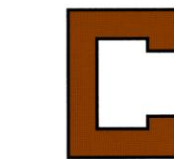
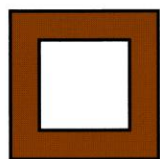
Direk ekstrüzyon sırasında ıstampa malzemeyi kovan içinde ileri kalıba doğru ittirdiği için kalıp-takoz ara yüzeyinde büyük sürtünme kuvvetleri oluşur. İşlemin gerçekleştirilmesi için bunun aşılması gerektiğinden çok büyük ekstrüzyon kuvvetleri doğar.



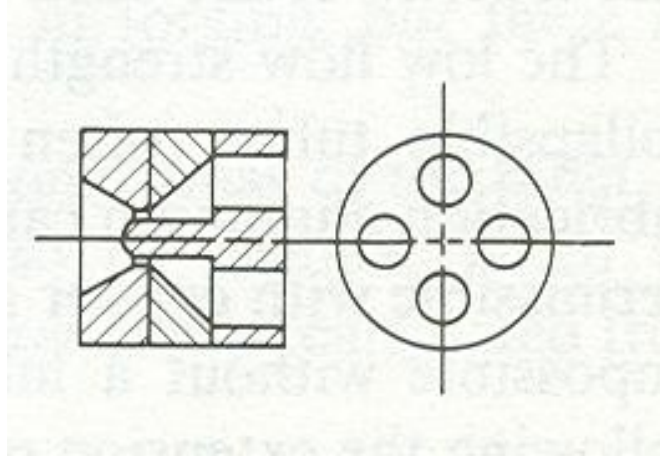
Ekstrüzyon sırasında elde edilen kesitlerin zorluk derecesi yukarıdaki şekilde yer alan okun yönüyle belirtilmektedir. Burada belirleyici parametre “çevre/alan” oranıdır. Bu oran ok yönünde olduğu gibi arttıkça işlem zorlaşır. Örneğin içi boş ürünlerde bu oran büyük olup işlem zorlaşmaktadır. Boru ekstrüzyonu “Mandrel” veya “Köprülü matris” kullanılarak gerçekleştirilir.



(b)

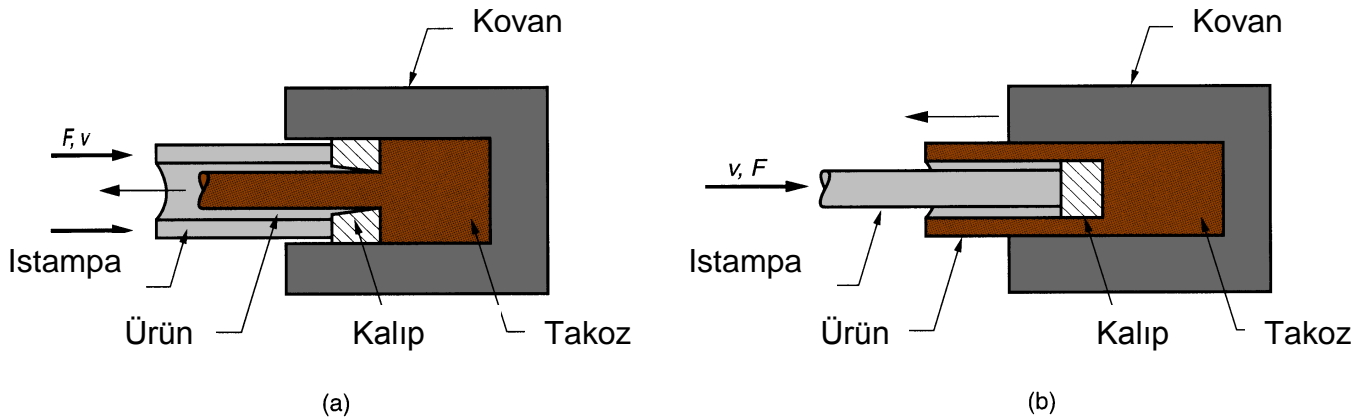


(c)



Köprülü matris veya kalıpta takoz malzeme dört yoldan ilerleyerek kalıp ağzına doğru gelir. Burada dört adet çeyrek boru kesitindeki malzeme birleşir ve tam daire şeklini oluşturan yüksek basınçların yardımıyla alır. Üretim hızı yüksektir ancak kalıp maliyeti fazladır. Ayrıca nispeten yumuşak olarak kabul edilen malzemelere uygulanabilmektedir.

2. Endirekt Ekstrüzyon

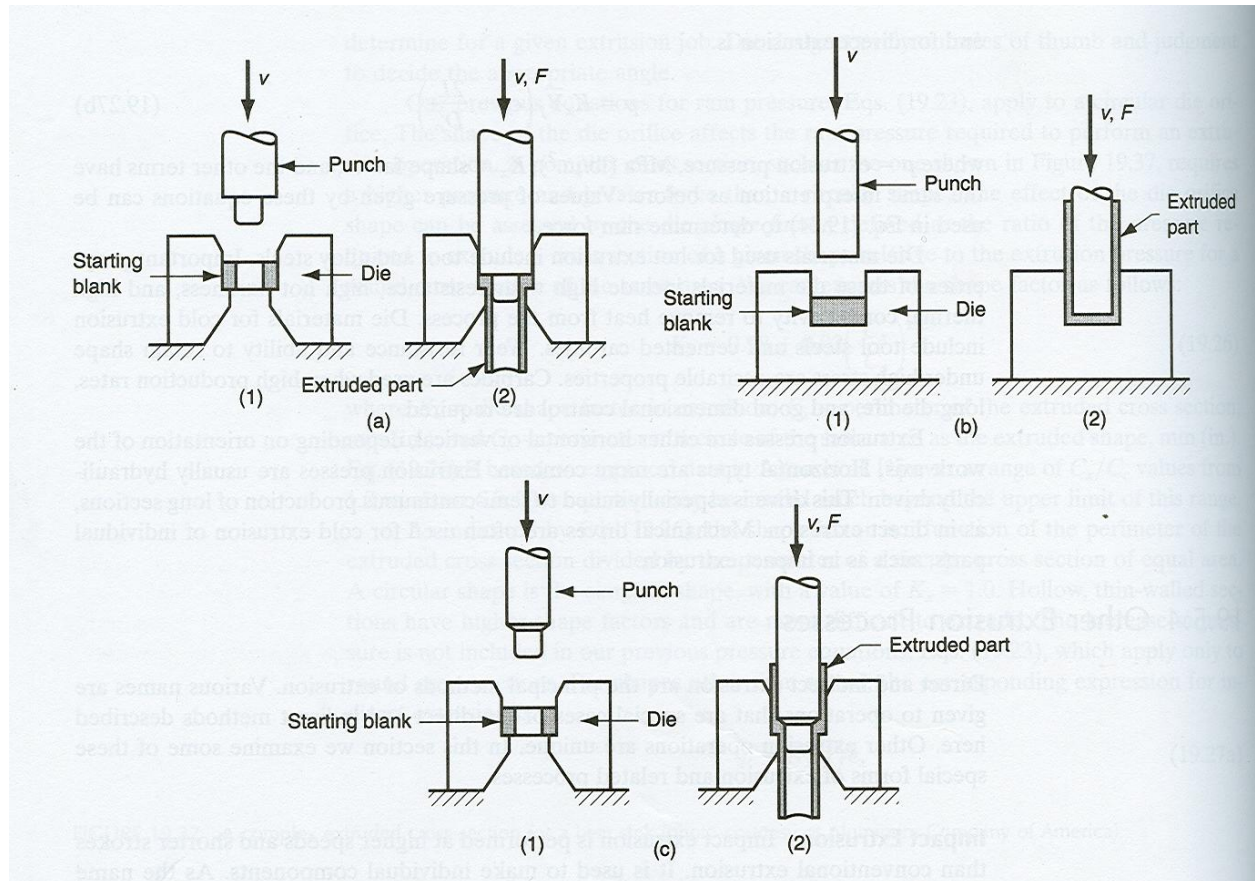


Endirekt ekstrüzyonda kalıp veya mandrel takoza batar, burada takozun kovana göre bir hareketi söz konusu değildir. Bu nedenle gerekli ekstrüzyon kuvveti azalır. Ancak burada ıstampanın azalan kesiti dikkate alınmalıdır. Bu işlem sırasında güçlük çıkarmaktadır. Bu işlem aynı zamanda “geri ekstrüzyon” veya “ters ekstrüzyon” olarak da bilinmektedir. Ayrıca ürünün hareket yönü de işlemde zorluk çıkarmaktadır.

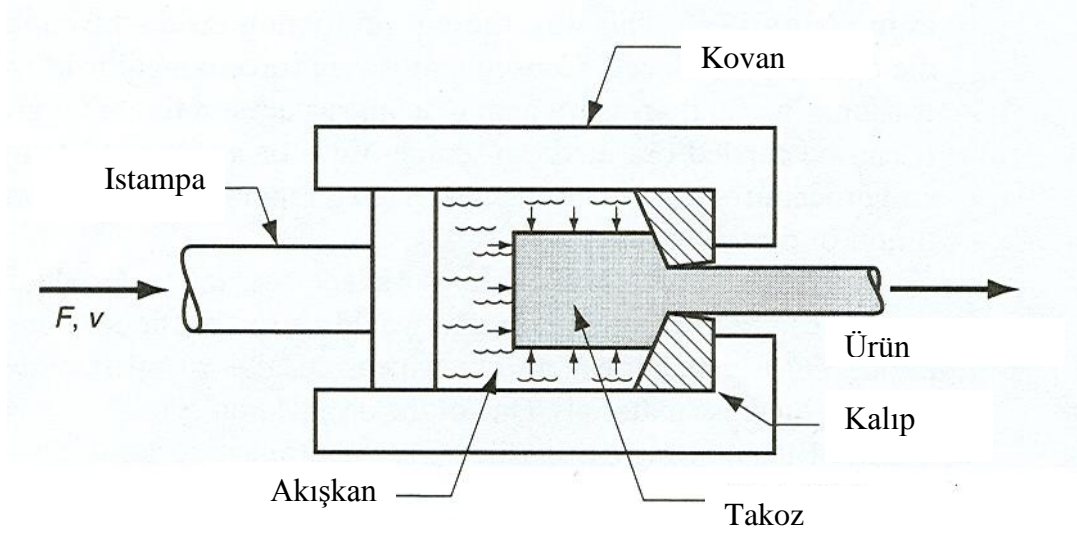
Ekstrüzyon şu üstünlüklere sahiptir:

1. Muhtelif şekillerde ancak uniform kesite sahip uzun yarı-mamullerin üretimi için çok uygundur,
2. Soğuk ekstrüzyonla dayanım arttırmak mümkündür,
3. Mamul boyutlarında yeterli hassasiyeti sağlamak daha kolaydır,
4. Üretim sırasında zayıt ve hurda kaybı daha azdır.

Sıcak ekstrüzyon takozun ve kovanın malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklara ısıtılmasıyla gerçekleştirilir. Bu sıcaklıkta akma dayanımı azaldığı ve şekillendirilebilme arttığı için daha kolay (daha az kuvvet ve güç kullanılarak) ve daha çok şekil değişimi (daha büyük kesit değişiklikleri sağlanarak) verilebilmektedir. Soğuk ekstrüzyon genel anlamda sürekli ürün imalatına uygun olmayıp genel olarak tek parça ürünlerin elde edilmesine müsaittir. Bu tür işlemler "darbeli ekstrüzyon" olarak tanımlanmaktadır.



Kalıp/kovan sürtünme etkisinden kurtulmanın en iyi yolu “hidrostatik ekstrüzyon” yöntemidir. Burada sıvı kovan ile takoz arasında yer alır ve sürtünme etkisini ortadan kaldırır. Bu işlemi yüksek sıcaklıklarda yapmak mümkün olmadığından yüksek kuvvetler gerekir ayrıca şekil verme miktarı da daha sınırlıdır. Ayrıca sızdırmazlığın sağlanması da işlemi zorlaştırmaktadır.



Ekstrüzyon işleminin analizinde öncelikle deformasyon miktarının tayin edilmesi gerekir. Bu amaçla “Ekstrüzyon Oranı” adı verilen parametreden yararlanılır. Bu değer endüstriyel uygulamalarda 16 ile 400 arasında gerçekleşir.

$$R = \frac{A_0}{A_s}$$

Burada A_0 takozun kesit alanını, A_s ise ürünün kesit alanını temsil etmektedir. Birim şekil değişimi ε ise;

$$\varepsilon = \ln R = \ln \frac{A_0}{A_s}$$

Şeklinde tanımlanmaktadır. Sürtünme ve iç şekil değişimi işinin ihmal edildiği ideal deformasyon şartlarında ıstamp yüzeyine gelen basınç p ,

$$p = \sigma \cdot \ln R$$

olarak hesaplanır. Burada işlem soğuk gerçekleştiriliyorsa akma gerilmesi σ yerine ortalama akma gerilmesi σ_{ort} hesaplanmalıdır. Ancak gerçek uygulamalarda gerek şekil değişimi sırasında iç şekil değişimi işini gerekse sürtünme etkisini hesaba katmak gerekmektedir.

Endirekt ekstrüzyonda sürtünmenin yokluğunda birim şekil değişimi hesabında aşağıdaki deneye dayalı ifadeden yararlanılmaktadır:

$$\varepsilon = a + b \cdot \ln R$$

Burada $a=0.8$, b ise kalıp açısına bağlı olarak 1.2 ile 1.5 arasındaki değerleri almaktadır. İstampa yüzeyine gelen basınç ise,

$$p = \sigma(a + b \cdot \ln R)$$

Şeklinde hesaplanmaktadır. Direk ekstrüzyonda ise sürtünmenin etkisi katılmalıdır. Aşağıdaki analizde sol taraf sürtünme nedeniyle gerekli ekstrüzyon kuvvetindeki artış, sağ taraf ise kovanda takozun hareketi sırasında oluşan sürtünme kuvveti verilmektedir ve bunların birbirine eşit olduğu kabulü yapılmaktadır.

$$p_s \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \right) = \mu \cdot p_c \cdot (\pi \cdot D_0 \cdot L)$$

Burada p_f sürtünmeden gelen ek basınç, μ sürtünme katsayısı, p_c kovan yüzeyine etkiyen basınç, L takoz boyu ve $(\pi \cdot D_0 \cdot L)$ takozun sürtünme yüzeyi alanıdır. En kötü durumda sürtünmenin çok yüksek yani yapışma durumunun geçerli olduğu halde sürtünme gerilmesinin takoz malzemesinin

kesme akma gerilmesine (τ) eşit olduğu düşünülduğünde bağıntı,

$$p_s \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \right) = \mu \cdot p_c \cdot (\pi \cdot D_0 \cdot L) = \tau \cdot (\pi \cdot D_0 \cdot L)$$

şeklini alır. Ayrıca kesme akma gerilmesinin malzemenin normal akma gerilmesinin yarısına eşit olduğu varsayılacak olursa sürtünme kaynaklı basınç artışı;

$$p_f = \sigma \frac{2 \cdot L}{D_0}$$

olarak hesaplanır. Bu durumda toplam ekstrüzyon basıncı,

$$p = \sigma \left(\varepsilon + \frac{2L}{D_0} \right)$$

olup bu durumda ekstrüzyon kuvveti F (N)

$$F = p \cdot A_0$$

ve işlemi gerçekleştirmek için gerekli güç P (J/s) ise

$$P = F \cdot v$$

olarak hesaplanır. Burada v (m/s) ıstampanın hızıdır.

Kuvvet hesabında bir de kesit faktörü K dikkate alınmalıdır.

$$K = 0.98 + 0.02 \left(\frac{C_X}{C_C} \right)^{2.25}$$

Ampirik olarak yukarıdaki gibi tanımlanabilen bu bağıntıda C_x ürün kesitine ait çevre uzunluğu, C_c ise kesit alanının dairesel olarak düşünüldüğünde sanal olarak elde edilecek olan çemberin uzunluğudur. Katsayılar ve üstel ampirik

değerlerdir. Bu ilişki $\frac{C_x}{C_c}$ oranının 1 ile 6 değerleri arasında

geçerlidir. Bu durumda ekstrüzyon kuvveti:

a. Endirekt durumda ve sıcakta:

$$F = \sigma \cdot K \cdot \varepsilon \cdot A_0$$

Soğukta

$$F = \sigma_{ort} \cdot K \cdot \varepsilon \cdot A_0$$

Olarak hesaplanmaktadır.

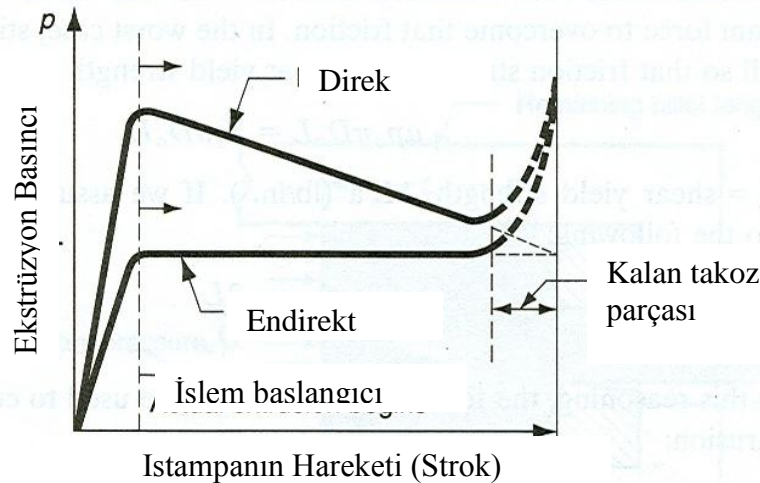
b. Direkt durumda ve sıcakta:

$$F = \sigma \cdot K \cdot \left(\varepsilon + \frac{2 \cdot L}{D_0} \right) \cdot A_0$$

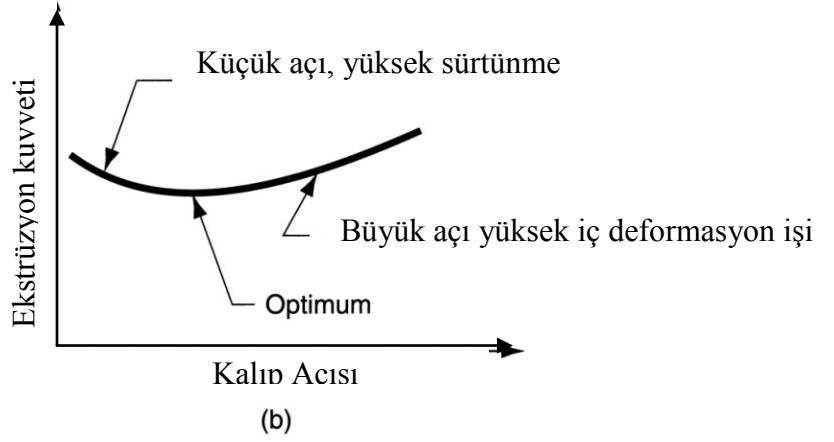
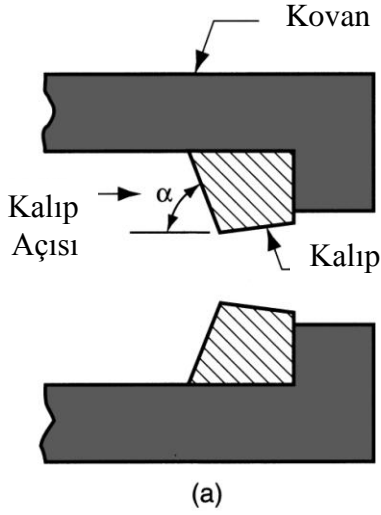
Soğukta ise

$$F = \sigma_{ort} \cdot K \cdot \left(\varepsilon + \frac{2 \cdot L}{D_0} \right) \cdot A_0$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

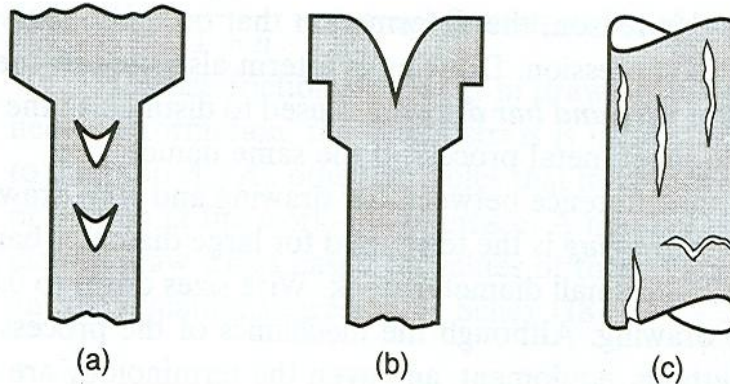


Ekstrüzyon kalıplarının bazıları açılı olacak şekilde tasarlanmaktadır. Bazılarında ise düz kalıplar ($\alpha=90^\circ$) kullanılmaktadır. Genellikle alüminyum ve alaşımları için düz kalıplar kullanılırken çelik pirinç gibi malzemelerin ekstrüzyonunda açılı kalıplar tercih edilmektedir.



Buradan da görüleceği gibi kalıp açısı seçiminde sürtünmenin ve iç deformasyon işinin dengelendiği optimum değer dikkate alınmaktadır. Optimum açının belirlenmesinde aynı zamanda yağlama ve işlem sıcaklığı da etkin olmaktadır.

Ekstrüzyon işleminde başlıca üç tip kusur oluşumu meydana gelebilir:



1. Yukarıda (a) şeklinde olduğu gibi merkezde ok başı şeklindeki çatlaklar: Bunun nedeni yetersiz redüksiyondur (şekil değişimi miktarı). Örneğin ekstrüzyon oranınının 10'dan düşük olması durumunda işlem sırasında yüzeydeki sürtünme kuvvetleri malzemenin merkezinde ikincil çekme gerilmelerinin oluşmasına neden olur. Bunun büyük değerler almasıyla merkezde eksen boyunca çatlaklar görülebilir.

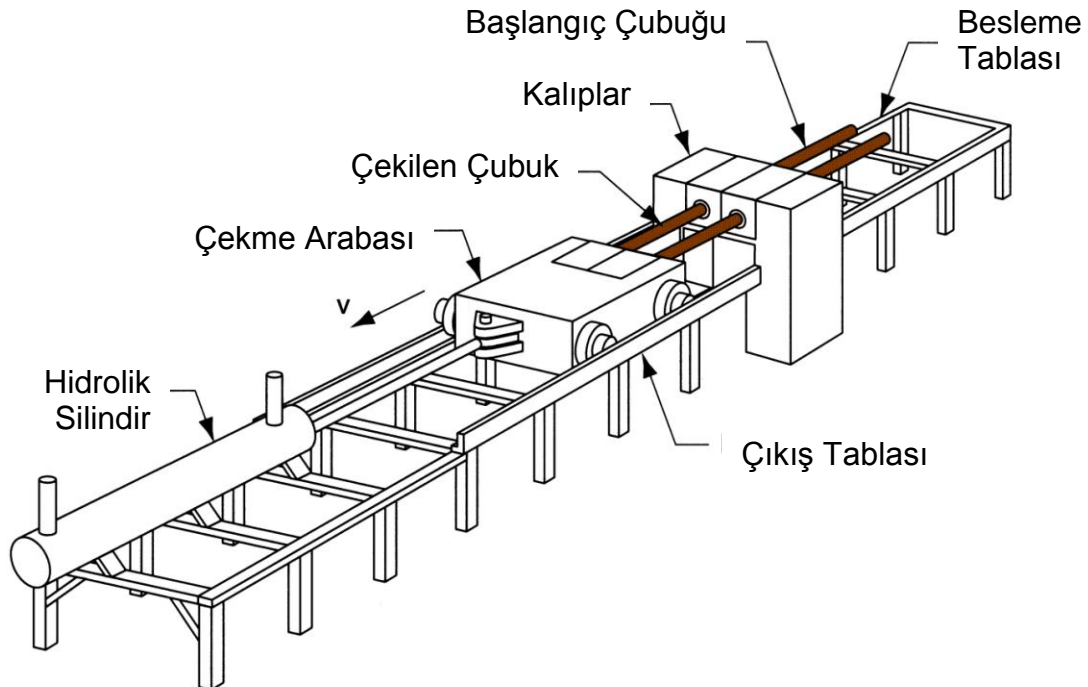
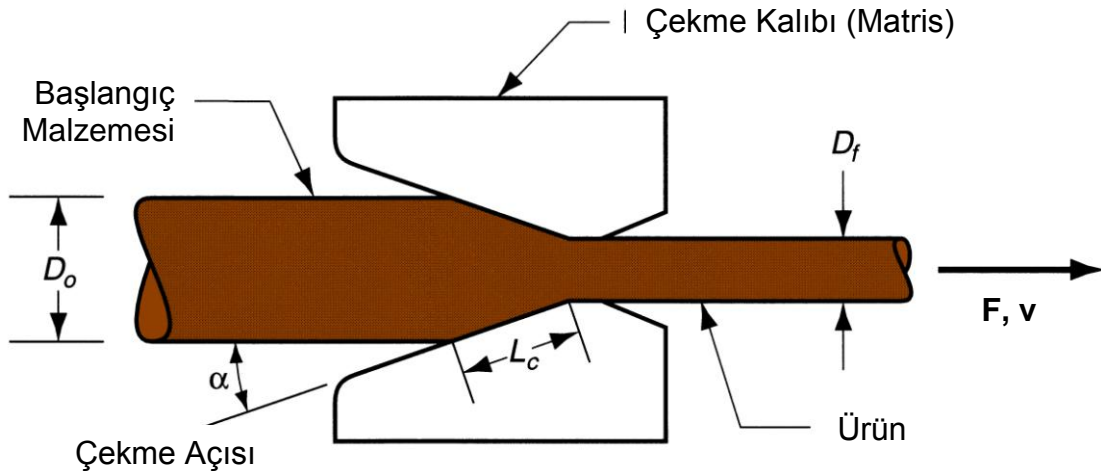
2. Yukarıda (b) şeklinde olduğu gibi takoz sonuna kadar basıldığı durumda ortadan kolayca ve daha fazla akan malzeme merkezde ürünün sonuna doğru boru oluşumuna neden olur. Bu yüzden takozu sonuna kadar basmamak gereklidir.

3. Yağlamanın yetersiz olduğu durumda yukarıdaki (c) şeklinden de görüleceği gibi, sıcaklığın özellikle yüksek deformasyon hızları nedeniyle arttığı durumlarda yüzey çatlaklarına da rastlanabilir.

Ekstrüzyon işlemlerinde çoğunlukla yatay, hidrolik ekstrüzyon preslerinden yararlanılır. Bu tür presler 500 ile 4000 ton aralığında basma kapasitesine sahiptir. Sıcak ekstrüzyonda takozların ısıtılmasında fırınlardan veya endüksiyon ısıtma donanımından yararlanılmaktadır. Gene sıcak ekstrüzyon işleminde kovanlarda takozun ısı kaybını önlemek için ısıtma tertibatı da bulunmaktadır. Yardımcı donanım olarak ayrıca ürün çıkışında ani soğutma ve gerdirme üniteleri de kullanılabilir.

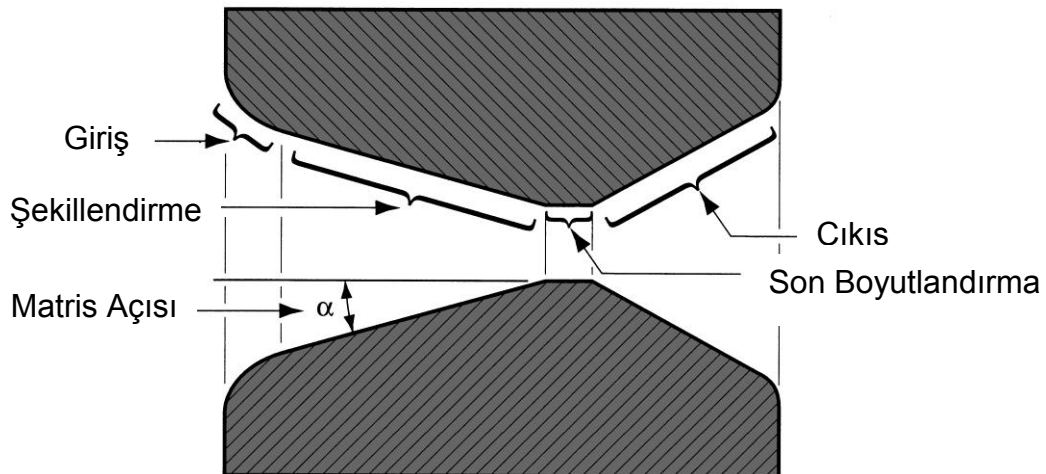
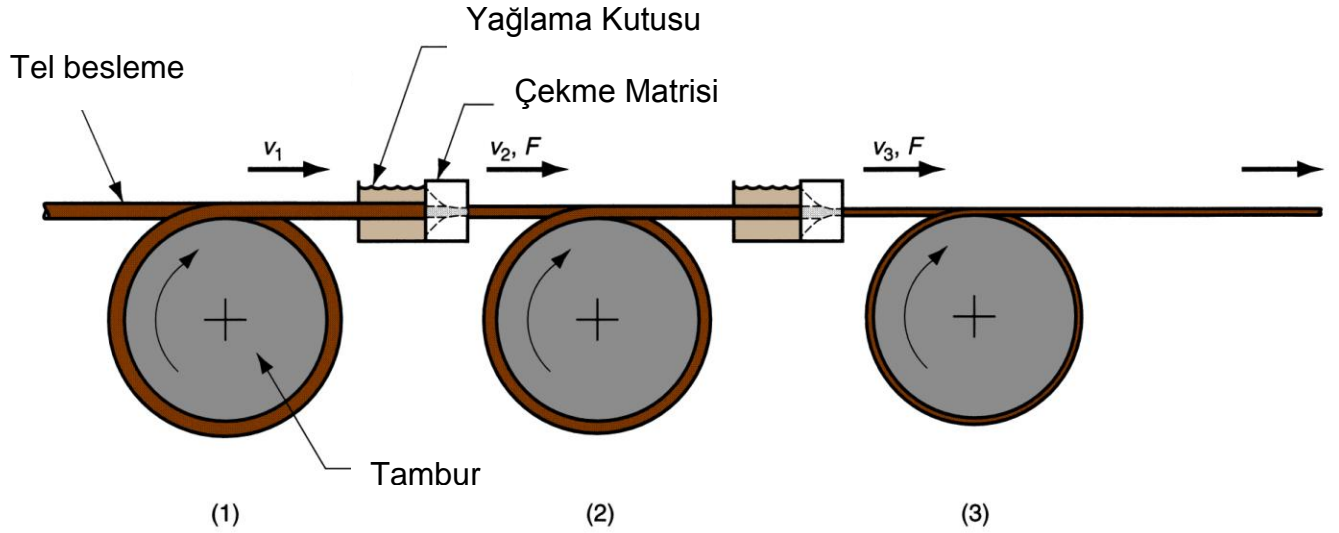
4. ÇUBUK ve TEL ÇEKME

Bu işlemle çubuk veya telin kesit alanı küçültülmekte ve boyu uzatılmaktadır. Ekstrüzyona prensip itibarıyla benzetmekle birlikte ekstrüzyonda işlem takozun ittirilerek basılmasıyla gerçekleşirken burada işlem çubuk veya telin kalıp sonrasında tutulup çekilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Çekme işleminde çekme gerilmeleri etkin olmakla birlikte dolaylı olarak kalıpta şekillenme sırasında basma gerilmeleri de rol almaktadır.



