

TEMPERLENMİŞ BEYİNİTİK BİR ÇELİĞİN BALİSTİK DAVRANIŞI

Ş. Hakan ATAPEK¹
Şadi KARAGÖZ²

ÖZET

Bu çalışmada, temperlenmiş beynitik bir çeliğin 7,62 mm kalibre bir zırh delici ile olan etkileşimi sonrasında meydana gelen hasar incelenmiştir. Mermi çarpma hızı 840 m/s olup atış sıfır derecelik bir açıda gerçekleştirilmiştir. Atış sonrası oluşan delinme yöresinden alınan numune üzerinde mikroyapısal ve fraktografik incelemeler yapılmıştır. Dağlanmış numunede, penetrasyon doğrultusuna yakın yörelerde orijinal mikroyapı morfolojisinin değiştiği ve kayma/adyabatik kayma bantlarının oluştuğu gözlenmiştir. Çeliğin delinme modu ise tipik bir taçyaprağı şeklinde açılmadır.

Anahtar Kelimeler : Zırh Çelikleri, Mikroyapı, Balistik, Delinme Modu

BALLISTIC BEHAVIOUR OF A TEMPERED BAINITIC STEEL

ABSTRACT

In this study, failure occurred after the interaction between an armor piercing 7.62 mm caliber projectile and a tempered bainitic steel was investigated. The shot was performed at zero degree with a projectile velocity of 840 m/s. After the shot, microstructural and fractographical examinations were carried out on the sample, taken from the perforated region. In the etched sample, it is observed that the morphology of the original microstructure has changed and shear/adiabatic shear bands formed in regions close to the direction of penetration. The perforation mode of the steel is a typical petalling.

Keywords: Armor Steels, Microstructure, Ballistic, Perforation Mode

1. GİRİŞ

Modern ateşli silahlar askerî ve sivil platformlarda yüksek seviye bir tehdidin oluşumuna neden olmaktadır. Günümüz koruma/zırh malzemeleri bu tür tehditlerin azaltılması açısından önemli bir rol oynamaktadır. Başlıca koruma/zırh malzemeleri olan çelik, seramik ve kompozit üzerine yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları bu açıdan önem kazanmıştır (Edwards

¹ Arş. Grv. Y. Müh., Kocaeli Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Müh.,
hatapek@kocaeli.edu.tr.

² Prof. Dr., Marmara Üniversitesi, Mekatronik Böl., karagoez@marmara.edu.tr.

ATAPEK-KARAGÖZ

ve Mathewson, 1997: 297-309; Demir ve diğ., 2008: 2009-2016; Gonçaves ve diğ., 2004: 307-316; Shokrieh ve Javadpour, 2008: 269-276).

Koruma malzemesi açısından gerekli ve yeterli şart, kinetik enerjili ve belirli bir geometriye sahip parçacığın (mermi vb.) özellikle insan ve mühimmata yönelik oluşturabileceği kaybı minimum seviyede tutabilmesidir (Gama ve diğ. 2001: 381-395). Yüksek hızlarda kinetik enerjili bir merminin zırh malzemesi olarak seçilen herhangi bir malzeme ile olan etkileşiminde malzeme sertliği bir bariyer rolü oynayacaktır (Maweja ve Stumpf, 2008: 140-153). Zırh malzemeleri ve balistik performanslarına ilişkin olarak yapılan çoğu araştırma malzeme sertliğinin balistik performansı üzerine doğrudan etkisi olduğunu ortaya koymuştur (Dikshit, 2000: 95-99; Borvik ve diğ., 2009: 948-964; Hu ve diğ., 2002: 99-107). Malzemenin sertliğindeki artış balistik korumanın o kadar iyi olacağını göstermiştir (Sangoy ve diğ., 1988: 319-326).

