

Ultra yüksek mukavemetli çelik sacların zımba ile delme işleminin takım ömrü için Taguchi yöntemi kullanılarak optimizasyonu

Optimization of punching process of ultra high strength steel sheets for tool life using Taguchi method

Onur ÇOBAN^{*1} , Kerim Mert ÇELİK² , Murat BAYRAKTAR² , Rahman EHVAN² 
İlker KUZUCU² 

¹Kocaeli Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Kocaeli, Türkiye

²Formiva A.Ş., Kocaeli, Türkiye

• Geliş tarihi / Received: 31.12.2024

• Kabul tarihi / Accepted: 14.07.2025

Öz

Ultra yüksek mukavemetli sacların zımba ile delinmesinde takım ömrünün artırılması ve bu sayede bakım maliyetlerinin düşürülmesi otomotiv sektörü için çok kritiktir. Bu çalışmada zımba ömrünü etkileyen zımba hammaddesi (Vanadis 4E ve Caldie ESR), zımba kaplaması (kaplamasız, AlCrN, TiAlCN), zımba uç yuvarlatma yarıçapı (0.1, 0.3 ve 0.5 mm) ve kesme boşluğu (sac kalınlığının %15, %22 ve %30'u) parametrelerinin maksimum zımba ömrü için istatistiksel olarak Taguchi metodu ve ANOVA analizleriyle optimizasyonu ve bu sayede kazanılacak bakım maliyeti hesaplaması yapılmıştır. Taguchi metodu sonuçları en yüksek zımba ömrü için hammadde olarak Caldie ESR, kaplama türü olarak TiAlCN, uç yuvarlatma yarıçapı olarak 0.3 mm ve kesme boşluğu olarak da sacın %15'inin seçilmesi gerektiğini göstermiştir. ANOVA analizleri sonucunda ise %61.71'lik katkı oranı ile kaplama türü ve ardından %24.12'lük katkı oranı ile kesme boşluğu en etkin faktörler olarak belirlenmiştir. Yapılan istatistiksel optimizasyon sayesinde zımba ömrü 2538 işlemde 22080 işleme yükseltilirken 100000 delme işlemi için bakım maliyetlerinde yaklaşık 465819 TL'lik kazanç elde edilmiştir. Ultra yüksek mukavemetli sacların zımba ile delinmesinde zımba ömrü iyileştirmesi ve dolaylı olarak bakım maliyetlerinin minimize edilmesi için istatistiksel proses optimizasyonunun gerekliliği başarıyla ortaya konmuştur.

Anahtar kelimeler: Maliyet, Taguchi, Takım ömrü, Ultra yüksek mukavemetli sac, Zımba ile delme

Abstract

Increasing tool life and thus reducing maintenance costs in hole punching of ultra-high strength sheet metal is critical for the automotive industry. In this study, the punch raw material (Vanadis 4E and Caldie ESR), punch coating (uncoated, AlCrN, TiAlCN), punch tip radius (0.1, 0.3 and 0.5 mm) and clearance (15%, 22% and 30% of the sheet thickness) parameters affecting the punch life were statistically optimised by Taguchi method and ANOVA analyses for maximum punch life and maintenance cost calculation. Taguchi method results showed that Caldie ESR should be selected as the raw material, TiAlCN as the coating type, 0.3 mm as the tip rounding radius and 15% of the sheet as the cutting gap for the highest punch life. As a result of ANOVA analyses, coating type with a contribution rate of 61.71% and then cutting gap with a contribution rate of 24.12% were determined as the most effective factors. Thanks to the statistical optimisation, the punch life has been increased from 2538 to 22080 operations, while a gain of approximately 465819 TL in maintenance costs for 100000 punching operations has been achieved. The necessity of statistical process optimisation for punch life improvement and indirectly minimising maintenance costs in hole punching of ultra-high strength sheets has been successfully demonstrated.

Keywords: Cost, Taguchi, Tool life, Ultra high strength steel, Hole punching

1. Giriş

1. Introduction

Malzeme ve üretim teknolojilerinin kullanıldığı hafif tasarımların gelişimi otomotiv endüstrisinde arzu edilen güvenlik ve sürdürülebilirlik standartlarının güncellenmesini teşvik etmektedir (Chongthairungruang vd., 2013; Pu & Gao, 2015). Özellikle araç ağırlığını azaltarak enerji verimliliğini artırma gereksinimi, ileri yüksek

*Onur ÇOBAN; onur.coban@kocaeli.edu.tr

mukavemetli çeliklerin (advanced high strength steel-AHSS) ve ultra yüksek mukavemetli çeliklerin (ultra high strength steel-UHSS) kullanımını hızla yaygınlaştırmıştır (Abe vd., 2020; Eryılmaz & Gürün, 2021; Drexler vd., 2021; Yılmaz & Hoecke, 2023). Bu tür çelikler sahip oldukları yüksek mukavemet (800-1350 MPa aralığında akma dayanımı) sayesinde çarpışma güvenliğini artırmakla kalmaz aynı zamanda CO₂ emisyonlarını düşürerek çevresel etkileri de en aza indirir (Drexler vd., 2021). Bununla birlikte, sahip oldukları yüksek dayanım bu çeliklerin delinmesi, kesilmesi ve şekillendirilmesi işlemlerinde geleneksel düşük mukavemetli çeliklere göre önemli zorluklar yaratır (Abe vd., 2014; Li vd., 2020; Lara vd., 2022). Özellikle delme işlemlerinde yüksek kesme kuvvetlerine olan ihtiyaç, aşınma ve kırılmalara bağlı olarak takım ömrünün azalmasını hızlandırır ve kesilen kenar kalitesini olumsuz etkiler (Mori vd., 2012; Mori vd., 2020). Takım ömrü delme işlemi sırasında kullanılan işlem parametreleri (kesme açısı, zımba şekli, kesme boşluğu vb.) ile önemli ölçüde uzatılabilir. AISI D3 takım çeliğinden yapılmış delme takımını kriyojenik ısıtma işlemleri ile modifiye edilip performansını, korozyon direncini ve ömrünü artırmak da mümkündür (Arslan vd., 2015; Uygur vd., 2015)