Yukarıdaki şekilde bir çubuk çekme düzeneği verilmiştir. Hidrolik silindir vasıtasıyla çekme işlemi uygulanmaktadır. Hidrolik silindire bağlı çekme arabasında çeneler bulunmaktadır. Bunlar kesiti küçültülerek (örneğin soğuk döverek) kalıp boşluğundan geçirilen malzemeyi tutmaya yaramaktadır. Araba işlem sırasında raylar üzerinde hareket etmektedir.

Tel çekme işleminde ise işlemin arka arkaya gerçekleştirildiği çok tamburlu (4 ile 12 arasında ardı ardına sıralanan kalıp sistemlerine uygun) ırgat (bocurgat) sistemleri kullanılmaktadır.



Yukarıdaki şekilde tipik bir çubuk veya tel çekme matrisine ait kesit verilmiştir. Çekme işleminde matris ile malzeme arasında çok büyük sürtünme gerilmeleri oluşmakta bu da işlemi güçleştirmektedir. Bunu engellemek için çok iyi yağlama yapılması gerekir. Bu amaçla hidrodinamik yağlama koşulları sağlanmaya çalışılır. Bu ise içinde yağlayıcı sıvı bulunan kutularda ıslak koşullarda sağlanır. Dolayısıyla matris bu kutuların içinde yani yağlayıcı sıvının içinde bulunur ve işlem bu kutunun içinde gerçekleştirilir. Yağlamanın etkin olması için matrislerin giriş kısmı konik olarak işlenir. Böylece matrisin içine malzeme yağlayıcı ile birlikte çekilir. Bundan sonra matris açısıyla konik olarak işlenmiş şekillendirilmenin gerçekleştiği bölge bulunur. Matris açısı malzemeye bağlı olarak 6° ile 20° arasında değişir. Üçüncü bölge silindirik işlenmiş olup ürün son boyutuna bu bölgede kavuşur. Bundan sonra gene konik işlenmiş (yaklaşık 30° açılı) bir çıkış bölgesi vardır. Genelde kalıplarda soğuk iş çelikleri kullanılmakla birlikte matrislerin imalatında sinterlenmiş malzeme kullanılmaktadır. İnce çaplı tel çekmek için yapay veya doğal elmas kullanılmaktadır.

Malzemenin çekme işlemine hazırlık aşamaları ise şunlardır:

1. Yumuşatma Tavlaması

Malzemenin sünekliğini veya şekillendirilebilme özelliğini iyileştirmek için yeniden kristalleştirme tavlama uygulanır.

2. Yüzey Temizleme

Isıl işlem sonrası veya bekletilme sonrasında yüzeyde oluşan tufal ve pasın temizlenmesi gerekir. Bunlar çok sert olduklarından matris yüzeylerine zarar verirler. Bu amaçla kimyasal (asidik) banyolardan veya kumlama gibi mekanik işlemlere başvurulur. Temizleme sonrası yüzeylere bir ön yağlama da uygulanabilir.

3. Malzeme ucunun kesitini küçültme

Malzemenin kalıp boşluğundan geçmesi için yapılır. Tokaçlama, dövme, tornalama gibi yöntemler kullanılabilir.

Çekme işleminin gerilme ve kuvvet analizi için öncelikle şekil değişimi miktarı ε tanımlanmalıdır. Çekme işlemlerinde şekil değişimi miktarını tanımlamak için uygulamalarda “redüksiyon (r)” deyimi kullanılmaktadır. Redüksiyon;

$$r = \frac{A_0 - A_s}{A_0}$$

Şeklinde giren ve çıkan malzemenin kesit farkının giren malzemenin kesit alanına oranı olarak tanımlanmaktadır. Birim şekil değişimi ise;

$$\varepsilon = \ln \frac{A_0}{A_s} = \ln \frac{1}{1-r}$$

Olarak tanımlanmaktadır. İdeal durumda yani sürtünme ve iç şekil değişimi işinin olmadığı varsayıldığında çekme gerilmesi;

$$\sigma_{\zeta} = \sigma_{ort} \cdot \varepsilon = \sigma_{ort} \cdot \ln \frac{A_0}{A_s}$$

Şeklinde belirlenebilmektedir. Burada dikkat edildiği gibi akma gerilmesi olarak σ_{ort} kullanılmıştır. Bu işlemin soğuk şartlarda gerçekleştirildiğini göstermektedir. Çekme işlemi genelde soğuk koşullarda yapılır. Çünkü tel veya çubuk matris sonrasında çekileceği için kopma olmaması için dayanımın yüksek olması istenir. Bu ise ancak deformasyon sonrası elde edilecek pekleşmeyle mümkündür. İkinci olarak hidrodinamik yağlamayı sıcak koşullarda sağlamak mümkün değildir.

Sürtünmenin ve iç şekil değişimi işinin dikkate alındığı gerçek durumda çekme gerilmesi;

$$\sigma_{\zeta} = \sigma_{ort} \cdot \ln \frac{A_0}{A_s} \left(1 + \frac{\mu}{\tan \alpha} \right) \cdot \phi$$

Olarak tanımlanmaktadır. Burada parantez içindeki ifade sürtünme etkisini, son ϕ ifadesi ise iç şekil değişimi işinden kaynaklanan etkiyi vermektedir. Şekil değişimi etkisi kesit geometrisine bağlı olarak;

$$\phi = 0.88 + 0.12 \frac{D}{L_c} \quad (\text{yuvarlak kesitli malzemeler için})$$

$$\phi = 0.80 + 0.20 \frac{h}{L_c} \quad (\text{dörtgen kesitli malzemeler için})$$

Şeklinde tanımlanmaktadır. Burada α matris açısını (gerçekte tam açının yarısıdır), μ malzeme ile matris arasındaki sürtünme katsayısını, D ortalama çapı, L_c şekil değişimi sırasında malzemenin matrise temas ettiği uzunluğu, h ise dörtgen kesitli malzemelerde ortalama yüksekliği tanımlamaktadır. D ve L_c değerleri geometriden

$$D = \frac{D_0 - D_s}{2}, \quad L_c = \frac{D_0 - D_s}{2 \cdot \sin \alpha}$$

Şeklinde belirlenmektedir. Bu durumda işlem için gerekli çekme kuvveti F_ζ yuvarlak kesitli bir çubuk için;

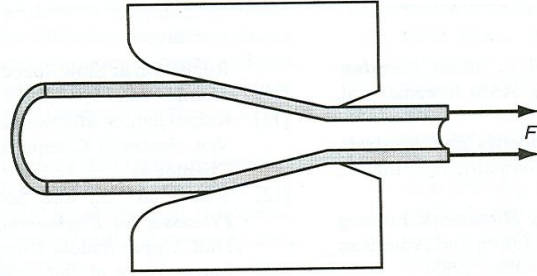
$$F_\zeta = A_s \cdot \sigma_\zeta = A_s \cdot \sigma_{ort} \cdot \ln \frac{A_0}{A_s} \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\tan \alpha} \right) \left(\sin \alpha \cdot \frac{D_0 + D_s}{D_0 - D_s} \right)$$

Olarak hesaplanabilir. Bu arada dikkat edilmesi gereken diğer bir nokta da çekme gerilmesinin malzemenin akma dayanımından büyük olmamasıdır.

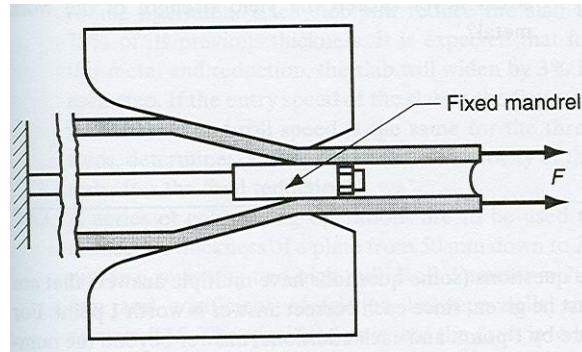
$$\sigma_\zeta < (0.8) \cdot \sigma \quad (\sigma = K \cdot \varepsilon^n)$$

Aksi takdirde çekme işlemi başarılı olamaz ve malzeme kopar. Malzemenin % 0,2 akma dayanımı için malzemenin ε kadar şekil değiştirdikten sonraki pekleşme neticesinde ulaşılan akma gerilmesinin % 80'i dikkate alınabilir.

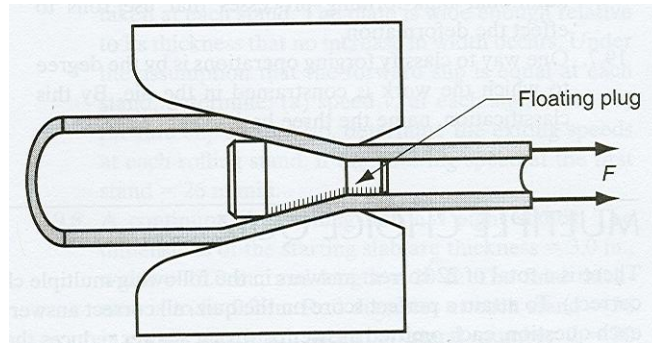
Çekme işlemlerinin önemli bir bölümünü de içi boş profillerin (örneğin boru) çekilmesi oluşturur. Bu işlemlerde gerek et kalınlığının gerekse çap veya çevresinin küçültülmesi sağlanır. Genellikle borular ekstrüzyonla veya Mannesmann usulü haddelemeyele elde edilir. Ancak bu işlemlerin gereği küçük çap ve ince et kalınlıkları elde etmek mümkün değildir. Bu şekilde üretilen dikişsiz, merdanelerle büküp kaynakla elde edilen dikişli borularda et kalınlığını ve çapı düşürmek boru çekme yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilir.



Malafasız Serbest Boru Çekme



Sabit Malafalı Boru Çekme



Yüzer Malafalı Boru Çekme

SAC ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMLERİ

(Ders Kitabı 20. Bölüm)

Sac Şekillendirme işlemlerinin ticari açıdan önemi büyüktür. Beyaz eşya, otomotiv, havacılık sektörlerinde kullanılan birçok parça yassı yarı mamuller (sac veya levha) Őekillendirilerek imal edilmektedir.

- **Levha $t > 5$ mm**
- **Sac 0.2 mm $< t < 5$ mm**

Sac Şekillendirme yöntemleri büyük çoğunlukla soğuk olarak uygulanır.

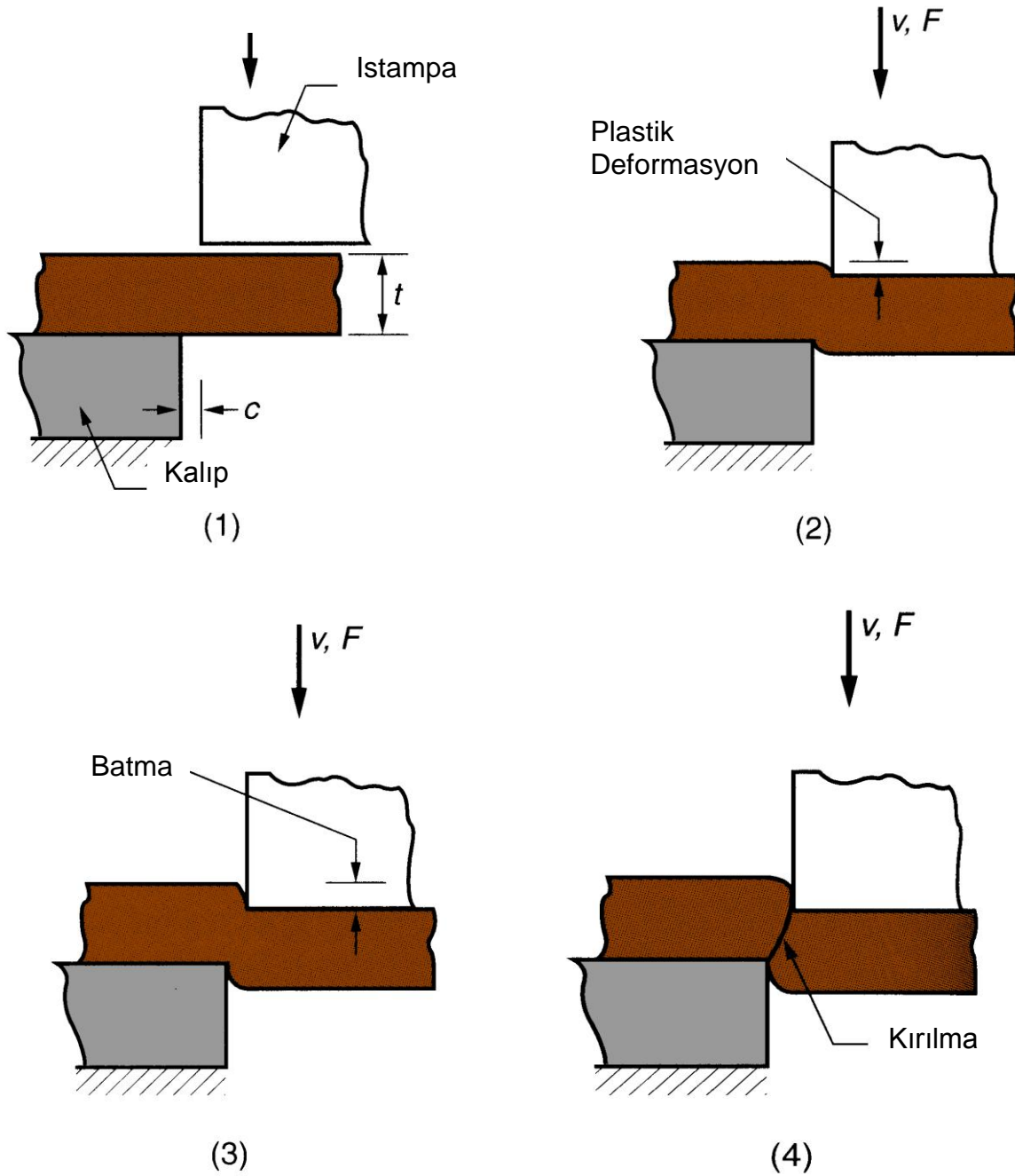
Sac Şekillendirme yöntemleri:

- 1. Sac kesme,**
- 2. Sac bükme,**
- 3. Derin çekme,**
- 4. Diğer Şekillendirme yöntemleri olarak gruplandırılabilir.**

Sac Ürünlerin Avantajları:

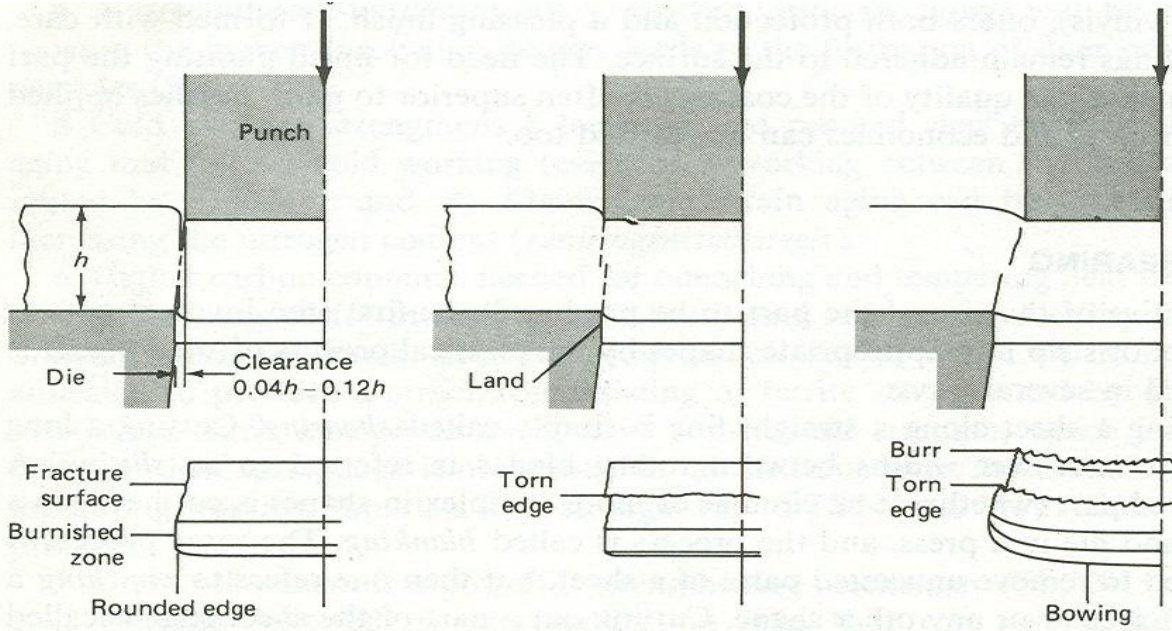
- 1. Yüksek Dayanım**
- 2. Yüksek boyut hassasiyeti**
- 3. İyi yüzey özellikleri**
- 4. Daha düşük maliyet,**

A) KESME



Optimum Kesme Aralığı, $c = a.t$

Metal	a
Yumuşak Al alaşımları	0.045
Sertleştirilebilir Al alaşımları, pirinç, yumuşak çelik ve paslanmaz çelik	0.060
Soğuk haddelenmiş sertleştirilmiş çelik, paslanmaz çelik	0.075



a. Optimum aralık

b. Aralık yetersiz

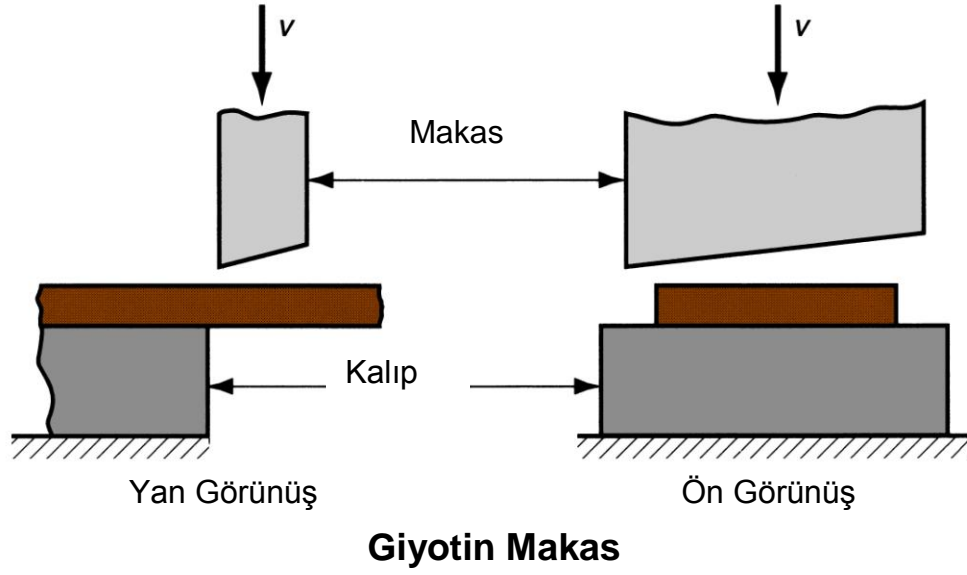
c. Aralık çok

Kesme işleminde kalıplar arasında bir optimum aralık bırakılmalıdır. Bunun yapılmaması durumunda kesme kalitesi kötüleşir. Dik kesme kenarları elde edilemez ve kesme yüzeylerinde girinti çıkıntılar meydana gelir. Optimum aralık malzeme sertliği veya sünekliği ile sac kalınlığına bağlıdır. Sert olanlarda daha büyük, yumuşak saclarda daha küçük aralıklar kullanılmaktadır.

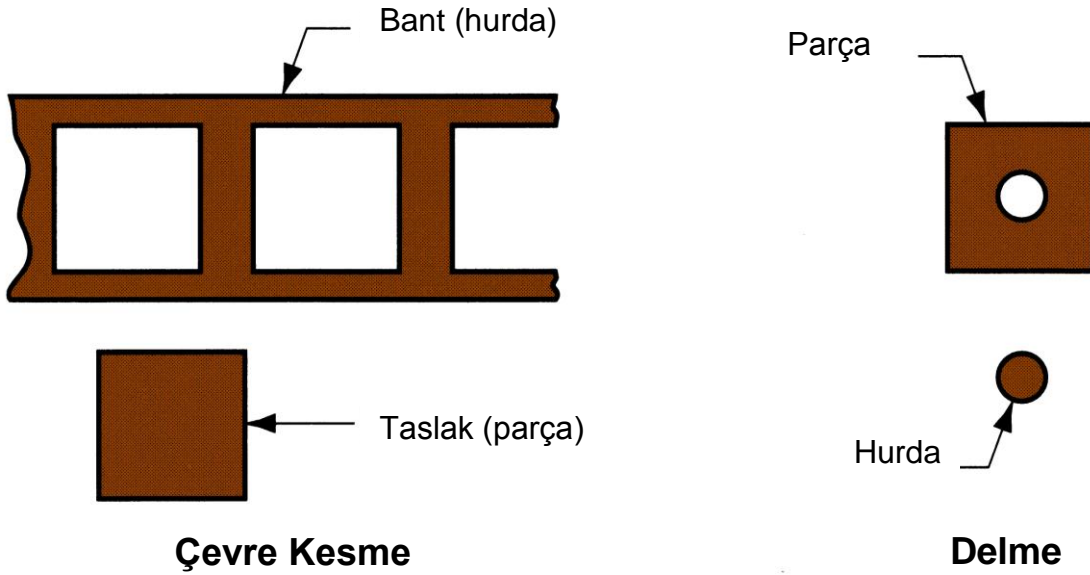
Sac kesme işlemleri şu şekilde gruplandırılabilir:

- 1. Düz (Kenar) Kesme**
- 2. Çevre Kesme**
- 3. Delme**

1. Düz Kesme



2. Çevre Kesme ve Delme



Yuvarlak Çevre Kesme Kalıp Çapı:

$$D_b$$

Yuvarlak Çevre Kesme İstampa Çapı:

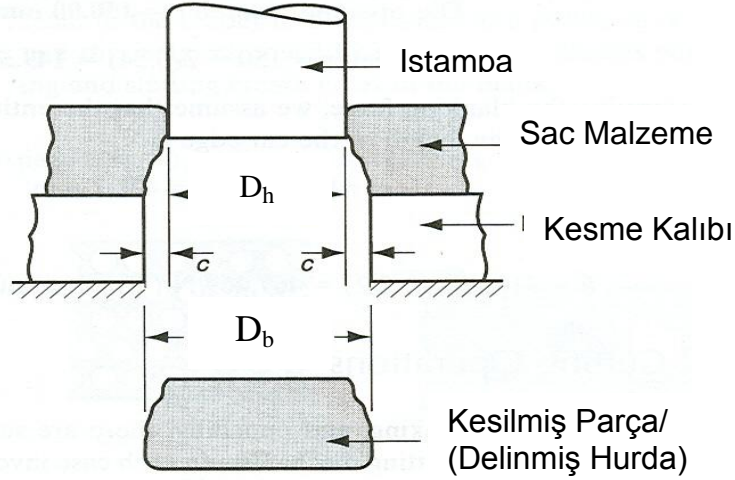
$$D_b - 2c$$

Yuvarlak Delme İstampa Çapı:

$$D_h$$

Yuvarlak Delme Kalıp Çapı:

$$D_h + 2c$$



Kesme kuvveti hesabında kesme boyu, malzemenin kesme dayanımı ve sac kalınlığı etkin rol oynar.

$$F = \tau.t.L$$

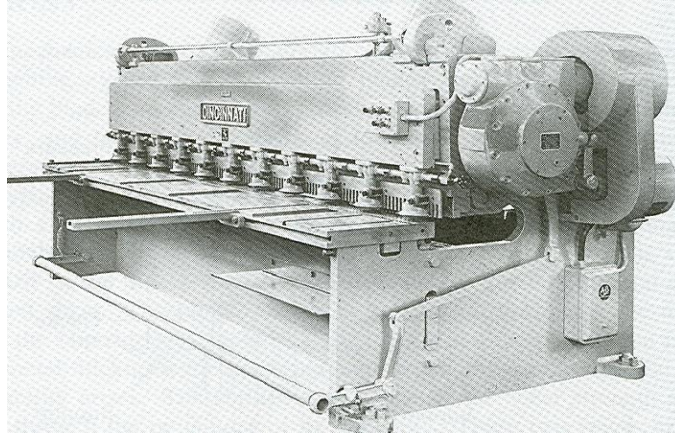
Veya çekme dayanımı cinsinden

$$F = 0.7(\sigma_c.t.L)$$

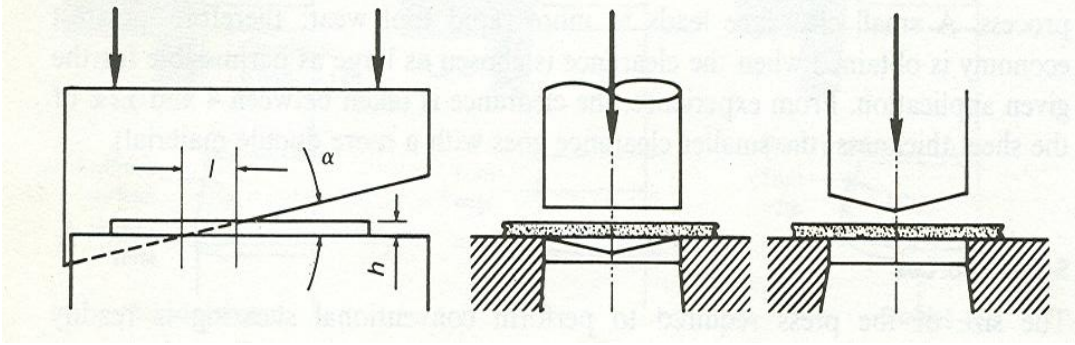
Olarak hesaplanır. Kesme sırasında harcanan iş veya bunu karşılayacak enerji yaklaşık olarak,

$$E = 0.4.(F.t)$$

Şeklinde hesaplanabilir. Boyutlar için mm, dayanım ise N/mm² birimleri kullanılırsa kesme kuvveti N cinsinden ve enerji de N.mm cinsinden bulunur. Kesme kuvvetinin azaltılması, kalıpların daha uzun ömürlü olması için açıldırma yapılır. Böylece kesme boyu azaltılarak kesme kuvveti düşürülür. Uzun düz kesme yapmak için giyotin makaslar kullanılır. Kesme boyu 6 metreye kadar uzanan giyotin makaslar vardır.



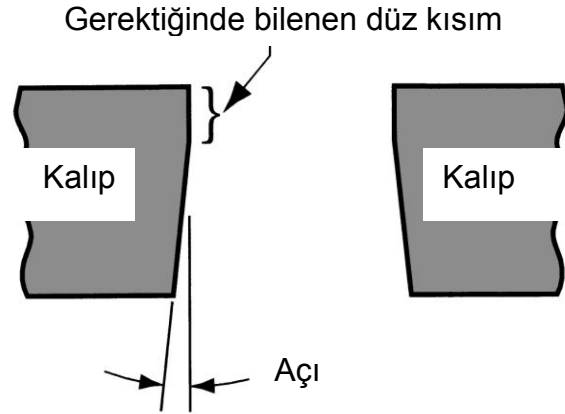
Giyotin Makas



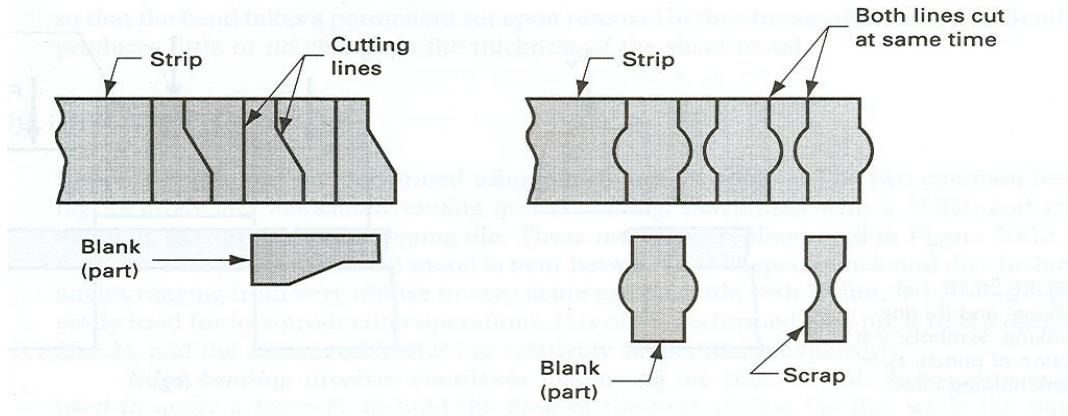
Giyotin Makas

Kesme veya delme kalıbı

Delme ve kesme sonrası parçaların aşağı kolay düşmesini sağlamak amacıyla 0.5 ile 1.5° arasında açılar verilir.

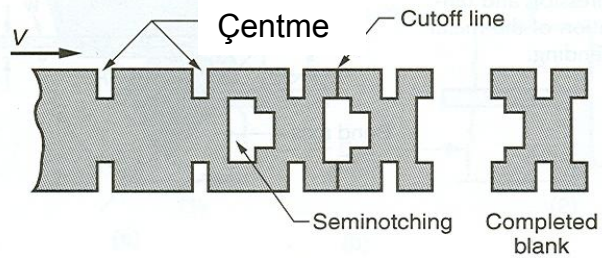


Çevre kesme ve delme işlemlerinin dışında diğer sac keme yöntemleri olarak uç kesme (hurda yok), ayırma (iki taslak arasında hurda var), çentme, yarma ve etek kesme işlemleri vardır.