Kullanılabilirlik ve etkin bir balistik koruma sağlaması açısından zırh çelikleri oldukça popüler bir malzemedir (Sangoy ve diğ., 1988: 319-326). Martenizitik/beynitik veya temperlenmiş martenzit/beynit esaslı homojen haddelenmiş zırh çelikleri günümüzde tank, obüs, zırhlı muhabere araçlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Karagöz ve diğ., 2008: 579-586). Tüm bunların yanı sıra yüksek seviye koruma gereksinimi duyulan sivil uygulamalarda (para kasaları, banka koruma duvarları, zırhlı özel araç vb.) çelik vazgeçilmez bir malzeme olmuştur. Yüksek mukavemet, sertlik ve iyi seviye tokluk değerlerine sahip zırh çelikleri, kinetik enerjili bir mühimmatın enerjisinin absorblanması söz konusu iken de popüler bir malzemedir (Matsubara ve diğ., 1972: 435-443).

Mermi penetrasyonu ile birlikte mermi uç geometrisinin bozulması ve mermi enerjisinin bir kısmının başlangıçta gevrek kırılma enerjisine ve daha sonrasında plastik şekil değişimine harcanarak sünek bir kırılmaya yol açması zırh çeliklerinin kullanımına yönelik avantaj sağlamaktadır (Sorensen ve diğ., 1991: 107-111). Tüm bu davranış için çeliğin sahip olduğu mikroyapı önemli bir faktördür (Jena ve diğ., 2008: 1088-1096). Balistik performansın geliştirilmesine katkı sağlayacak mikroyapıyı belirleyen her bir kademe (alaşımlama, döküm, ısı işlem vb.) ise üzerinde çalışılması gereken başlıkları ortaya koymaktadır.

Bu çalışma kapsamında düşük alaşımlı bir çeliğin fiziksel metalurjik esaslar doğrultusunda mikroyapı bileşenleri tanıtılacak olup, sahip olduğu temper beynit yapısının 7,62 mm kalibre bir zırh delici ile olan balistik etkileşimi irdelenecektir.

ATAPEK-KARAGÖZ

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1. Malzeme ve Yöntem

Deneysel çalışmada kullanılan çeliğe ait kimyasal kompozisyon Tablo 1'de verilmiştir. Döküm sonrası slab, cehennemlikte 1230 °C'de homojenizasyon tavlamasından geçtikten sonra fırından deşarj edilmiştir. Kombine hadde giriş sıcaklığı ortalama 1200 °C olarak tespit edilen slab, kombine haddede 11 pasoda sorun yaşanmadan 12,7 mm kalınlığa haddelenmiştir. Haddelene sonrası çıkan levhalar birbiri üstüne istiflenerek soğumaya bırakılmıştır. İstenilen boyutlara kesilen 1 adet levha balistik test için 300x1000 mm boyutlarında hazırlanmıştır.

Çelik plaka üzerine uygulanan ısı işleme koşulları ise Tablo 2'de verilmiştir. Çelik, standartlara uygun olarak (MIL-A-12560 U.S. Military Specification, 1990) östenitleştirme - su verme - temperleme süreçlerinden geçirilmiştir. Tablo 3 tüm bu süreç sonrası çelik plakaya ait mekanik özellikleri sunmaktadır.

Tablo 1. Deneysel çeliğin kimyasal kompozisyonu (%-kütle).

C	Mn	Si	Ni	Co	Cr	Mo
0.23	0.19	0.19	0.04	2.35	1.4	0.5
Nb	V	Ti	B	P	S	Fe
0.08	0.08	0.01	0.01	0.01	0.01	Balans

Tablo 2. Deneysel çelik için ısı işleme koşulları. Östenitleştirme sonrası suda soğutma işlemi uygulanmıştır.

Östenitleştirme İşlemi	Temperleme İşlemi
1020 °C / 60dk.	540 °C / 60dk.

Tablo 3. Geliştirilen zırh çeliklerinin mekanik özellikleri.

Sertlik (HRC)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Tokluk* (J)
36	1270	9.80	8.20

* -40 °C darbe tokluk değeri

ATAPEK-KARAGÖZ

Çelik plaka üzerine 840 m/s'lik bir hıza sahip 7,62 mm kalibre zırh delici ile 30 metre seviyesinde bir mesafeden atış yapılmıştır. Atış koşulları ise Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Deneysel çelik üzerine yapılan atış koşulları.

