




1.2379 Soğuk İş Takım Çeliği Delme Zımbalarında AlTiN, TiSiN ve TiN, PVD Kaplamaların Takım Ömrüne Etkisi

Effect of AlTiN, TiSiN and TiN, PVD Coatings on Tool Life in 1.2379 Cold Work Tool Steel Punching

Hilal GÜNAY¹  Yalçın ENGİN²  E.Asım GÜVEN³  Tamer SINMAZÇELİK^{4,*} 

¹ Ensan Kalıp ve Makine San.Tic.Ltd.Şti., Dilovası, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-5750-9970

² Ensan Kalıp ve Makine San.Tic.Ltd.Şti., Dilovası, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-6096-0324

³ Makine Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0003-0153-6774

⁴ Makine Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-3276-5820

Araştırma Makalesi

Gönderilme Tarihi : 17/08/2020

Kabul Tarihi : 12/09/2020

Anahtar Kelimeler

AlTiN
TiSiN
TiN
PVD
Zımba
Delme

Özet

Zımbalama ve kesme, sac imalat sanayinde en yaygın seri üretim yapılan yöntemlerdir. Dünyada; otomotiv, ev eşyası ve diğer yapısal parçalar gibi milyonlarca parça, her gün delme veya kesme adımları ile seri olarak üretilmektedir. Takımlar, üretim sırasında tekrarlı bir şekilde ağır basma ve burkulma zorlanmaları ile, metal-metal çiftinin sürtünmesine ve temas eden yüzeylerde aşınmalar ile karşı karşıyadır. Bu zorlanma ve tribolojik etkiler nedeniyle takım servis süresince kırılma ve aşınmaya maruz kalabilmektedir. Özellikle bu etkilerin takip edilmemeleri, ya da standart ömür değerlerinin bilinmemesi ve kullanım sürelerinin belirsiz olması durumunda seri üretimde plansız duruşlar yaşanmaktadır. Son araştırmalar, en ucuz çözümün, yüksek kalite bir takım malzemesi kullanmak yerine nispeten ucuz ve ortalama kalite bir malzeme üzerine PVD (Fiziksel Buhar Difüzyonu) veya CVD (Kimyasal Buhar Difüzyonu) kaplaması kullanılması olduğu ortaya konulmuştur. Bu çalışmada 1.2379 Soğuk İş Takım Çeliği Zımbalara AlTiN, TiSiN ve TiN PVD kaplamalar yapılmış ve endüstriyel imalat sürecinde pres altında delme işlemleri yapılmış ve zımbalama sayısının bir fonksiyonu olarak zımba aşınmaları ve boyut değişimleri ölçülmüştür.

Research Paper

Received Date : 17/08/2020

Accepted Date : 12/09/2020

Keywords

AlTiN
TiSiN
TiN
PVD
Punch
Punching

Abstract

Punching and cutting are the most common mass production methods in the sheet metal manufacturing industry. In the world; Millions of parts, such as automotive, household appliances, and other structural parts, are mass-produced with punching or cutting steps every day. The tools are faced with repeated strains of heavy pressure and buckling during production, friction of the metal-metal pair and abrasion on the contact surfaces. Due to this stress and tribological effects, the tool may be exposed to breakage and wear during service. Unplanned shutdowns are experienced in mass production, especially if these effects are not followed, or the standard life values are unknown and the usage periods are uncertain. Recent research has shown that the cheapest solution is to use a PVD (Physical Vapor Diffusion) or CVD (Chemical Vapor Diffusion) coating on a relatively inexpensive and average quality material rather than using a high quality tool material. In this study, 1.2379 Cold Work Tool Steel punches were coated with AlTiN, TiSiN and TiN PVD coatings, and during the industrial manufacturing process, punching operations were performed under press, and punch wear and size changes were measured as a function of punching number.

