

**Wojciech TARASIUK<sup>\*</sup>, Dominik WĘGRZYN<sup>\*\*</sup>**

## **WPLYW PRĘDKOŚCI GŁOWICY W PROCESIE HARTOWANIA LASEROWEGO NA WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNE WARSTWY WIERZCHNIEJ**

### **THE INFLUENCE OF LASER HEAD SPEED IN THE PROCESS OF LASER HARDENING ON THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF SURFACE LAYERS**

#### **Słowa kluczowe:**

hartowanie laserowe, warstwa wierzchnia, zużycie ściernie

#### **Key words:**

laser hardening, top layer, abrasive wear

#### **Streszczenie**

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych wpływu prędkości głowicy na właściwości tribologiczne stali 16MnCr5 w procesie hartowania laserowego. Badania tarciove przeprowadzono na testerze typu trzpień-tarcza T-11, a przeciwpróbkę stanowiła tarcza silikatowa. Parametrem wyznaczającym jakość uzyskanej warstwy była intensywność zużycia. Moc wiązki lasera

---

<sup>\*</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok, Polska.

<sup>\*\*</sup> Universidade da Beira, Rua Marguês D'Ávila e Bolama, 6201-001 Covilhã, Portugal.

w każdym z badanych przypadków była identyczna, a prędkość głowicy laserowej zmieniała się w zakresie od 10 do 40 mm/s. Analiza uzyskanych wyników dostarczyła nam informacji na temat jakości warstwy wierzchniej w zależności od prędkości głowicy hartującej. Stal 16MnCr5 hartowana laserowo odznacza się niską intensywnością zużycia przy prędkościach głowicy nieprzekraczającej 30 mm/s.

## WPROWADZENIE

Technologia laserowa jest coraz częściej wykorzystywana w procesach obróbki cieplnej, spawania bądź cięcia metali. Urządzenia wykorzystywane w tych procesach są wyposażone w głowice laserowe sterowane komputerowo [L. 5, 6]. Pozwala to np. na precyzyjne hartowanie wybranych fragmentów, może skrócić czas obróbki i eliminuje konieczność nagrzewania całego detalu. Łatwość automatyzacji procesu pozwala na płynną zmianę jego parametrów, np. mocy wiązki laserowej, prędkości głowicy. Wadą stosowanych rozwiązań może być powstawanie powierzchni o zróżnicowanych właściwościach, co może być skutkiem źle dobranych odległości między ścieżkami hartowniczymi. Gdy te odległości są zbyt duże, może powstać obszar niezahartowany. Jeżeli odległości między ścieżkami będą zbyt małe, zahartowane miejsca mogą ulegać odpuszczeniu, co zmniejsza twardość warstwy wierzchniej i obniża odporność na zużycie ściernie warstwy obrabianej. Przy założeniu stałej gęstości mocy lasera na powierzchni obrabianego detalu ważne jest dobranie właściwej prędkości głowicy laserowej [L. 1, 2].

Alternatywnymi sposobami minimalizowania intensywności zużycia mogą być metody nanoszenia powłok z materiałów o wysokiej odporności na ścieranie, np. węglików spiekanych, ceramik. Jednak często proces nanoszenia takich powłok jest drogi i pracochłonny. W niektórych przypadkach zastosowane powłoki są kruche, co eliminuje je z części zastosowań [L. 9].

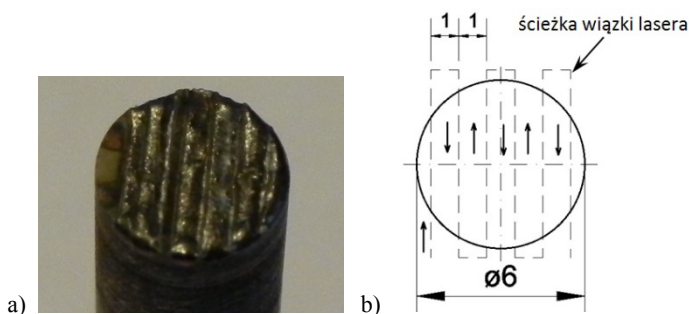
Hartowanie laserowe wydaje się tanią alternatywą pozwalającą na dużą ingerencję w sterowanie procesem w celu uzyskania powierzchni o wysokich parametrach użytkowych, np. wysokiej odporności na ścieranie.