Literatür araştırması sonucu özellikle AHSS çelikleri için delme işlemi parametrelerinin daha çok takım aşınma mekanizmaları ve kesme yüzeyi kalitesi üzerine etkilerinin incelendiği belirlenmiştir. Farklı sıcaklıklar altında kesme işlemi uygulamaları üzerine yapılan bir çalışmada (Mori vd., 2008) AHSS çeliklerinde kesme kuvvetinin azaltılarak kesme kenar kalitesinin artırılabilirliği belirlenmiştir. AHSS tipi DP1180, DP980 ve DP590 sac malzemeleri için düz, konik ve çatı zımba şekilleri ile üç farklı kesme boşluğunun delik çapı sapmaları üzerindeki etkilerini inceleyen bir başka yayının deneysel sonuçlarına göre zımba profillerindeki farklı çap genişleme türlerinin ve boyutsal uyumsuzlukların yüksek dayanımlı malzemelerde ve yüksek kesme boşluklarında daha önemli olduğu belirtilmiştir (Pu vd., 2018). Kesme boşluğunun AHSS sac malzemelerde delik kesme yüzeyi kalitesi ve takım aşınması üzerindeki etkilerini inceleyen başka çalışmalar da mevcuttur (Rafsanjani vd., 2009; Mucha, 2010; Soares vd., 2013; Achouri vd., 2014). Kesme boşluğunun düşük oranlarındaki kesme işlemi için takım aşınması mekanizmaları üzerine yapılan çalışma da mevcuttur (Shivpuri vd., 2011). Farklı bir parametre olarak takım kesme açısının AHSS sac malzeme delme işleminde kuvvet düşürücü etkisini belirten çalışmalar vardır (Mackensen vd., 2010; Shih vd., 2017). AHSS'nin delinmesinde kullanılan zımba açısının artırılmasıyla gerekli kesme kuvvetinin önemli ölçüde düşürüldüğü de tespit edilmiştir (Pu vd., 2018). Özellikle ultra yüksek mukavemetli çelik sacların delinmesinde gerekecek yüksek kesme kuvvetlerinin sebep olacağı takım aşınması ve kırılmaları sonucu takım ömrünün kışalmasına karşı takım kaplamaları üzerine yapılmış çalışmalar mevcuttur (Eriksson & Olsson, 2011). 1150 HV vikers sertliğine sahip tungsten karbür zımbanın yüzeyini 2 µm kalınlığında TiN (2200 HV) ve TiAlN (3500 HV) ile kaplayarak ve ucuna küçük köşe yuvarlatması yaparak ultra yüksek mukavemetli sacların delinmesinde takım uç aşınması ve kırılmasını önlemeye çalışan Mori vd. (2013), kırılma ömründe artış elde ettiklerini belirtmişlerdir. Zımba uç yuvarlatması sayesinde uç bölgede gerilme yoğunluğunun azaltılması sonucu takım aşınmasında ve kırılmasında önemli iyileştirmeler olacağı belirtilmektedir (Shih vd., 2017). Benzer bir çalışmada hem kesme boşluğu hem de kesme açısının AHSS sac malzeme delinmesinde gerekli olan kuvveti önemli oranda azalttığı belirtilmiştir (Mackensen vd., 2010). Takım ömründe kısalma ve kesme yüzey kalitesinde bozulma sonucu bir diğer çözüm önerisi de takımını bilemek veya değiştirmektir (Lee & Park, 2018). Ancak bu durumda da seri imalat içinde uzun süreli duruşlara neden olacağından hem takım hem de zaman ve işçiliğe bağlı ciddi maliyet artışı olacağı açıktır.

Literatür araştırmaları sonucunda AHSS ve UHSS sac malzemelerinin delinmesinde takım aşınması, kesme yüzey kalitesi ve takım ömrü çalışmalarında düşük adetli delme işlemleriyle inceleme yapıldığı belirlenmiştir. Ancak tüm proses parametrelerinin birlikte istatistiksel olarak ele alınıp takımın tamamen hasarlandığı gerçek ömrünü ve gerçek bakım maliyetlerini optimize eden çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle, literatür incelemesinde ortaya çıkan zımba hammaddesi, kaplama türü, zımba uç yuvarlatma yarıçapı ve kesme boşluğu parametrelerinin UHSS sacların delinmesinde hem takım ömrünü maksimize edecek hem de maliyetleri minimize edecek istatistiksel proses optimizasyonuna ihtiyaç olduğu belirlenmiştir.

Başarı oranı çok yüksek olarak bilinen Taguchi deney tasarımı metodu, tasarımı veya prosesi optimize etmek, ürün kalitesini artırmak ve maliyetleri düşürmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Mehat & Kamaruddin, 2012; Yıldırım vd., 2017; Radhvan vd., 2019; Hentati vd., 2020; Alpay vd., 2023; Dündar vd., 2025). Taguchi metodu kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmaları içeren bu çalışmada, UHSS saclarda zımba ile delme işlemi için optimum proses koşulları belirlenerek, takım ömründe önemli ölçüde artış elde edilirken bakım maliyetinde ciddi düşüş sağlanmış ve rapor edilmiştir.

2. Materyal ve metot

2. Material and method

Bu çalışmada, ultra yüksek mukavemetli çelik (ultra high strength steel-UHSS) malzemelerin delinmesinde kullanılan zımbaların kırılma ömürleri incelenmiştir. Deneylerde Docol 1500M (Docol The Automotive Steel ®) martenzitik çelik saclar kullanılmıştır. Bu sac malzemenin mekanik özellikleri Tablo 1’de, kimyasal özellikleri ise Tablo 2’de gösterilmiştir. Kalınlığı 1.6 mm olan UHSS sac malzemenin delme işlemi için 330 ton kapasiteli pres kullanılmıştır. Her bir delme işlemi için uygulanan kuvvet 69500 N olup delme süresi 2 saniye olarak ayarlanmıştır. Deneylerde kullanılan zımbalar Şekil 1’de gösterilen proses tasarım görselindeki elips içinde görüldüğü gibi silindirik tip olup, boyu 100 mm ve çapı da 10 mm’dir. Delme işleminde zımba ömrünü etkileyen birinci faktör olarak zımba malzemesi seviyeleri için “Vanadis 4 Extra Super Clean” (Vanadis 4E olarak anılacaktır) ve “Caldie ESR” çelik türleri tercih edilmiş ve Uddeholm® firmasından temin edilmiştir. Her iki hammaddeye ait kimyasal içerikler ve fiziksel özellikler sırasıyla Tablo 3 ve Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 1. Sac malzemenin mekanik özellikleri

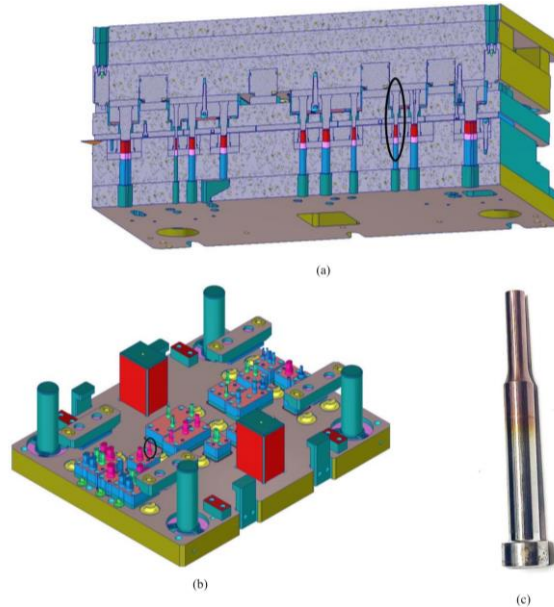
Table 1. Mechanical properties of sheet material

Sac Malzeme	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Kalınlık (mm)
Docol 1500M	1500-1750	1220-1520	3	1.6