1. Giriş

Zımbalama ve kesme, sac imalat sanayinde en yaygın seri üretim yapılan yöntemlerdir [0]. Ayrıca bu işlemler; derin çekme, bükme, kenar yuvarlama, damgalama ve hidroform gibi diğer sac şekillendirme işleminin ilk

adımıdır [0]. Zımbalama (delme) ve kesme işlemleri kelime olarak birbirine karıştırılan proseslerdir. Fakat, bu iki sac metal işleme tamamen farklıdır. İşlem, ürün veya hurda olan işlenmiş sac ile belirlenir. Eğer işlenmiş sac metal; ürün ise, bu işleme kesme denir. Öte yandan sac metal hurda ise delme olarak adlandırılır [0]. Kalıp boyutları ise kesme veya delme işlem türüne göre belirlenir.

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author): tamersc@kocaeli.edu.tr



Dünyada; otomotiv, ev eşyası ve diğer yapısal parçalar gibi milyonlarca parça, her gün delme veya kesme adımları ile seri olarak yüksek miktarlarda üretilmektedir. Bu nedenle, üretim planlanmamış duraksamalarla asla kesilmemelidir. Üretimin, işlemi (kesme veya delme) doğru bir şekilde yürütebilmek için aşağıdaki gibi parametreleri dikkate alması gerekir; malzeme özellikleri (kayma mukavemeti, sertlik, vb.), geometrik parametreler (yuvarlatmalar), kontur tanımı (keskin kenarlar), fiziksel parametreler (yağlama, kalıp malzemeleri, kaplama, pres özellikleri, vb.) ve çıkış parametreleri (boyutsal toleranslar, geri yaylanma), takım aşınması vb. [0]. Algılama ve çevrim içi izleme teknikleri [0-0] icat edilmiş olsa bile, en dramatik ve sık karşılaşılan plansız ya da istemsiz duruşlar takım arızalarından kaynaklanır. Bu planlanmamış duruşlar, takım kırılması, takım kenarı aşınmasından kaynaklanan çapak yüksekliği, takım duvarı aşınmasından kaynaklanan kabul edilemez tolerans veya şekillerden dolayı gerçekleştirilebilir.

Takımlar, üretim sırasında tekrarlanan ve ağır basma ve burkulma zorlanmaları, metal-metal çiftinde gerçekleşen (takım ve sac malzeme) sürtünme kuvvetleri ve kenar aşınmaları ile karşı karşıyadır. Bu nedenle maliyetli bir kalıp bakımını önlemek için takımlar periyodik olarak kontrol edilir, bilenir veya değiştirilir [0]. Tasarımcılar, plansız üretim duruşlarını önlemek için uzatılmış takım ömrü üzerinde çalışmalar yapmaktadır. Son araştırmalar, en ucuz çözümün, yüksek kalitede bir takım malzemesi kullanmak yerine nispeten ucuz ve ortalama kalite bir malzeme üzerine PVD (Fiziksel Buhar Difüzyonu) veya CVD (Kimyasal Buhar Difüzyonu) kaplaması olduğunu ortaya koymuştur [0-0]. Çünkü, yüksek kalite malzemedeki üretilen takımların işlenmesi zor ve pahalı olacaktır. Esas olarak ilk PVD uygulamaları Robert Grove'un 1852 ve Michael Faraday'ın 1857 yılında gerçekleştirdiği çalışmalar olarak kabul edilmektedir [0]. Günümüzde termal ve kinematik yöntemlerin hibrit olarak uygulandığı PVD teknikleri geliştirilmiştir. 1960'lı yıllardan sonra kesici takım yüzeylerine aşınmayı geciktirme amaçlı kullanılmaya başlanmıştır. CVD uygulamaları ise 19. yüzyılda ampul filamentleri üzerinde başlamasına rağmen, 1950'ler de ilk TiC kaplama gerçekleşmiş, 1990'lar da ise Krupp firması tarafından ticari uygulamalara dönüştürülmüştür [0]. Ticari uygulamalarda PVD-CVD kaplama kullanımı son 25 yıl içerisinde önemli derecede artarak %70 gibi önemli bir paya ulaşmıştır [0]. PVD ve CVD kaplamalar ile yüksek sertlik, düşük sürtünme katsayısı [Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.] ve düşük aşınma ve yüksek korozyon direnci sağlar. Kaplama kalınlıkları ise PVD yönteminde yaklaşık 1-5 mikron, CVD yönteminde ise 5-20 mikrondur. Bu nedenle kaplama, nihai malzemeye boyut toleransı kaybı olmadan uygulanabilir. Bu çalışmada, 1.2379 baz malzeme üzerine