Mesafe	30 m
Atış açısı	0°
Mermi cinsi ve numarası	API 55, 7.62-51 Zırh Delici
Ortam sıcaklığı	18.7 °C
Bağıl nem (%)	% 42

Atış öncesi çelik plakadan ve atış sonrası delinme yöresi kesitinden alınan numuneler sırası ile 120, 320, 600 ve 1000 no'lu zımparalama sonrası 3 µm'luk elmas pasta ile parlatılmıştır. Numuneler nihai olarak % 3'lük nital ile dağlanarak metalografik inceleme amaçlı olarak hazırlanmıştır. Mikroyapısal ve fraktografik etüdü makro ve mikro seviyede ışık mikroskobu ve tarama elektron mikroskobu ile yapılmıştır. Tüm çalışmalar Kocaeli Üniversitesi - Metalurji ve Malzeme Mühendisliği araştırma laboratuvarlarında yapılmıştır.

3. BULGULAR

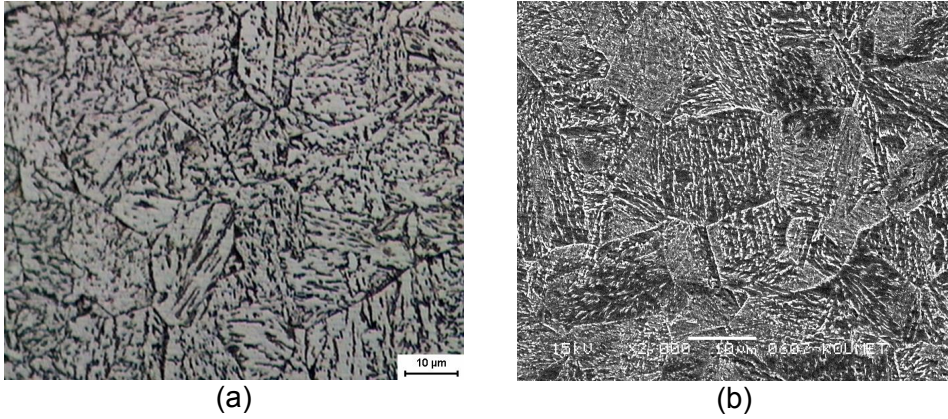
3.1. Mikroyapısal Karakterizasyon

Östenitleştirme ve hızlı bir su verme sonrası düşük alaşımlı çelikler çoğunlukla martenzitik/beynitik bir mikroyapıya sahiptirler. Bu durumda çeliğin özellikle mukavemet ve sertlik değerleri yüksek olmakla birlikte tokluk değerleri oldukça düşüktür. Çeliğin tokluk özelliklerinin artırılması amacı ile temperleme olarak bilinen bir başka ısıl işleme ihtiyaç duyulur. Matriks bu işlem sonrasında çoğunlukla temper martenzit/beynit yapısı sergiler (Verhoeven, 1975) .

Temper beynit yapısı, lata benzeri ferritin yanı sıra ferrit lata içi ve lata sınırında varolan yoğun iç çökelti içermektedir. İç çökelti çoğunlukla sementit olarak bilinen demir karbür çökeltileridir. Alaşım karakteristiğine de bağlı olarak temperlemenin 500-600 °C sıcaklık aralığında uygulaması sonucu ikincil sertlik ile çelik daha sert bir hale getirilebilir. Matriks ile uyumlu veya yarı-uyumlu olan ve daha çok nano boyutta alaşım karbürlerin ince dağılımı bu sertlik kazanımını sağlamaktadır (Karagöz ve Andren,

ATAPEK-KARAGÖZ

1992: 386-394). Şekil 1a'da çeliğin dağlanmış konumda ışık mikroskop görüntüsü verilmiştir. Yapı, tipik bir temper beynit yapısı göstermektedir. Gri kontrast ferritik matriksi göstermekte olup temperleme ile ayrılmış latta ferritleri ifade etmektedir. Refleksiyon tipi ışık mikroskop görüntülemeye yoğun iç çökelti ise koyu siyah kontrastlarda görülmektedir. Şekil 1b'de verilen tarama elektron mikroskop görüntüsü de ışık mikroskop görüntüsü ile elde edilen gözlemleri desteklemektedir. Östenit tane sınırları belirgin olarak gözlenmektedir ve su verme ile beynitik dönüşüm bu yörelerden başlamıştır.