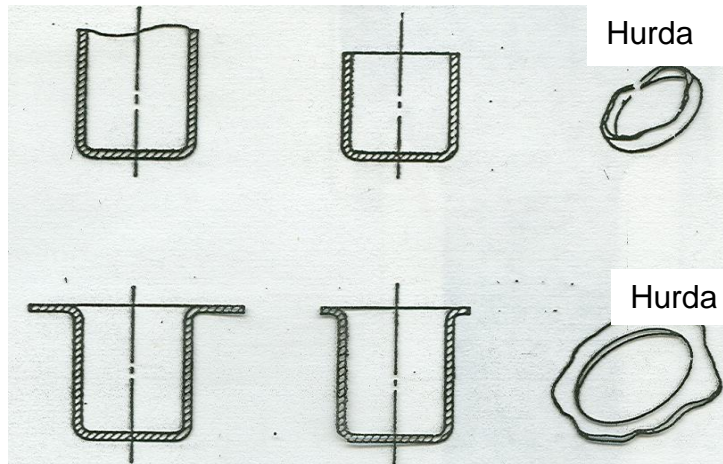


Uç Kesme

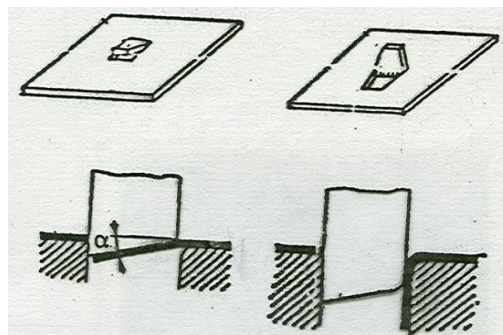
Ayırma



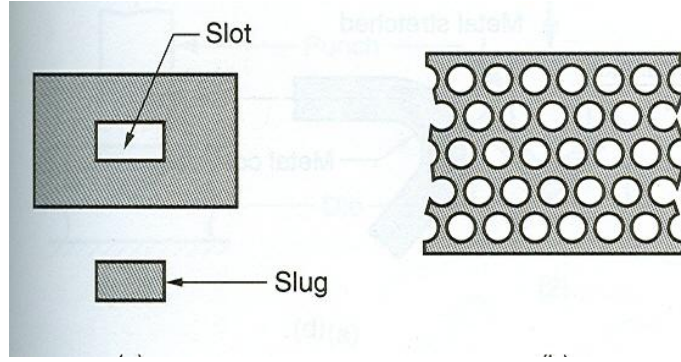
Çentme (Çentik açma)



Etek Kesme



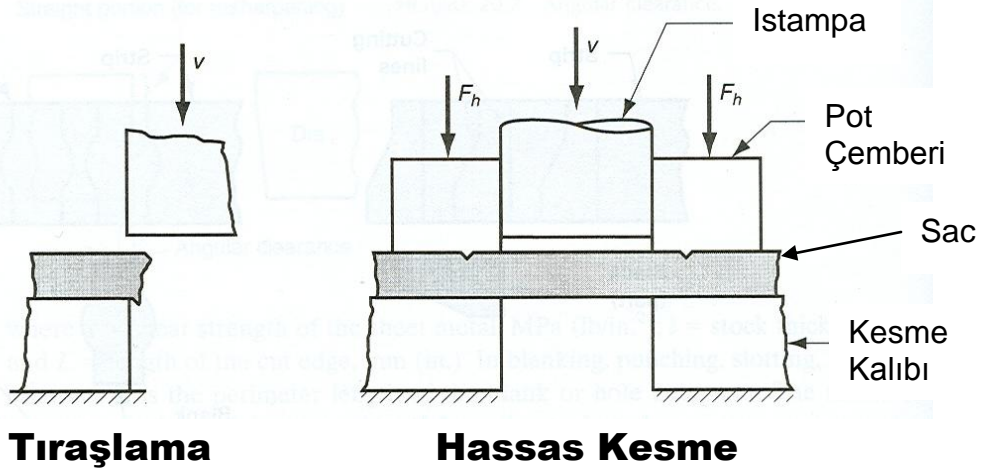
Yarma



Dörtgen delme

Çoklu Delme

Kesme sonrası parçanın istenen tam boyutlarda olmasını sağlamak için “Hassas Kesme” işlemi uygulanır. Bunun için klasik kesme işleminden sonra hassas tıraşlama işlemi uygulanabileceği gibi işlem bir defada hassas kesme kalıplarında gerçekleştirilir.



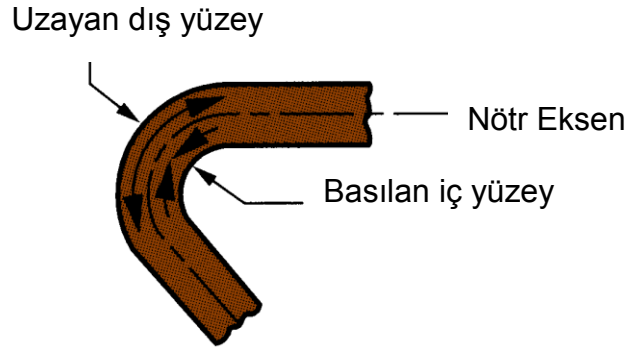
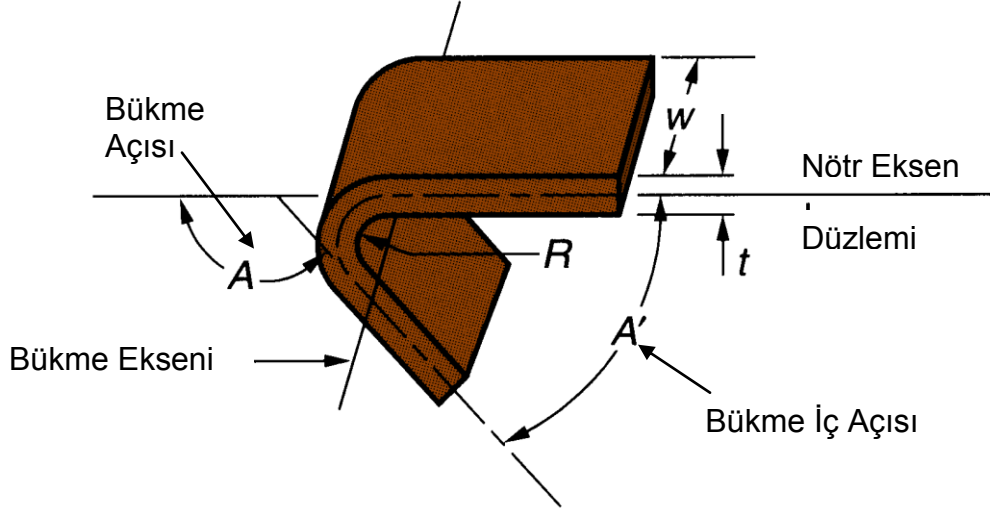
Tıraşlama

Hassas Kesme

Hassas kesme işleminde önce bir pot çemberi ile saca baskı uygulanır. V çentikleri olan pot çemberi sacı kesme işlemi öncesi sabitler ve içeri doğru zorlayarak basma gerilmesi oluşturur. Bu malzemenin kesme sırasında gevrek yani kırılğan davranış göstermesini destekler. Kesme kalıbı ile ıstampa arasında optimum açıklıktan çok daha küçük açıklık bırakılır ve kesme işlemi hızlı bir şekilde gerçekleştirilir. Kesme yüzeyleri gevrek kırılma nedeniyle ezilme büzülmeye veya boyut değişikliğine uğrayamaz. Bunu gerçekleştirecek kalıpların çok dayanıklı (sinter-sert metal) preslerin ise çok hızlı olması gerekir.

B. BÜKME

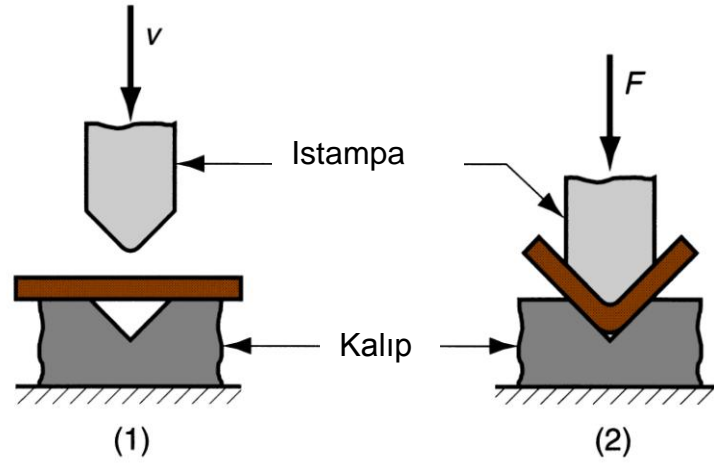
Sacı bir eksen etrafında eğme gerilmeleri kullanarak bükme işlemidir. Sacın içi basma dış yüzeyi ise çekme gerilmeleri altında şekillenmeyi sağlamaktadır.



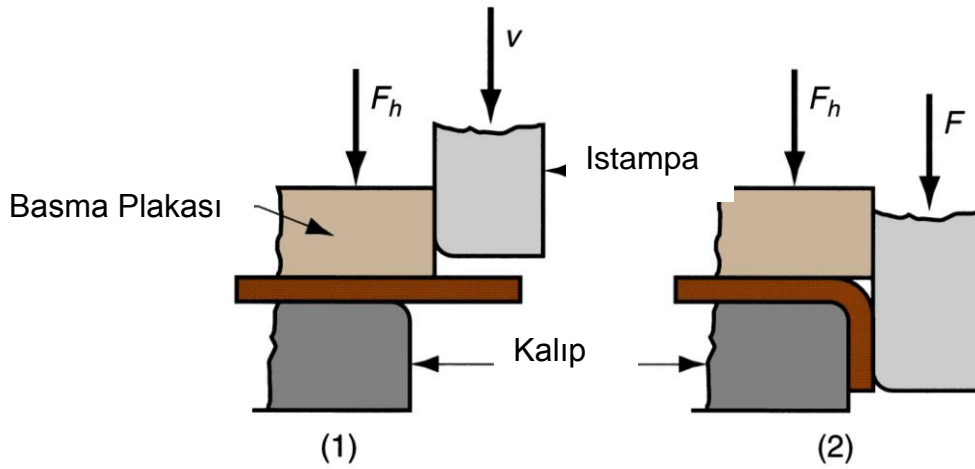
En çok kullanılan bükme işlemleri:

- a. V-Bükme**
- b. Kenar Bükme**

Bükme sırasında kalınlıkta önemli bir değişme görülmez. Bükme işlemleri kalıp ve ıstampa yardımıyla gerçekleştirilir.



V-Bükme



Kenar Bükme

Bükme açısı A ile bükme iç açısı A' toplamı 180° dir. Bükme yarıçapı R bükülen parçanın iç tarafındaki yarıçap olarak tanımlanır.

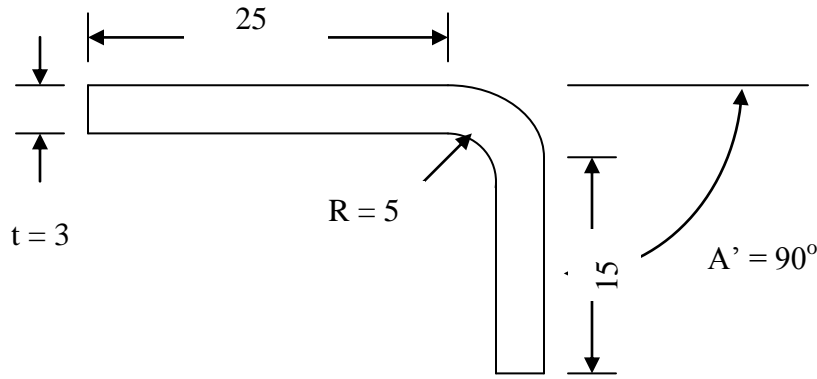
Bükme Açılımı:

Bükme sırasında küçük radyüsler kullanıldığında malzeme bükme boyunca uzar. Dolayısıyla başlangıçtaki taslak boyunun iyi hesap edilerek kesilmesi gerekir ki bükme işlemi sonrasında parça boyutları tanımlandığı gibi elde edilebilsin.

$$BA = 2.\pi \frac{A}{360} (R + K_{ba}.t)$$

BA bükme açılımı (bükülen bölgenin işlem öncesi olması gereken boyu), **A** bükme açısı (°), **R** bükme yarıçapı (mm), **K_{ba}** uzama faktörü ve **t** sac kalınlığıdır (mm).

R < 2.t	K_{ba} = 0.33
R ≥ 2.t	K_{ba} = 0.50



$$BA = 2.\pi \frac{90}{360} (5 + 0.35 \times 3) = 9.5 \text{ mm}$$

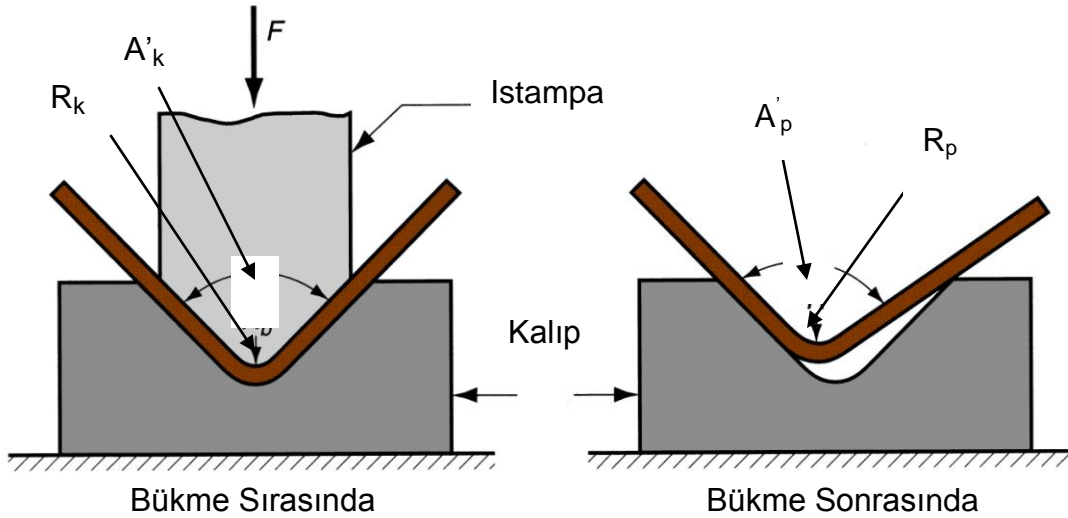
Taslağın başlangıç boyu = 25 + 9.5 + 15 = 49.5 mm olarak kesilmelidir.

Geri Yaylanma:

Bükme işlemi sonrasında uygulanan eğme gerilmesi kaldırıldığında parçanın tarafsız (nötr) eksenine yakın bölgede geçerli olan elastik deformasyonlar parçanın bir miktar açılmasına veya bükme açısında azalmaya neden olur. Buna geri yaylanma adı verilir. İstenilen bükme açısının elde edilememesine neden olur. Geri yaylanma miktarı GY;

$$GY = \frac{A'_p - A'_k}{A'_k}$$

Olarak tanımlanmakta olup malzemenin akma dayanımı ve elastiklik modülünün yüksek olması geri yaylanma miktarının da büyümesine neden olmaktadır.

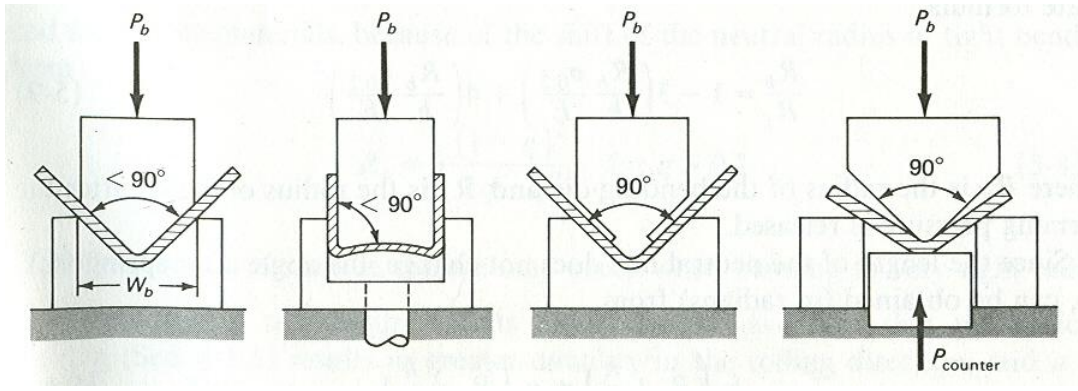


Bükme sonrasında geri yaylanma nedeniyle parça açısı ile parçadaki bükme radyüsünü aşağıdaki ampirik bağıntılarla hesaplamak mümkündür:

$$A_p \cdot \left(R_p + \frac{t}{2} \right) = A_k \cdot \left(R_k + \frac{t}{2} \right)$$

$$\frac{R_k}{R_p} = 1 - 3 \left(\frac{R_k}{t} \frac{\sigma_{0.2}}{E} \right) + 4 \left(\frac{R_k}{t} \frac{\sigma_{0.2}}{E} \right)^3$$

Burada A_p parçanın işlem sonrasındaki bükme açısı, A_k kalıbın bükme açısı, R_p parçanın işlem sonrası bükülme radyüsü, R_k kalıbın bükme radyüsü, t sac kalınlığı, E sac malzemesinin elastiklik modülü, ve $\sigma_{0.2}$ sac malzemenin akma dayanımıdır. Geri yaylanmanın bükmedeki olumsuz etkisini gidermek için bazı tedbirler alınabilir. Fazla bükme, kalıbı dipleme gibi teknikler kullanılarak istenilen boyutlara ulaşılır.

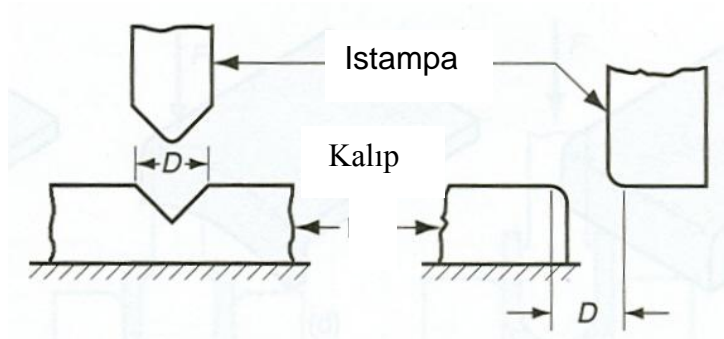


Fazla Bükme

Bükme Bölgesini Ezme

Bükme kuvvetinin hesaplanmasında aşağıdaki bağıntıdan yararlanılabilir.

$$F_b = \frac{K_{bf} \cdot \sigma_{\zeta} \cdot w \cdot t}{D}$$



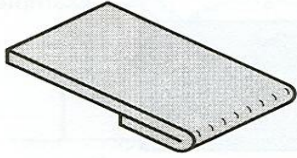
V-Bükme

Kenar Bükme

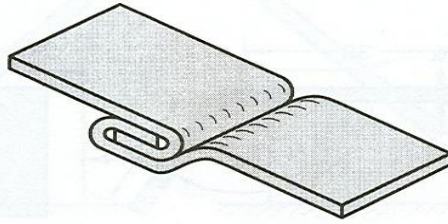
D işlem sırasındaki bükme mesafesi (mm), K_{bf} bükme faktörü, σ_{ζ} sac malzemesinin çekme dayanımı (N/mm² veya MPa), w sac genişliği (mm) ve t sac kalınlığıdır (mm).

V-Bükme	$K_{bf} = 1.33$
Kenar Bükme	$K_{bf} = 0.33$

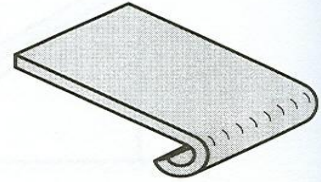
Bunların dışında kalan ve imalat sanayinde çok kullanılan bazı bükme uygulamaları aşağıda verilmektedir.



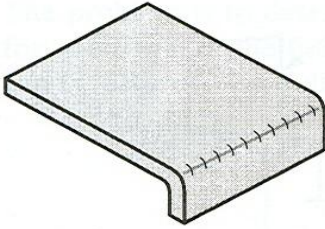
Katlama



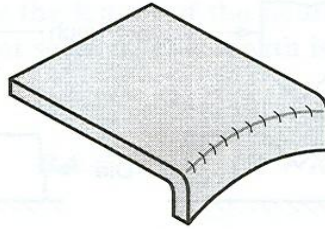
Kenetleme



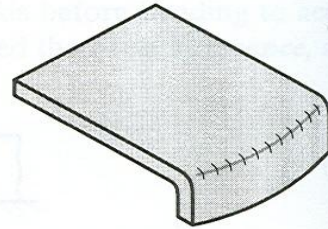
Kenar Kıvrırma



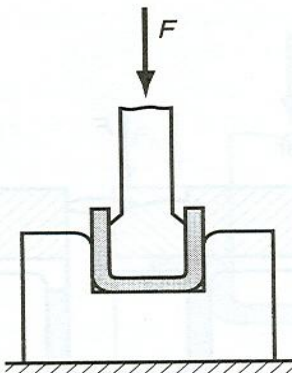
Düz Flanşlama



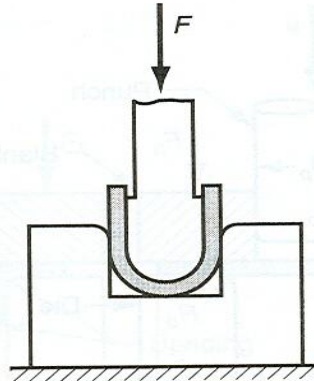
İç Bükey Flanşlama



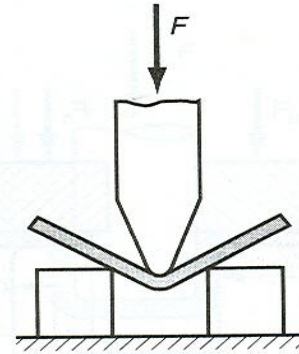
Dış Bükey Flanşlama



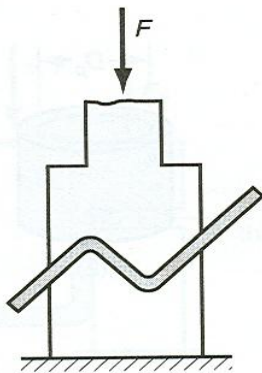
Kanal Bükme



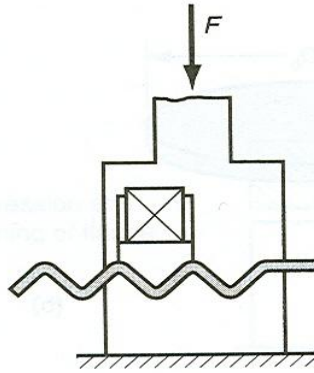
U-Bükme



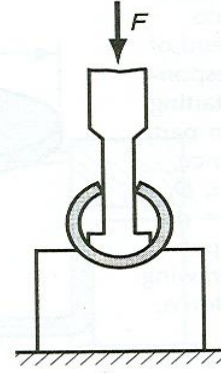
Serbest Bükme



Ofset Bükme

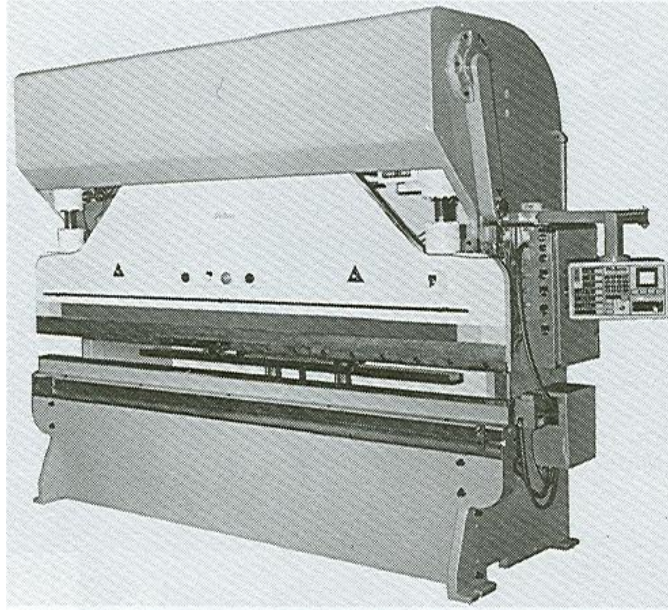


Ondüle Bükme

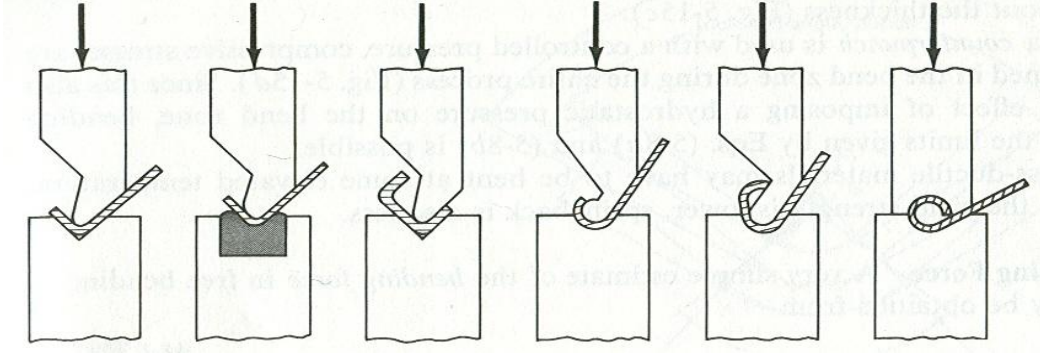


Silindirik Bükme

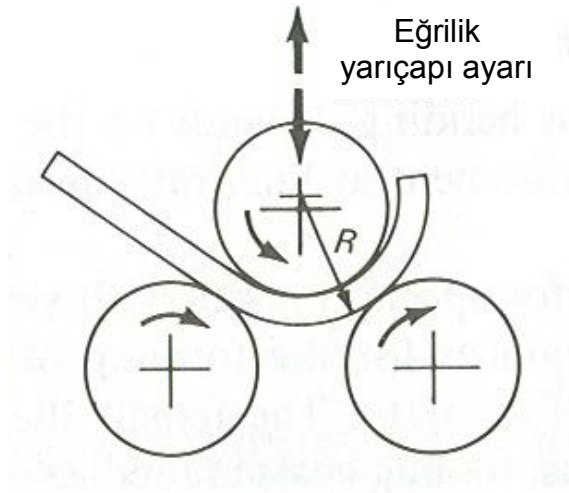
Sacların boyuna bükülmesi için abkant presler kullanılır.



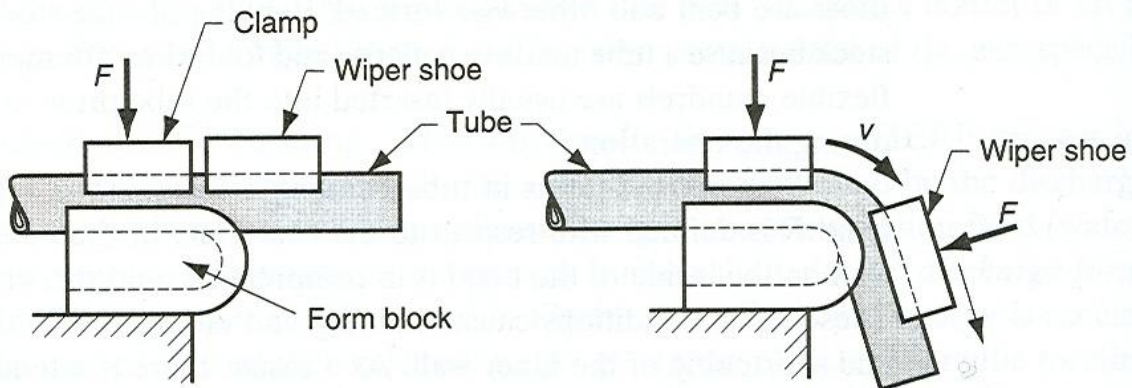
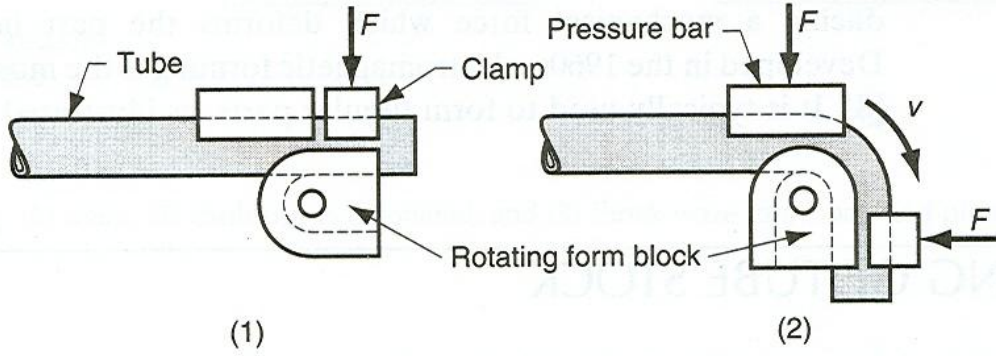
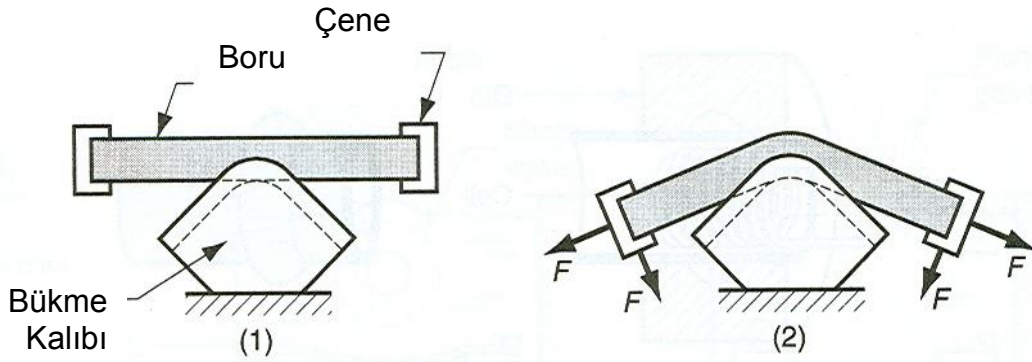
Abkant preslerde kullanılan bükme kalıplarının kesitlerine ait bazı örnekler aşağıda verilmektedir.

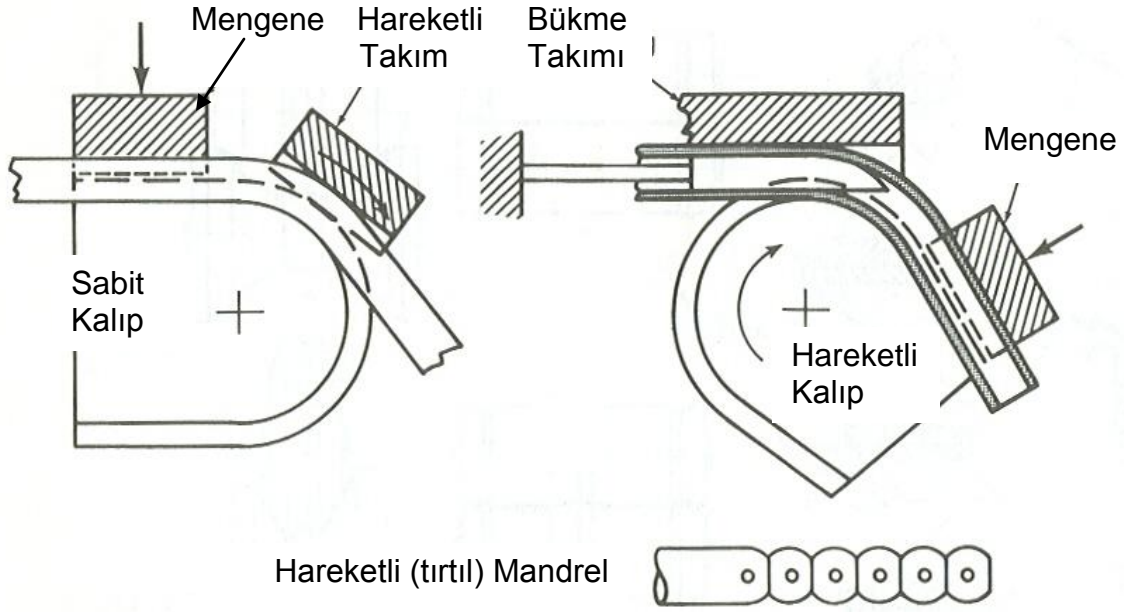


Sacların silindirik bükülmesinde bükme merdanelerinden ve aşağıdaki gibi bir düzenekten yararlanılır.