Tablo 2. Sac malzemenin kimyasal içeriği

Table 2. Chemical content of sheet material

C (maks %)	Mn (maks %)	Si (maks %)	Cr+Mo (maks %)	Cu (maks %)	Nb+Ti (maks %)	S (maks %)	P (maks %)	Al (min %)	B (maks %)
0.28	2.00	1.00	1.00	0.20	0.15	0.025	0.020	0.010	0.010



Şekil 1. Zımba ile delme kalıp tasarımı (a), seçilen zımbanın kalıp tasarımındaki pozisyonu (b), zımba örneği
Figure 1. Punching mould design (a), position of the selected punch in the mould design (b), punch example

Tablo 3. Caldie ESR ve Vanadis 4E hammaddelerinin kimyasal içerikleri

Table 3. Chemical contents of Caldie ESR and Vanadis 4E raw materials

Hammadde	%C	%Cr	%Mo	%V	%Mn	%Si
Caldie ESR	0.7	5.0	2.3	0.5	0.5	0.2
Vanadis 4E	1.4	4.7	3.5	3.7	0.4	0.4

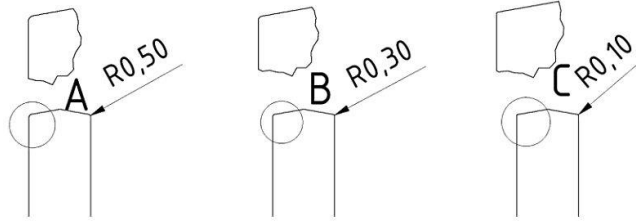
Tablo 4. Caldie ESR ve Vanadis 4E hammaddelerinin fiziksel özellikleri
Table 4. Physical properties of Caldie ESR and Vanadis 4E raw materials

Hammadde	Yoğunluk (kg/m ³)	Elastik modül (MPa)	Isı iletkenlik katsayısı (W/m°C)
Caldie ESR	7820	213000	24
Vanadis 4E	7700	206000	30

Farklı kaplama türlerinin zımba ömrüne etkisini gözlemlemek için ikinci faktörün seviyeleri olarak zımbalar kaplamasız, AlCrN kaplamalı ve TiAlCN kaplamalı olarak hazırlanmıştır. Kaplamaların özellikleri Tablo 5’te verilmiştir. Üçüncü faktör olarak zımba uç köşe yuvarlatma yarıçapı seviyeleri Şekil 2’de gösterildiği gibi 0.1, 0.3 ve 0.5 olarak seçilmiştir. Dördüncü faktör olan kesme boşluğunun seviyeleri, delinecek sac kalınlığının %15, %22 ve %30’una denk gelen ölçülerde hazırlanmış mührelerin (matrisler) Şekil 1’deki elips içinde zımba karşısına denk gelen kırmızı renkli yere sırasıyla takılması ile ayarlanmıştır. Docol 1500 M sac malzemenin zımba ile delinmesinde takım ömrünün hammadde türü, kaplama türü, uç yuvarlatma yarıçapı ve kesme boşluğuna göre optimizasyonu için deneysel tasarım olarak Taguchi metodu kullanılmıştır. Literatür araştırmaları ve malzeme ile proses gerekliliklerine göre belirlenen bu dört (4) ayrı parametre ve her biri için seçilmiş seviyeleri Tablo 6’da özetlenmiştir.

Tablo 5. Zımba kaplama bileşenleri özellikleri
Table 5. Properties of punch coating components

Kaplama bileşeni	Sertlik (HV)	Sürtünme katsayısı	Kaplama kalınlığı (µm)	Servis sıcaklığı (°C)
AlCrN (alüminyum krom nitrür)	3400 ± 200	0.45	≈ 4	1000
TiAlCN (titanyum alüminyum karbo-nitrür)	3500 ± 500	0.2	≈ 4	800



Şekil 2. Zımba köşe uç yuvarlatma yarıçapları görseli
Figure 2. Punch tip corner radius visualisation

Tablo 6. Deneysel faktörler ve seviyeleri
Table 6. Experimental factors and their levels

Faktörler	Seviyeler			Birim
	1	2	3	
Zımba hammaddesi	Vanadis 4E	Caldie ESR	-	-
Kaplama türü	Kaplamasız	AlCrN	TiAlCN	-
Zımba uç yuvarlatma yarıçapı	0.1	0.3	0.5	mm
Kesme boşluğu	15	22	33	% (sac kalınlığı)

Bu dört parametre ve karışık seviyeleri için Taguchi’nin L_{18} ($2^1 \times 3^3$) matrisi ile tanımlanan deney tasarımı Tablo 7’de verilmiştir. Zımbaların kırılma ömürleri, üç (3) tekrar olacak şekilde her bir zımba belirli sayıda zımbalama işleminden sonra incelenmiş ve aşınma ya da deformasyon oluşan zımbalar için takım ömrü delme adedi ortalama alınarak kaydedilmiş ve Tablo 7’te verilmiştir. Bu takım ömrü verileri ile Minitab İstatistiksel Yazılım® programında Taguchi metodu ile sinyal-gürültü (S/N) oranları çıkarılmıştır. Takım ömrünü optimize etmek için Denklem 1’e göre hesaplanabilen “en büyük en iyi” S/N karakteristiği kullanılmıştır. Ayrıca her parametrenin takım ömrü üzerindeki etki değeri regresyon ve varyans (ANOVA) analizleri ile %95 güven aralığı için elde edilmiştir.

$$\eta = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

“ y_i ” deneyde elde edilen değer ve “ n ” de test deneme sayısını temsile etmektedir.

Tablo 7. $L_{18} (2^1 \times 3^3)$ Taguchi deney tasarımı ve takım ömrü deneysel sonuçları

Table 7. $L_{18} (2^1 \times 3^3)$ Taguchi experimental design and tool life experimental results

Deney No.	Zımba hammaddesi	Kaplama türü	Zımba uç yuvarlatma yarıçapı	Kesme boşluğu	Takım ömrü
1	Vanadis 4E	Kaplamasız	0.1	0.15	4852
2	Vanadis 4E	Kaplamasız	0.3	0.22	3542
3	Vanadis 4E	Kaplamasız	0.5	0.3	2538
4	Vanadis 4E	AlCrN	0.1	0.15	8522
5	Vanadis 4E	AlCrN	0.3	0.22	6847
6	Vanadis 4E	AlCrN	0.5	0.3	5112
7	Vanadis 4E	TiAlCN	0.1	0.22	11011
8	Vanadis 4E	TiAlCN	0.3	0.3	9525
9	Vanadis 4E	TiAlCN	0.5	0.15	18102
10	Caldie ESR	Kaplamasız	0.1	0.3	3183
11	Caldie ESR	Kaplamasız	0.3	0.15	5457
12	Caldie ESR	Kaplamasız	0.5	0.22	3512
13	Caldie ESR	AlCrN	0.1	0.22	8128
14	Caldie ESR	AlCrN	0.3	0.3	6934
15	Caldie ESR	AlCrN	0.5	0.15	12092
16	Caldie ESR	TiAlCN	0.1	0.3	8736
17	Caldie ESR	TiAlCN	0.3	0.15	22080
18	Caldie ESR	TiAlCN	0.5	0.22	11779

3. Bulgular ve tartışma

3. Results and discussion

Otomotiv endüstrisinde yaygın kullanımı olan UHSS sac malzemelerin zımba ile delinmesinde kullanılan zımbaların belirli delme işlemi sonrası kırılma ya da aşınma gibi sebeplerle uzun süreli duruşlara sebep olduğu bilinmektedir. Bu nedenle zımba ömrünün uzun tutulabilmesi bu duruşlardan kaynaklanacak maliyetleri düşürmede oldukça önem arz etmektedir. Bu amaç doğrultusunda zımba ve prosese ait parametrelerin zımba ömrü üzerindeki etkileri, sanayi ölçekli hat üzerinden elde edilen ömür verilerinin Taguchi metodu ve ANOVA analizleri ile istatistiksel olarak incelenmiştir.