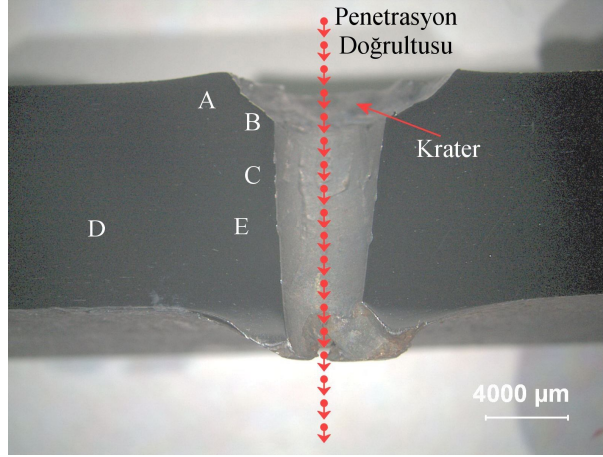


Şekil 1. Deneysel çeliğe ait temper beynit yapısı. (a) Işık mikroskop ve (b) tarama elektron mikroskop görüntüsü.

Atış sonrası delinme yöresi kesitine ait makro görüntü Şekil 2'de verilmiştir. Penetrasyon başlangıcında çelik plakanın ön yüzeyinde belirli derinlik ve uzunlukta bir krater oluşmuştur. Kinetik enerjili mermi ile olan ilk etkileşimde çeliğin plastik şekil değişimi göstermeksizin gevrek bir şekilde kırılması kaçınılmaz olacaktır. Makro görüntü üzerinde alfabetik harfler ile işaretlenmiş yörelere ait mikroyapı görüntüleri ise Şekil 3'te verilmiştir. Şekil 3a'da mermi penetrasyonunun bir sonucu olarak oluşan yüksek gerinme oranlarında matriks içerisinde oluşan tipik bir adyabatik kayma bant yapısı gösterilmiştir. Çok yüksek gerinme oranlarında, örneğin bazı metal kesme işlemleri, yüksek hızlı (100-3600 m/s) mermi darbeleri veya patlama sonucu kırılmalarda malzemeler "adyabatik kayma" olarak bilinen oldukça yüksek lokal deformasyon gösterirler (Mills ve diğ., 1987; Beckman ve Finnegan, 1973). Adyabatik kaymada, malzemenin toplam plastik deformasyonu, relatif olarak deforme olmamış matriks içinde dar bantlar hâlinde yoğunlaştırılır. Adyabatik kayma, özellikle çelik, alüminyum, titanyum alaşımları ve pirinç gibi çeşitli malzeme gruplarında gözlenir (Mills ve diğ.,

