



SAE MÜHENDİSLİK
ENGINEERING & CONSULTING

TEKNİK YAYINLAR • No. 5

Yarı Katı Şekillendirme

Tiksotropi ve globular mikroyapı, tiksodöküm–reodöküm–thixomolding rotaları, proses penceresi, hata analizi ve kalite kontrol

Hazırlayan: Ahmet Asım ESER — SAE Mühendislik ve Danışmanlık Hizmetleri

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

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

1. Giriş: Döküm ile Dövme Arasında Bir Köprü

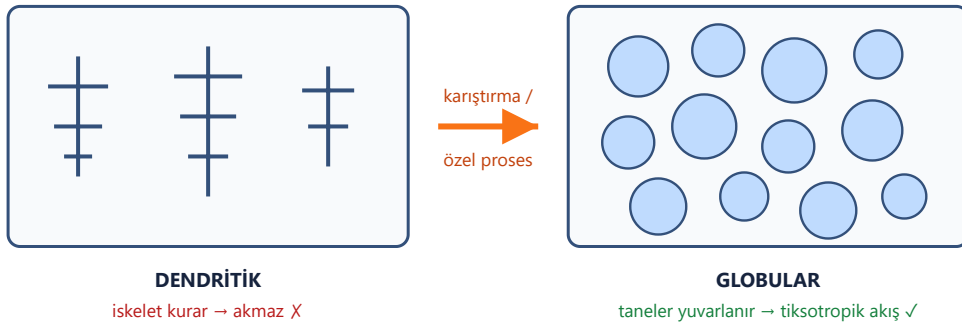
Yüksek basınçlı döküm (HPDC) hızlı ve ucuzdur ama türbülanslı dolumun getirdiği gaz porozitesi nedeniyle klasik HPDC parçaya ısıtma işlemi ve kaynak uygulanamaz. Dövme mükemmel iç yapı verir ama karmaşık ince cidarlı geometrilerde ve maliyette sınırlanır. **Yarı katı şekillendirme (semi-solid metal processing, SSM)**; metali ne tam sıvı ne tam katı hâlde, **%30–60 katı oranındaki bir "çamur" (slurry)** olarak şekillendirerek bu iki dünyanın arasındaki boşluğu doldurur.

Yöntemin kökeni, 1970'lerde MIT'de Flemings ve öğrencilerinin katılaştan alaşımları kararken yapılan reoloji deneylerine dayanır: sürekli karıştırılan yarı katı alaşımın dendritik değil **küresel (globular)** katı taneler içerdiği ve şaşırtıcı biçimde akıcı kaldığı görülmüştür.

2. Bilimsel Temel: Tikotropi ve Globular Yapı

Yarı katı aralıktaki bir alaşımın davranışını iki şey belirler: **katı oranı (f_s)** ve **katı fazın morfolojisi**.

- **Dendritik yapı:** Dallı kristaller ~%20 katı oranında bile iskelet kurar; malzeme kaşıkla kesilen değil, kürekle kırılan bir lapaya döner. Şekillendirilemez.
- **Globular yapı:** Küresel taneler birbirinin üzerinden yuvarlanabilir; %50 katı oranında bile malzeme **tikotropik** davranır — durağanken kendini taşıyan bir "katı" gibi (dilimlenebilir!), kayma altında viskozitesi düşerek akar.



Şekil 1. Aynı katı oranında dendritik ve globular yarı katı yapının davranış farkı (şematik — SAE Mühendislik çizimi).

Turnusol testi: İyi hazırlanmış bir yarı katı biyet, bıçakla peynir gibi dilimlenebilir. Dilimlenemeyen (sert iskeletli) veya kendini taşıyamayan (aşırı sıvı) biyet, proses penceresinin dışındadır.

3. Proses Rotaları

3.1 Tiksodöküm (thixocasting) — "önce biyet, sonra yeniden ısıt"

İki aşamalıdır: (1) Döküm tesisinde **elektromanyetik karıştırma (MHD)** ile globular yapıya özel biyet üretilir. (2) Şekillendirme tesisinde biyet dilimi, **indüksiyonla yarı katı aralığa** (A356 için ~577–585 °C, $f_s \approx 0,5$) hassasça ısıtılır ve gerçek zamanlı kontrollü preste kalıba enjekte edilir. Kararlı ve tekrarlanabilir; dezavantajı özel biyet maliyeti ve hurdanın rotaya geri dönememesidir.