Deney tasarımında belirtilen tüm setler için yapılan tekrarlı zımba delme işlemlerinde hem zımbanın hem de kesilen sacın yüzeyleri her 500 delme işlemi sonrası kontrol edilerek özellikle zımbada meydana gelen kırılmalar sonucu kullanılamayacak veya bileme ile tekrar kullanılması gereken kullanım adedi, takım ömrü olarak değerlendirilip kaydedilmiş ve Tablo 7’de verilmiştir. Bu takım ömrü verileri Taguchi metodu kullanılarak Minitab programında analiz ettirilerek her bir faktörün takım ömrü üzerindeki etkisini incelemek için sinyal/gürültü (Signal/Noise) oranları elde edilmiş ve Tablo 8’de sunulmuştur. “En büyük en iyi” yaklaşımına göre hesaplanan S/N oranlarının faktör seviyelerine göre dağılımı görsel anlama kolaylığı için ayrıca Şekil 3’te gösterilmiştir.

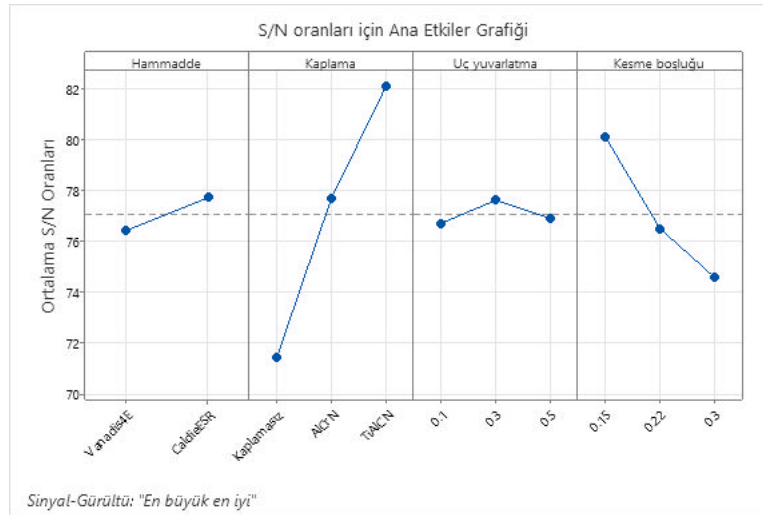
Tablo 8. Maksimum takım ömrü için S/N oranları cevap tablosu

Table 8. S/N ratios response table for maximum tool life

Seviye	Hammadde	Kaplama	Uç yuvarlatma yarıçapı	Kesme Boşluğu
1	76.43	71.42	76.71	80.13
2	77.72	77.69	77.62	76.51
3		82.12	76.90	74.59
Delta	1.29	10.70	0.91	5.54
Sıra	3	1	4	2

Şekil 3'te verilen ortalama S/N oranları incelendiğinde, en yüksek takım ömrü için hammadde olarak Caldie ESR, kaplama türü olarak TiAlCN, zımba uç yuvarlatma yarıçapı olarak 0.3 mm ve kesme boşluğu olarak 0.15 yani sac malzeme kalınlığının %15 olarak seçilmesi gerektiği görülmektedir. Şekil 3 ayrıca faktör etkinliği bakımından kaplama türü ve kesme boşluğunun S/N oranlarının birbirlerine göre yüksek farklar yaratmasına bağlı olarak takım ömrü üzerinde daha etkin olduğu izlenimini vermektedir. Optimum faktör seviyeleri incelendiğinde tesadüfi olarak Tablo 7'de verilen deney tasarımı setlerinden 17. set ile çakıştığı görülmektedir. Bu sonuca göre seçilecek bu faktör seviyeleri ile en yüksek takım ömrü elde edilebileceği ve bu sayede duruş sayısı ve buna bağlı bileme veya değişim gibi maliyetlerin de en aza indirilebileceği görülmektedir.

Faktörlerin takım ömrüne etkilerinin istatistiksel olarak ortaya konması için varyans analizi (analysis of variance-ANOVA) yapılmış ve maksimum takım ömrü için elde edilen sonuçlar Tablo 9'da verilmiştir. ANOVA sonuçları arasından katkı oranları incelendiğinde en yüksek etkinin %61.71 ile kaplama türüne ait olduğu açıkça görülmektedir. Ardından ikincil en etkin faktör olarak %24.12 katkı oranı ile kesme boşluğu gelmektedir. Diğer geriye kalan uç yuvarlatma ve hammaddenin de sırasıyla %2.13 ve %1.69 katkı oranlarının %1'den büyük olmasına bağlı olarak takım ömrü üzerinde az da olsa bir etkiye sahip oldukları belirlenmiştir. Benzer şekilde Tablo 9'daki P değerleri için 0.005'ten küçük olma koşuluna bağlı olarak yine en etkin faktörlerin sırasıyla 0.0001 ile kaplama türü ve 0.0024 ile kesme boşluğu olduğu görülmektedir. %10.34 olarak görülen hata katkı oranının zımbaların incelenmesindeki sapmalardan kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Üç tekrar ile ortalamalar alınmasına bağlı olarak elde edilen istatistiksel sonuçlardaki %10.34'lük hata oranına rağmen varyans analizi sonuçları ile Taguchi metodu sonuçlarının doğrulanmış olduğu dolayısıyla istatistiksel olarak sonuçların güvenilirliğinin desteklendiği görülmüştür.



Şekil 3. Takım ömrü için ortalama S/N oranları grafiği (en büyük en iyi)
Figure 3. Mean S/N ratios plot for tool life (larger is better)

Kaplama türü olarak TiAlCN kaplamasının AlCrN kaplamasına kıyasla sertliğinin az farkla yüksek olmasına karşın özellikle sürtünme katsayısının düşük olmasına bağlı olarak aşınmaya karşı daha dayanıklı olması ve bu sayede zımba ömrünün daha uzun çıktığı söylenebilir. Sertlikteki az fark çatlama eğiliminde önemli bir fark yaratmazken sürtünme katsayısında yaklaşık iki katlık fark kesme yüzeyinde oluşan kayma gerilmelerini önemli ölçüde azaltarak zımba ömrünün uzamasını sağladığı belirlenmiştir (Eriksson & Olsson, 2011). Paralel olarak, Gomah ve Demiral (2020), DIN 1.2379 soğuk iş takım çeliği için farklı kaplama türlerinin etkilerini araştırdıkları çalışmalarında, AlCrN'ün düşük sürtünmeye bağlı olarak termal kararlılık ve yapışma dayanımını sayesinde daha az aşınma gösterdiğini belirtmiştir.