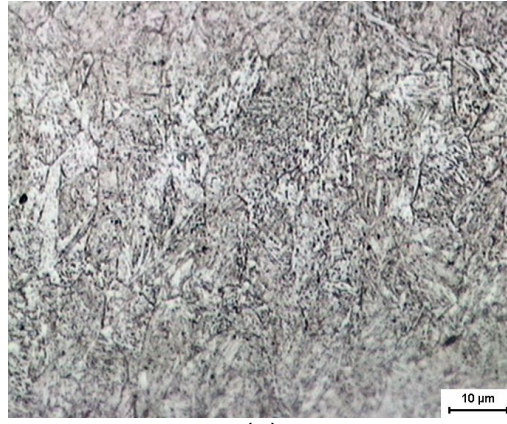
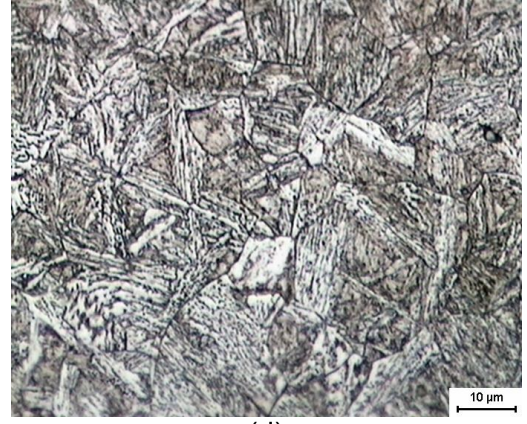
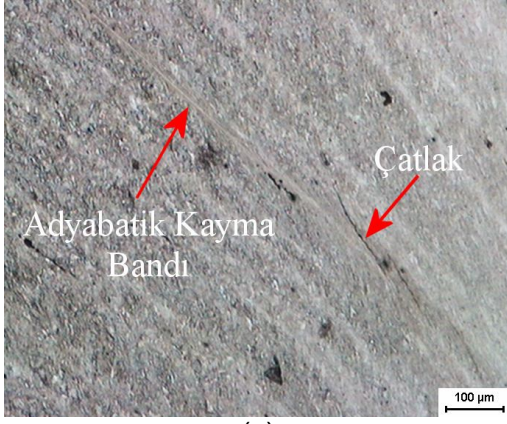
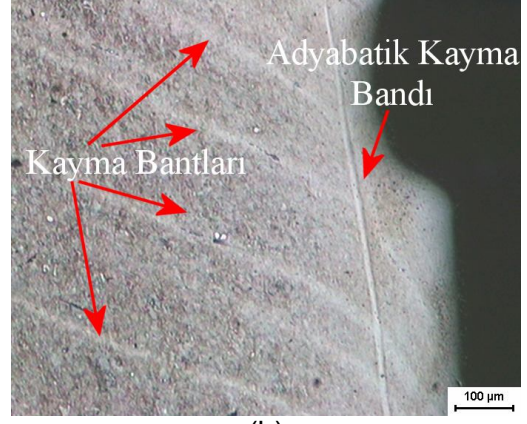
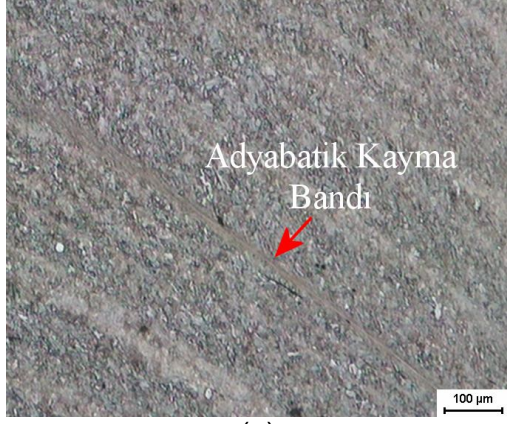
ATAPEK-KARAGÖZ

1987). Şekil 3b'de adyabatik kayma bantlarının yanı sıra tipik plastik akış bantları da örneklenmiştir. Plastik akış izleri mermi penetrasyon doğrultusu boyunca oluşmuştur. Adyabatik kayma bant oluşumları zırh çeliğinde birçok delinme modunun oluşumuna neden olabilmektedir. Bu tür bir oluşum çoğunlukla delinme ve disk şeklinde parçalanma mekanizmaları için çatlak çekirdeklenme ve ilerleme yörelerini içermektedir (Sangoy ve diğ., 1988: 319-326). Şekil 3c'den de görüleceği üzere adyabatik kayma bantı üzerinde ve yakın bir yörede çatlak ilerlemesi söz konusudur. Yüksek oranda deformasyonla birlikte Şekil 3d'de örneklenen orijinal mikroyapı, Şekil 3e'de görüleceği üzere bozulmuş (dejenere) bir şekilde gözlenmektedir. Dejenere mikroyapı bu hâli ile yoğun pekleşme göstermiş bir matriks gibi davranacaktır.



Şekil 2. Atış sonrası delinme yöresinin kesitine ait bir makro görüntü.

ATAPEK-KARAGÖZ



ATAPEK-KARAGÖZ

Şekil 3. Makro görüntü üzerinde alfabetik harfler ile işaretlenmiş yörelere ait mikroyapılar. (a) Adyabatik kayma bant yapısı, (b) beyaz bantlar hâlinde matriks içi belirgin adyabatik kayma bantları, (c) adyabatik kayma bant nedenli olarak matriks içi çatlak oluşumu, (d) orijinal matriks mikroyapısı, (e) penetrasyona yakın bir yörede dejenere olmuş matriks mikroyapısı.