3.2 Reodöküm (rheocasting) — "sıvıdan doğrudan çamur"

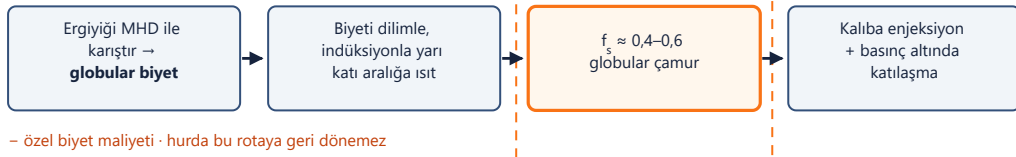
Slurry, şekillendirme hücresinde doğrudan sıvıdan üretilir: düşük kızdırma sıcaklığında dökülen ergiyik, kontrollü soğutma + çekirdeklenme yönetimiyle globular çamura dönüştürülür ve hemen enjekte edilir. Ticari varyantlar: **NRC** (New Rheocasting), **SEED**, **GISS** (gaz kabarcıklı), **SSR** (döner soğutucu çubuk). Standart külçe kullanabilmesi ve hurda dostu olması nedeniyle günümüzde ağırlık reodökümdedir.

3.3 Thixomolding — magnezyumun yolu

Plastik enjeksiyonun metalik ikizi: Mg alaşımı granüller (AZ91D), ısıtılmış vidalı kovanda kısmen ergitilir; vidanın kayma etkisi globular yapıyı üretir ve makine doğrudan kalıba enjekte eder. Ergiyik Mg tutma fırını gerektirmediği için güvenlidir; ince cidarlı elektronik gövdelerinin standardıdır.

Rota	Hammadde	Güçlü yönü	Sınırlaması
Tiksodöküm	MHD karıştırmalı özel biyet	En kararlı pencere, tekrarlanabilirlik	Biyet maliyeti, hurda dönüşü yok
Reodöküm	Standart külçe/hurda	Düşük malzeme maliyeti, esneklik	Slurry üretimi hücre içinde yönetilmeli
Thixomolding	Mg granül	Güvenlik, ince cidar, entegrasyon	Pratikte Mg ile sınırlı

TİKSODÖKÜM — önce biyet, sonra yeniden ısıtma



REODÖKÜM — sıvıdan doğrudan çamur



ortak hedef: dendritik değil GLOBULAR yapı

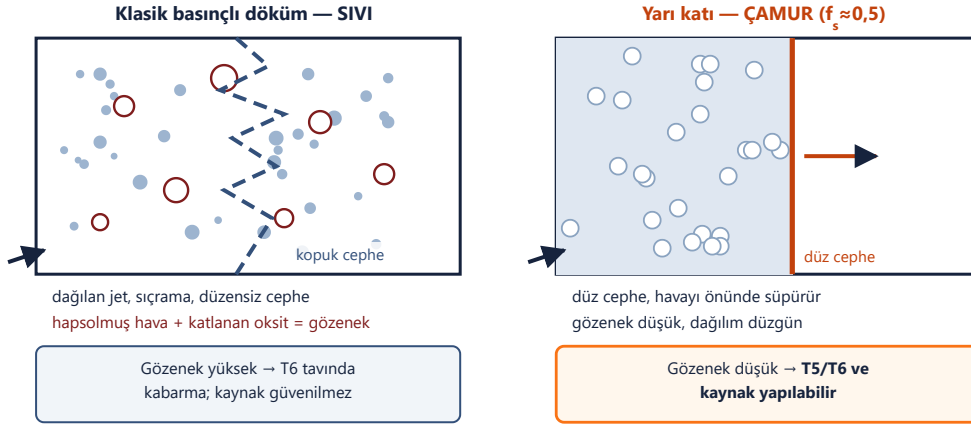
iki rota yalnız çamuru nasıl ürettiğinde ayrılır

Şekil 2. İki ana rotanın karşılaştırması. Tiksodökümde globular yapı **döküm tesisinde** üretilip biyete kaydedilir ve şekillendirmede yeniden ısıtma ile geri çağrılır; reodökümde aynı yapı **şekillendirme hücresinde sıvıdan** üretilir. Enjeksiyon adımı ikisinde de aynıdır — fark, çamurun nerede ve hangi maliyetle hazırlandığıdır. (şematik — SAE Mühendislik çizimi.)

4. Neden Yarı Katı? Avantajlar

- **Laminer dolum:** Yüksek viskoziteli çamur kalıbı türbülanssız doldurur → hava hapsi ve oksit katlanması dramatik azalır.
- **Düşük porozite:** Parça ısıtma işlemlenebilir (T5/T6) ve kaynak edilebilir hâle gelir — klasik HPDC'nin aşamadığı eşik.
- **Düşük büzülme:** Metalin bir kısmı zaten katı girdiği için çekinti ve çarpılma azalır; dar toleranslar, ince işleme payları.
- **Kalıp dostu:** Sıvıya göre ~50–100 °C düşük sıcaklık, kalıp termal yorulma ömrünü belirgin uzatır.

- **Mekanik özellikler:** A356-T6 yarı katı parça; süneklik ve yorulmada kokil dökümü geçer, dövmeğe yaklaşır.



Şekil 3. Yarı katı şekillendirmenin asıl kazancı hızda değil **dolum rejimindedir**. Düşük viskoziteli sıvı kalıba türbülansla girer; hapsolan hava ve katlanan yüzey oksidi gözenek bırakır — bu gözenek ısı işlem sıcaklığında genişip yüzeyde kabarma yaptığı için klasik basınçlı döküm parçası çoğu zaman T6 alamaz. Yüksek viskoziteli çamur ise düz bir cephe hâlinde ilerler ve havayı önünde süpürür. (şematik — SAE Mühendislik çizimi.)