İkinci etkin parametre olan kesme boşluğunun en düşük değeri olan 0.15 için en yüksek zımba ömrü elde edilmesi kalıp ile zımba arasındaki boşluğun kesilecek sacı eğmeyecek kadar düşük olması gerekliliğini göstermiştir. Çünkü sacın eğilmesi sonucu temas yüzeyindeki artış beraberinde yüksek kayma gerilmelerini doğuracak ve zımbada aşırı zorlanma nedeniyle aşınma ve çatlama gibi hasarların erken yaşanmasına neden olacaktır (Nothhaft vd., 2012). Çavuşoğlu, AISI 34 paslanmaz çeliğin zımba ile kesilmesi işleminde takım kesme boşluğunun etkilerini incelediği çalışmada kesme boşluğu arttıkça kesilen parçada kalıntı gerilmelerin ve plastik deformasyonun arttığını belirtmiştir (Çavuşoğlu, 2022). Diğer taraftan, kesme

boşluğunun düşük olması önerilirken 0.15'ten düşük olması denenmemiştir, çünkü bu sefer de kesme için çok daha fazla enerji ihtiyacı gerekeceği bilinmektedir (Chumrum vd., 2015).

Uç yuvarlatma yarıçapının çok etkin olmasa da optimize edilmesi gerektiği Şekil 3'te açıkça görülmüştür. Çünkü ara bir değer olan 0.3 yarıçapı en yüksek zımba ömrünü sağlamıştır. Benzer şekilde UHSS sacların zımba ile delinmesinde yüksek kesme boşluğu ve uç yuvarlatmasının daha yüksek yuvarlanmalı sürtünme kaynaklı hasarları meydana getirdiği belirtilmiştir (Picas vd., 2010). Yüksek uç yuvarlatma yarıçaplarında ayrıca kesme işleminin geciktiği ve bu nedenle parçanın kesme öncesi eğilmeye zorlandığı da rapor edilmiştir (Çavuşoğlu, 2022). Ancak kesme esnasında zımba ucunda ortaya çıkan yüksek gerilmeler yuvarlatma yarıçapının çok düşük olması halinde gerilme yığılmasına ve küçük çatlaklar ile başlayan hasar mekanizmalarını tetiklediği bilinmektedir (Shih vd., 2017). Bu nedenle uç yuvarlatma yarıçapının sürtünme yaratmayacak kadar küçük ancak gerilme yığılması yaratmayacak kadar da yüksek yani optimum bir değerde ayarlanabilmesi için istatistiksel analiz yaklaşımının önemi açıkça görülmektedir.

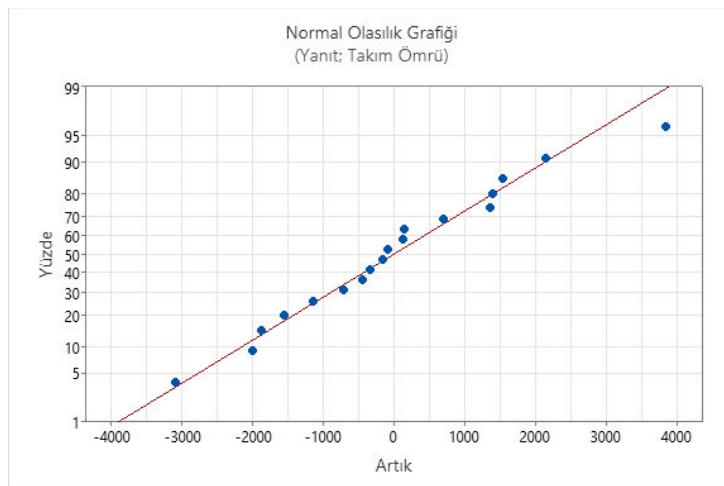
Bu istatistiksel tasarımda seçilen hammaddeler oldukça özel seriler olduğu için hangisi seçilirse seçilsin iyi bir ömür sonucu elde edileceği açıktır. Ancak, klasik zımba hammaddelerinin de ele alınacağı farklı bir deneysel tasarım olsaydı zımba hammaddesinin takım ömrü üzerindeki etkinliğinin mutlaka değişeceği de ifade edilmelidir.

Tablo 9. Maksimum takım ömrü için ANOVA sonuçları
Table 9. ANOVA results for maximum tool life

Faktörler	SD	Seq SS	Katkı (%)	Adj SS	Adj MS	F-değeri	P-değeri
Hammadde	1	7801250	1.69	7801250	7801250	1.64	0.2293
Kaplama	2	284049078	61.71	284049078	142024539	29.85	0.0001
Uç yuvarlatma	2	9798162	2.13	9798162	4899081	1.03	0.3921
Kesme boşluğu	2	111035078	24.12	111035078	55517539	11.67	0.0024
Hata	10	47583737	10.34	47583737	4758374		
Toplam	17	460267305	100.00				

SD: Serbestlik derecesi

Normal olasılık grafiği, bir veri kümesinin yaklaşık olarak normal dağılıp dağılmadığını belirlemek için kullanılan grafiksel bir tekniktir (Hazir & Koc, 2019; Beylergil, 2024). Maksimum takım ömrü için artık grafiği Minitab® programı kullanılarak elde edilmiş ve Şekil 4'te gösterilmiştir. Grafiğe bakıldığında yanıtların neredeyse doğrusal olduğu, hataların da bu doğrusallığa göre oldukça yakınsak dağıldığı açıkça görülmektedir.



Şekil 4. Maksimum takım ömrünün S/N oranları için kalıntı grafiği
Figure 4. Residual plot of maximum tool life for S/N ratios

Deneysel sonuçlar ile tahmin sonuçlarının kıyaslanması için polinomsal regresyon analizi ile elde edilen regresyon Denklem 2 olarak verilmiştir.

$$\text{Tahminsel takım ömrü} = 3014 + 0.0920 \text{ Pmean1} + 0.000049 \text{ Pmean1}^2$$