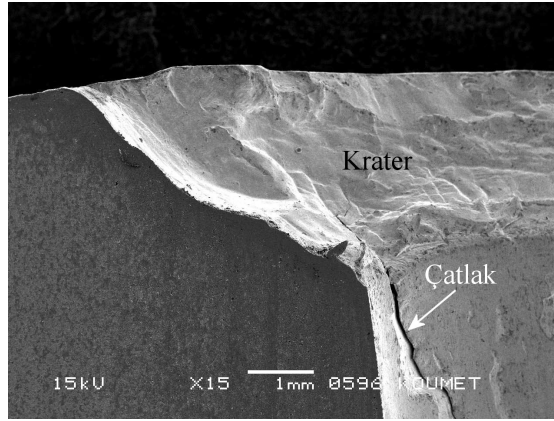
3.2. Fraktografik İncelemeler

Statik veya dinamik yüklenme sonrasında hasara uğramış malzemelerin kırılma yüzeyleri üzerine yapılan çalışmalar fraktografik etüdüler dahilinde değerlendirilir. Fraktografik bir etüd için yüklenme koşulları, malzemenin mikroyapısı ve dış etkenler (sıcaklık, korosif ortam vb) önem arz etmektedir (Mills ve diğ., 1987).

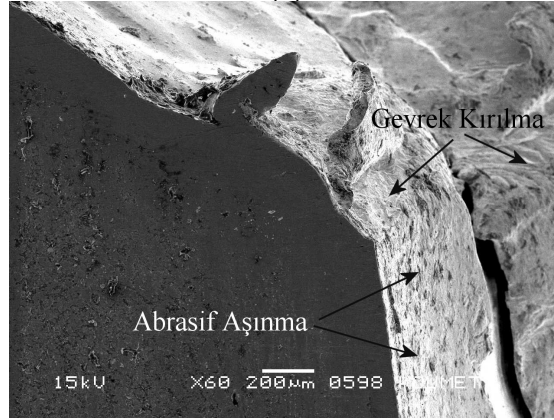
Şekil 4'te atış sonrası delinme yöresinin kesiti üzerine yapılan fraktografik etüd sonrasında elde edilen tarama elektron mikroskop görüntüleri verilmiştir. Mermi ile olan etkileşimde ön yüzeyde belirli bir derinlik ve uzunlukta krater oluşumu söz konusudur (Şekil 4a). Matriks içi mikroboşluklar aşırı bir yüklenme durumunda birleşerek veri bir çatlağın oluşumuna katkı sağlayıp kırılmanın hızlı bir şekilde gerçekleşmesine olanak verebilir. Şekil 4a'da bu tür bir çatlak oluşumu örneklenmiştir. Penetrasyonun başlangıç aşamasında malzemenin herhangi bir plastik şekil değişimi göstermeksizin gevrek olarak hasar uğraması kaçınılmazdır. Gevrek kırılmalar Şekil 4b'de gösterildiği üzere elektron mikroskop görüntülemeye parlak düzlemler olarak gözlenirler. Bu parlak düzlemler çoğunlukla klivaj düzlemleri olup düşük indisli ve yüksek atom yoğunluklu yörelerdir. Bu yöreler yüklenme altında pekleşerek gevrekleşebilirler (Mills ve diğ., 1987). Diğer taraftan merminin malzeme içerisinde ilerlemesi süresince yüksek derecede abrasif aşınmalar gerçekleşmektedir. Şekil 4b'de gevrek kırılma ve abrasif aşınmış yöreler ok uçları ile gösterilmiştir. Penetrasyon çıkış yöresinde de giriş yöresine benzer olarak çatlak oluşumları gözlenmiştir (Şekil 4c). Merminin malzeme ile olan ilk etkileşiminde sahip olduğu yüksek kinetik enerjisinin çoğunluğu gevrek kırılmaya harcanmıştır. Burada meydana gelen etkileşim ile mermi uç geometrisinin deformasyonu artacak ve mermi etkinliği azalacaktır. Bu tür oluşumlar zırh çeliğinin balistik performansının anlaşılması açısından da önemlidir. Malzeme içerisinde ilerleyen merminin geriye kalan enerjisinin ise daha çok malzemenin şekil değişimine harcanması hedeflenir ve bu durumda malzemenin plastik şekil değişimi söz konusudur. Şekil 4c'de görüleceği üzere çıkış hattında belirli bir oranda ana malzemedan dışarı doğru uzama gerçekleşmiştir. Bu ise plastik şekil değişimini işaret etmektedir. Çeliğin delinme modu değerlendirilecek olunursa, tipik bir