## BADANIA DOŚWIADCZALNE

### Dobór materiału i wykonanie próbek

Do badań wytypowano stal 16MnCr5. Stosuje się ją na elementy maszyn [L. 3, 4], które mogą być narażone na zmienne obciążenia, oraz na elementy narażone na intensywne zużycie ściernie, np. płyty form do produkcji wyrobów silikatowych [L. 8, 9]. Próbkę wykonano w kształcie walca o średnicy 6 mm i poddano nawęglaniu gazowemu w temp 930°C przez 6 godzin. Powierzchnia

czołowa została zahartowana laserowo (**Rys. 1**) w Fizyko-Technicznym Instytucie Akademii Nauk Białorusi. Stanowisko laserowe „Kometa-UNILAM” charakteryzowało się maksymalną mocą wiązki laserowej 1 kW i dokładnością pozycjonowania stołu 0,1 mm [L. 5].



**Rys. 1. Przykład powierzchni próbki ze stali 16MnCr5 hartowanej laserowo: a) powierzchnia rzeczywista, b) schemat ścieżki hartującej wiązki lasera**

Fig. 1. An example of the sample surface with a laser-hardened steel 16MnCr5: a) an actual, b) a diagram of the path of the laser beam

Badanym parametrem wpływającym na jakość hartowanej powierzchni była prędkość głowicy laserowej. Pozostałe parametry jak moc wiązki, odległość powierzchni próbki były za każdym razem identyczne. **Tabela 1** zawiera podstawowe parametry zastosowanego hartowania laserowego.

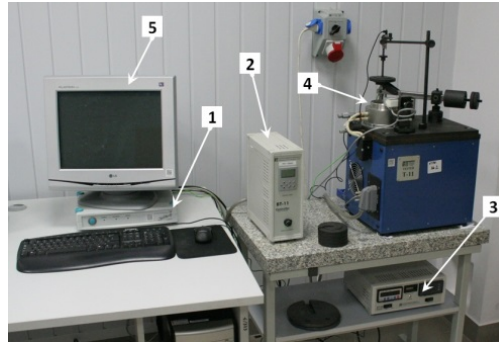
**Tabela 1. Parametry procesu hartowania laserowego**

Table 1. Laser hardening parameters

Nr próbki	Materiał	Moc wiązki lasera [W]	Prędkość głowicy laserowej [mm/s]	Jednostkowa powierzchnia, na którą oddziaływał laser [mm <sup>2</sup> ]
1.	16MnCr5	600	10	0,8
2.			20	
3.			30	
4.			40	

## Badania tarciove

Tak przygotowane próbki poddano badaniom na testerze typu trzpień-tarcza T-11 (**Rys. 2**).



**Rys. 2. Stanowisko do badań tribologicznych typu trzpień-tarcza T-11: 1 – cyfrowy wzmacniacz Spider 8, 2 – sterownik BT-11, 3 – sterownik BT-03, 4 – czujniki i przetworniki pomiarowe, 5 – zestaw komputerowy**

Fig. 2. Schema of the T-11 position for the tribological pin-on-disc-type test: 1 – digital amplifier 8 Spider, 2 – the controller BT-11, 3 – the controller BT-03, 4 – sensors and transducers, 5 – a set of computer

Głównym parametrem przyjętym do oceny jakości powierzchni była intensywność zużycia ściernego, którą wyznaczono według zależności [L. 8]:

$$I = \frac{M_1 - M_2}{SF} \left[ \frac{mg}{m^3} \right] \quad (1)$$

gdzie:  $M_1$  i  $M_2$  – masa próbki przed i po teście [mg],  
 $S$  – droga tarcia [m],  $F$  – powierzchnia przekroju próbki [m<sup>2</sup>].

$$S = \pi \cdot R_T \cdot t \cdot n \quad [m] \quad (2)$$

gdzie:  $R_T$  – promień tarcia [m],  
 $t$  – czas testu [min],  
 $n$  – prędkość obrotowa przeciwp próbki.