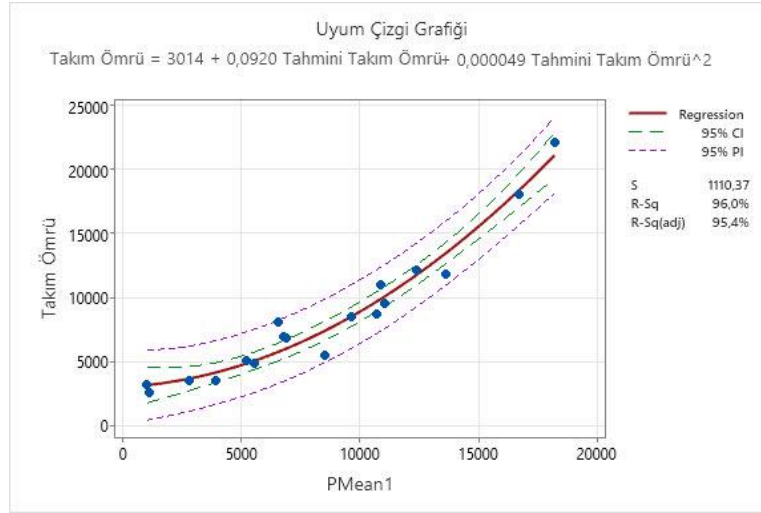
(2)

Yapılan hesaplama sonuçlarında elde edilen tahminlerin polinomsal regresyon analiz sonuçları Tablo 10'da verilmiştir. Takım ömrü sonuçlarının tahmin değerleri ile ilişkisini gösteren grafik de Şekil 5'te sunulmuştur. Hem Tablo 10'daki doğruluk oranının %96 ile oldukça yüksek olması hem de Şekil 5'teki regresyon denklemi eğrisine yakın duran sonuçlardan anlaşılabileceği üzere tahmin değerlerinin deneysel sonuçlar ile mükemmel uyum içinde olduğu açıktır.

Tablo 10. Takım ömrü regresyon analizi model özeti; sonuç, deneysel ve tahminsel değerler ilişkisi

Table 10. Tool life regression analysis model summary; relationship between result, experimental and predictive values

S	R-sq	R-sq(adj)
1110.37	%96.0	%95.4



Şekil 5. Deneysel sonuçlar ile tahminsel sonuçların karşılaştırılması

Figure 5. Comparison of experimental and predictive results

İmalat sektöründeki ürün yaşam döngüsünde toplam maliyetin %2-8'i kesici takımlar tarafından temsil edildiği için sanayi şirketleri takım yaşam döngülerini iyileştirmeye odaklanmaları gerektiği açıktır (Brenner vd., 2017; Kasie & Bright, 2022). Ayrıca küresel rekabet de üreticileri operasyonel maliyetleri azaltacak çözümler geliştirmeye zorluyor (Kasie & Bright, 2021; Handoyo vd., 2023). Bu amaç için yapılan zımba takım ömrü proses optimizasyonu sonucu ortaya çıkacak maliyetteki değişim zımba maliyeti ve duruş maliyetleri kalemleri ile hesaplanmıştır. Optimizasyon öncesi zımba ömrü 2538 işlem iken optimizasyon sonrası 22080 işleme yükseltilmiştir.

Zımba maliyeti optimizasyon sonrası 2592.9 TL'den 1814.6 TL'ye düşürülmüştür. Duruş maliyeti için bir zımba değişimi sırasında 2 personel 1 saat çalışmaktadır. Ayrıca zımbanın kullanıldığı üretim hattında 1 saatlik de duruş yaşanmaktadır. Bu nedenle toplam duruş maliyeti 10664 TL olarak hesaplanmıştır. Toplam maliyet değişimi için 100000 işlem adedine göre gerekli olacak zımba değişim süreci maliyetleri hesaplanmıştır. 100000 işlem için optimizasyon öncesi 39.4 adet zımba değişim süreci yaşanırken optimizasyon sonrası bu değer 4.5 adede düşürülmüştür. Zımba değişiminden kaynaklı maliyette optimizasyon sonrası 93942.1 TL'lik kazanç sağlanırken duruş maliyetinden de 371876.9 TL'lik kazanç sağlanmıştır. Zımba ile delme prosesinde optimizasyon sonrası toplamda 465819 TL'lik maliyet avantajı elde edildiği belirlenmiştir. 120000 adet delme işlemine kadar her 10000 işlemde bir aşınma kütle kaybı ölçümü yapılan bir çalışmada kaplamasız ve kaplamalı olan takımlarda giderek artan oranlarda kütle kaybı gözlenirken toplam 120000 delik için kaplamalı olanın ömrünün kaplamasız olana göre 3 katına çıktığı rapor edilmiştir (Bohdal vd., 2021). Bir başka çalışmada ise TiC kaplamalı AISI 52100 takımında kaplamasız olana göre %60'a varan ömür artışı kaydedildiği görülmüştür (Luo, 1999). Parça geometrisine bağlı değişken kesme boşluklu takım ile uniform kesme boşluklu takıma göre 2.8 kat daha fazla işlem ömrü elde eden Subramonian vd., (2013), kesilen parçanın şekline göre kesme boşluğunun değişkenlik gösterebileceğini belirtmiştir.

Literatür araştırması sonucunda, sacların zımba ile delinmesinde proses parametrelerinin kesme yükü, parça kalitesi, takım aşınması ve ömrü üzerinde göreceli etkin olduğu görülse de ultra yüksek mukavemetli saclar

için elde edilen istatistiksel sonuçlar hangisinin ne ölçüde etkin olduğunu açıkça ortaya konmuştur. Yapılan istatistiksel yaklaşım aslında bu tarz bir proseste doğru parametre ve seviyeleriyle yapılacak istatistiksel analizlerle optimum sonuçların minimum işçilik, malzeme, enerji ve maliyet ile sağlanabileceğini göstermiştir.

4. Sonuçlar

4. Conclusions

Bu çalışmada zımba takım ömrünü artırmak ve dolaylı yoldan maliyetleri düşürmek için delme işlemi parametreleri olarak seçilen hammadde türü, kaplama türü, uç yuvarlatma yarıçapı ve kesme boşluğu parametrelerinin istatistiksel olarak Taguchi metodu ve ANOVA analizleriyle optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenmiştir:

- Taguchi metodu sonucuna göre maksimum zımba takım ömrü için hammadde olarak Caldie ESR, kaplama türü olarak TiAlCN, uç yuvarlatma yarıçapı olarak 0.3 mm ve kesme boşluğu olarak da sacın %15'inin seçilmesi gerektiği tespit edilmiştir.
- Taguchi metodu ile elde edilen S/N oranlarına göre ilk izlenimler en etkin faktörler olarak kaplama türü ve kesme boşluğunu göstermektedir.
- Kesme boşluğunun artmasıyla takım ömrünün yaklaşık %50'lik ciddi oranda düştüğü görülürken yuvarlatma yarıçapında orta seviyenin daha yüksek takım ömrü değeri (en yüksek değer, 22080) sunması optimizasyon gerekliliğini açıkça göstermiştir.
- ANOVA analizi sonucuna göre tüm parametrelerin zımba takım ömrü üzerinde etkin olduğu ancak en yüksek katkı oranı %61.71 ile kaplama türü ve ardından %24.12 ile kesme boşluğu en etkin faktörler olarak belirlenmiştir.
- Regresyon analizi sonucu elde edilen modelin R^2 değerinin %96 olması tahminsel değerlerin deneysel sonuçlar ile mükemmel uyum içinde olduğunu göstermektedir.
- Optimizasyon sonucunda zımba ömrü 2538 işlemiden 22080 işleme yükseltirken 100000 delme işlemi için bakım maliyetlerinde yaklaşık 465819 TL'lik kazanç sağlanmıştır.
- Sonuç olarak maksimum zımba takım ömrü ve minimum bakım maliyeti için zımba ile delme prosesi parametrelerinin başarılı bir şekilde optimize edilmesi gerektiği açıkça ortaya konmuştur.