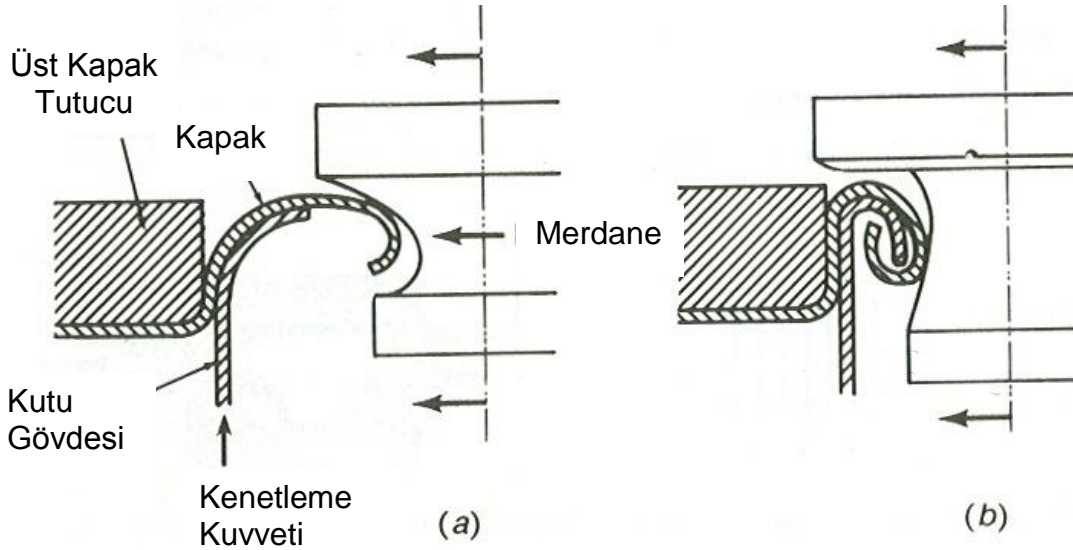


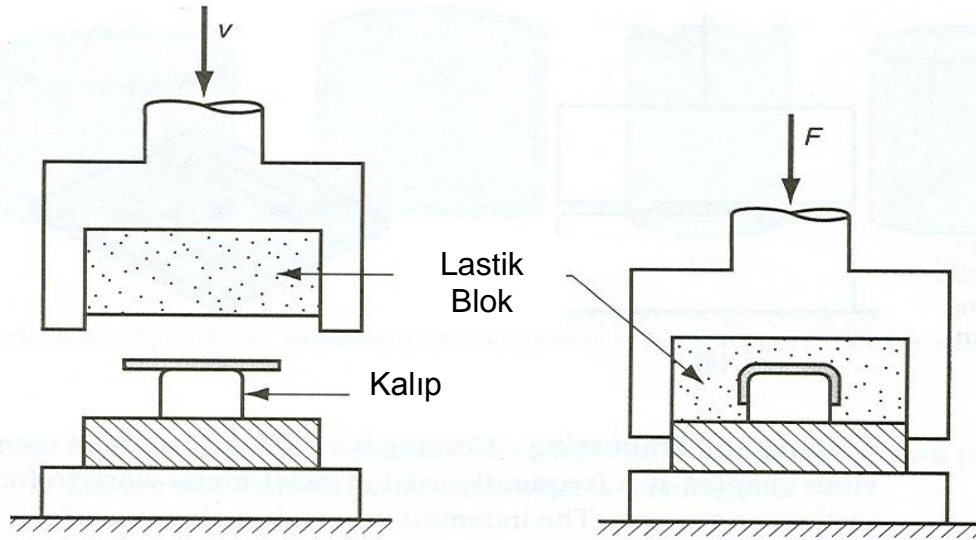
Boru ve profillerin bükülmesinde özel tertibatların kullanılması gerekir. Örneğin boru bükmede bu önlem alınmazsa bükme bölgesinde boru ovalleşir ve elips görünümünü alır. Bu durum T, U, L gibi profillerin bükülmesinde de kesit geometrisinin bükme bölgesinde değişmesi şeklinde karşımıza çıkar.



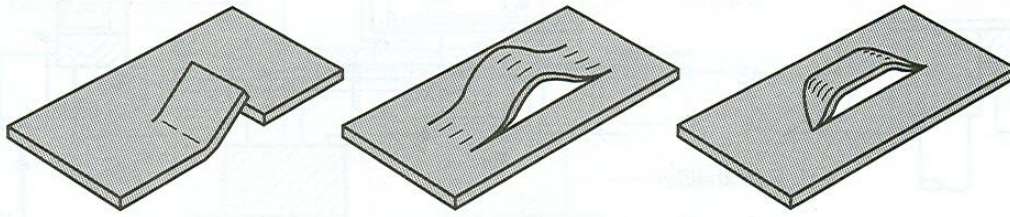


Kenar kıvrırma ve kenetleme işlemlerine kutu içeceklerin gövdesiyle üst kapağının birleştirilmesi aşamasında rastlanır. Üst kapak bir kalıp vasıtasıyla sabitlenerek bastırılır. Silindirik ve dönen bir kalıp kutu gövdesine hareket ettirilir ve kutu sacıyla üst kapak sacını birlikte birbirinin üzerine kenetler.





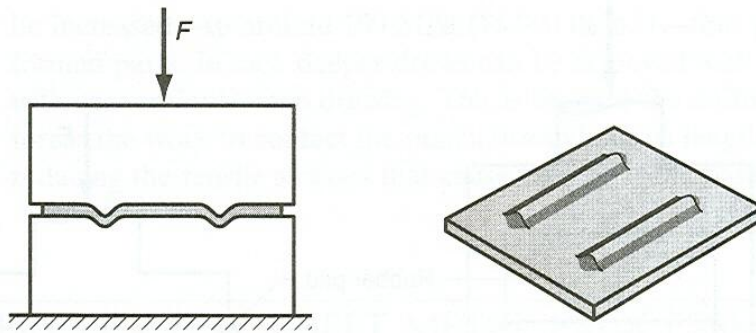
Guerin Yöntemi (Elastik Kalıp)



Guerin Yöntemi Uygulamaları

Guerin Yönteminin avantajları:

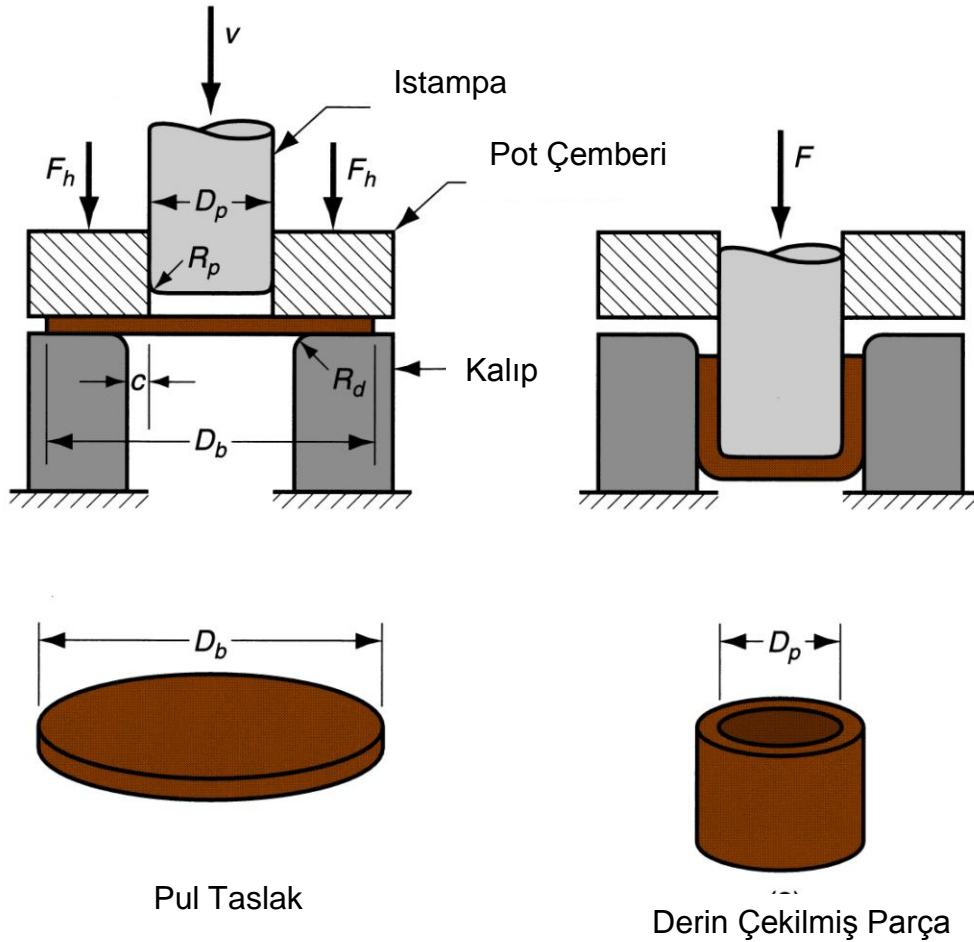
- 1. Düşük kalıp maliyeti**
- 2. Şekillendirme kalıplarının tahta, plastik gibi kolay şekillendirilebilir malzemelerden hazırlanabilmesi,**
- 3. Elastik kalıp bloğunun değişik şekillendirme kalıpları için kullanılabilmesi,**
- 4. Küçük imalat partileri için ekonomik olması.**



Kabartma

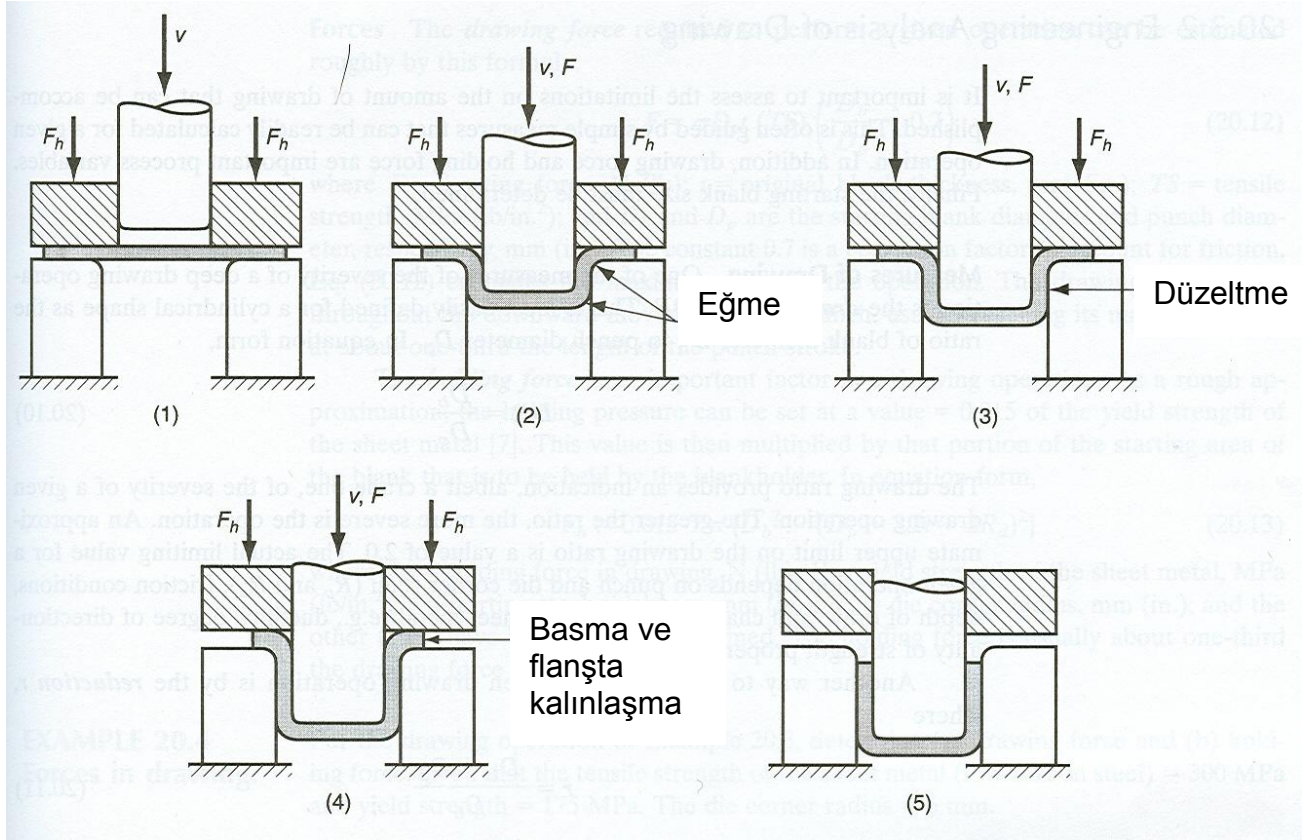
3. DERİN ÇEKME

Düz saclardan basit veya karmaşık kap, kutu ve diğer şekillerde parçaları imal etmede kullanılan bir yöntemdir. İşlem soğuk olarak gerçekleştirilir. Metal içecek kutuları, mermi kovanları, otomotiv sac parçaları üretiminde kullanılmaktadır.



Derin çekme işlemi pot çemberi kullanarak aşağıdaki aşamalardan sonra tamamlanır. Önce gerekli boyutta taslak pul kesilir ve kalıbın üzerine yerleştirilir. Sonra bunun üzerine pot çemberiyle bastırılır (1). Pot çemberi basıncı sac malzemenin akma dayanımının yaklaşık % 1.5 olacak şekilde uygulanır. Bundan sonra ıstampa pula temas eder ve sacı kalıbın içine doğru çeker (2). Bu sırada malzeme önce

bükülür ve daha sonra düzelir (3). İşlemin sonuna doğru flanş bölgesinde kalınlaşma meydana gelir. Uygun bir basınçla pot çemberi flanş bölgesine basıyorsa burada kırışmaya müsaade etmez (4). Pot çemberi basıncı sacı kalıba sabitlememeli ve gerektiği kadar kalıp boşluğuna gitmesini sağlamalıdır. Pul tamamen derin çekilip parça üretilene kadar işlem sürdürülür (5).



İşlem sırasında kalıp iç çapı ile ıstampa çapı arasında c kadar bir aralık bırakılması gereklidir. Genellikle aralık sac kalınlığından % 10 daha fazla olacak şekilde belirlenir.

$$c = (1.1) \cdot t$$

İşlemin sınırlarını belirlemede “Çekme Oranı (ÇO)” olarak tanımlanan faktör etkilidir.

$$\text{ÇO} = \frac{D_p}{D_{ist}}$$

Olarak tanımlanan bu parametrede D_p taslak pulun çapını, D_{ist} ise istampanın çapını vermektedir. İdeal koşullarda elde edilen ve hasar olmadan (yırılmadan) çekilebilecek en büyük çekme oranı “Sınır Çekme Oranı (SÇO)” olarak adlandırılır ve bir malzeme özelliğidir.

$$SÇO = \frac{D_{p_{maks}}}{D_{ist}}$$

Genellikle saclarda SÇO 2 mertebelerindedir. İşlemin ideal koşullarda yapılmaması, örneğin yağlayıcı kullanmama, pot çemberi kullanmama veya yanlış pot çemberi basıncı uygulama bu değerlerin daha düşmesine (1.2 gibi) neden olur.

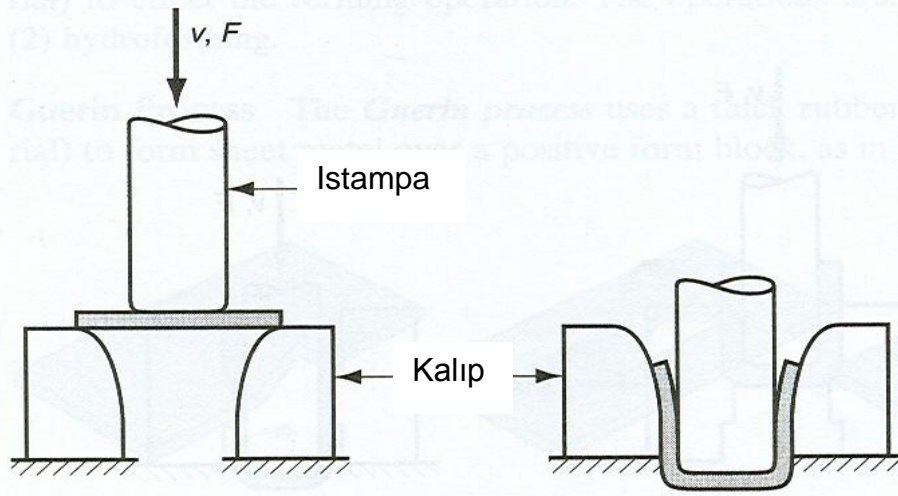
“Redüksiyon (r)” derin çekme işleminin boyutunu belirlemede kullanılan diğer bir parametredir.

$$r = \frac{D_p - D_{ist}}{D_p}$$

Redüksiyon SÇO ile doğrudan ilişkili olup SÇO=2 için % 50 mertebelerindedir. Deformasyonu tanımlayan bir başka parametre de “pul kalınlığı/pul çapı” oranıdır. $\frac{t}{D_p}$ olarak

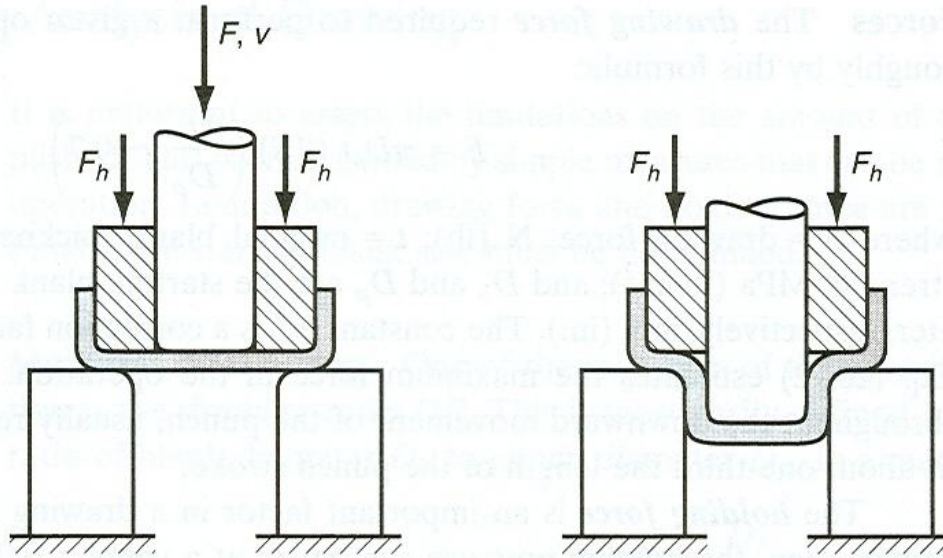
belirlenen bu parametrenin % 1’den büyük olması, kırışma riskini azaltmak amacıyla istenir. Bu sınırların dışında kalan derin çekme işlemleri kademelendirilerek 2 veya 3 aşamada gerçekleştirilir.

Derin çekme işleminin pot çembersiz olarak gerçekleştirilmesi mümkündür. Ancak pulun çapındaki küçülme burkulmaya, buda kırışmaya neden olduğundan derin çekme işlemi sınırlanmak zorunda kalır. Büyük pul çapları kullanılmadığından derin kapların imalatı gerçekleştirilemez.

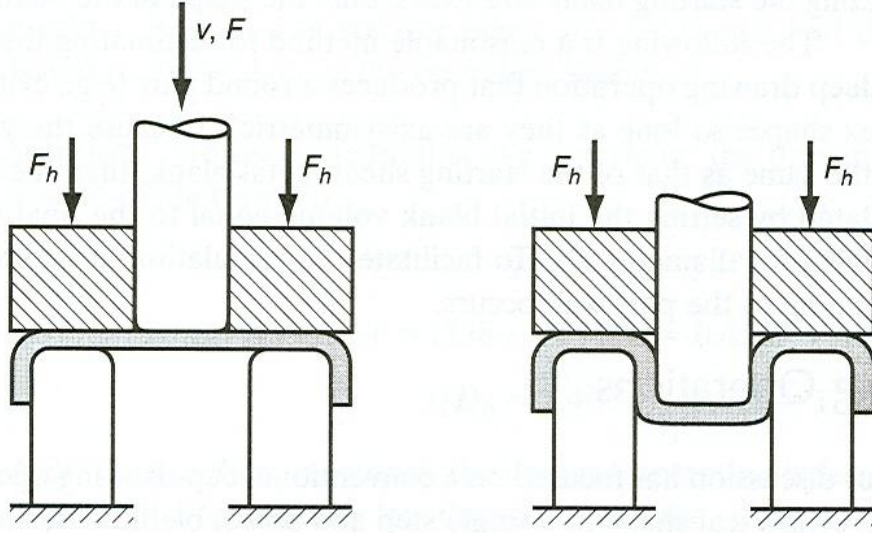


Pot Çembersiz Derin Çekme

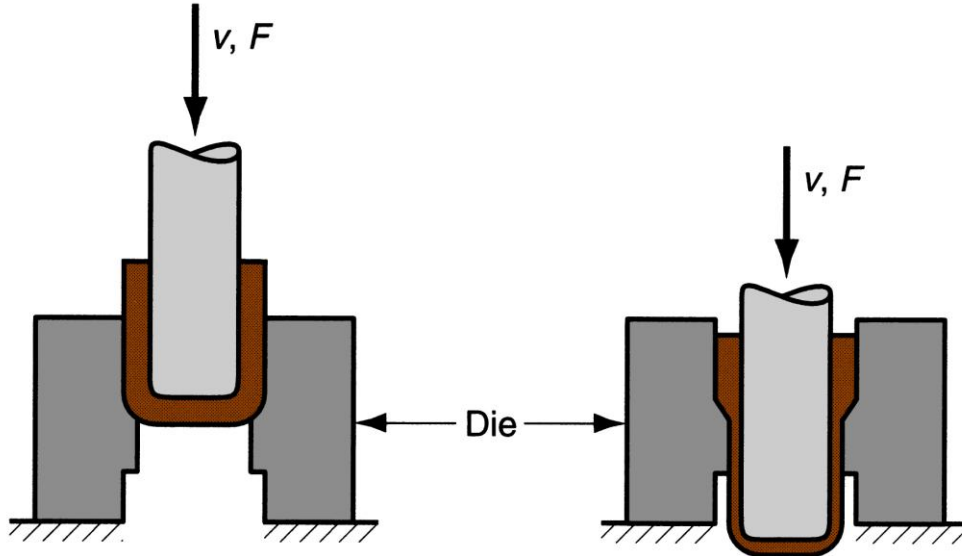
Derin çekme işleminin istenilen şekil değişimini sağlamaması durumunda yeniden derin çekme, ters derin çekme ve ütüleme gibi işlemler uygulanır. Yeniden ve ters derin çekme işlemlerinde çekilen kabın iç çapı değişir. Ütüleme sırasında kabın iç çapı değişmez et kalınlığı azaltılır.



Yeniden Derin Çekme



Ters Derin Çekme



Ütuleme

Derin çekme işleminde gerekli kuvvet hesabı için aşağıdaki ampirik bağıntıdan yararlanılabilir:

$$F = \pi \cdot D_{ist} \cdot t \cdot \sigma_{\zeta} \cdot \left(\frac{D_p}{D_{ist}} - 0.7 \right)$$

Burada D_p taslak pul çapını (mm), D_{ist} ıstampa çapını (mm), t sac kalınlığını (mm), σ_{ζ} sac malzemesinin çekme dayanımını

(N/mm² veya MPa) ve F ise derin çekme kuvvetini (N) vermektedir. İfadede yer alan 0.7 sabiti işlem sırasında etkin olan sürtünmeyi hesaba katan bir faktördür. Pot çemberi kullanılması halinde uygulanması gereken pot çemberi baskı kuvveti aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$F_{PÇ} = \pi \cdot (0.015) \cdot \sigma_{0.2} \cdot \left[D_p^2 - (D_{ist} + 2.2t + 2R_K)^2 \right]$$

Bu ifadede ise $F_{PÇ}$ pot çemberi baskı kuvvetini (N), $\sigma_{0.2}$ sac malzemesinin akma dayanımını, R_K ise derin çekme kalıbında kenar yuvarlatma yarıçapını (mm) vermektedir.

Derin çekme sırasında oluşabilecek hasarlar şunlardır:

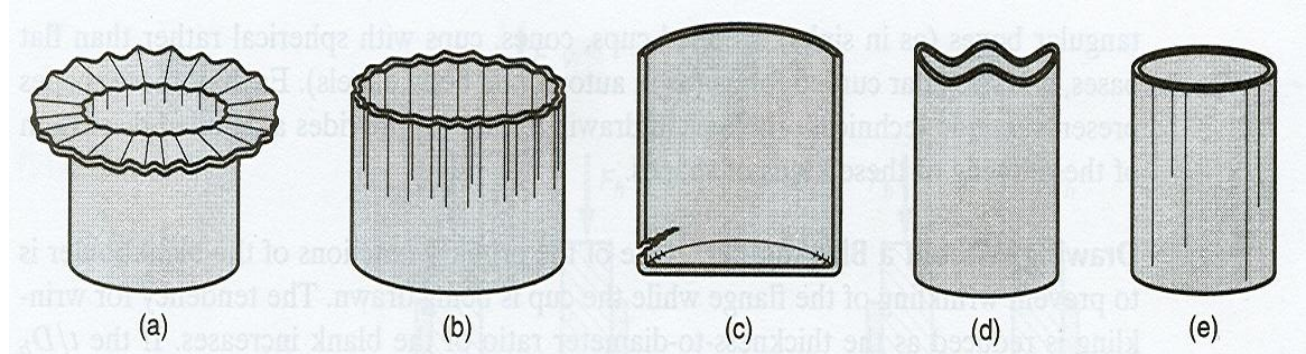
a. Flanş Bölgesinde Kırışma: Basma gerilmeleri altında sacın burkularak kırışması. Pot çembersiz derin çekmede, yetersiz pot çemberi basıncı uygulanmasında ve pul çapının gereğinden fazla seçilmesi durumunda,

b. Yan Duvarda Kırışma: Flanşa oluşan kırışıklıkların içeri çekilmesiyle,

c. Yırtılma: Genellikle çekme kuvvetinin büyük olması neticesinde ve flanştan malzemenin akamaması durumunda derin çekilen kabın dibinde ve istampanın basma yüzeyine yakın radyüste,

d. Kulaklanma: Sacın düzlemsel anizotropisine bağlı olarak kabın üst kenarında,

e. Yüzey Çizikleri: Kalıbın yüzeyine ve kullanılan yağlayıcıya bağlı olarak kabın dış yüzeyinde.



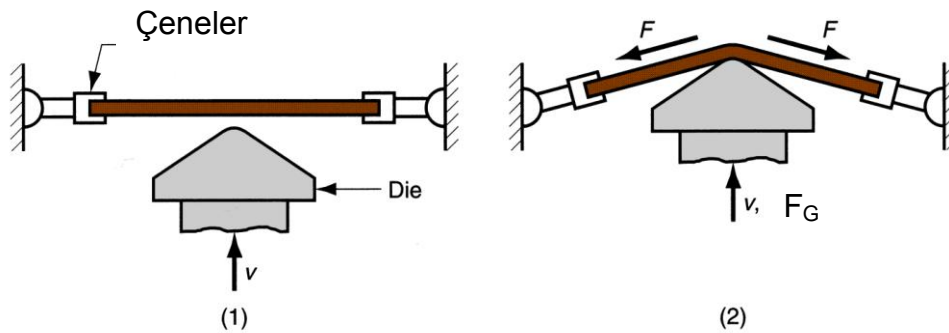
4. DİĞER SAC ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMLERİ

Kesme, bükme ve derin çekme dışında yer alan diğer sac şekillendirme yöntemleri:

- a. Germe
- b. Sıvama
- c. Yüksek Hızda Şekillendirme (HERF)
- d. Hidro-Şekillendirme
- e. Merdanelerle Şekillendirme

A. GERME

Germe işleminde sac kenarlarından çeneler vasıtasıyla yakalanır ve hareketine izin verilmez. Daha sonra bir kalıpla gerilen saca baskı uygulanır ve gerilme neticesinde sacın kalıbın şeklini alması sağlanır.



Germe işlemi sırasında kullanılan kuvvet;

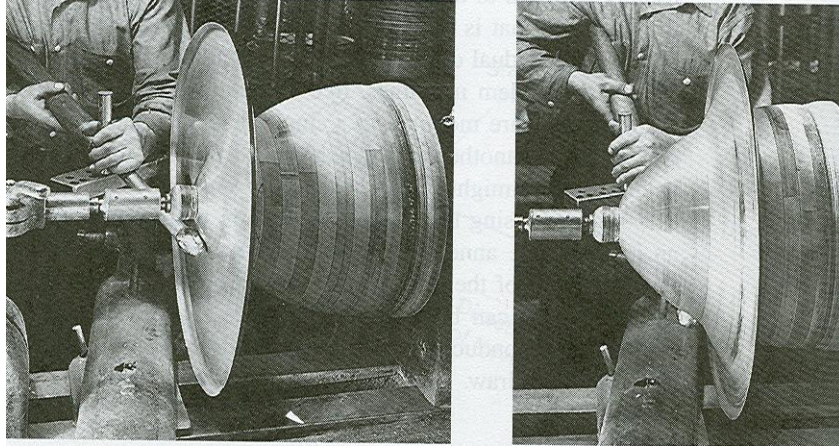
$$F = L.t.\sigma$$

Şeklinde hesaplanır. Burada L germe yönüne dik olarak uzanan sac boyunu (mm), t sac kalınlığını (mm) ve σ malzemenin akma gerilmesini (N/mm^2) vermektedir. Germe işleminde hareketli kalıbın uygulanması gereken kuvvet F_G ise statik denge dikkate alınarak hesaplanmaktadır. İşlem sırasında “az” miktarda bir geri yaylanma oluşması beklenir.