AlTiN, TiSiN ve TiN PVD kaplamaları kullanılarak elde edilen zımba ömür değerleri incelenmiştir.

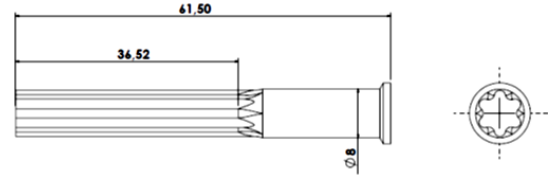
2. Malzeme ve Yöntem

Operasyonel delme işlemleri Ensan Kalıp ve Makina Sanayi Tic. Ltd. Şti.'nin Dilovası tesisinde endüstriyel imalat koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Zımba malzemesi olarak 1.2379 soğuk iş takım çeliği kullanılmıştır. Malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir. Zımbalar nihai boyutlarına işlendikten sonra (Şekil 1) 750 °C sıcaklığa yavaş, 1030 °C sıcaklığa hızla ısıtılarak su verilmiş ve daha sonra sertlikleri 60 HRC olacak şekilde 250 °C'de menevişlenmiştir.

Tablo 1: 1.2379 soğuk iş takım çeliğinin kimyasal bileşimi (ağ.%)

C	Si	Mn	P
1,45-1,60	0,10-0,60	0,20-0,60	0,03
S	Cr	Mo	V
0,03	11,00-13,00	0,60-0,80	0,90-1,10

Zımbalar daha sonra kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 2'de verilen üç farklı tür malzemeyle PVD yöntemi kullanılarak kaplanmıştır.



Şekil 1: Yıldız zımba ölçüleri

Tablo 2: Kaplama malzemesinin kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal İsim	Oksidasyon Sıcaklığı (°C)	Sertlik (HV)	Sürtünme Katsayısı	Kaplama Kalınlığı (µm)
TiSiN	1100	4200	0,50	1-4
AlTiN	900	3600	0,55	1-4
TiN	600	2600	0,40	2-5

Matris (dişi) malzemesi olarak 1.2080 soğuk iş takım çeliği kullanılmış ve malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 3'de ayrıntılı olarak verilmiştir. Matris nihai boyutlarına işlendikten sonra çarpılma problemini önlemek amacıyla 800 °C sıcaklığa yavaş, 950 °C sıcaklığa ise hızla ısıtılarak su verilmiş ve daha sonra sertlikleri 58 HRC olacak şekilde 300 °C'de menevişlenmiştir. Kesme boşluğu tek taraftan 0,06 mm olarak şekilde işlenmiştir.

Tablo 3: 1.2080 soğuk iş takım çeliğinin kimyasal bileşimi (ağ.%)

C	Si	Mn	P
2,00-2,30	0,10-0,60	0,10-0,60	0,03
S	Cr	T	V
0,03	11,00-13,50	0,00-1,00	0,00-1,10

Deneylerde sac malzeme olarak soğuk haddelenmiş 2,25 mm kalınlığında S275JR yapı çeliği kullanılmıştır.