Teşekkür

Acknowledgement

Yazarlar, çalışmanın yürütülmesindeki destekleri için FORMIVA A.Ş.'nin tüm çalışanlarına teşekkür eder. Yazarlar ayrıca malzeme tedarikindeki destekleri için Uddeholm A.Ş. firmasına teşekkürü bir borç bilir.

Semboller

Symbols

- | | |
|------------------------------------|---|
| • HV; vikers sertliği | • SD: serbestlik derecesi |
| • mm; milimetre | • S/N; sinyal gürültü oranı |
| • m; metre | • W; watt |
| • MPa; megapaskal | • °C; sıcaklık derecesi |
| • n; tekrar sayısı | • η ; “en büyük en iyi” sinyal gürültü oranı |
| • R-sq; R-kareler | • $\sum$; toplam |
| • R-sq(adj); düzeltilmiş R-kareler | • yi; deneyde elde edilen değer |
| • S; kalıntıların standart sapması | • €; Euro para birimi |

Yazar katkısı

Author contribution

Onur ÇOBAN; verilerin analizi, raporlama, makale yazımı ve makalenin düzenlenmesi. Kerim Mert ÇELİK; verilerin analizi, raporlama, makale yazımı ve düzenleme. Murat BAYRAKTAR; deney setinin hazırlaması, verilerin elde edilmesi, makale yazımı. Rahman EHVAN; deney setinin hazırlanması, verilerin elde edilmesi, makale yazımı. İlker KUZUCU; deney setinin hazırlanması, verilerin elde edilmesi, verilerin analizi, makalenin düzenlenmesi

Etik beyanı*Declaration of ethical code*

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan eder.

Çıkar çatışması beyanı*Conflicts of interest*

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar*References*

- Abe, Y., Ijichi, W., Mori, K., & Miyazawa, S. (2020). Bending process for producing uniform angle distribution from ultra-high strength steel sheets having thickness distribution. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107, 2251-2260. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05174-4>
- Abe, Y., Mori, K., Nakanoshita, S., & Kadarno, P. (2014). Direct Punching in Inclined Ultra-High Strength Steel Sheets. *Key Engineering Materials*, 622-623, 1051-1057. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.622-623.1051>
- Achouri, M., Germain, G., Santo, P. D., & Delphine, Saidane (2014). Experimental and numerical analysis of micromechanical damage in the punching process for High-Strength Low-Alloy steels. *Materials and Design*, 56, 657–670. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.016>
- Alpay, Y. O., Uygur, I., Kilincel, M., Samtas, G. (2023). Cure cycle optimization of infrared cured composites using Taguchi method. *J Appl Polym Sci*, 140 (22): e53922. <https://doi.org/10.1002/app.53922>
- Arslan, Y., Uygur, I., Jazdzewska, A. (2015). The Effect of Cryogenic Treatment on Microstructure and Mechanical Response of AISI D3 Tool Steel Punches. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 137(3): 034501, 1-6. <https://doi.org/10.1115/1.4029567>
- Beylergil, B. (2024). Hoop Strength Optimization of 3D-Printed Polylactic Acid (PLA) Rings Using Taguchi Method. *International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.)*, 18(5). <https://doi.org/10.15866/ireme.v18i5.24978>
- Bohdal, Ł., Kukielka, L., Patyk, R., Koska, K., Chodór, J., Czyzewski, K. (2022). Experimental and Numerical Studies of Tool Wear Processes in the Nibbling Process. *Materials*, 15, 107. <https://doi.org/10.3390/ma15010107>
- Brenner, D., Kleinert, F., Imiela, J., Westkämper, E. (2017). Life Cycle Management of Cutting Tools: Comprehensive Acquisition and Aggregation of Tool Life Data. *Procedia CIRP*, 61, 311 – 316. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.168>
- Chongthairungruang, B., Uthaisangsuk, V., Suranuntchai, S., & Jirathearanat, S. (2013). Springback prediction in sheet metal forming of high strength steels. *Materials and Design*, 50, 253–266. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.02.060>
- Chumrum, P., Koga, N., & Premanond, V. (2015). Experimental investigation of energy and punch wear in piercing of advanced high-strength steel sheet. *Int J Adv Manuf Technol*, 79, 1035–1042. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-6902-z>
- Çavuşoğlu, O. (2022). An Investigation of Punch Radius and Clearance Effects on the Sheet Metal Blanking Process. *International Journal of Automotive Science and Technology*, 6 (4): 309-316. <https://doi.org/10.30939/ijastech.1190699>
- Drexler, A., Bergmann, C., Manke, G., Kokotin, V., Mraczek, K., Leitner, S., Pohl, M., & Ecker, W. (2021). Local hydrogen accumulation after cold forming and heat treatment in punched advanced high strength steel sheets. *Journal of Alloys and Compounds*, 856, 158226. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.158226>
- Dündar, M., Uygur, I., and Ekici, E. (2025). Optimization of low-velocity impact behavior of FML structures at different environmental temperatures using Taguchi method and grey relational analysis. *Journal of Composite Materials*, 59 (7), 885-906. <https://doi.org/10.1177/00219983241301751>