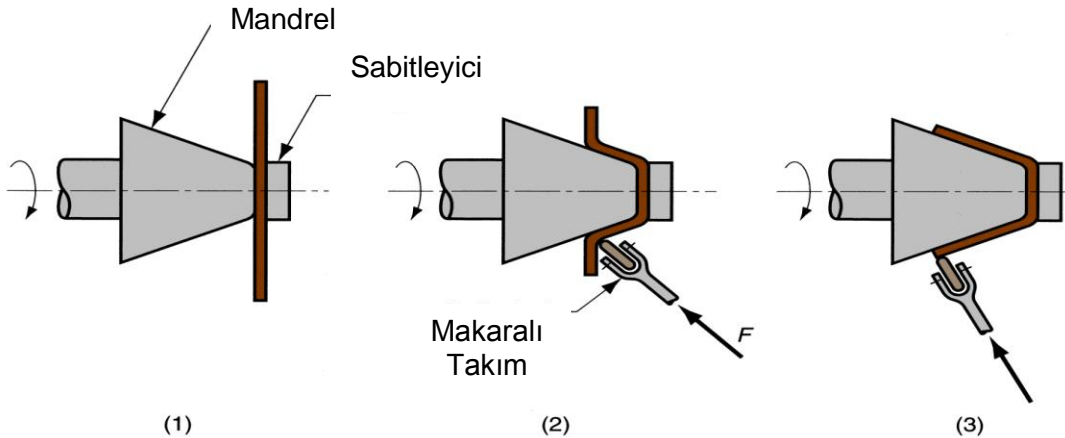
B. SIVAMA

Sıvama aksel simetriye sahip parçaların üretimine uygun olup işlem kademeli olarak gerçekleştirilir. İşlem uygulamalarda üç türlü gerçekleştirilir:

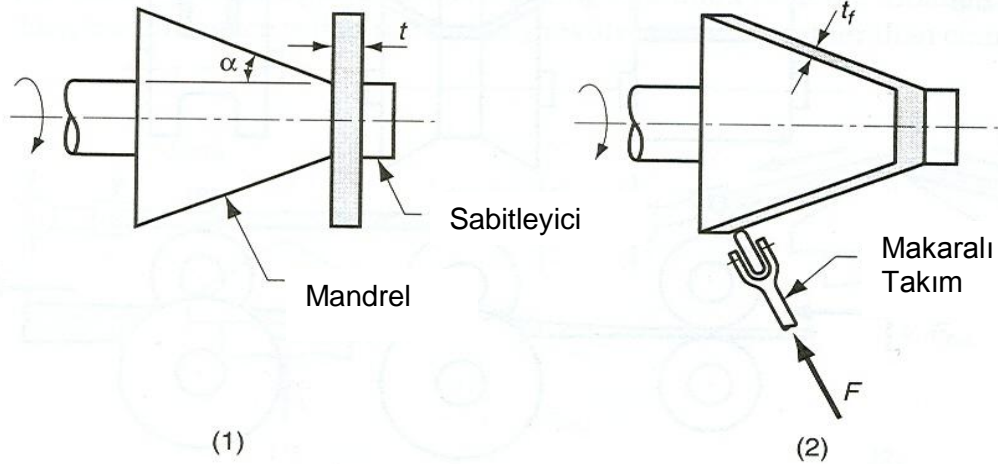
- 1. Geleneksel Sıvama**
- 2. Keserek Sıvama**
- 3. Tüp Sıvama**



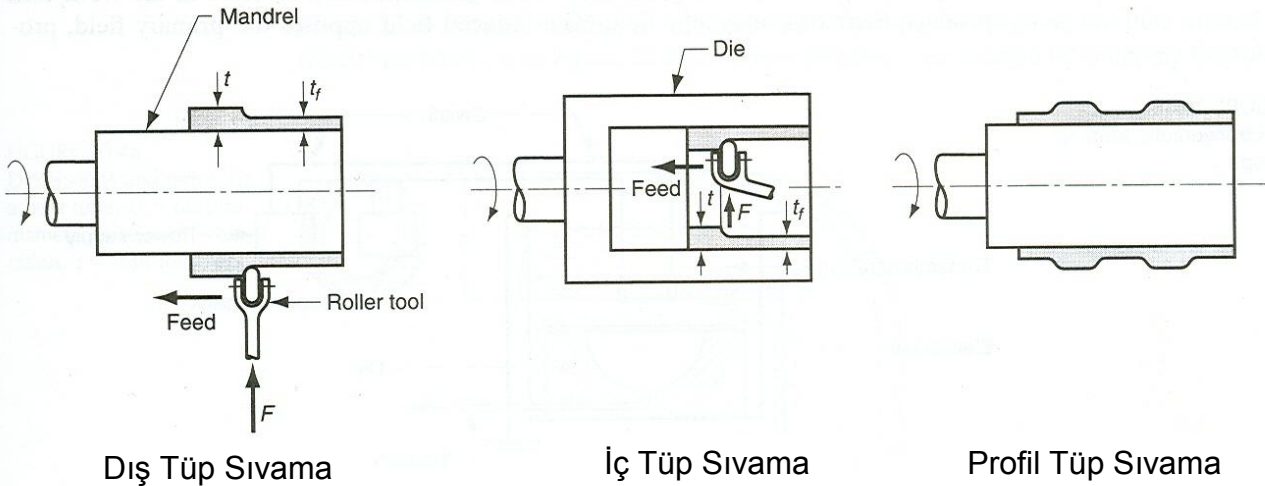
Geleneksel sıvamada dönen bir mekanizmaya mandrel veya kalıp tutturulur. Yuvarlak kesilen sac bir baskı aparatı yardımıyla mandrelin üzerine bastırılarak sabitlenir. Mandrel, pul ve sabitleyici birlikte döndürülür. Bu arada sacın üzerine bir makara, tahta gibi bir gereçle dönme sırasında bastırılır. Sacın kalıbın veya mandrelin üzerine yatırılmasına çalışılır.



Keserek (şekillendirerek) sıvamada sıvanan sac kalınlığının sabit olması amaçlanır. Sıvama sırasında hem sac mandrel üzerine bastırılarak şekillendirilir hem de basınç uygulanarak sac kalınlığın parça boyunca sabitlenmesi ezerek plastik şekillendirme yoluyla sağlanır.



Tüp sıvama yöntemiyle boruların et kalınlıkları azaltılarak boylarının uzatılması sağlanır. Aynı zamanda aksenal simetri korunmak şartıyla boru kesitine profil de verilebilir.

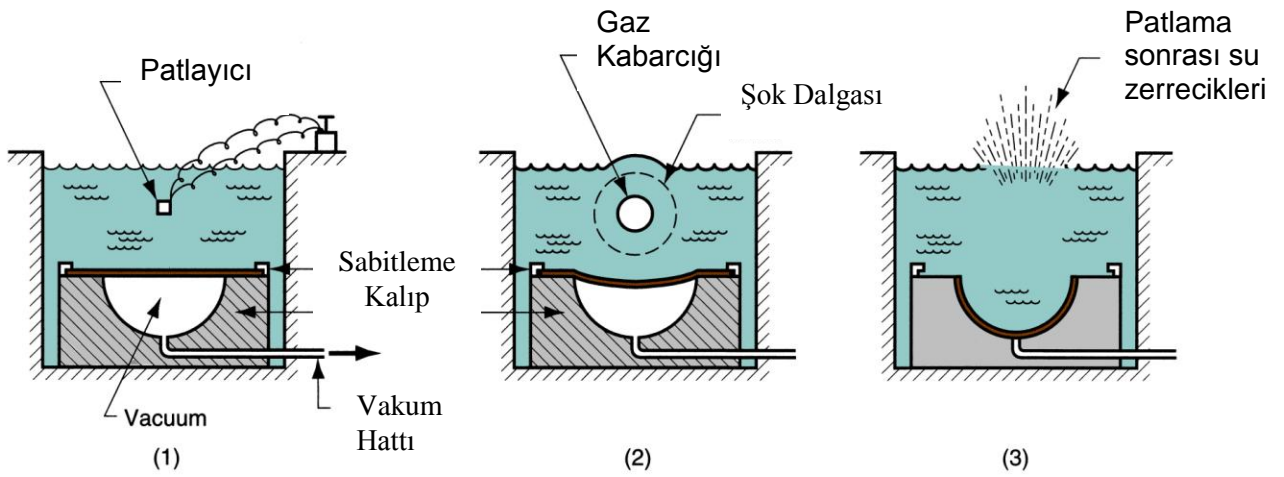


C. YÜKSEK HIZDA ŞEKİLLENDİRME (HERF)

Ani zorlanmalar yaratarak darbeli şekilde kuvvet uygulanmasıyla kısa sürede gerçekleştirilen plastik şekil değiştirme yöntemlerini içerir. Şu türleri vardır:

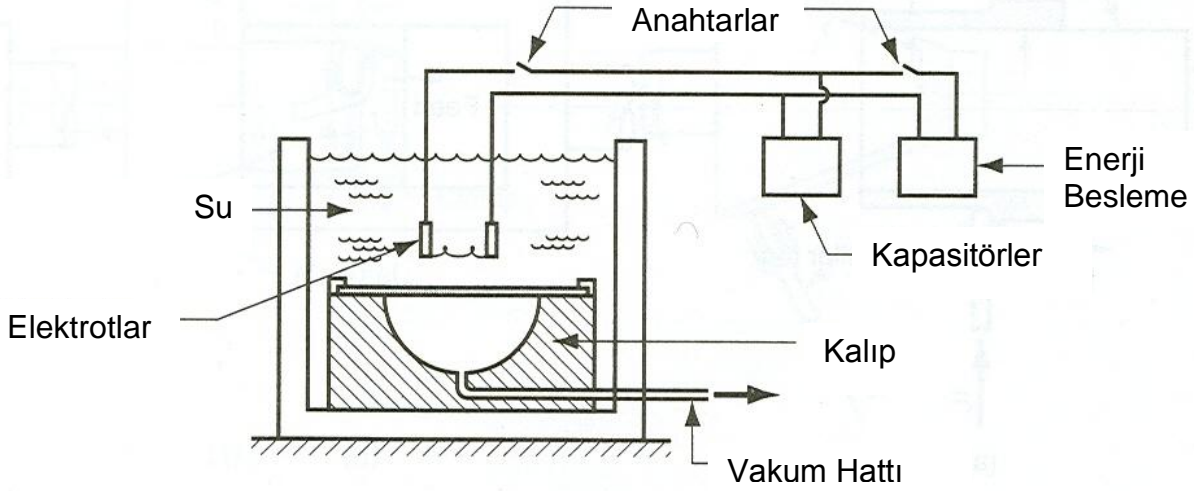
- 1. Patlamayla Şekillendirme**
- 2. Elektro-Hidrolik Şekillendirme**
- 3. Elektro-Manyetik Şekillendirme**

Patlamayla şekillendirme emniyet açısından sıvı banyosunda (örneğin su) gerçekleştirilir. Kalıp ve üzerine sac yerleştirilir. Bunların üzerine ise patlayıcı (örneğin TNT) konur (1). Daha sonra patlayıcı ateşlenir ve gaz oluşumuyla birlikte şok dalgaları meydana gelir (2). Bu dalgalar malzemeye şok etkisi yaparak kalıbın iç yüzüne yapışmasını sağlar. İşlemin daha kolay gerçekleşmesi için kalıbın altından vakum uygulanır ve havanın sıkışmasına mani olunur (3).

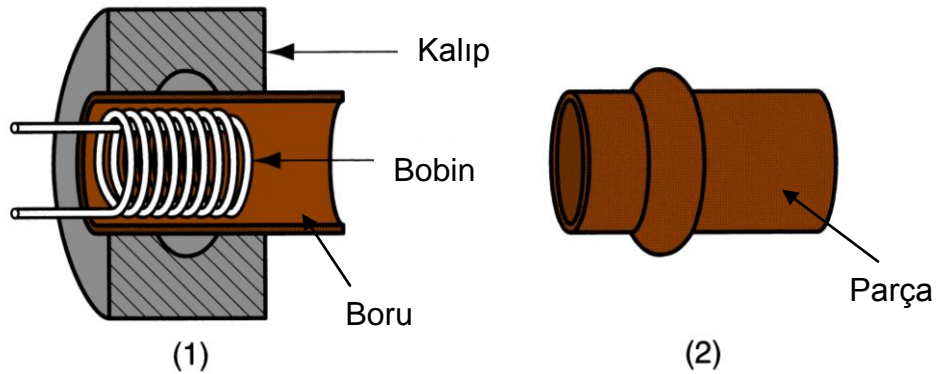


Elektro-Hidrolik Şekillendirme su altında yerleştirilen iki elektrot arasında elektrik enerjisinin deşarj edilmesiyle gerçekleştirilir. Elektrik enerjisi kapasitörler vasıtasıyla biriktirilmektedir. Deşarj sırasında oluşan şok dalgası su vasıtasıyla sac yüzeyine etkir ve sacı kalıbın şeklini almaya

zorlar. Patlamaya göre daha küçük parçaların şekillendirilmesine elverişlidir.

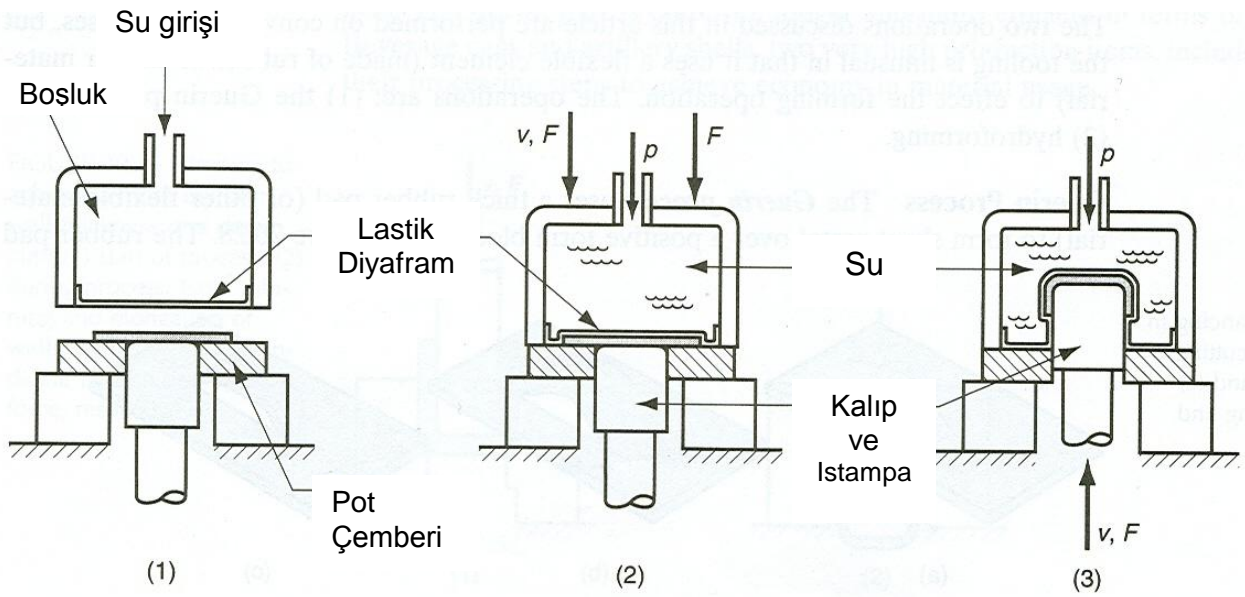


Elektro-Manyetik şekillendirmede kullanılan kuvvet elektro manyetik alan sayesinde oluşturulmaktadır. Elektro-manyetik alan meydana getirmek için elektrik bir bobinden geçirilmekte ve böylece Eddy-Akımı yaratılmaktadır. Bu şekilde oluşturulan manyetik alan sacın yüzeyine baskı uygulamakta ve bu elektrik enerjisinin frekansına bağlı olarak ardı ardına sürekli şekilde gerçekleştirilmektedir. Saca etkiyen kuvvet sacı kalıba doğru bastırmakta ve kalıbın şeklini almasını sağlamaktadır.



D. HİDRO-ŞEKİLLENDİRME

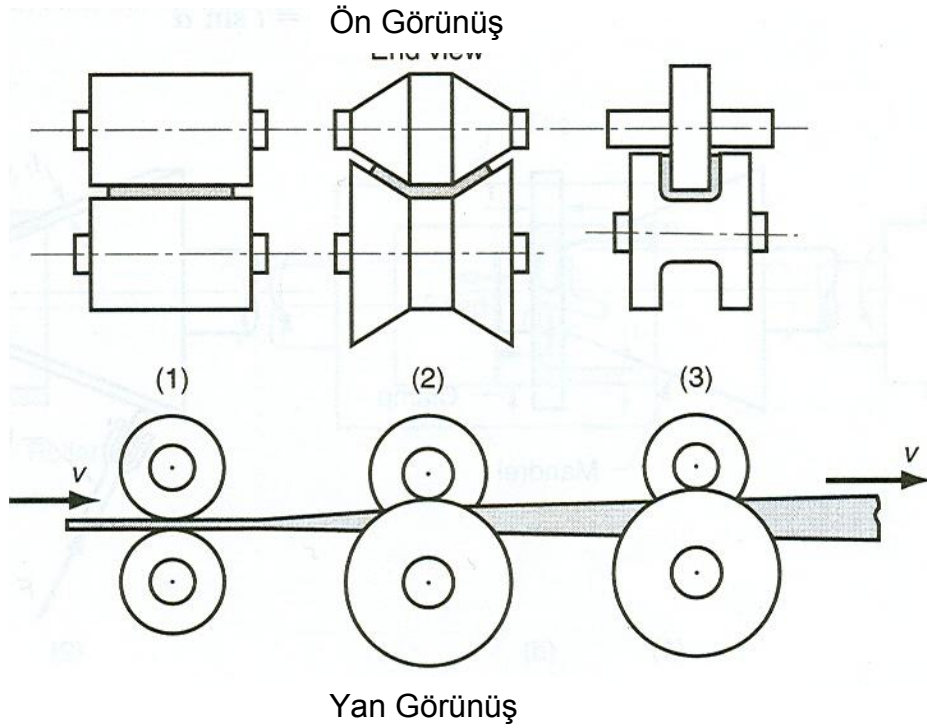
Guerin yöntemiyle şekillendirmeye çok benzer. Burada elastik kalıp yerine bir diyaframla ayrılmış olarak şekillendirme sırasında basınçlı sıvı kullanılmaktadır. Sac kalıbın üzerine yerleştirildikten sonra altında lastik diyafram bulunan bir kap sacın üzerine getirilir ve bastırılır (1). Daha sonra kap su ile doldurulur ve basınç uygulanır (2). Daha sonra alttan bir ıstampaya bağlı olan kalıp saca doğru aşağıdan yukarı doğru hareket eder ve üzerindeki şekli sacın üzerine şekillendirir (3). Bu sırada kap içindeki su basıncının 100 MPa aşmaması için hidrolik boşaltma sisteminden yararlanır.



Bu yöntemle sacın kırışması önlenmekte ve derin çekmeye göre daha derin parçalar üretilebilmektedir. Özellikle homojen uygulanan basınç sürtünmeden kaynaklanan heterojen şekil değişimi nedeniyle erken yırtılmayı önlemektedir.

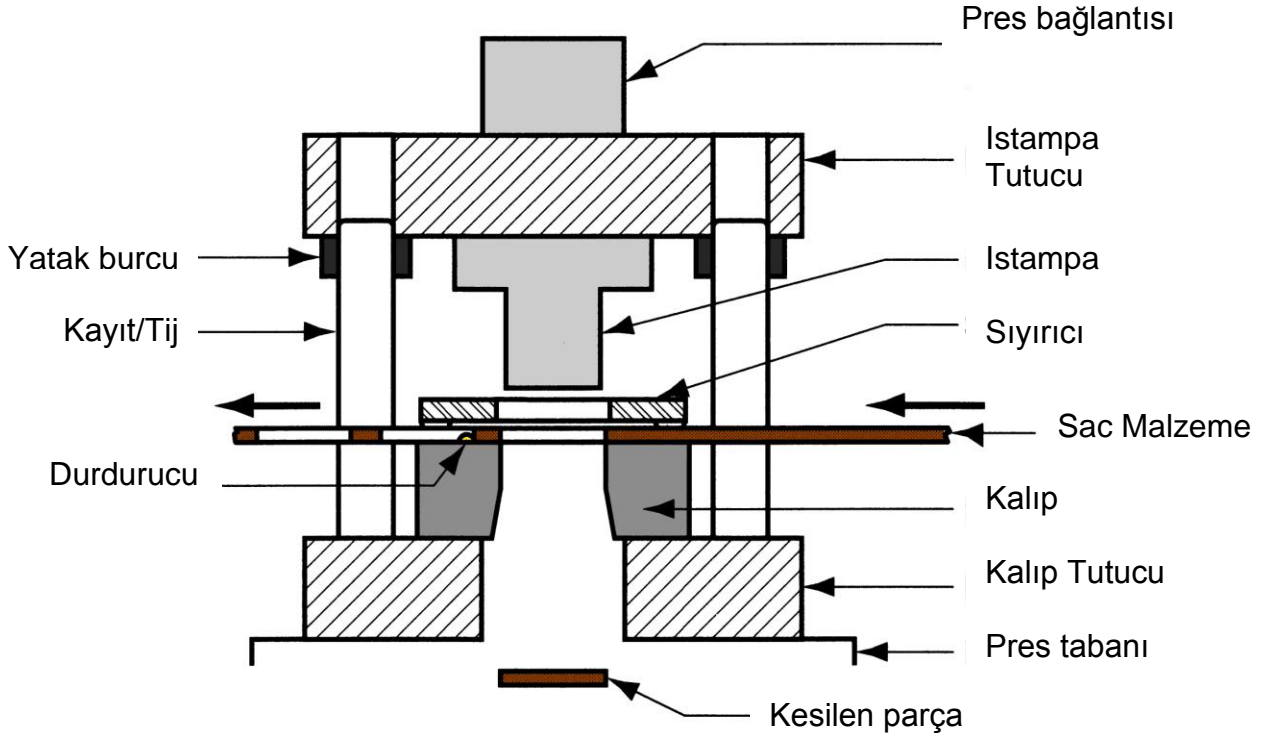
E. MERDANELERLE ŞEKİLLENDİRME

Merdaneler yardımıyla sürekli ve kademeli olarak gerçekleştirilir. Böylece bükme işlemi sırasında birim şekil değişimlerinin bir noktaya yığılması ve orada çatlamaya neden olması önlenmektedir. Şekillendirme sırasında sonuçta elde edilecek profile bağlı olarak çok sayıda merdane (örneğin 10-15 gibi) kullanılması mümkündür. Aşağıda u-profil üretiminde kullanılan 3 merdaneli bir bükme sistemine ait örnek verilmiştir.

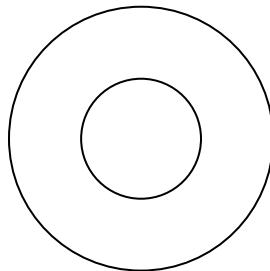


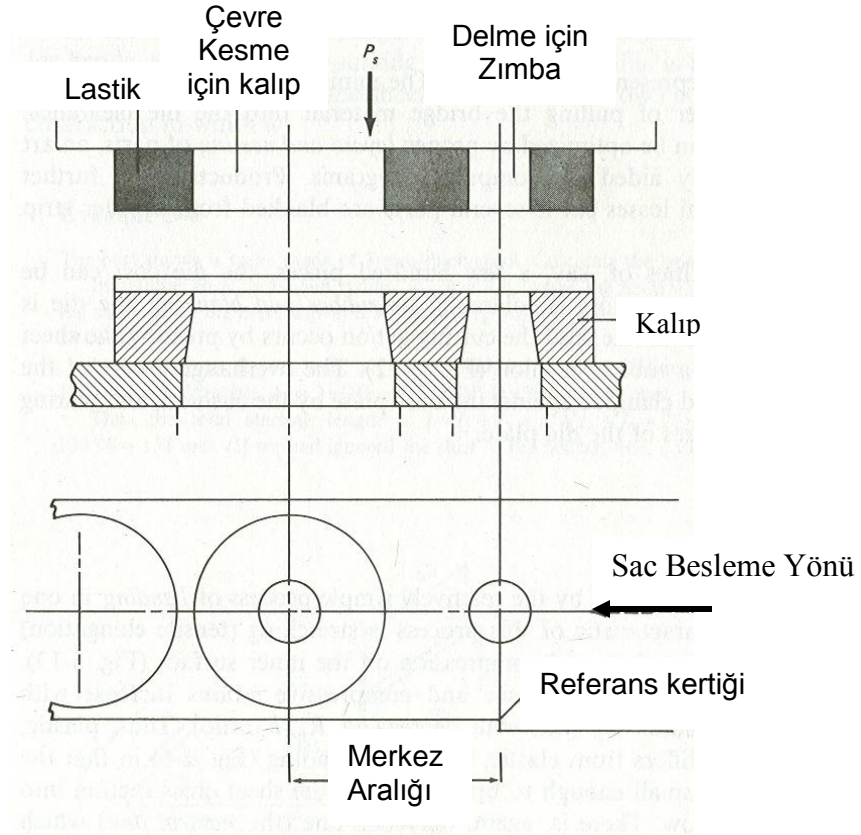
SAC ŞEKİLLENDİRME İŞLEMLERİNDE KALIP VE MAKİNALAR

Hemen hemen tüm pres işleri klasik “ıstampa” ve “baskı kalıbı” düzeneği ile gerçekleştirilmektedir. Aşağıda basit bir kesme kalıbına ait kesit görünümü şematik olarak verilmiştir.

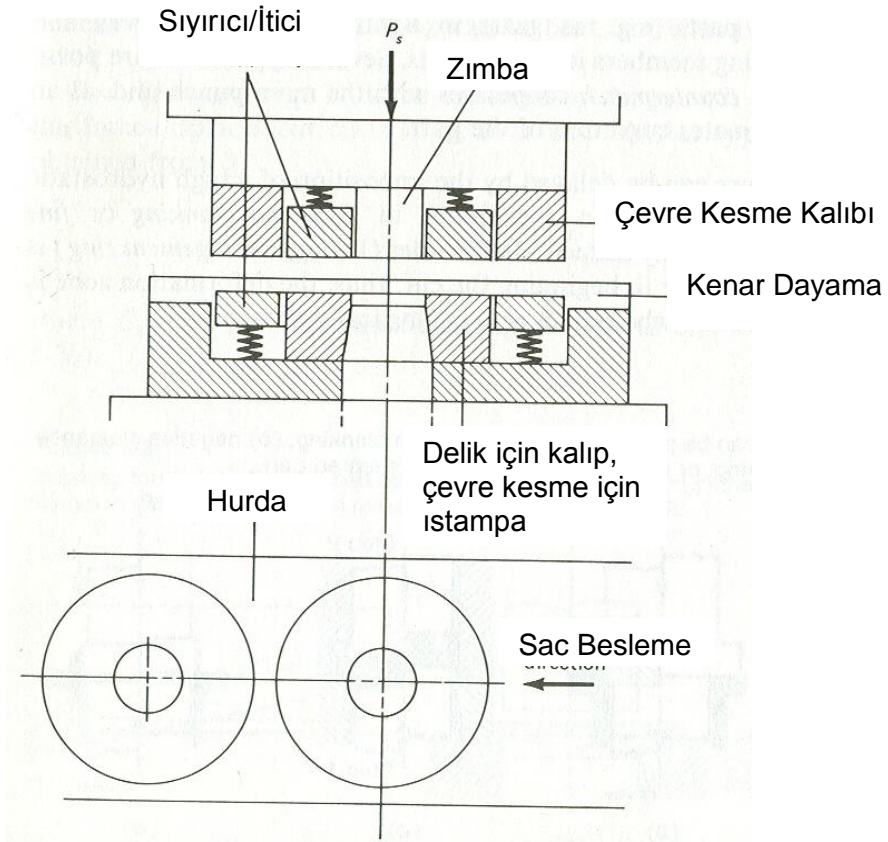


Kesme kalıpları çoğu zaman bu kadar basit olmaz ve birkaç kesme işlemini ve hatta gerekiyorsa basit bükme işlemini birlikte gerçekleştirir. Bunu sağlamak üzere hazırlanan kalıplar “Bileşik Kalıp” veya “Progresif Kalıp” adını alır. Örnek olarak aşağıdaki gibi yuvarlak ve içi delinmiş bir parçayı banttan kesmek için kullanılacak bileşik kalıp ve progresif kalıp örnekleri verilmektedir.



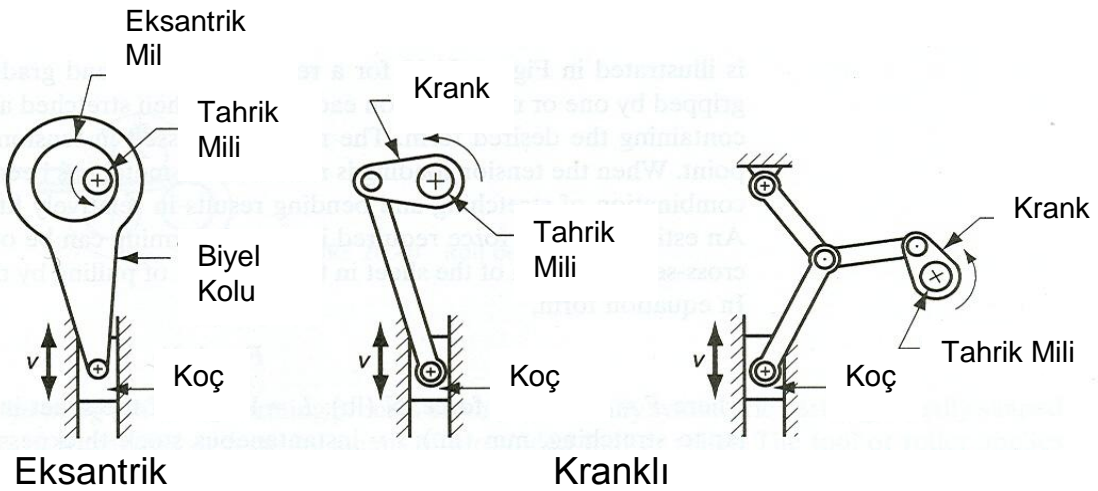
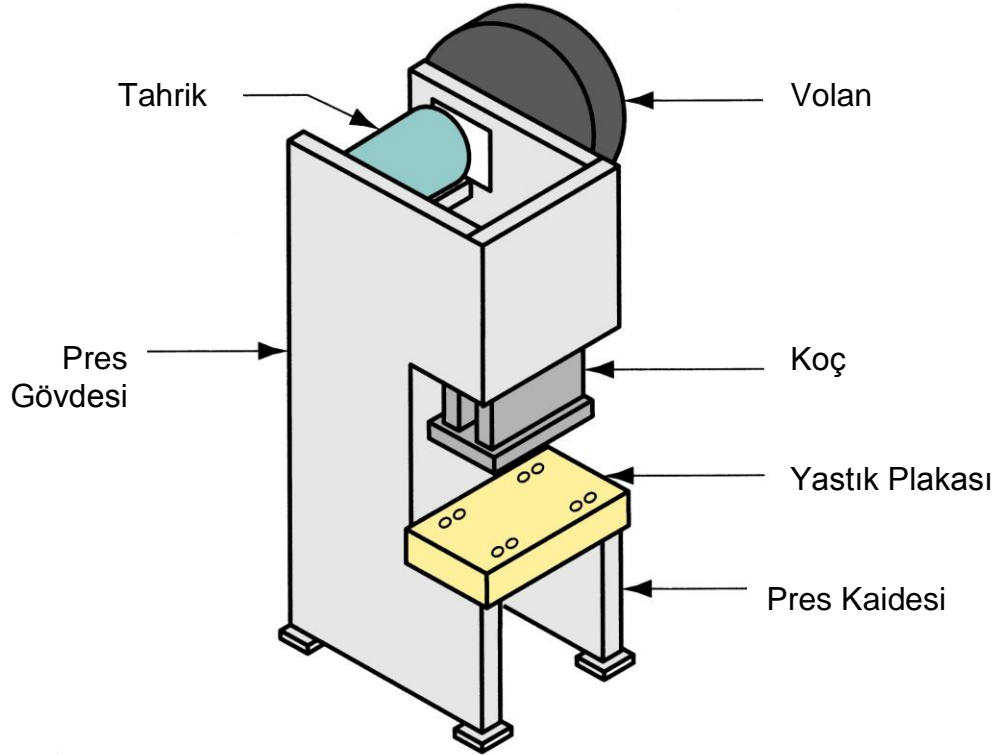


-Progresif Kesme Kalıbı-



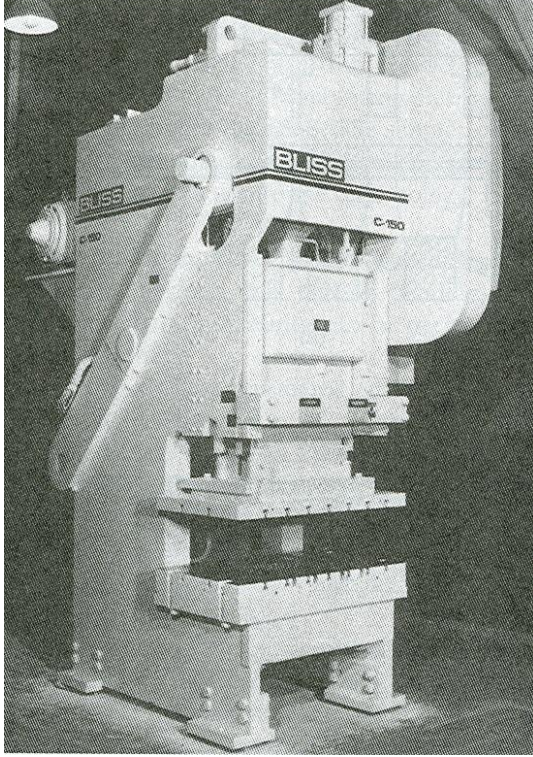
-Bileşik Kesme Kalıbı-

Sac işlerinde makine olarak preslerden yararlanır. Kesme ve bükme işlemlerinde genellikle mekanik preslerden yararlanır. Özellikle eksantrik presler bu amaçla kullanılır. Derin çekme, Hidro-forming gibi işlemlerde ise hidrolik preslerden yararlanır. Kuvvet kapasitesi 10 t ile 4000 t arasında değişebilmektedir. Kullanılan mekanik presler çoğunlukla “C-Gövdeli Eksantrik presleri”dir. Bu tür preslere ait şematik görünüm aşağıda verilmiştir.