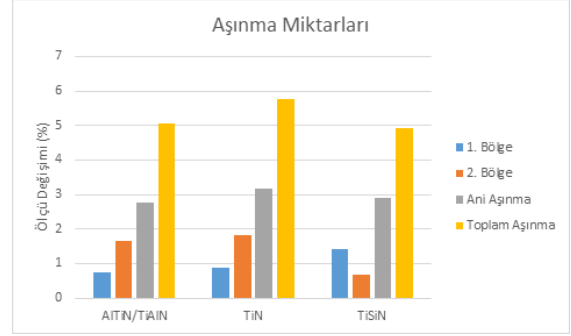
Yaklaşık 20.000 'lik partiler halinde delme işlemi sonrası ürünlerden numune alınmış ve boyut ölçümü yapılarak aşınma miktarları hesaplanmıştır. Kullanılan 3 farklı zımbaya da deneyler esnasında herhangi bir bileme işlemi yapılmamış, deneyler zımbalarda hasar meydana kadar devam etmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

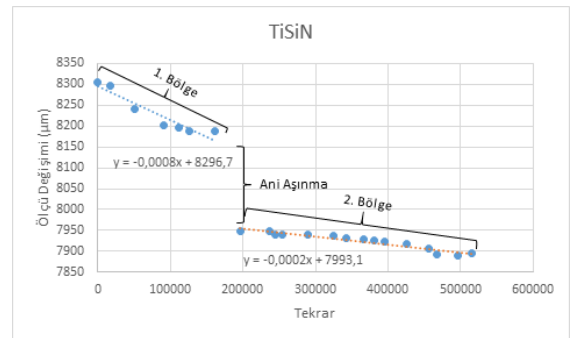
Kaplamasız olarak kullanılan 1.2379 soğuk iş takım çeliği zımbalarla yapılan delme-kesme işlemlerinde yaklaşık 10.000 delme işleminde zımba kopması yaşandığı aynı zımbanın tamir edilerek kullanılması halinde ise 20.000 delme işleminde bileme ihtiyacı duyulduğu işletme tarafından bilinmektedir. Her bir kopma veya bileme sebebiyle üretim duruşlarında yaklaşık olarak yarım vardiya üretim kaybı oluşmaktadır. Bununla birlikte zımba hasarların bazılarında kalıp (dişi) hasarı da oluşmaktadır. Bu durumlarda ise hem kalıp tamir ya da imalat masrafları hem de imalatın durması kaynaklı toplam maliyet daha da artmaktadır.

AlTiN, TiSiN ve TiN kaplanmış zımbalarla yapılan delme işlemlerinde bileme ihtiyacı duyulmadan 514.500 adete ulaşan delme işlemi yapılabilmektedir. AlTiN zımbanın kırılmasıyla deneyler durdurulmuştur.

Yapılan delme işlemleri neticesince zımbalar herhangi bir bileme işlemine tabi tutulmamasına rağmen 196.500 delme işlemi sonrası zımba boyutunda belirgin bir şekilde değişim gözlemlenmiştir. Saç parça üzerinde yapılan çap ölçümlerinde de benzer durumlar gözlenmiş olup tüm zımba çeşitleri için yaklaşık 200.000 tekrar sayısından sonra kaplama özelliğini kaybetmeye başladığı görülmüştür. Fakat imalat boyut ve toleransları kabul edilebilir seviyede olması nedeniyle deneyler devam etmiştir. Yaklaşık 200.000 tekrar sınırına kadar olan aşınma **1. Bölge**, 200.000-500.000 tekrar arası **2. Bölge** ve 196.500 tekrarda oluşan aşınma ise **Ani Aşınma** olarak isimlendirilmiştir.