ATAPEK-KARAGÖZ

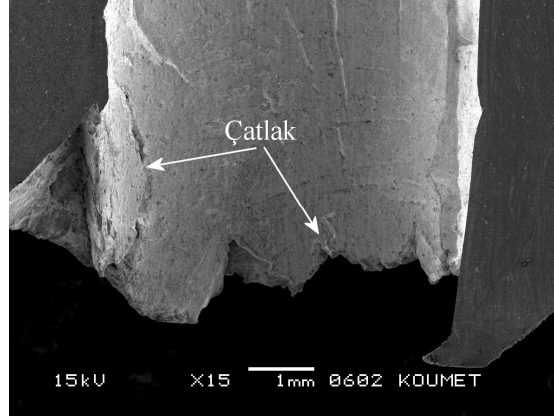
taçyaprağı şekilli açılım gözlenmiştir. Açılma ile birlikte ana malzemeden kopmalar gerçekleşebilir. Tüm bu hasar oluşumlarında malzemenin dinamik yüklenme altında gerinme sertleşmesi nedeni ile yöresel sertlik farklılıkları içermesi, adyabatik kayma bant yapıları nedeni ile çatlak çekirdeklenmesinin teşvik edileceği, merminin kinetik enerjisinin çoğunlukla gevrek kırılmaya ve geri kalanının plastik şekil değişimine harcanağı göz önüne alınmalıdır. Çelik sertliğinin ve tokluğunun bu oluşumları etkileyen önemli birer kavram olduğu da göz ardı edilmemelidir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4. Delinme sonrası çelikte oluşan hasara ait tarama elektron mikroskop görüntüleri. (a) Mermi nüfuziyeti ile krater ve adyabatik kayma bant nedenli çatlak oluşumları, (b) gevrek kırılma ve abrasif aşınma yöreleri, (c) çıkış hattında çatlak oluşumları ve taçyaprağı şekilli açılma.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada veri bir kompozisyonda uygulanan ısıtma işlem çevrimi (östenitleştirme – su verme – temperleme) sonrasında 36 HRC sertliğe sahip temper beynit matriksli bir çelik elde edilmiştir. 840 m/s hıza sahip 7,62 mm kalibre zırh delici ile yapılan balistik atış testi sonrasında mikro seviyede meydana gelen değişimler ve hasar oluşumu irdelenmiştir.

Çelik, uygulanan ısıtma işlem sonrasında temper beynitlik bir matrikse sahiptir. Orijinal matriks, belirgin östenit tane sınırlarından su verme sonrasında dönüşmüş beynitin temperleme sonrası ayrışmasını göstermektedir. Merminin malzeme içerisine olan nüfuziyeti esnasında orijinal matriks aşırı yüklenme nedeni ile bozulmuştur. Penetrasyon doğrultusu boyunca matriks içerisinde adyabatik kayma bant yapıları ve çatlak oluşumları gözlenmiştir. Adyabatik kayma bantları lokal heterojenlik, deformasyon ve ısınma nedeniyle olarak termo-mekanik kararsızlığın bir sonucunda oluşmaktadır. Mikroskobik incelemelerde bu yüzeyler ince bantlar şeklinde gözlemlenmekte olup çatlaklar bu bantlar üzerinde ilerleyebilir ve malzemenin hızlı bir şekilde hasar uğramasına neden olabilir.

Atış sonrası delinme yöresinin kesiti üzerine yapılan fraktografik etüdü mikroyapısal karakterizasyonu destekleyecek tarzdadır. Merminin ön yüzeye hızlı ve yüksek bir enerji ile çarpması sonrasında belirli bir

ATAPEK-KARAGÖZ

derinlikte krater oluşturduğu gözlenmiştir. Mikroyapı içerisinde varolan mikroboşlukların birleşmesi ve özellikle adyabatik kayma bantlarının katkısı ile çatlak oluşumları ve ilerlemesi gözlenmiştir. Merminin malzeme içerisinde ilerleme doğrultusu boyunca yoğun abrasif aşınmaların gerçekleştiği, etütlerde belirlenen bir diğer karakteristiktir. Mermi çıkış hattında giriş yöresine benzer olarak çatlak oluşumları gözlenmiştir. Buna ek olarak malzemede plastik akış nedeni ile belirli bir uzama belirlenmiştir. Delinme modu açısından deneysel çelikte taçyaprağı şekilli açılma söz konusudur.