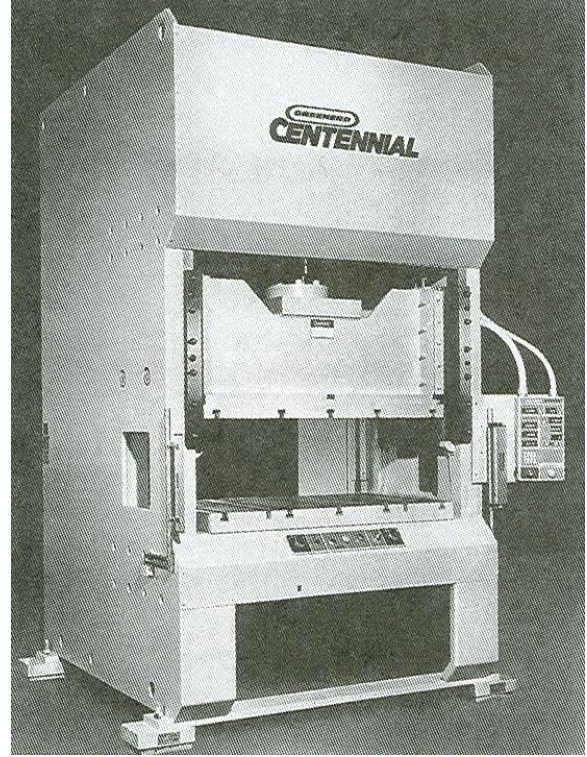


Mekanik Preslerde Tahrik Mekanizmaları

C gövdeli presler büyük eğme gerilmeleri altında çalıştılarından kuvvet kapasiteleri sınırlıdır. Ancak düz kenar preslerde bu sorun yoktur. Büyük kuvvet kapasitelerine bu tür preslerde ulaşılır.

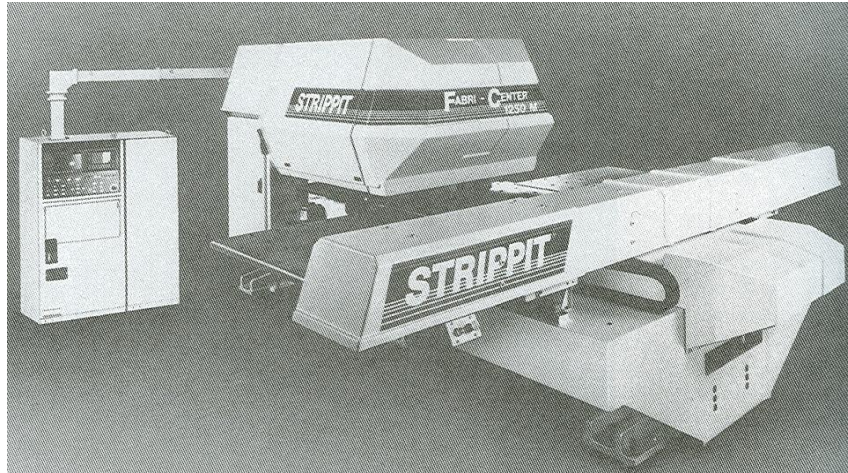


C-Gövdeli Eksantrik Pres

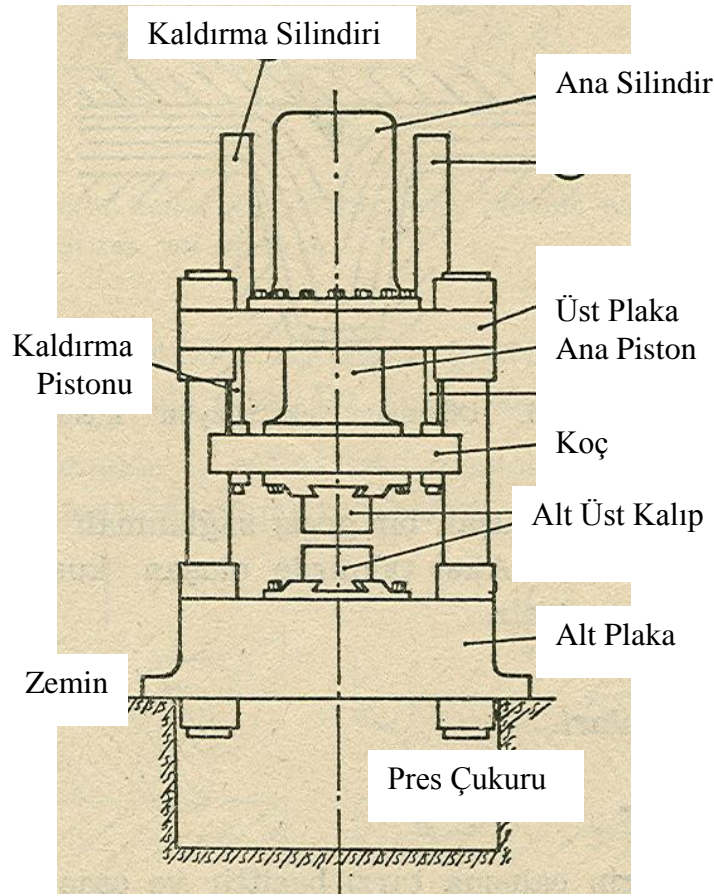


Düz Kenarlı Eksantrik Pres

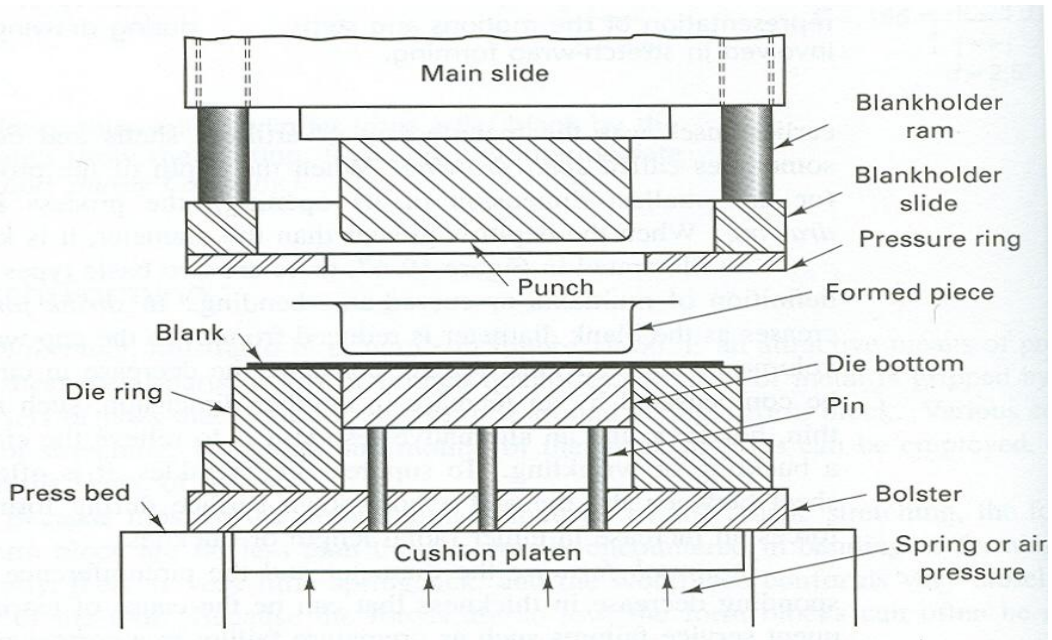
Ayrıca C gövdeli, nümerik kontrollü “Taret Presler” sayesinde kesme ve bükme işlemleri kademeli olarak tek bir tezgahta gerçekleştirilebilmektedir.



Nümerik Kontrollü Taret Pres



Yukarıdaki şekilde bir tek tesirli hidrolik prese ait şematik görünüm verilmiştir. Derin çekme işlemlerinde birden fazla farklı kuvvetlerin uygulanması gerektiğinde (örneğin pot çemberi baskısı için), Çift Tesirli Hidrolik Preslerden yararlanılmaktadır.



SACLARDA ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİK

Malzemelerin şekillendirilebilme özelliği doğrudan süneklığe bağlıdır. Süneklik ise birkaç istisna hariç sertlik ve dayanımla ters orantılıdır. Süneklik ölçüm kriteri olarak malzemenin kopma uzaması ve kesit daralması değerlerinden yararlanılabilir.

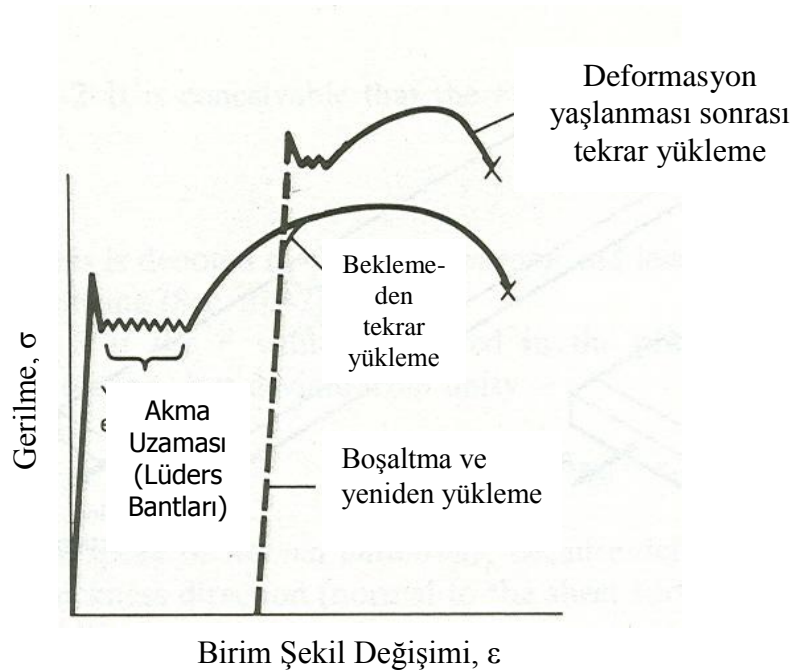
a. HASAR TÜRLERİ:

1. Yüzeyin Portakal Kabuğu Görünümü:

İri taneli saclarda plastik şekil değişimi sonrasında mat ve portakal kabuğu görünümünde yüzey oluşur. Önlenmesi için olabildiğince küçük tane boyutuna sahip saclar kullanılmaktadır.

2. Yüzeyde Oluşan Akma Bantları:

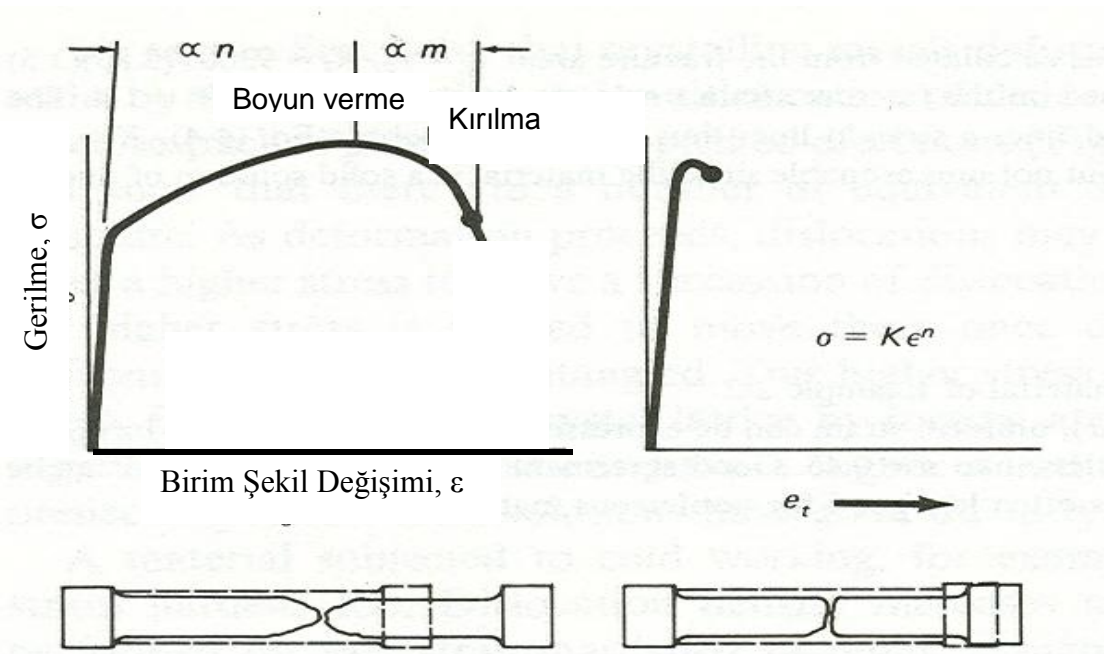
Özellikle yumuşak basit karbonlu çelik saclarda plastik şekil değişimi başlangıcında meydana gelen Lüders kayma bantları hem heterojen şekil değişimine hem de yüzey kalitesinde bozulmaya neden olmaktadır.



Akma noktasından sonra gelişen belirgin akma olayı Lüders bantlarının oluşup tüm malzemeyi kaplamasıyla gerçekleşmektedir. Bu olay çözünen küçük atomların (C ve N gibi) özellikle kenar dislokasyonların altına yerleşmesi ve burada Cottrell Atmosferi olarak adlandırılan bir etki yaratmasıdır. Bu etki dislokasyonların hareketine izin vermemekte ve belirgin akmanın oluşmasına neden olmaktadır. Bu etki mekanik olarak bozulduğunda başka etkiler yoksa hemen tekrar oluşmamaktadır. Bunun tekrar oluşması ısı aktivasyonu yani kafes içinde yayınma gerektirmektedir. Bu sağlanırsa (örneğin 150°C de bir saat tutma veya oda sıcaklığında 6 ay bekleme gibi) Cottrell atmosferi yeniden oluşur ve belirgin akma sacda yeniden görülür. Genellikle sanayide bu etkiden kurtulmak için saclara "Temper Haddesi" uygulanmaktadır. Bu işlem saclara soğuk haddelenmeyle verilen % 2-5 arasındaki plastik şekil değişimidir.

3. Boyun Verme:

Fazla şekil değişimi verildiğinde kırılma belki olmaz ancak malzeme boyun verir.



Boyun verme malzemenin pekleşme üsteli ile ilgilidir. Boyun verme uniform birim şekil değişimi $\epsilon_{ün}$ değerine ulaşıldığında gerçekleşir. Yaklaşık olarak malzemelerde;

$$\epsilon_{ün} = n$$

olduğu kabul edilmektedir. Bunun anlamı sac şekillendirmede boyun verene kadar malzemenin şekillendirilmesi gerekmektedir ve bunun sınırı malzemenin pekleşme üsteli değeridir.

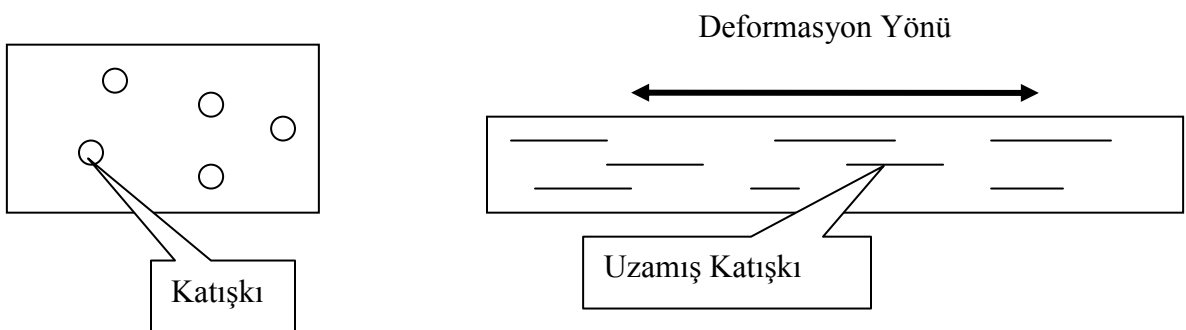
4. Malzemeler boyun verdikten sonra deformasyon o bölgede yoğunlaşır ve kopma gerçekleşir. Deformasyon hızına duyarlılık üsteli m değeri ise boyun verme sonrası kırılmaya kadar olan bölge üzerinde etkilidir. Büyük m değerine sahip malzemeler boyun verseler bile kırılmaya veya kopmaya kadar önemli oranda şekil değiştirebilirler. Kısaca malzemelerin n ve m değerlerinin büyük olması sacın şekillendirilebilme özelliğinin iyi olduğunun bir göstergesidir.

b. ANİZOTROPI

Anizotropi özelliklerde yöne bağımlılık demektir. Saclarda iki tür anizotropi görülür:

i. Mekanik Anizotropi

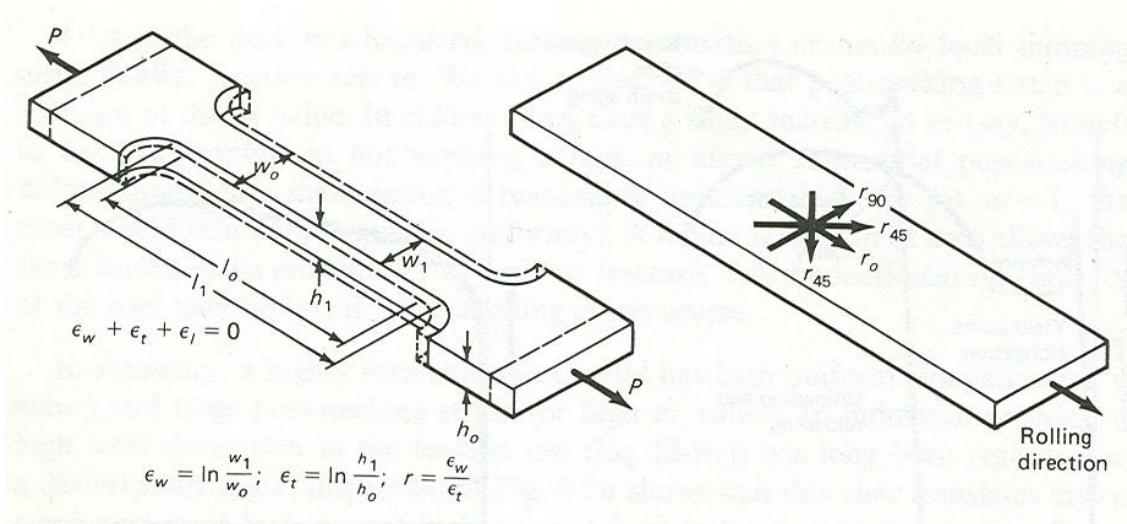
Malzeme sac haline getirilirken çok büyük oranda önce sıcak sonra soğuk haddeleme işlemine tabi tutulur.



Bu sırada özellikle sülfür tipi katışkılar (inklüzyonlar) deformasyon yönünde uzarlar. Bunlar malzeme enine yüklendiği zaman kuvvetli çentik etkisi yaparak süneklik, tokluk ve yorulma dayanımı üzerinde olumsuz rol oynarlar. Malzemenin boylamasına yüklenmesi durumunda bu olumsuzluklar görülmez. Buna mekanik anizotropi adı verilir ve parçanın konumlanmasında mutlaka dikkate alınması gerekmektedir.

ii. Kristalografik Anizotropi:

Bir Sac çekme deney numunesi çekme deneyine tabi tutulduğunda boylamasına uzar ve kalınlık ile genişlik yönünde daralır.



Toplam birim şekil değişimi sıfıra eşit olduğundan;

$$\epsilon_l + \epsilon_w + \epsilon_t = 0$$

Yazılır. Bu durumda çekme birim şekil değişimi basma birim şekil değişimlerinin toplamına eşit olmakta ve basma birim şekil değişimleri (kalınlık ve genişlik) için bir şey söylenememektedir.

$$\epsilon_l = -(\epsilon_w + \epsilon_t)$$

Kısalma yönündeki birim şekil değişimleri arasında bir ilişki kurmak için “r değeri” adı verilen bir parametre kullanılmaktadır. Bu parametre;

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t}$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Çekme deneyi için alınan deney parçaları şekillendirme yönüyle değişik açılarda konumlanmış olabilir. Örneğin yukarıdaki şekilde olduğu gibi deney parçası boylamasına (deformasyon yönüne paralel, açı = 0°), enlemesine (deformasyon yönüne dik, açı = 90°) veya verev (deformasyon yönüyle 45° açıyla konumlanmış olabilir. Burada belirtilen her durum için farklı bir r değeri elde edilebilir. Bunları ayırt etmek için altlarına deformasyon yönüyle yaptığı açı indis olarak belirtilmektedir (r_0 , r_{45} , r_{90} gibi).

Bu durumda aşağıda sıralanan koşullar oluşur:

1. İzotropi Hali

$$r_0 = r_{45} = r_{90} = 1$$

2. Düzlemsel Anizotropi Hali

$$r_0 \neq r_{45} \neq r_{90}$$

Bazı yönlerde deformasyonun daha kolay ve fazla miktarda gerçekleştiğini ifade eder. Bu durum derin çekme işlemi sırasında görülen Kulaklanma ile kendini gösterir.

3. Normal Anizotropi Hali

$$r_0 = r_{45} = r_{90} \neq 1$$

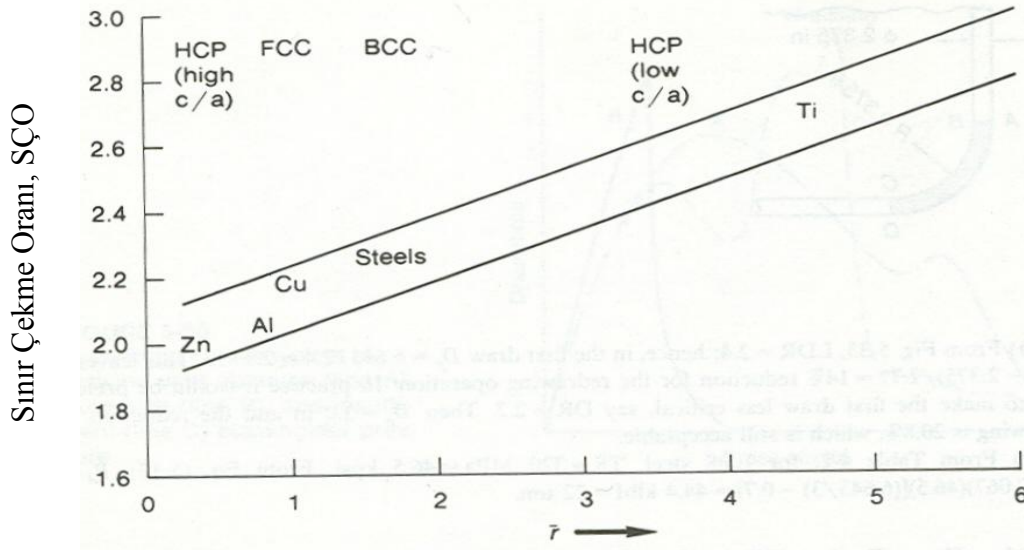
Bu ise sacın deformasyon sırasında incelmeye olan eğilimini belirlemektedir. Özellikle birden küçük değerler sacın kolay incelmeye olan eğilimini gösterir ki bu tür sacları şekillendirmek zordur. Şekillendirme sınırı düşük olduğu için büyük şekil değişimi verilemez.

4. Gerçek Durum

Gerçekte saclarda hem normal hem de düzlemsel anizotropi birlikte bulunur. Bu durumda normal anizotropiyi sayısal olarak belirlemede ortalama r değeri olarak nitelendirilen \bar{r} değerine bakılır:

$$\bar{r} = \frac{r_0 + r_{90} + 2r_{45}}{4}$$

Bu değerın büyük olması sacın şekillendirebilirliği açısından iyidir.



Yukarıdaki şekilde normal anizotropinin artmasıyla derin çekme işlemlerindeki sınır çekme oranının da arttığı görülmektedir.

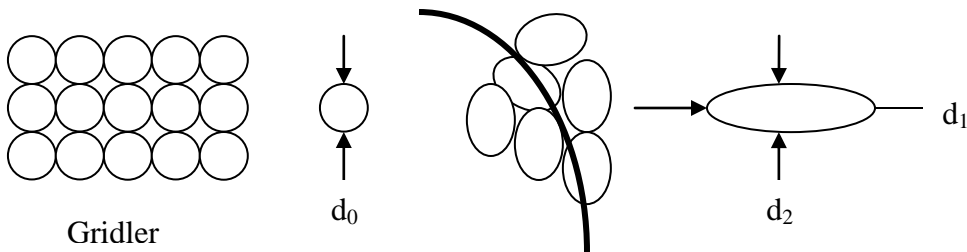
Gerçek durumda düzlemsel anizotropiyi sayısal olarak belirlemek için Δr değerine bakılmaktadır.

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{4}$$

Bu durumda da kulaklanma olasılığının azalması için Δr değerinin sıfıra yaklaşması avantaj sağlamaktadır.

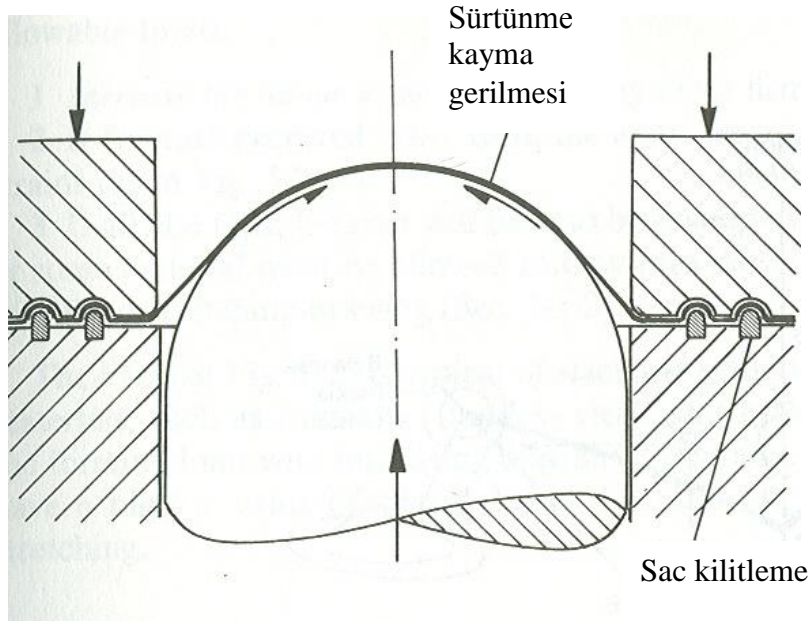
c. ŞEKİLLENDİRME SINIR DİYAGRAMLARI

Germe durumunun geçerli olduğu özellikle derin çekme işlemlerinde tek eksenli zorlama neticesinde elde edilmiş malzeme verileri kullanarak analiz yapmak mümkün değildir. Kalınlık yönündeki şekil değişiminin ihmal edilerek iki eksendeki zorlama ve neticesindeki şekil değişiminin değerlendirilmesi gerekir. Bu amaçla “Şekillendirme Sınır Diyagramları” kullanılır. Bunun elde edilmesinde sacın üzerine önce çapı önceden belirlenmiş yuvarlak Gridler işlenir. Bunun için fotoğraf yönteminden yararlanılır. Çünkü mekanik olarak yapılırsa yüzeyi çizer ve zarar verir. Kalemle yapılırsa bu defa şekillenme sırasında boyalar atar.

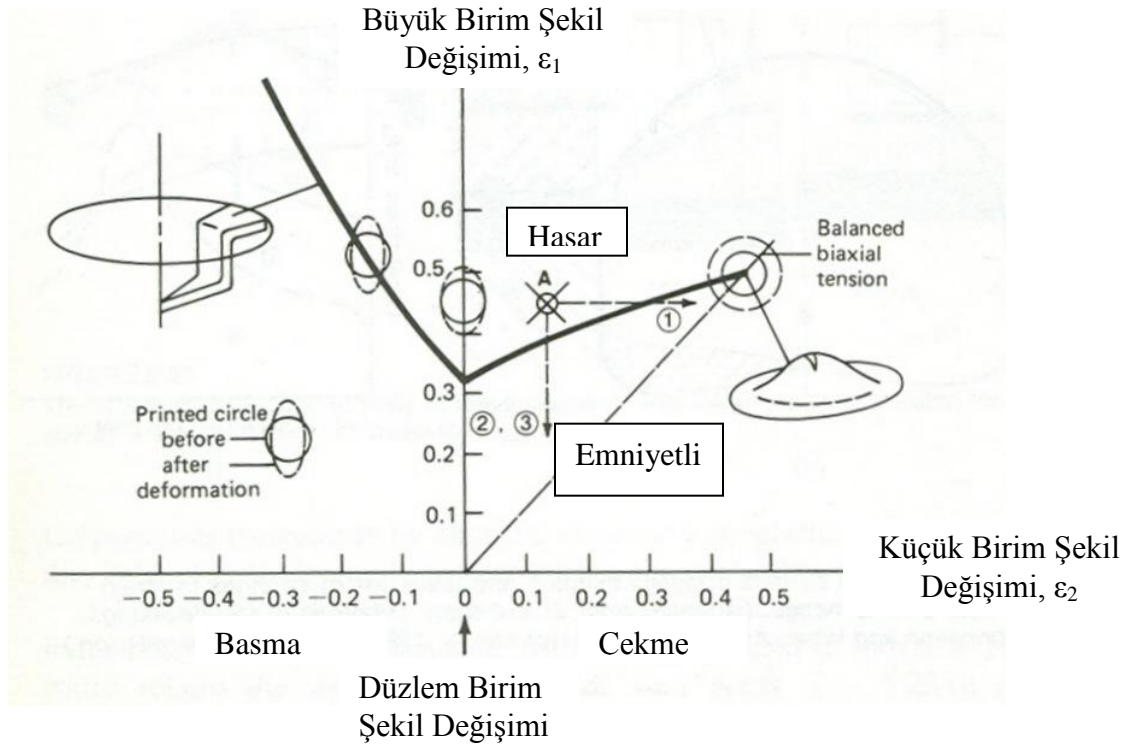


Yüzeyine Gridler işlenmiş sac küresel bir mandrelin kullanıldığı germe cihazında germe işlemine tabi tutulur. Germe işlemi ya sacda boyun verme oluşuncaya ya da yırtılma olana kadar sürdürülür. Daha sonra örneğin yırtılma analizi yapılıyorsa yırtılan bölgede şekil değiştiren gridlerin boyutları ölçülür. Genellikle daireler elips şekline dönüşür. Bu durumda eksenlerinin ölçümü sonrasında o noktada

meydana gelen kritik şekil değişimi büyük ve küçük olmak üzere belirlenir.