**Şekil 2:** Kaplamaların aşınma miktarları

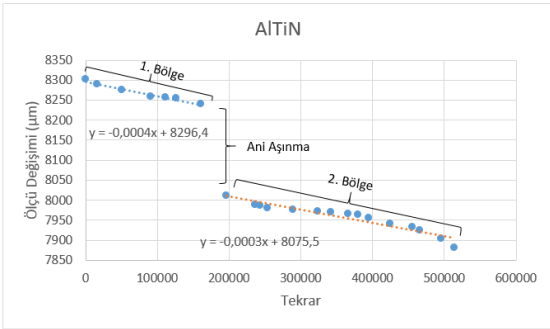
Geleneksel kaplamalarda tane boyutu 30-80 nm civarındadır. Fakat TiSiN nano kompozitlerinin tane boyutları amorf bir SiN_x matrisine gömülü ve 5 nm ila 20 nm arasındadır. Çatlak oluşumunu ve yayılmasını azaltmak için, bu amorf matris mümkün olduğunca ince olmalıdır. Küçük tane büyüklüğü nedeniyle deformasyon dislokasyon hareketi yerine tane sınırı kayması ile yönetilir [0]. TiSiN kaplamalarda kolonsal tane yapısı görülmez. Bu özellikle birlikte aşınma dayanımı arttırmaktadır. 4200 HV gibi yüksek sertlik değeri de aşınma dayanımına yardımcı olmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda da benzer şekilde aşınma miktarı en az olan kaplama türü TiSiN olmuştur. Her ne kadar Şekil 2'de görüldüğü gibi yaklaşık 200.000 delme işlemine kadar hızlı bir şekilde aşınmaya uğramasına rağmen 200.000'den sonra aşınma miktarı yavaşlamıştır. Ball on disc deneylerinde de benzer şekilde aşınmanın belirli bir süre sonunda kararlı hale geçtiği gözlemlenmiştir [0]. Kaplama yüzeyinde bulunan kararsız tabakanın hızlı bir şekilde aşınmasından sonra kaplamanın kararlı hale geldiği ve yüksek sertlikle birlikte aşınmaya karşı dayanım gösterdiği anlaşılmıştır. Şekil 3 ve 4'te TiSiN kaplı zımbanın aşınma hızı ve zımba ucundaki aşınma miktarı gösterilmektedir.

**Şekil 3:** TiSiN kaplamanın aşınma davranışı



Şekil 4: TiSiN kaplı zımbanın ilk ve 514.500 delme işleminden sonraki görüntüsü.

AlTiN kaplamalardan genel olarak kaplamalardaki metalik oran %65-75 Titanyum, %25-35 Alüminyum şeklindedir. AlTiN kaplamalarda ise genel olarak %60-70 Alüminyum, %30-40 Titanyum şeklinde olmaktadır. Alüminyum atomik oranı %70'i geçtiğinde kafes yapısı bozulmakta ve kübik kafes yapısı ortadan kalktığı için filmin mekanik özellikleri bozulmaktadır. Bu sebeple ticari uygulamalarda %70'den daha fazla atomik alüminyum oranına sahip AlTiN filmler üretilmemektedir. Performans deneylerinde yüksek kesme hızlarına sahip olan takımlarda kaldırılan talaş hacmi ve ekonomik uygunluk performansının daha yüksek olduğu gözlemlenmiş ve aşınmalar ilk andaki hızlı büyümeden sonra ve doğrusal olarak arttığı gözlemlenmiştir [0]. Deneysel çalışmalar neticesinde Şekil 2'de de görüldüğü gibi birinci ve ikinci aşınma bölgesinde AlTiN aynı aşınma karakterine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 5 ve 6'te AlTiN kaplı zımbanın aşınma hızı ve zımba ucundaki aşınma miktarı gösterilmektedir.



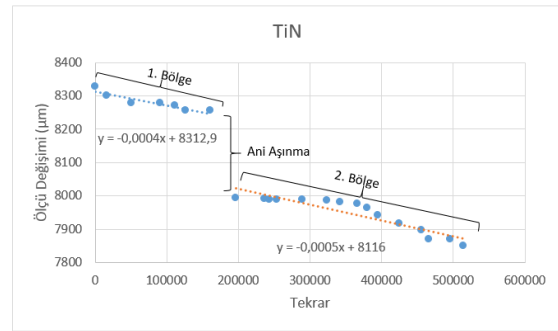
Şekil 5: AlTiN kaplamanın aşınma davranışı



Şekil 6: AlTiN kaplı zımbanın ilk ve 514.500 delme işleminden sonraki hasar ile aşınma görüntüsü.