Sınırlamalar

- Dar proses penceresi: birkaç °C'lik sapma katı oranını hızla değiştirir; hassas sıcaklık kontrolü şarttır.
- Alaşım seçimi: geniş katılaşma aralıklı, ötektikçe zengin alaşımlar ister (A356/A357 ideal); dar aralıklı alaşımlar zordur.
- Ekipman ve bilgi birikimi eşiği; parça başı maliyet klasik HPDC'den yüksektir — kazanç, ısıtma/ısıtma/kaynak gerektiren nitelikli parçalarda döner.

5. Alaşımlar

- **A356 / A357 (AlSi7Mg):** Endüstrinin standardı; geniş yarı katı pencere, T6 ile 300+ MPa dayanım ve yüksek uzama.
- **319, 355 tipi Al-Si-Cu:** Daha yüksek dayanım/sıcaklık ihtiyacında; sıcak yırtılma ve pencere yönetimi daha dikkatli ister.
- **AZ91D (Mg):** Thixomolding'in ana alaşımı.
- **Ar-Ge cephesi:** Yarı katı yüksek dayanımlı 2xxx/7xxx denemeleri, bakır alaşımları ve kompozit (SiC takviyeli) çamurlar literatürde aktiftir.

6. Hatalar: Tanı ve Önleme

Hata	Tipik görünüm	Kök neden	Başlıca önlemler
Sıvı segregasyonu	İnce kesit/yüzeyde ötektikçe zengin bölgeler; sertlik dalgalanması	Katı-sıvı ayrışması: aşırı basınç, yanlış f_s , uzun akış yolu	Katı oranı ve enjeksiyon profili optimizasyonu, yolluk konumu
Akış izleri / soğuk birleşme	Yüzeyde birleşme çizgileri	Düşük kalıp sıcaklığı, kesintili akış cephesi	Kalıp ısıtma (200–250 °C), dolum profili
Kalıntı porozite	X-ray'de dağınık boşluklar	Pencere dışı çalışma, kirli ergiyik, hatalı vakum	Sıcaklık disiplini, ergiyik temizliği, vakum bakımı
İri/dendritik yapı adaları	Mikroyapıda dallı bölgeler	Slurry hazırlığında yetersiz çekirdeklenme/karıştırma	Proses parametreleri, biyet kalite kontrolü
Yapışma (die soldering)	Kalıpta Al birikintisi, yüzey yolunması	Yerel sıcak nokta, kaplama aşınması	Kalıp termal dengesi, yüzey kaplama, yağlama

7. Kalite Kontrol

- Mikroyapı metrikleri:** Ortalama globül boyutu (hedef tipik <100 μm) ve **şekil faktörü/küresellik**; sıvı segregasyon haritası (kesit sertlik taraması ile).
- İç kalite:** X-ray/BT; yoğunluk ölçümü (Arşimet) — HPDC referansına karşı belirgin iyileşme doğrulanmalı.
- Mekanik:** Parçadan çıkarılan numunelerle çekme (T6 sonrası uzama, yarı katının imza göstergesidir), sertlik ve yorulma.
- Proses izleme:** Biyet/slurry sıcaklık profili, enjeksiyon hız-basınç eğrileri parça başına kayıt altına alınmalıdır.

8. Uygulamalar ve Güncel Durum

Tipik parçalar: fren ana silindiri gövdeleri, ABS blokları, yakıt sistemi rayları, motor braketleri, alaşımlı jantlar, basınç tutan hidrolik gövdeler ve ince cidarlı Mg elektronik muhafazaları. Elektrikli araçlarda sızdırmazlık + ısıtma işlemi gerektiren soğutma plakaları ve yapısal braketler yarı katıya yeni alan açmaktadır. **Vakum destekli yapısal HPDC ve gigacasting** ile rekabette yarı katının kozu; en yüksek iç kalite, kaynaklanabilirlik ve dar toleranstır — seçim, parçanın nitelik gereksinimine göre yapılır.

9. Yararlanılan Temel Kaynaklar

- Flemings, M.C., "Behavior of Metal Alloys in the Semisolid State", *Metallurgical Transactions A*, 22A, 1991, 957–981.
- Kirkwood, D.H., Suéry, M., Kapranos, P., Atkinson, H.V., Young, K.P., *Semi-solid Processing of Alloys*, Springer, 2010.
- Atkinson, H.V., "Modelling the Semisolid Processing of Metallic Alloys", *Progress in Materials Science*, 50, 2005, 341–412.
- ASM International, *ASM Handbook Vol. 15: Casting* (Semisolid bölümleri), 2008.
- Campbell, J., *Complete Casting Handbook*, 2. baskı, Elsevier, 2015.