KAYNAKÇA

- Beckman, E., Finnegan, S. A., 1973. **Metallurgical Effects at High Strain Rates**, Plenum Press, USA.
- Borvik, T., Dey, S., Clausen, A. H., 2009. Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles. **International Journal of Impact Engineering**, 36 (7): 948-964.
- Demir, T., Übeyli, M., Yıldırım, R. O., 2008. Investigation on the ballistic impact behavior of various alloys against 7.62 mm armor piercing projectile. **Materials & Design**, 29 (10): 2009-2016.
- Dikshit, S. N., 2000. Influence of hardness on perforation velocity in steel armour plates. **Defence Science Journal**, 50 (1): 95-99.
- Edwards, M. R., Mathewson, A., 1997. The ballistic properties of tool steel as a potential improvised armour plate. **International Journal of Impact Engineering**, 19 (4) : 297-309.
- Gama, B. A., Bogetti, T. A., Fink, B. K., Yu, C. J., Claar, D., Eifert, H. H., Gillespie, J. W., 2001. Aluminum foam integral armor: a new dimension in armor design. **Composite Structures**, 52 (3-4): 381-395.
- Gonçalves, D. P., de Melo, F. C. L., Klein, A. N., Al-Qureshi, H. A., 2004. Analysis and investigation of ballistic impact on ceramic/metal composite armour. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 44 (2-3): 307-316.
- Hu, C. J., Lee, P. Y., Chen, J. S., 2002. Ballistic performance and microstructure of modified rolled homogeneous armor steel. **Journal of the Chinese Institute of Engineers**, 25 (1): 99-107.
- Jena, P. K., Kumar, K. S., Krishna, V. R., Singh, A. K., Bhat, T. B., 2008. Studies on the role of microstructure on performance of a high strength armour steel', **Engineering Failure Analysis**, 15: 1088–1096.
- Karagöz, Ş., Andren, H. O., 1992. Secondary hardening in high speed steels. **Z. f. Metallkunde**, 83: 386-394.

ATAPEK-KARAGÖZ

- Karagöz, Ş., Atapek, H., Yılmaz, A., 2008. Araçlarda su verilmiş ve temperlenmiş çeliklerin zırh malzemesi olarak kullanımı ve balistik açıdan mekanik özellikleri. **IV. Uluslararası Otomotiv Teknolojileri Kongresi, Bildiriler Kitabı**, 579-586.
- Matsubara H., Osuka, T., Kozasu, I., Tsukada, K., 1972. Optimization of metallurgical factors for production of high strength, high toughness steel plate by controlled rolling. **Transactions ISIJ**, 12: 435-443.
- Maweja, K., Stumpf, W., 2008. The design of advanced performance high strength low-carbon martensitic armour steels: Part 1. Mechanical property considerations, **Materials Science and Engineering: A**, 485 (1-2): 140-153.
- Mills, K., Davis, J. R., Destefani, J. D., 1987. **Fractography**. ASM Handbook, Vol. 12, Materials Park, Ohio/USA.
- Sangoy, L., Meunier, Y., Pont, G., 1988. Steels for ballistic protection. **Israel Journal of Technology**, 24: 319-326.
- Shokrieh, M. M., Javadpour, G. H., 2008. Penetration analysis of a projectile in ceramic composite armor. **Composite Structures**, 82 (2): 269-276.
- Sorensen, B. R., Kimsey, K. D., Silsby, G. F., Scheffler, D. R., Sherrick, T. M., de Rosset, W. S., 1991. High velocity penetration of steel targets. **International Journal of Impact Engineering**, 11 (1): 107-111.
- U. S. Military Specification, 1990. **MIL-A-12560H(MR) -Armor Plate, Steel, Wrought, Homogenous (For Use in Combat-Vehicles and for Ammunition Testing)**, USA.
- Verhoeven, J. D., 1975. **Fundamentals of physical metallurgy**. John Wiley & Sons, NY.