TiN kaplamalar, yüksek sertlikleri, düşük aşınma oranları ve görünüşlerinden dolayı yıllardır, aşınma önleme ve dekoratif amaç ile yaygın olarak kullanılmaktadır. Zira

TiN kaplamaların altın renginde olması özellikle dekoratif amaçlı uygulamalarda avantajlıdır. Fakat 600 °C gibi sınırlı bir oksidasyon direncine sahiptirler [0]. Bununla birlikte kolonsal tane yapıları nedeniyle kaplama özellikleri anizotropdur. Uygulanan yüklemenin yönüne bağlı olmakla birlikte kolonlar da kırılma şeklinde hasar oluştururlar [0]. Tablo 2'de görüldüğü gibi TiN kaplama deneylerde kullanılan diğer iki kaplamaya göre sertlik değeri daha düşük olup 2600HV seviyesindedir. Şekil 2'ye göre TiN kaplanan zımbalarda aşınma miktarı diğer iki tür kaplamaya göre ikinci bölge aşınması ile ani aşınma miktarları da fazladır. Şekil 7 ve 8'de TiN kaplı zımbanın aşınma hızı ve zımba ucundaki aşınma miktarı gösterilmektedir. Bu zımbanın kırılarak hasara uğradığını göstermektedir.



Şekil 7: TiN kaplamanın aşınma davranışı



Şekil 8: TiN kaplı zımbanın ilk ve 514.500 delme işleminden sonraki görüntüsü.

4. Sonuçlar

1.2379 Soğuk İş Takım malzemesi üzerine yapılan PVD kaplamalar ile takım ömrü geleneksel yöntemle göre % 5000 arttırılmıştır. Geleneksel yöntemle göre planlanmamış duruşlar ciddi bir derecede azaltılmış ve zımba bileme ihtiyacı ortadan kaldırılmıştır.

Tüm kaplamalarda yaklaşık 200.000 delme işleminde zımba boyutlarında belirgin bir azalma görülse bile zımbaların işlevlerini yerine getirmeye devam ettiği anlaşılmıştır.

Aşınma dayanımı en iyi olan TiSiN kaplama olmasına rağmen birinci aşınma bölgesinde diğerlerine kıyasla daha hızlı bir aşınma durumu gözlemlenmiş fakat daha sonra diğer kaplamalara benzer şekilde kararlı hale geçmiştir.

AlTiN kaplı zımbadaki aşınma davranışında birinci ve ikinci bölgede bir fark olmayıp aşınma aynı oranda devam etmiştir.

TiN kaplı zımbada ise aşınma miktarı diğer iki tür kaplamaya göre daha fazla olmuştur. TiN kaplamada zımba hasarı oluşmasa bile boyut farklılığı nedeniyle zımbanın daha erken değiştirilmesi gerektiği anlaşılmıştır.

Öncelikle her üç kaplamanın da endüstriyel ölçekte son derece iyi performans gösterdikleri söylenebilir. Diğer yandan kaplamaların sertlik değerleri ve sürtünme katsayılarındaki küçük farklılıklara rağmen performanslarında kayda değer bir farklılık olmadığı anlaşılmaktadır. Bu bağlamda TiN kaplamanın daha düşük sertliğe sahip olmasına karşın sürtünme katsayısının düşük olmasının diğer kaplamalar ile eşdeğer bir performans ortaya koyabildiği söylenebilir. Diğer yandan AlTiN kaplamaların daha yüksek sertliğe sahip olmakla birlikte daha yüksek sürtünme katsayılarına sahip olduklarının altı çizilmelidir. Dolayısı ile kaplamanın sertliği ve sürtünme katsayısının (zımba/sac malzeme çiftine ait) iki önemli parametre olduğu anlaşılmaktadır. Bu bağlamda yüksek sertlik ve düşük sürtünme katsayısı kombinasyonunun en iyi kombinasyon olduğu söylenebilir.

Zımba performansında ayrıca kaplamanın ana malzemeye yapışma direnci, kendi içerisinde mikroyapısal düzgünlüğü, kırılabilirliği (tokluk), kalınlığı gibi diğer parametrelerin de önemli olduğu gözden geçirilmelidir.