Bu inceleme bir çok farklı noktada yapılır ve bulunan değerler bir diyagram üzerinde gösterilir. Elde edilen bu diyagrama “Şekillendirme Sınır Diyagramı (ŞSD)” adı verilir.



Büyük birim şekil değişimi: $\varepsilon_1 = \ln \frac{d_1}{d_0}$

Küçük birim şekil değişimi: $\varepsilon_2 = \ln \frac{d_2}{d_0}$

Şekillendirme sınır diyagramları malzemenin normal anizotropi değerinden, pekleşme üstelinden ve sac kalınlığından etkilenir. Bu değerlerin fazla olması ŞSD olumlu etkiler ve diyagram yukarı doğru kayar. Bu diyagramın altında kalan şekil değişimlerinde malzeme sorunsuz şekillendirilir. Ancak bu diyagramın üzerinde yer alan birim şekil değişimi kombinasyonları oluşmuşsa sacı boyun vermesi veya yırtılması kaçınılmazdır. Bu durumda şu önlemler alınabilir:

1. Küçük birim şekil değişimi arttırılabilir. Bu söz konusu yönde tutma işleminin daha az sıkı yapılmasıyla gerçekleştirilebilir.

2. Yırtılma tepede gerçekleşmişse iyi bir yağlamayla deformasyonun yığılmasına engel olunabilir,

3. Bunların yeterli olmadığı durumlarda yeniden kalıp tasarımı yapılır ve büyük birim şekil değişiminin azaltılmasına çalışılır.

4. ŞSD daha yukarıda olan yeni bir malzeme seçimi de çözüm olarak önerilebilir.

YÜZEY TEMİZLEME YÖNTEMLERİ

(Ders Kitabı 28. Bölüm)

İmal edilen parçaların uygulanan işlemler sırasında bir veya daha fazla kere yüzeylerinin temizlenmesine ihtiyaç duyulabilir. Yüzey temizleme işlemlerini şu şekilde sınıflamak mümkündür:

- 1. Kimyasal temizleme,**
- 2. Mekanik Temizleme,**
- 3. Yayınma ve İyon İmplantasyon İşlemleri.**

Endüstriyel uygulamalarda temizlik amacıyla kimyasal ve/veya mekanik işlemlerden yararlanılmaktadır.

Kimyasal Temizlemede kimyasal maddeler kullanılarak yüzeydeki kir, yağ veya istenmeyen diğer birikintiler giderilmektedir. Mekanik temizlemede ise daha çok yüzeyde biriken kirler alınmakta, talaşlı imalat sonrasında çapakların giderilmesinde ve yüzey düzgünlüğü ile parlaklığının sağlanmasında kullanılmaktadır. Parçaların yüzey özelliklerini iyileştiren diğer yöntemler ise yayınma esaslı işlemler ile iyon implantasyon uygulamalarıdır. Bu işlemlerle parça yüzeyi ve yüzeye yakın bölgelere yabancı element atomları eklenmekte ve böylece yüzeyin kimyasal ve fiziksel özelliklerinde değişim sağlanmaktadır.

Gerek imalat, sırasında gerekse imalat sonrasında parça yüzeylerinin temizlenmesine aşağıdaki nedenlerden dolayı ihtiyaç duyarız:

- 1. Parça yüzeyini bir sonraki işleme hazırlamak için (örneğin yüzey kaplama veya yapıştırma işlemleri öncesi)**
- 2. Çalışanların ve müşterilerin çalışma koşulları ile konforlarını geliştirmek için,**
- 3. Parça yüzeyi ile reaksiyona girebilecek kir ve birikintileri uzaklaştırmak için,**
- 4. Parçanın performansını (kimyasal, fiziksel, estetik vb.) arttırmak ve görünümünü geliştirmek.**

Hangi temizleme yönteminin kullanılması gerektiği konusunda karar verebilmek için aşağıdaki faktörlerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir:

- 1. Temizlenmesi istenen birikinti veya kirin türü,**
- 2. İstenen temizliğin derecesi veya seviyesi,**
- 3. Yüzeyi temizlenecek parçanın malzemesi,**
- 4. Temizleme nedeni,**
- 5. Çevre, emniyet ve sağlık koşulları,**
- 6. Parça geometrisi ve boyutları,**
- 7. Temizleme yönteminin uygulama kolaylığı,**
- 8. Yöntemin maliyeti.**

a. Birikinti Türleri:

- Fabrika şartlarından veya önceki imalat kademelerinden dolayı yüzeyde oluşan birikintiler veya kirler,**
- Metal şekillendirmede veya işlemede kullanılan yağlar veya gres yağı,**
- Talaş, abrasif parçacıklar, atölye tozu,**
- Perdahlama veya parlatma sırasında kullanılan bileşiklerin kalıntıları,**
- Oksit tabakaları, pas veya tufal kalıntılarıdır.**

b. Temizlik Seviyesi veya Derecesi:

Yapılacak temizlik sonrasında parça yüzeyinde kalabilecek veya izin verilen birikinti veya kir miktarını belirler. Bu amaçla “Silme Testi” adı da verilen yöntemden yararlanır. Bu test sırasında parça yüzeyi temiz bir kâğıt veya bezle silinir ve bu işlem sonrasında kâğıt veya bezde toplanan birikinti veya kir miktarı izlenir. Sayısal kıstas içermese de pratikte çok kullanılan bir yöntemdir.

c. Temizlenen Parçanın Malzeme Özellikleri

Parça malzemesi dikkate alınmadan yapılacak bir yüzey temizleme uygulaması yüzeyin zarar görmesine neden olabilir. Örneğin Al asitler ve alkali çözeltilerde çözünmektedir. Çelikler ise hemen hemen tüm asitlerle reaksiyona girerken alkali çözeltilere karşı daha dayanıklıdır.

d. Çevre ve Sağlık

Yüzey temizleme sırasında kullanılacak olan kimyasal maddelerin gerek çalışanlar, gerekse kullanıcıların sağlığına olumsuz etkilerinin olmamasına ve çevreyi kirletmemesine dikkat edilmelidir.

1. Kimyasal Yüzey Temizleme Yöntemleri:

a. Alkali Temizleme

b. Emülsiyonla Temizleme

c. Çözücü Kullanarak Temizleme

d. Asitle Temizleme

e. Ultrasonik Temizleme (Diğer kimyasal temizleme yöntemlerine mekanik katkı olarak)

A. Alkali Temizleme

Kimyasal olarak alkali maddeler kullanılır. Parça yüzeyindeki yağlar, gres, cila artıkları, metal talaşları, muhtelif tozlar, hafif pas tabakaları bu yöntemle temizlenebilir. Sanayide en yaygın olarak kullanılan temizleme yöntemlerinden biridir. Kullanılan kimyasal maddeler olarak NaOH, KOH, Na₂CO₃ ve Na₂B₄O₇ (boraks) sayılabilir. Temizleme işlemi sırasında kimyasal madde banyosuna parça daldırılabilirdiği gibi kimyasal madde parça yüzeyine püskürtülebilmektedir. İşlem 50-95°C sıcaklık aralığında ve çoğunlukla da konveyörlü taşıma sistemi bulunan kapalı ünitelerde gerçekleştirilir. İşlem sonrası parça yüzeyine su püskürtülerek çalkalanması sağlanır. Elektro temizleme veya elektrolitik temizleme alkaline temizleme sırasında yararlanılan yardımcı yöntemdir. Burada çözeltiye 3-12 V gerilim uygulanır. Bu gerilim parça yüzeyinde hava kabarcıkları oluşmasına neden olur ve parça yüzeyinde ovalama hareketi sağlayarak temizlemenin daha etkin bir şekilde gerçekleşmesine neden olur.

B. Emülsiyonla Temizleme

Bu yöntemde su içinde saçınmış (emülsiyon) halde bulunan organik çözücüler (yağlar) temizleme ortamı olarak kullanılmaktadır. Örneğin su içinde sabun çözeltisi iki faz içeren bu tür bir temizleme ortamı oluşturur. Emülsiyon halindeki bu çözelti kirleri çözerek gerekli temizliği sağlar. İşlem sonrasında, örneğin bir yüzey kaplama işlemi parçaya uygulanacaksa ek olarak alkali temizleme işlemine de gerek duyulur. İşlem hem metal hem de metal dışı parçaların yüzey temizliğinde kullanılabilir.

C. Çözücü İle Temizleme

Yağ gibi organik kirler, bu yöntemde onları çözebilme özelliği olan kimyasal maddeler tarafından çözülerek yüzeyden uzaklaştırılır. Genel uygulamalar, elle silme, daldırarak

temizleme, yüzeye püskürtme ve çözücü buharıyla temizleme şeklindedir. Buhar ile temizleme işleminde çözündürücü (örneğin tri-klor etilen) ısıtılarak buharları metal parça yüzeyine gönderilir. Burada soğuk parça üzerinde yoğunlaşır ve yüzeydeki kirleri çözerek alttaki banyoya damlar. Buharlaşma ve yoğunlaşma mekanizmasıyla gerekli yüzey temizliği sağlanır. En etkili yüzey temizleme yöntemlerinden biridir. Ancak yangın tehlikesi ve buharların insan sağlığına olumsuz etkileri göz önünde bulundurulmalıdır.

D. Asitle Temizleme ve Dağlama

Asitle temizlemede yüzeyde bulunan yağlar, ince oksit tabakaları ve gres yağı asidik çözeltiye daldırarak, yüzeye püskürterek ve ovalayarak alınır. Bu amaçla HCl, HNO₃, H₂SO₄ veya H₃PO₄ kullanılabilir. Asitle dağlama daha kalın oksit tabakalarını ve tufalı parça yüzeyinden kimyasal olarak kaldırma amacıyla kullanılır. Dağlama derin olduğu için parça yüzeyinde iz bırakabilir.

E. Ultrasonik Temizleme

Bu işlemde mekanik çırpıntı ile beraber kimyasal temizleme gerçekleştirilir. Mekanik çırpıntı yüksek frekanslı titreşim sayesinde yaratılır. Kimyasal ortam olarak alkali deterjanların kullanıldığı sulu çözeltilerdir. Bu amaçla alkolden de yararlanılabilir. 20-45 kHz mertebelerindeki frekansa sahip mekanik titreşimler parça yüzeyinde önce kavitasyon yaratmakta bunun neticesinde gaz kabarcıkları oluşturmakta ve bunların da yüzeydeki kirlerin etkin bir şekilde temizlenmesinde çok faydası olmaktadır. Çözelti banyo sıcaklığı genellikle 65-85°C arasında tutulmaktadır.

2. Mekanik Yüzey Temizleme Yöntemleri

Parça yüzeyinden kir, oksit, pas, talaş gibi birikintileri fiziksel olarak aşındırıcı (abrasif) veya başka mekanik etkilerden yararlanarak uzaklaştırma yöntemlerini kapsar. Ayrıca yüzeyde yerel kalıcı şekil değişimi yaratarak yüzeyde basma artık gerilmeleri ve pekleşmeye de neden olmasından dolayı yüzey bitirme işlemi olarak da kullanılabilir. Belli başlı mekanik temizleme yöntemleri:

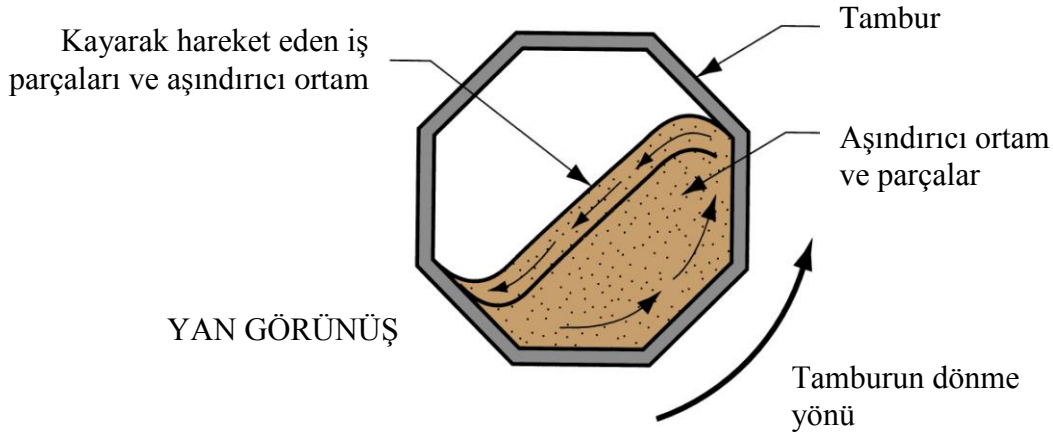
- 1. Kum püskürtme (blasting),**
- 2. Bilye Püskürtme (shot peening),**
- 3. Tamburda temizleme (barrel tumbling),**
- 4. Titreşimle temizleme (vibratory finishing).**

Kum Püskürtme işleminde parça yüzeyine yüksek hızda kum, alümina (Al_2O_3), silis karbür (SiC) aşındırıcı parçacıklar gönderilir ve yüzey mekanik yolla fiziksel olarak temizlenir. Bazı durumlarda naylon gibi yumuşak parçacıkların da kullanıldığı olur. Özellikle sıcak şekillendirme sonrası, döküm sonrası veya talaşlı imalat sonrası yüzey temizleme amacıyla kullanılır. Parçacıklar ya basınçlı hava ile ya da merkezkaç kuvvetinden yararlanılarak yüzeye gönderilir.

Bilye püskürtme işleminde parça yüzeyine sert bilyeler hava veya merkezkaç etki yardımıyla gönderilir. Bu işlem daha çok yüzeyde yerel deformasyon yaratarak özellikle parçanın yorulma dayanımını arttırmak amacıyla uygulanır. Bilye püskürtme işleminin şiddetini belirlemede “Almen” testinden yararlanır.

Tamburda döndürerek temizleme işlemi parçaların teker teker değil de gurup halinde yüzeylerinin temizlendiği bir işlemdir. Parça boyutu küçüldükçe yüzeylerinin toplu halde temizlenmesi daha ekonomik olur. Bu işlemde bir tamburun

içine aşındırıcı ortam konur. Çapak alma, pah kırma, tufal alma, parlatma veya yüzey temizleme amacıyla kullanılabilir. Amaca uygun olarak temizleyici ortam seçilmelidir. Döküm sonrası, dövme sonrası, ısıl işlem sonrası parçaların yüzey bitirme işlemlerinde kullanılır. Ortam olarak seramik, polimer, talaş parçacıkları ve deterjanlı sudan yararlanılır.

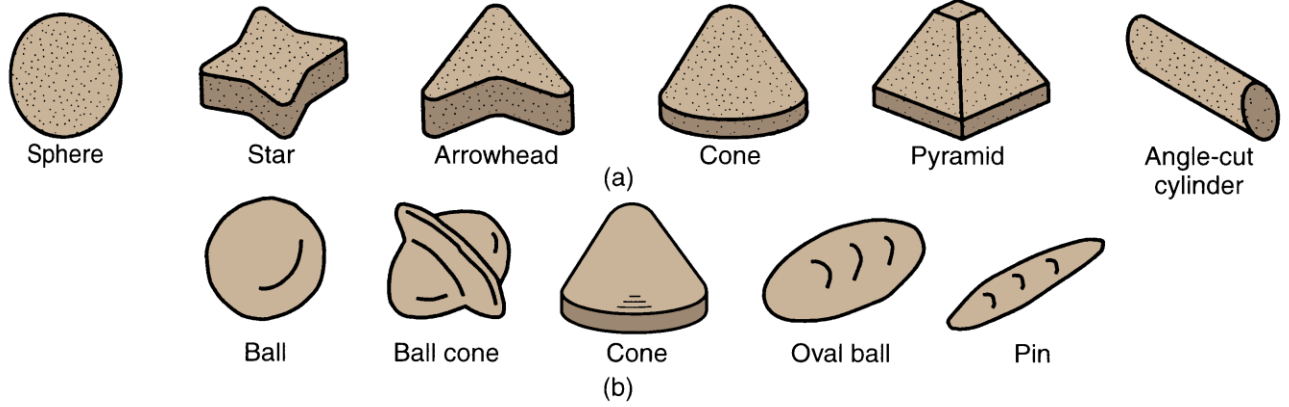


Genel olarak yatay konumlanmış altıgen prizma şeklindeki tamburlar döndürülerek işlem yapılır. Tambur içine temizleyici ve/veya aşındırıcı ortam ile birlikte parçalar yerleştirilir ve tambur kapatıldıktan sonra 10–50 dev/dak hızla döndürülür. Dönme sırasında parçalar kayarak ve ortama sürtünerek hareket ederler ve yüzeyleri ovalama etkisi altında kalır. İşlemin uzun sürmesi, çok yer tutması ve sesli oluşu önemli dezavantajları arasındadır.

Titreşimli temizlemede parçalar titreşimli bir kabın içine aşındırıcı ortam ile birlikte konulmakta ve belli bir süre titreşime tabi tutulmaktadır. İşlem süresi daha kısa, ses düzeyi daha düşüktür. Ayrıca işlem sırasında parça yüzeyinin kalitesini işlemi durdurmadan anlamak mümkündür.

Temizleyici ve aşındırıcı ortam olarak

- a. Doğal (alümina, granit tozu, kireç taşı, talaş),**
- b. Sentetik (Muhtelif şekillere polimer resin kullanılarak ve sıkıştırılarak hazırlanmış Alümina ve SiC tozları).**



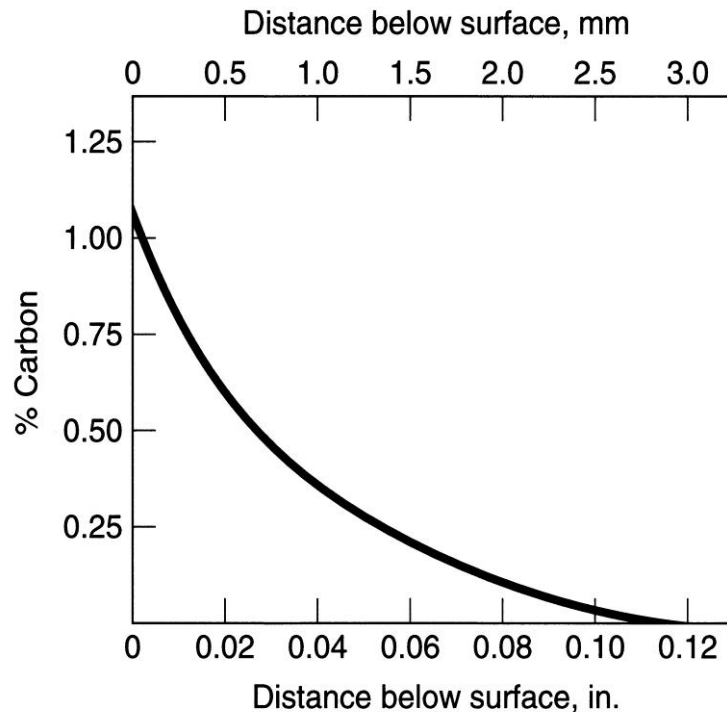
(a. Aşındırıcı parçalar)

(b. Parlatici parçalar)

Bu tür işlemlerin çoğunda aşındırıcı ve parlatici parçacıklarla birlikte sıvı temizleyici ve parlatici özelliği olan bileşiklerden de yararlanır.

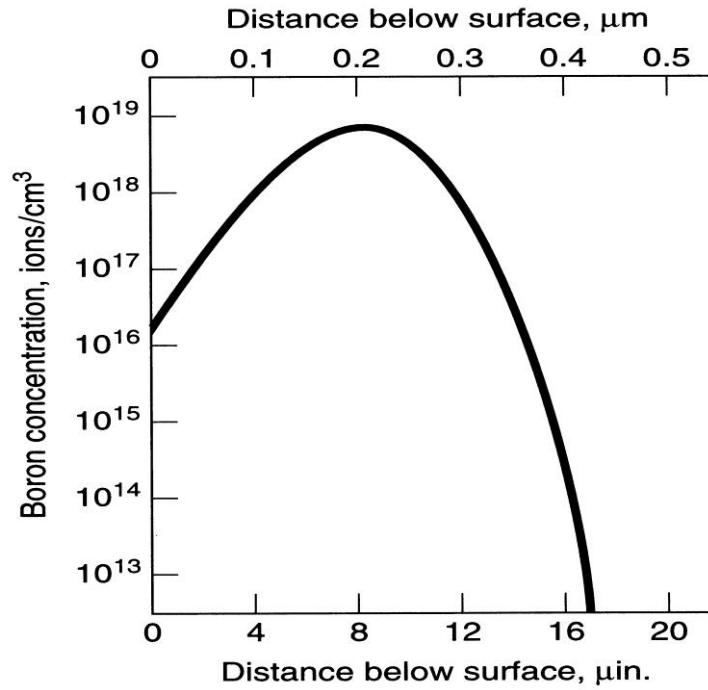
3. Yayınma ve İyon İmplantasyon İşlemleri

Yayınma olayından yararlanarak parçaların yüzeyinde kimyasal bileşim farklılıkları yaratılabilir.



Örneğin sementasyon (karbürleme) işleminde olduğu gibi karbonca zengin bir ortamda yayınmanın gerçekleşebileceği bir sıcaklıkta tutulan bir düşük karbonlu çeliğin yüzeyine karbon atomları yayındırılarak yüzeyde karbon oranını artırılır. Buna benzer şekilde yüzeyden N (nitrürleme), B (borlama), C ve N birlikte (karbo-nitrürleme) yayındırılıp parçaların yüzeyleri sertleştirilebilmektedir.

İyon implantasyonu ise daha düşük sıcaklıklarda parça yüzeyine atomların mekanik olarak çarptırılıp zoraki yüzeye sokulması ve hatta çivilenmesiyle gerçekleştirilmektedir.



İyon implantasyonunun avantajları:

- 1. Düşük sıcaklıklarda uygulanması,**
- 2. Atomların yüzeyden içeri doğru yerleşmelerinin iyi kontrol edilebilmesi,**
- 3. Sert fazların çökmesi gerçekleşmeden çözündürme sınırlarının aşılabilmesi,**
- 4. Diğer yayınma proseslerine göre işlem sonrası atık madde sorunu olmaması,**

5. kaplama tabakası ile parça arasında sureksizliğe neden olmaması.

İyon implantasyon yöntemi metal yüzeylerinin değişik amaçlar için (örneğin korozyon dayanımı, aşınma dayanımı gibi) yüzey özelliklerini değiştirmek ve yarı-iletken malzeme üretimi amacıyla kullanılmaktadır.

YÜZEY KAPLAMA YÖNTEMLERİ

(Ders Kitabı 29. Bölüm)

İmal edilen metal parçaların pirinç (sarı) ve paslanmaz çelik haricinde olanlarının hemen hemen hepsinin yüzeyleri gerek boyanarak veya kaplanarak gerekse daha başka yöntemler kullanılarak kaplanır. Aynı şekilde metal dışı bazı parçaların da yüzeyleri değişik yöntemler kullanılarak metal kaplama işlemine tabi tutulur.

Metallere uygulanan yüzey kaplama işlemlerinde şunlar hedeflenir:

- 1. Korozyondan koruma,**
- 2. Estetik sağlama,**
- 3. Aşınma performansını iyileştirme,**
- 4. Sürtünme katsayısını azaltma,**
- 5. Elektrik iletkenliğini veya rezistansını arttırma,**
- 6. Yüzeyi sonra uygulanabilecek işlemlere hazırlama,**
- 7. Aşınmış yüzeyleri eski haline döndürme.**

Metal dışı malzemelere uygulanan yüzey işlemlerinde ise şunlar hedeflenir:

- 1. Plastik parçaların yüzeyinde metalik görünüm elde etme,**
- 2. Gözlük çamlarına yansıma önleyici kaplama yapma,**
- 3. Yarı iletken çiplerinin ve baskılı devrelerin imalatında kullanılan plakaların imalatı.**

Biriktirme ve yüzey kaplama işlemlerini aşağıdaki guruplara ayırmak mümkündür:

- a. Elektrolitik Kaplama (Plating),
- b. Dönüşümle Kaplama (Conversion Coating),
- c. Fiziksel Buhar Biriktirme (Physical Vapor Deposition, PVD),
- d. Kimyasal Buhar Biriktirme (Chemical Vapor Deposition, CVD),
- e. Organik Kaplama (Organic Coating),
- f. Porselen veya Emaye Kaplama (Porcelain Enameling),
- g. Isıl Kaplama (Thermal Coating),
- h. Mekanik Kaplama (Mechanical Coating).

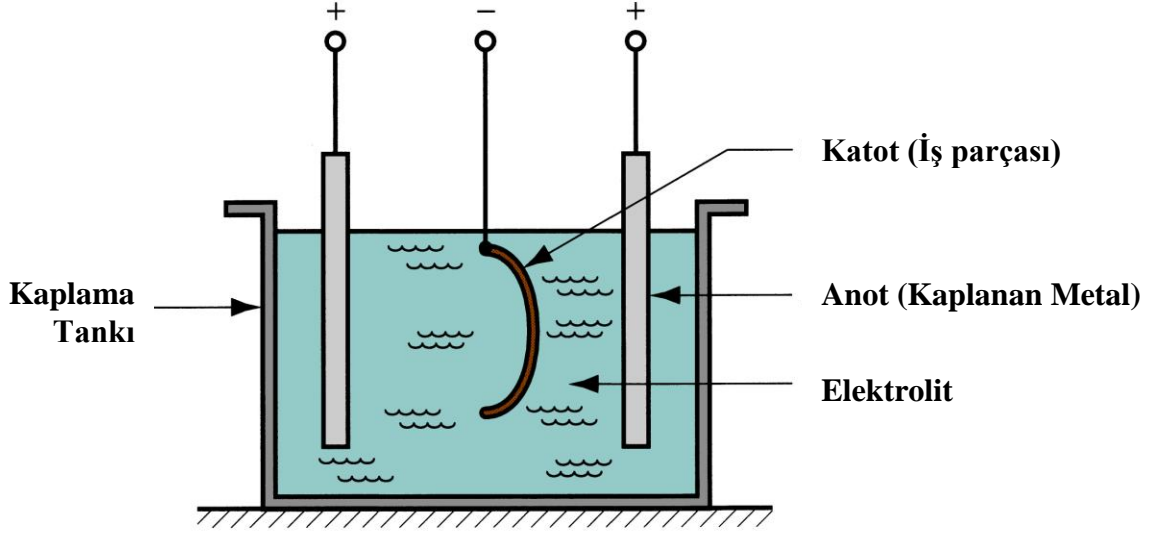
A. ELEKTROLİTİK KAPLAMA YÖNTEMLERİ

Çoğunlukla metalik parçaların yüzeyine ince metalik tabakaların kaplanması bu yöntemle gerçekleştirilir. Nadir de olsa seramik ve plastik parçaların yüzeylerinin kaplandığı da olur. Aşağıdaki şekillerde uygulanabilir:

- a. Elektrokimyasal Kaplama (En yaygın kullanılanı),
- b. Elektrokimyasal Birikimle Şekillendirme,
- c. Akımsız Kaplama,
- d. Sıcak Daldırma ile Kaplama.

1. Elektrokimyasal Kaplama:

Elektrolitik kaplama olarak da bilinir. Elektrolit içinde bulunan metal iyonları katot konumunda olan parçanın üzerine biriktirilir. Parçayı katot durumuna getirmek için dışarıdan doğru akım kullanılarak bir elektrokimyasal hücre oluşturulur. Elektrolit olarak asitlerin, bazların veya tuzların sudaki çözeltilerinden yararlanılır. Elektro kaplamada kaplanan metal elektrolitten geçirilen akım ile tutma süresine bağlıdır.



Faraday kuralına göre kaplanan metalin hacmi, V (mm^3):

$$V = C.I.t$$

olarak tanımlanmıştır. Burada C ($mm^3/amp-s$) kaplama sabiti, I (amp) işlemi gerçekleştiren doğru akım ve t (s) kaplama süresidir. Ancak kaplama olayında elektrik enerjisi sadece kaplama işleminde değil de hidrojen oluşumu gibi başka elektrokimyasal olaylarda da kullanıldığı için işlemin verimliliği E dikkate alınmalıdır. Bu durumda ortalama yüzey kaplama kalınlığı d 'yi belirlemekte aşağıdaki gibi bir bağıntıdan yararlanmak mümkündür:

$$d = \frac{E.C.I.t}{A}$$

Burada yer alan A (mm^2) kaplanacak parçanın yüzey alanıdır.

Küçük parçaların kaplanmasında işlem tamburlar içinde gerçekleştirilir. Büyük parçalar elektrolit banyosunun içinde asılarak, şeritler ve teller ise banyoda hareket ettirilerek ve makaralara sarılmak suretiyle kaplanır.

Plate Metal ^a	Electrolyte	Cathode Efficiency %	Plating Constant C ^a	
			mm ³ /amp-s	(in. ³ /amp-min)
Cadmium (2)	Cyanide	90	6.73×10^{-2}	(2.47×10^{-4})
Chromium (3)	Chromium-acid-sulfate	15	2.50×10^{-2}	(0.92×10^{-4})
Copper (1)	Cyanide	98	7.35×10^{-2}	(2.69×10^{-4})
Gold (1)	Cyanide	80	10.6×10^{-2}	(3.87×10^{-4})
Nickel (2)	Acid sulfate	95	3.42×10^{-2}	(1.25×10^{-4})
Silver (1)	Cyanide	100	10.7×10^{-2}	(3.90×10^{-4})
Tin (4)	Acid sulfate	90	4.21×10^{-2}	(1.54×10^{-4})
Zinc (2)	Chloride	95	4.75×10^{-2}	(1.74×10^{-4})

En çok kullanılan kaplama malzemeleri yukarıdaki tabloda verilmiştir. Çinko kaplama çeliği korozyondan korumak için, Nikel kaplama çeliği hem korozyondan korumak hem de estetik görüntü vermek için, Kalay kaplama ince saclardan teneke imalatında, bakır kaplama hem dekoratif amaçla hem de baskılı devrelerde kullanılan plakaların imalatında, krom kaplama ise hem dekoratif hem de aşınma direncini arttırmak için sert krom kaplama şeklinde kullanılmaktadır. Altın ile gümüş kaplama ise hem elektrik iletkenliğini arttırmak hem de mücevherat imalinde kullanılmaktadır.

2. Elektrokimyasal Şekillendirme

Prensip olarak elektrolitik kaplamanın aynısıdır ancak kaplama kalınlığı daha fazla olup süre daha uzundur. Burada amaç bir model veya taslak parça üzerine istenilen kalınlıkta kaplama biriktirmek ve daha sonra altta bulunan malzemeyi kaplanan malzemedan uzaklaştırarak parça imal etmektir. O yüzden şekillendirme terimi kullanılmaktadır. Altlık malzeme olarak düşük sıcaklıklarda eriyebilen metaller, plastikler veya mum kullanılabilir. Genellikle bu yöntem bakır, nikel ve nikel-kobalt alaşımlarında kullanılmaktadır.

Günümüzde çok hassas kalıpların imalatında (örneğin CD kalıpları), optik lens kalıplarının imalatında bu yöntemden yararlanılmaktadır.