- Eriksson, J., & Olsson M. (2011). Tribological testing of commercial CrN, (Ti, Al)N and CrC/C PVD coatings – evaluation of galling and wear characteristics against different high strength steels. *Surface and Coatings Technology*, 205(16), 4045–4051. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.02.053>
- Eryılmaz, İ., & Gürün, H. (2021). DP600 Sac Malzemenin Delik Flaşlama İşleminde Zımba Formunun Etkileri. *Muş Alparslan Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2(1), 44-53. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/maummfd/issue/65869/1028334>
- Gomah, M., Demiral, M. (2020). An Experimental and Numerical Investigation of an Improved Shearing Process with Different Punch Characteristics. *Journal of Mechanical Engineering*, 66(6), 375-384. <http://dx.doi.org/10.5545/sv-jme.2020.6583>
- Handoyo, S., Suharman, H., Ghani, E.K., & Soedarsono S. (2023). A business strategy, operational efficiency, ownership structure, and manufacturing performance: The moderating role of market uncertainty and competition intensity and its implication on open innovation. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 9:100039. <http://dx.doi.org/10.1016/j.joitmc.2023.100039>
- Hazir, E., & Koc, K. H. (2019). Optimization of Wood Machining Parameters In CNC Routers: Taguchi Orthogonal Array Based Simulated Angling Algorithm. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 21(4), 493-510. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000406>
- Hentati, F., Hadriche, I., Masmoudi, N., & Bradai, C. (2020). Experimental design to enhance the surface appearance, the internal structure, and the shear stresses of injected and metallized polycarbonate/acrylonitrile–butadiene-styrene parts. *J. Appl. Polym. Sci.*, 48384, 1-13. <https://doi.org/10.1002/app.48384>
- Kasie, F. M., & Bright G. (2022) Cutting Tools Assignment and Control Using Neutrosophic Case-Based Reasoning and Best Worst Method. *Advances in Operations Research*, 2022(1), 4344686. <https://doi.org/10.1155/2022/4344686>
- Kasie, F. M., & Bright, G. (2021). Integrating fuzzy case-based reasoning, parametric and feature-based cost estimation methods for machining process. *Journal of Modelling in Management*, 16(3), 825-847. <https://www.emerald.com/insight/1746-5664.htm>
- Lara, A., Frómeta, D., Parareda, S., Casellas, D., Larour, P., Hinterdorfer, J., Atzema, E., & Heuse, M. (2022). Sheared edge formability characterization of cold-rolled advanced high strength steels for automotive applications. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 1238(1):012029.
- Lee H. Y., & Park J. Y. (2018). A Study on the Punch Shape for Improving Tool Life in Shearing AHSS. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 418, 012063. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/418/1/012063>
- Li, H., Wu, X., Li, G., & Zhou, D. (2020). Chipping damage of die for trimming advanced high-strength steel sheet: Evaluation and analysis. *Journal of Materials Processing Tech.*, 285, 116787. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116787>
- Luo, S. Y. (1999). Effect of the geometry and the surface treatment of punching tools on the tool life and wear conditions in the piercing of thick steel plate. *Journal of Materials Processing Technology*, 88, 122-133. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00375-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00375-6)
- Mackensen, A., Golle, M., Golle, R., & Hoffmann, H. (2010). Experimental investigation of the cutting force reduction during the blanking operation of AHSS sheet materials. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 59, 283–286. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.110>
- Mehat, N. M., & Kamaruddin, S. (2012). Quality control and design optimisation of plastic product using Taguchi method: a comprehensive review. *Int J Plas Tech*, 16, 194-209. <https://doi.org/10.1007/s12588-012-9037-1>
- Mori, K., Abe, Y., & Murai, Y. (2020). Prevention of delayed cracking of punched 1.5 GPa ultra-high strength steel sheets by ironing with punched slug. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 109, 2503–2510. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05786-w>
- Mori, K., Abe, Y., Kidoma, Y., & Kadarno, P. (2013). Slight clearance punching of ultra-high strength steel sheets using punch having small round edge. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 65, 41–46. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.09.005>

- Mori, K., Maeno, T., & Fuzisaka, S. (2012). Punching of ultra-high strength steel sheets using local resistance heating of shearing zone. *Journal of Materials Processing Technology*, 212, 534–540. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.10.021>
- Mori, K., Saito, S., & Maki, S. (2008). Warm and hot punching of ultra high strength steel sheet. *Ann CIRP*, 57, 321–324. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.125>
- Mucha, J. (2010). An experimental analysis of effects of various material tool's wear on burr during generator sheets blanking. *Int J Adv Manuf Technol*, 50, 495–507. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2554-1>
- Nothhaft, K., Suh, J., Golle, M., Picas, I., Casellas, D., & Volk, W. (2012). Shear cutting of press hardened steel: influence of punch chamfer on process forces, tool stresses and sheared edge qualities. *Prod. Eng. Res. Devel*, 6, 413–420. <https://doi.org/10.1007/s11740-012-0404-8>
- Picas, I., Herná'ndez, R., Casellas, D., & Valls I. (2010). Strategies to increase the tool performance in punching operations of UHSS. In: *Proceedings of the 50th IDDRG conference*, Austria, 325–334. https://iddrg.com/wp-content/uploads/2022/03/C_35_10.pdf
- Pu, C., & Gao, Y. (2015). Crystal Plasticity Analysis of Stress Partitioning Mechanisms and their Microstructural Dependence in Advanced Steels. *Journal of Applied Mechanics*, 82(3), 031003. <https://doi.org/10.1115/1.4029552>
- Pu, C., Jia, Y., Zhou, D., Makrygiannis, P. J., Zhu, F., Wu, W., Du, C., & Wang, Y. (2018). Effects of Punch Shapes and Cutting Configurations on the Dimensional Accuracy of Punched Holes on an AHSS Sheet. *SAE Technical Paper*, 01, 0800. <https://doi.org/10.4271/2018-01-0800>
- Pu, C., Zhou, D., Makrygiannis, P. J., Wu, W., Jia, Y., Zhu, F., Du, C., & Wang, Y. (2018). A Comprehensive Study of Hole Punching Force for AHSS. *SAE Technical Paper*, 01:0802. <https://doi.org/10.4271/2018-01-0802>
- Radhvan, H., Nasir, S. M., Rashidi, M. M., Kamarudin, K., & Abdellah A. (2019). Optimization Parameters to Reduce the Warpage Defect of Plastic Injection Molding Process for A Thin-Shell Part Using Design of Experiment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 551, 012027. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/551/1/012027>
- Rafsanjani, A., Abbasion, S., Farshidianfar, A., & Irani, N. (2009). Investigation of the viscous and thermal effects on ductile fracture in sheet metal blanking process. *Int J Adv Manuf Technol*, 45, 459–469. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-1988-9>
- Shih, H., Zhou, D., & Konopinski, B. (2017). Effects of Punch Configuration on the AHSS Edge Stretchability. *SAE Int. J. Engines*, 10(4). <https://doi.org/10.4271/2017-01-1705>
- Shivpuri, R., Singh, S., Agarwal, K., & Liu, C. (2011). Energy release rate based approach for the wear of punches in precision blanking of high strength steel. *Ann CIRP*, 60, 307–310. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.139>
- Soares, J. A., Gipiela, M. L., Lajarin, S. F., & Marcondes, P. V. P. (2013). Study of the punch-die clearance influence on the sheared edge quality of thick sheets. *Int J Adv Manuf Technol*, 65, 451–457. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4184-2>
- Subramonian, S., Altan T., Ciocirlan, B., Campbell, C. (2013). Optimum selection of variable punch-die clearance to improve tool life in blanking non-symmetric shapes. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 75, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.09.004>
- Uygur, I., Gerengi, H., Arslan, Y., Kurtay, M. (2015). The effects of cryogenic treatment on the corrosion of AISI D3 steel. *Materials Research*, 18 (3); 569-574. <https://doi.org/10.1590/1516-1439.349914>
- Yıldırım, Ç. V., Kivak, T., Erzincanlı, F., Uygur, İ., Sarıkaya, M. (2017). Optimization of MQL parameters using the Taguchi method in milling of nickel based waspaloy. *Gazi University Journal of Science*, 30(2), pp. 173-186. <http://dergipark.gov.tr/gujs>
- Yılmaz, O., & Hoecke, D. (2023). Hole-making and cutting effects on fatigue performance of ultra high strength steels. *Procedia Structural Integrity*, 57, 420–427. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.03.045>