Kaynaklar

- [1] Pan M., Raob Y., 2009. An integrated knowledge based system for sheet metal cutting–punching combination processing. *Knowledge-Based Systems*, 22, 368-375.
- [2] Tang Z., Du H., Lang L., Jiang S., Chen J., Zhang J., 2018. Experimental investigation into the electropulsing assisted punching process of 2024T4 aluminum alloy sheet. *Journal of Materials Processing Technology*, 253, 86-98.
- [3] Capan L., 2015. *Metallere Plastik Şekil Verme, Caglayan Kitapevi*.
- [4] Hattallia V. L., Srivatsaa S. R., 2018. Sheet Metal Forming Processes – Recent Technological Advances. *Materials Today: Proceedings*, 5, 2564-2574.
- [5] Du R., Xu Y.S., 2002. A review on the sensing and on-line monitoring of sheet metal stamping operations. *Proceedings of the 5th International Conference on Frontiers of Design and Manufacturing (ICFDM'02)*. pp. 412-420.
- [6] Aronson R., 1998. *Intelligent Presses, Manuf. Eng.*
- [7] Beard T., 1989. New force in stamping process control *Mod. Mach. Shop.*, 61, 66-75.
- [8] Brueninghaus G., 1988. Process monitoring in the sheet metal processing industry, *VDI-Z.*, 130, 99-101.
- [9] Straffelini G., Bizzotto G., Zanon V., 2010. Improving the wear resistance of tools for stamping *Wear*, 269, 693-697.
- [10] Fernandes L., Silva F. J. G., Andrade M. F., Alexandre R., 2017. Increasing the stamping tools lifespan by using Mo and B4C PVD coatings. *Surface and Coatings Technology*, 325, 107-119.
- [11] 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, 4045-4051.
- [12] Fernandes L., Silva F. J. G., Andrade M. F., Alexandre R., 2017. Improving the punch and die wear behavior in tin coated steel stamping process. *Surface and Coatings Technology*, 332, 174-189.
- [13] Wang L., Nie X., Housden J., Spain E., 2008. Material transfer phenomena and failure mechanisms of a nanostructured Cr–Al–N coating in laboratory wear tests and an industrial punch tool application. *Surface and Coatings Technology*, 203, 816-821.
- [14] Holmberg K., Matthew A., 2009. *Coatings Tribology: Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering*, Elsevier.
- [15] Haubner R., 2013. The history of hard CVD coatings for tool applications at the University of Technology Vienna, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 41, 22-34.
- [16] Fukui H., 2016. Evolutional History of Coating Technologies for Cemented Carbide Inserts - Chemical Vapor Deposition and Physical Vapor Deposition, *SEI Technical Review*, 82, 39-45.
- [17] Mariano J.P., Lau K.H., Sanjurjo A., Caro, D., Casellas, Colominas C., 2006. TiSiN nanocomposite coatings by chemical vapor deposition in a fluidized bed reactor at atmospheric pressure (AP/FBR-CVD), *Surface & Coatings Technology*, 201, 2217–2225.
- [18] Chang C., Chen W.C., Tsai P.C., Ho W.Y., Wang D.Y., 2007. Characteristics and performance of TiSiN/ multilayers coating synthesized by cathodic arc plasma evaporation, *Surface & Coatings Technology*, 202, 987–992.
- [19] Kalss W., Reiter A., Derflinger V., Gey C., Endrino J.L., 2006. Modern coatings in high performance

- cutting applications. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 24, 399–404.
- [20] Zhang S.Y., Zhu W.G., 1993. TiN coating of tool steels, *Journal of Materials Processing Technology*, 39. 1993, 165-177.
- [21] Tilbrook M.T., Paton D.J., Xie Z., Hoffman M., 2007. Microstructural effects on indentation failure mechanisms in TiN coatings: Finite element simulations, *Acta Materialia*, 55, 2489–2501