3. Akımsız Kaplama

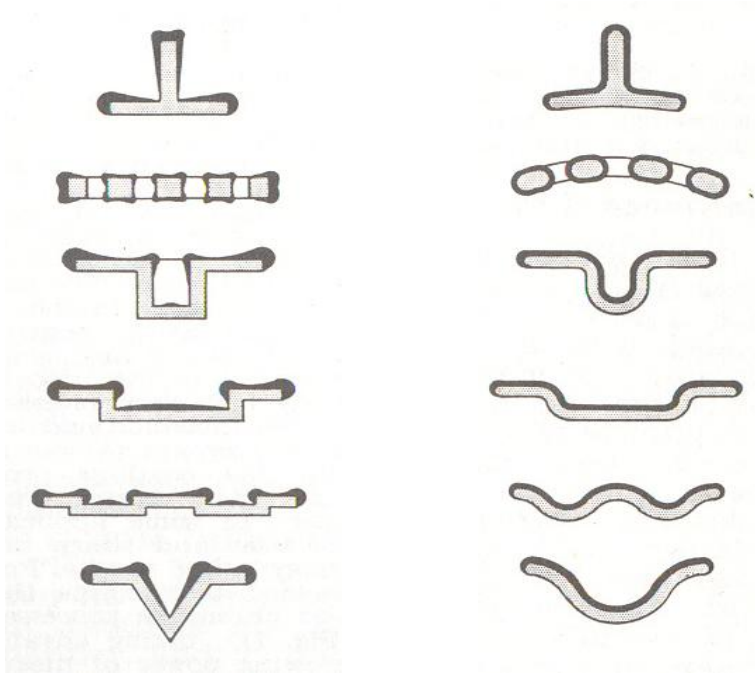
Bu yöntemde elektrik akımından yararlanılmaz ve işlem tamamen kimyasal reaksiyonlarla gerçekleştirilir. Kaplama sulu çözelti içinde yer alan metal iyonların parça üzerinde biriktirilmesi ile gerçekleştirilir. Bu yöntemin kullanıldığı kaplama metalleri sınırlıdır. Örneğin Nikel ve alaşımları ile bakır ve altın buna örnek olarak gösterilebilir. Elektrolitik kaplamaya oranla daha pahalı bir yöntem olmakla birlikte;

e. Elektrik enerjisi gerektirmemesi,

f. Metal dışı malzemelere de uygulanması ve

g. Yüzeyde daha homojen kalınlıkta kaplama meydana getirmesi (elektrolitik kaplamada karşılaşılan ciddi bir problemdir),

gibi bazı avantajlara sahiptir.



Elektrolitik kaplamada parça geometrisi etkisi

Genellikle karmaşık geometriye sahip, keskin radyüsler içeren parçalarda kaplama kalınlığının homojen olarak sağlanmasında akımsız kaplama bir avantaj sağlar.

4. Sıcak Daldırma

Bu işlemden kaplanacak parça, yüzeyi kaplanacak metalin ergimiş banyosuna daldırılır ve yeterli süre tutulur. Kaplanacak parçaya ait malzemenin ergime sıcaklığının kaplama metalininkinden çok daha fazla olması gerekir. Üzeri kaplanan metal çoğunlukla çelik olup üzerine oluşturulan kaplama malzemesi çinko, alüminyum ve kalaydır. Kaplama yapısına bakıldığında öncelikle bir ara faz bölgesinin (metaller arası bileşik) oluştuğu görülür. Bu ara faz kaplamanın alttaki metale iyi tutunmasını sağlar.

Bu işlemin amacı çeliği korozyondan korumaktır. Zn kaplama “Galvanizleme”, Sn “Teneke”, Al “Alüminyum Kaplama” olarak isimlendirilir. Bunların içinde galvanizleme en çok kullanılan yöntemdir. Sonuçta “Galvaniz Sac” üretilir. Zn kaplama kalınlığı genellikle 40 ile 90 µm arasındadır. Galvaniz kaplama banyolarında işlem sıcaklığı 450°C mertebesinde olup kaplama kalınlığı işlem süresi ile kontrol edilir. Çeliğin korozyondan korunması çinko tabakasının anot konumunda kurban edilmesiyle sağlanmaktadır. Daha pahalı olmasına karşılık alüminyum kaplanmış saclarda korozyon dayanımı galvaniz saca oranla beş misli daha fazla elde edilmektedir.

B. DÖNÜŞÜMLE KAPLAMA YÖNTEMLERİ

Bu tür kaplama yöntemlerinin uygulanmasıyla parça yüzeyinde ince oksit, fosfat veya kromat tabakalarının oluşturulması amaçlanmaktadır. Bu işlemlerle elde edilmesi amaçlananlar şunlardır:

- 1. Korozyondan korunma,**
- 2. Metal yüzeyini boyama öncesinde hazırlama,**
- 3. Aşınmaya karşı direnç,**
- 4. Şekillendirme işlemleri öncesinde metal yüzeyinin daha iyi yağlayıcı tutma özelliği kazanması,**
- 5. Yüzeyin elektrik rezistansını arttırmak,**
- 6. Dekoratif görünüm,**
- 7. Yüzey görünümünden parçaların ayırt edilmesi.**

Dönüşümle yüzey kaplama yöntemleri günümüz teknolojisinde aşağıdaki gibi uygulanmaktadır:

1. Fosfatlama

Fosfat tuzlarının (Zn, Mg veya Ca) seyreltik fosforik asit (H_3PO_4) içinde çözündürülmesiyle oluşturulan çözeltiye malzemenin (çelik, alüminyum gibi) daldırılması ile uygulanır. Yüzeyde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar gene yüzeyde fosfat tabakası oluşturur. Fosfat tabakası kalınlığı 1 ile 50 μm arasındadır. Özellikle otomotiv karoserlerinin korozyon dayanımının sağlamada çok önemli bir uygulamadır.

2. Kromatlama

Kromat tuzlarının seyreltik kromik asit içinde çözündürülmesiyle hazırlanan çözeltinin malzeme yüzeyinde kromat tabakası meydana getiren reaksiyon ile gerçekleşir. Daha çok alüminyum, magnezyum, bakır gibi metaller ile bunların alaşımlarına uygulanır. Kalınlığı genelde fosfat kaplamadakinden daha incedir. Bu işlemin sağladığı yarar olarak korozyon dayanımı, boya öncesi iyi yüzey kalitesi ve estetik görünüm sayılabilir.

3. Anodik Oksit Kaplama

Bundan önceki yöntemlerde elektrik akımı kullanılmamakla birlikte burada doğru akımdan yararlanılır. Elektrolitik kaplamada kullanılan donanımda bu yöntem uygulanabilir. Ancak bu yöntemde yüzeyi oksitlenecek parça banyoya anot konumunda yerleştirilir ve banyo katot konumundadır. Bu durumda oluşan reaksiyonla metal yüzeyinde ince ve yüzeye sıkıca bağlı bir oksit tabakası oluşturulur.

Kaplama kalınlığı 1 ile 250 µm arasında olabilir. İşlem sırasında elektrolite bazı boyalar eklenerek yüzeyin farklı renkler alması sağlanabilir. Böylece hem oksit tabakasından dolayı yüzey sertleştirilmiş, korozyona karşı pasifleştirilmiş ve dekoratif olarak iyileştirilmiş olmaktadır. En çok alüminyum ve alaşımlarına uygulanır ve endüstride “Eloksal Kaplama” olarak bilinir.

C. FİZİKSEL BUHAR BİRİKTİRME YÖNTEMLERİ (PVD)

Bu yöntem kaplama malzemesinin vakum ortamında buharlaştırılması ve kaplanacak parçanın üzerinde yoğunlaştırılması ile gerçekleştirilmektedir. Metal, seramik ve polimer gibi geniş bir malzeme yelpazesine uygulanabilmektedir. İşlemin aşamaları:

- a. kaplama malzemesinin buharlaştırılması,**
- b. buharı parça üzerine taşıma,**
- c. buharın parça üzerinde yoğunlaştırılıp biriktirilmesidir. İşlem bir vakum kabı içinde gerçekleştirilmektedir.**

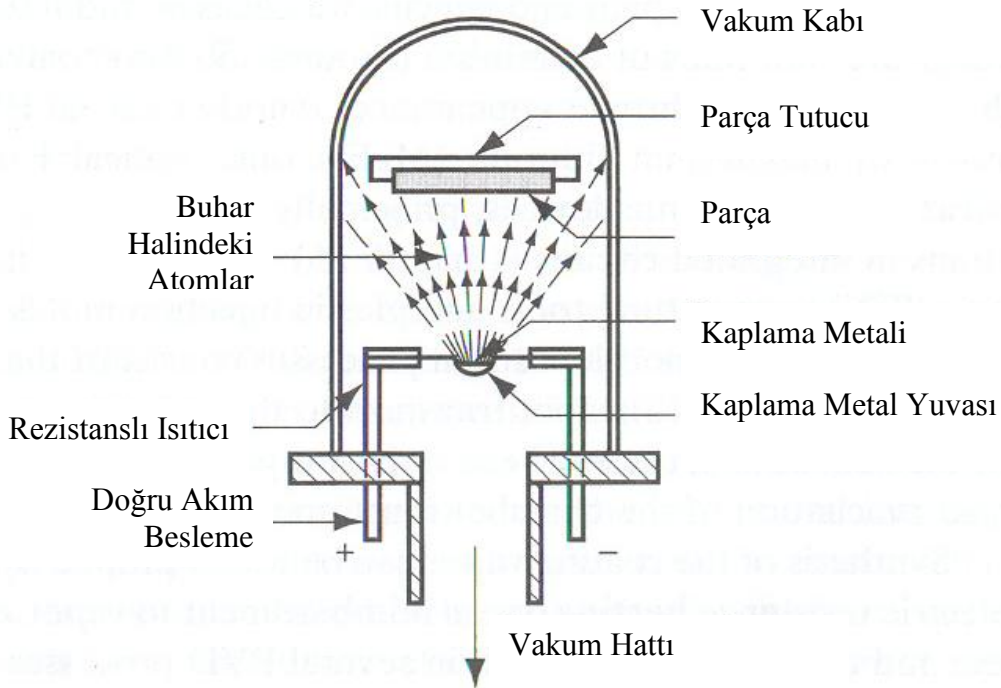
Uygulamaya örnek olarak oyuncak, kalem ve dekorasyon amaçlı muhtelif ev ve otomotiv parçaları üzerine yapılan 150

nm kalınlığındaki Al kaplama gösterilebilir. Bu tabaka üzerine yapılan lake cila uygulaması parça yüzeyinin krom veya gümüş parlaklığını almasını sağlamaktadır. Optik lenslerde yansımayı nleme amacıyla yapılan MgF_2 kaplaması da önemli bir PVD uygulamasıdır. Ayrıca talaşlı imalatta kullanılan kesme takımlarının ömrünü arttırmak amacıyla yüzeylerinin TiN ile kaplanması diğer bir önemli PVD uygulamasıdır.

Fiziksel buhar biriktirerek yüzey kaplama yöntemi uygulamalarını aşağıdaki gibi sınıflamak mümkündür:

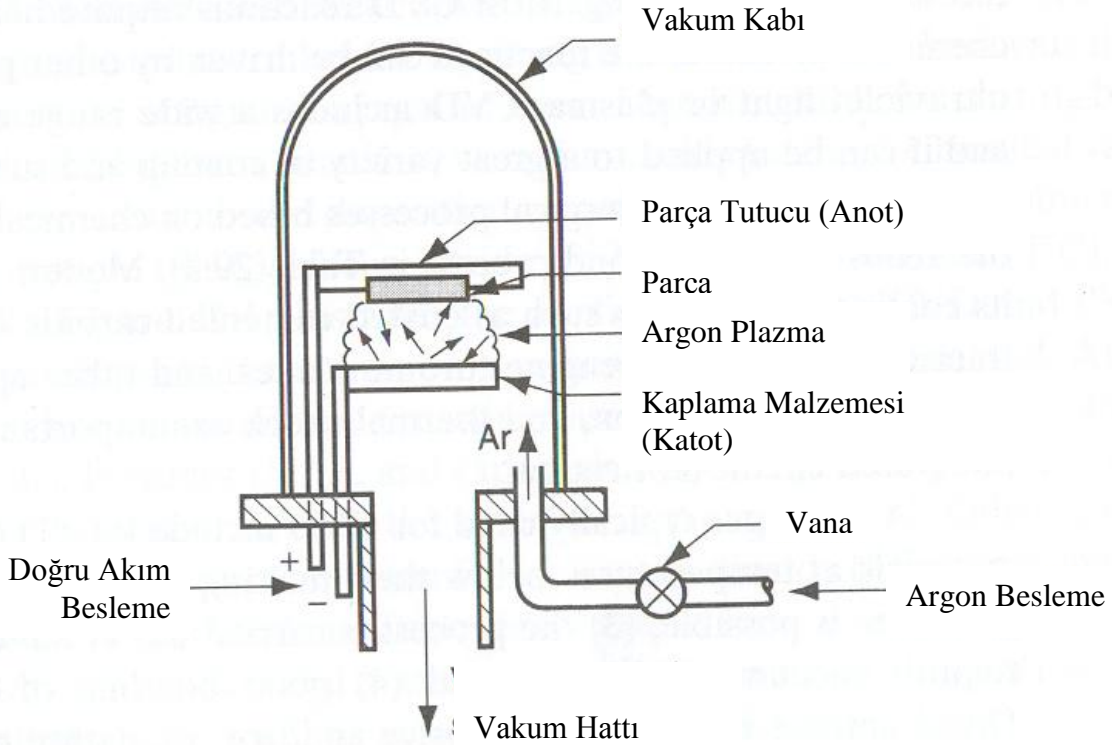
- 1. Vakumda Buharlaştırarak Biriktirme (evaporation),**
- 2. Sıçratarak Biriktirme (sputtering),**
- 3. İyon Kaplayarak Biriktirme (ion plating).**

1. Vakumda Buharlaştırma



Genellikle metal parçalara uygulanır. Kaplama malzemesi olarak da saf metaller tercih edilir. Kaba önce vakum uygulanır ve basınç düşürülür. Daha sonra kaplama malzemesi ısıtılır ve malzeme vakumun yardımıyla buharlaştırılır. Bu işlemde rezistanslı ısıtıcılar kullanılabileceği gibi elektron ışınlarından da yararlanılabilir. Buharlaşmış atomlar malzemeyi terk eder ve başka gaz molekülleriyle çarpışana veya katı yüzeye çarpmana kadar yollarına devam ederler. Vakum ortamı nedeniyle gaz atomları bulunmadığından doğrudan parça yüzeyine ulaşırlar. Burada birikirler ve ince bir film halinde katılaşır. Parça işlem sırasında döndürülerek birikimin daha homojen oluşması sağlanır.

2. Sıçratarak Biriktirme



Bu yöntemde kabın içinde önce vakum sağlanır daha sonra Argon gazı vakum basıncını arttırmayacak ölçüde beslenir ve parça anot, kaplama malzemesi de katot konumuna getirilecek şekilde yüksek doğru akım uygulanır. Anot ve katodun birbirine yeterince yakın olması neticesinde arada plazma oluşur. Plazmada yer alan Ar atomları katot konumundaki kaplama malzemesine çarpar ve oradan metal atomlarının sökülmesine ve anot konumundaki parça yüzeyine sanki sıçratılmış gibi gitmesine neden olur. Bu yöntem metal yüzeylerine olduğu gibi plastik seramik gibi diğer malzemelerin yüzeylerine de uygulanabilir ve kaplama malzemesi olarak sadece saf metaller değil muhtelif alaşımlar da kullanılabilir. Bu yöntemin sorunları olarak düşük imalat hızı ve kaplama içinde kalan gayri safiyet atomları sayılabilir.

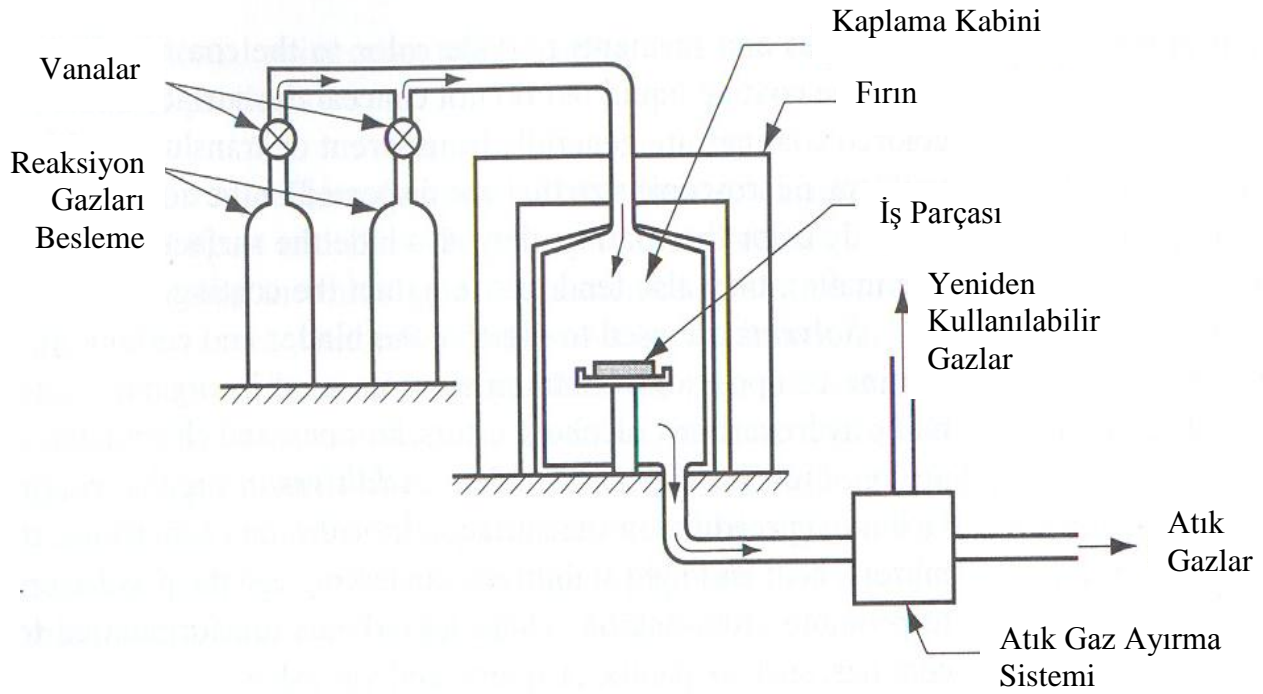
3. İyon Kaplama

İyon kaplama sıçratma ve buharlaştırma yöntemlerinin bir kombinasyonudur. Önce vakum uygulanır. Daha sonra elektrik enerjisi verilerek Ar plazması oluşturulur. Bu kaplanacak parçanın yüzeyini bombardıman ederek çok temiz bir hal almasını sağlar. Bundan sonra kaplama malzemesi ısıtılarak buharlaştırılır ve atomları parça üzerine yoğunlaştırılır.

Bu işlem sırasında plazma atomların yüzeye daha iyi tutunmasına katkıda bulunur ve daha homojen ve yüzeye daha sıkı bağlanmış bir kaplama tabakasının oluşturulması sağlanır. Ayrıca delik içlerinin kaplanabilmesi, yüksek işlem hızı ve kalın filmlerin oluşturulabilmesi yöntemin diğer avantajları olarak sayılabilir. En önemli kullanım örneklerinden birisi de yüksek hız çeliklerinden imal edilen matkap uçlarının TiN ile kaplanmasıdır.

D. KİMYASAL BUHAR BİRİKTİRME YÖNTEMİ (CVD)

Bu yöntem birden fazla gazın reaksiyona girerek kaplama malzemesine ait buharın kimyasal olarak oluşturulması ve bunun yüzeyi kaplanacak parça üzerine biriktirilmesi şeklinde uygulanmaktadır. Reaksiyon kapalı bir kabın içinde gerçekleşmekte ve reaksiyon ürünü olan metal veya bileşik kaplanacak parça üzerinde çekerdekenip büyüyerek kaplama tabakasını oluşturmaktadır. Genellikle CVD işleminde reaksiyon için ısı enerjisinin yanı sıra mor ötesi ışınları veya plazma gibi başka enerji kaynaklarından da yararlanılmaktadır.



Aşınma, korozyon ve erozyona karşı dayanımın artırılmasının istendiği uygulamalarda kullanılmaktadır.

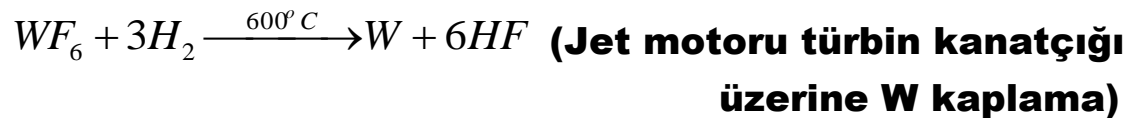
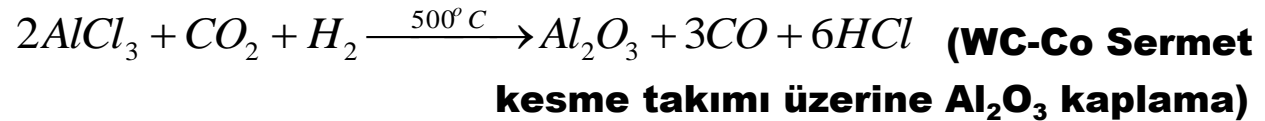
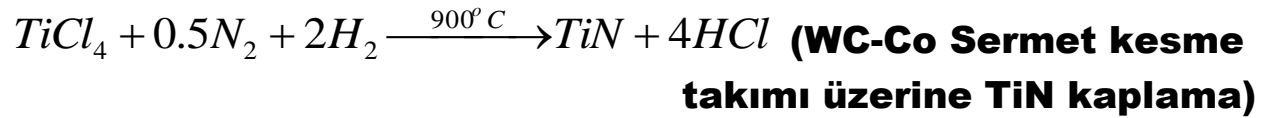
İşlemin avantajları arasında;

- 1. Düşük sıcaklıklarda işlemin gerçekleştirilmesinden dolayı özellikle sıcaklığa dayanıklı refrakter metal kaplamalarına elverişli olması,**
- 2. Tane boyutunun kontrol edilebilmesi,**
- 3. Atmosferik basınçlarda uygulanması,**
- 4. Kaplama tabakası ile ana malzeme arasında çok iyi bağ oluşturması sayılabilir.**

İşlemden karşılaşılan sorunlar olarak ise;

- 1. Donanımın korozyon ve zehirli gaz ortamında çalışmasından dolayı özel takımlar gerektirmesi,**
- 2. Reaksiyon sırasında kullanılan bazı bileşiklerin çok pahalı olması,**
- 3. İşlem hızının yavaş olması sayılabilir.**

CVD işlemlerinde kullanılan reaksiyonlara ait bazı örnekler şunlardır:



E. ORGANİK KAPLAMALAR (BOYALAR)

Organik kaplamalar polimer reçinelerdir. Doğal ve sentetik olarak üretilirler. Sıvı halde yüzeye uygulanır ve parça yüzeyinde katılaşarak tabaka oluştururlar. Günlük kullanımda “sentetik boya” olarak isimlendirilirler. Uygulama kolaylığı, ucuzluğu ve yüzeyde kolayca desenlendirilmeleri en önemli avantajlarıdır. Boyalar aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır:

1. **Bağlayıcılar:** Boyaların katı haldeki özelliklerini sağlayan polimer reçinelerdir. Boya içinde yer alan diğer bileşenleri bir arada tutar. Bağlayıcılara örnek olarak doğal yağlar, polyester, poliüretan, epoksi, akrilik ve selüloz verilebilir.
2. **Renklendiriciler:** Boyaya renk verir. Şeffaf (dye) ve parçacık (pigment) olanları vardır. Şeffaf olanlar vernik türü boyalardır. Pigmentli boyalar ise parçacık takviye içerdiği için daha dayanıklıdır.
3. **Çözücüler:** Polimer reçineyi çözerek sıvı hale getirir ve akışkanlık sağlar. Aromatik hidrokarbonlar (tiner), alkol, ester veya keton çözücülere örneklerdendir.
4. **Katkılar:** Boyanın katılaşma sonrası özelliklerini düzenlemek amacıyla katılır. Örneğin mantar ve yosun barındırmayan boyaların yapımında buna uygun katkı maddeleri kullanılmaktadır.

Değişik boyama tekniklerinden yararlanılmaktadır:

- a. Fırça ve Rulo
- b. Püskürtme
- c. Daldırma

Her uygulamada boyama verimi farklıdır. Genelde püskürtme ve daldırmada verim % 30'lara kadar düşmektedir. Verim

arttırmak için kullanılan yöntemlerden birisi de “Elektrostatik Boyama” dır. Bu yöntemde boya püskürtme öncesi iş parçası elektriksel olarak topraklanmaktadır. Püskürtme sırasında damlacıklar elektrostatik olarak yüklenmekte ve iş parçası üzerinde toplanmaktadır. Böylece boyama verimini %30'lardan % 90'lara çıkarmak mümkün olmaktadır.

Önemli boya uygulamalarından birisi de otomobil karoserinin boyanmasıdır. Tipik uygulamada önce yüzey temizlenmekte, daldırılarak fosfat kaplanmakta, püskürtme ile boya tatbik edilmekte ve son olarak parlaklık ve dayanım sağlayan son kat boya püskürtülmektedir. Bu şekilde yapılan boya sonrası otomotiv şirketleri 7 yıla kadar boya garantisi verir hale gelmişlerdir.

Boyanın dayanımı polimer reçinenin fırınlanması ve bunun sonucunda yapıda çapraz bağların oluşmasıyla sağlanır.

Organik kaplamanın bir diğer türü de “Toz Kaplama” dır. Burada iş parçası sıcak toz halindeki boya soğuktur. Yüzeyde ısınınca akışkan hale geçip parça yüzeyi kaplanmaktadır.

F. EMAYE KAPLAMA

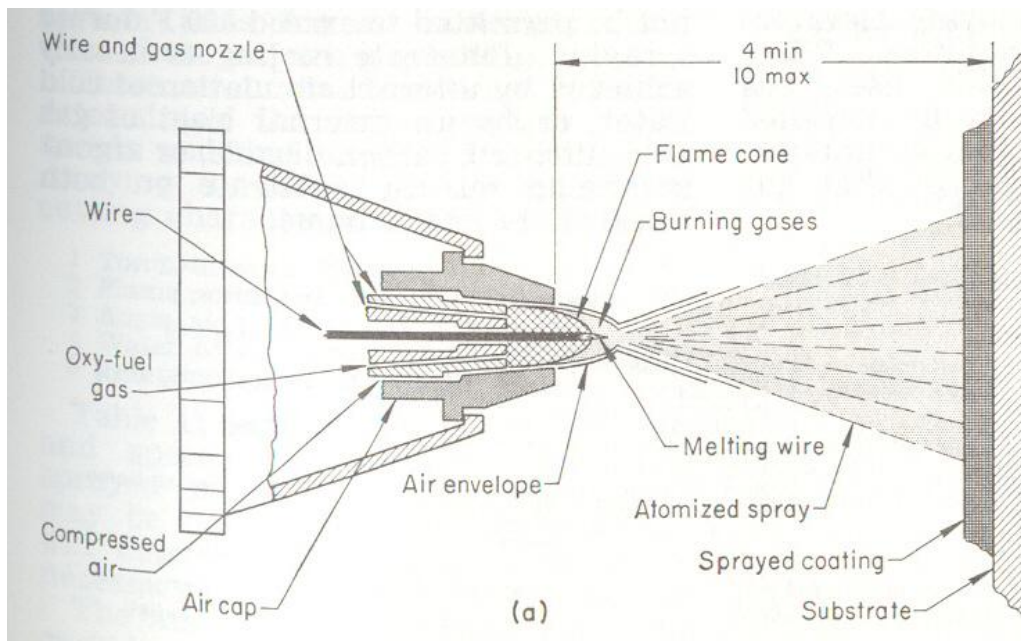
Kaolin, Feldspat ve Kuartz'dan oluşan bileşikler seramik kaplama amacıyla kullanılmaktadır. Bu seramik bileşiklerin kullanıldığı yüzey kaplama teknolojisi emaye kaplama olarak tanınmaktadır. Metallerin yüzeyleri (beyaz eşyalar, mutfak banyo gereçleri gibi) olduğu gibi kristal seramik yüzeylerinin (yer karoları) kaplanmasında da kullanılmaktadır. Yöntemin uygulanması şu aşamaları içerir:

1. Kaplama malzemesinin hazırlanması (firit yapma: cam seramiğin ince parçacıklar halinde öğütülmüş hali),
2. Yüzeğe uygulama (firit su ile karıştırılıp yüzeğe kolayca uygulanabilir, slip adını alır),
3. Gerekirse kurutma (suyunu alma) ve
4. Pişirme (firit malzemenin eriyerek vitray seramik haline gelmesini sağlayan sinterleme işlemi).

Kaplama işleminde kullanılan sıcaklıklar 800°C mertebesinde olup kaplama kalınlıkları 0,1 mm ile 2 mm arasında değişebilmektedir. Kalın kaplamalar için işlemin birkaç defa tekrar edilmesi gerekebilir.

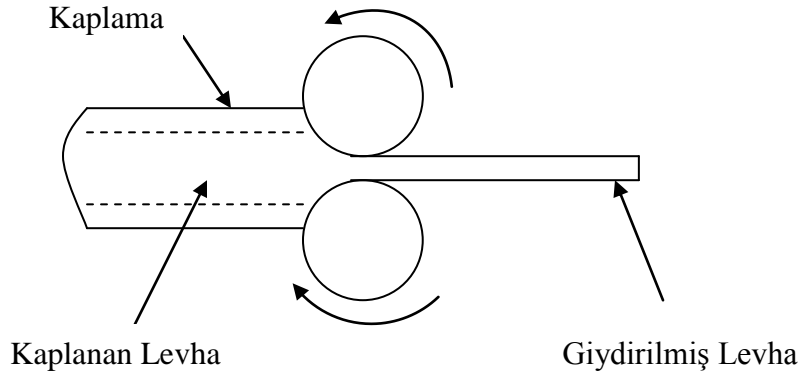
G. ISIL KAPLAMA YÖNTEMLERİ

Isıl enerjiden yararlanarak yapılır. Isıl Püskürtme işleminde ergimiş veya yarı ergimiş malzeme parça üzerine basınçla püskürtülmekte ve orada katılarak kaplamayı gerçekleştirmesi sağlanmaktadır. Bu işlem metal püskürtme tabancaları yardımıyla metal yüzeylere uygulandığında “Metal Püskürtme” adını almaktadır.



H. MEKANİK KAPLAMA YÖNTEMLERİ

Levha şeklindeki metallerin yüzeylerini mekanik enerjiyle yüksek basınç yardımıyla gene bir başka metalle kaplamaktır. Bu teknolojiye “Giydirme” (Cladding) olarak bilinmektedir.



Yukarıda haddeleyerek giydirme yöntemi şematik olarak gösterilmektedir. Bu yöntemle örneğin yaşlandırma ile sertleştirilebilir Al alaşımlarının yüzeyleri saf alüminyumla kaplanarak gerilmeli korozyon veya korozyondan etkilenmeleri önlenir. Örneğin AA 7075 alaşımından bir levhanın her iki yüzü saf Al ile giydirilir ve yapay yaşlandırma işlemi uygulanırsa “AlClad 7075-T6” malzemesi elde edilir. Bu malzeme uçak kanatlarında kullanılmakta olup hem dayanım hem korozyon dayanımını birlikte sağlar.

Bu yönteme ait diğer bir uygulama da ekstrüzyon işlemiyle bir telin veya çubuğun diğer bir metalle yüzeyinin kaplanmasıdır. Örneğin yüksek gerilim hatlarında kullanılan iletken tellerin hem dayanım hem iletkenliğinin aynı anda sağlanması çekirdek konumunda çelik tel, yüzey kaplaması olarak saf alüminyumun kullanılmasıyla mümkün olmaktadır.