Przeciwp próbkę stanowiła tarcza silikatowa. Ze względu na nietypowy materiał przeciwp próbki obciążenie dobrano doświadczalnie. Kryterium doboru obciążenia stanowiła wytrzymałość tarczy silikatowej. Czas trwania próby określono na  $t = 1200$  s, tj. czas, przy którym daje się określić intensywność zużycia. Badania przeprowadzono przy naciskach jednostkowych  $p = 1,25$  MPa.

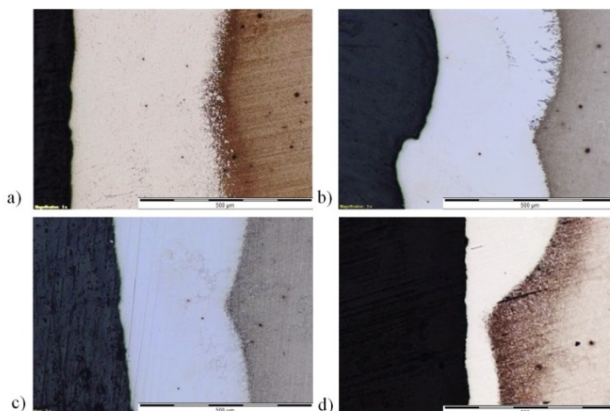
## WYNIKI BADAŃ

Przykład przeciwpróbki (przed i po badaniu) oraz próbki po badaniu przedstawiono na **Rys. 3**.



**Rys. 3.** Przykłady: a) przeciwpróbka, b) przeciwpróbka po badaniu, c) próbka po badaniu  
 Fig. 3. Examples: a) counterspecimen, b) counterspecimen after the test, c) the sample after the test

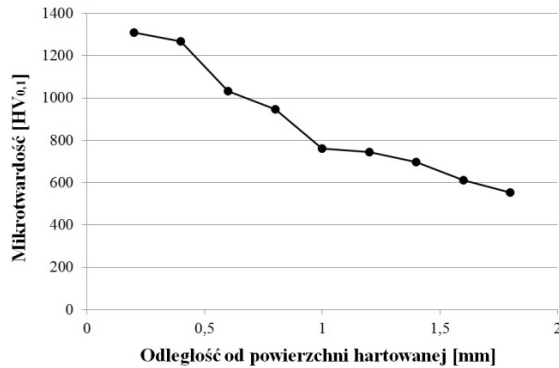
W zależności od prędkości głowicy laserowej ścieżki zahartowanego materiału różnią się wielkością. Wykonane zglądy metalograficzne próbek stali 16MnCr5 pokazują, jak zmienia się kształt ścieżki w zależności od prędkości głowicy laserowej (**Rys. 4**). W całym zakresie badanych prędkości uzyskujemy mikrostrukturę, w której ścieżki zachodzą na siebie, a jej właściwości są zbliżone do jednorodnych. Próbki wykonane z prędkością 40 mm/s posiadają wyraźne ślady ścieżek, które nie w pełni zachodzą na siebie, co widać na **Rys. 4**.



**Rys. 4.** Struktura stali 16MnCr5 po hartowaniu laserowym: a) 10 mm/s, b) 20 mm/s, c) 30 mm/s, d) 40 mm/s

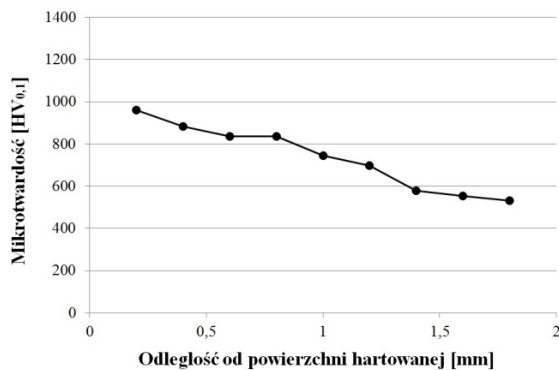
Fig. 4. 16MnCr5 steel structure after laser hardening: a) 10 mm/s, b) 20 mm/s; c) 30 mm/s; d) 40 mm/s

Dla badanych próbek zmierzono rozkład mikrotwardości w warstwie wierzchniej. Pomiarów dokonano w środku zahartowanej ścieżki, na głębokości do 1,8 mm, co 0,2 mm. Wyniki przedstawiono na **Rys. 5÷8**.



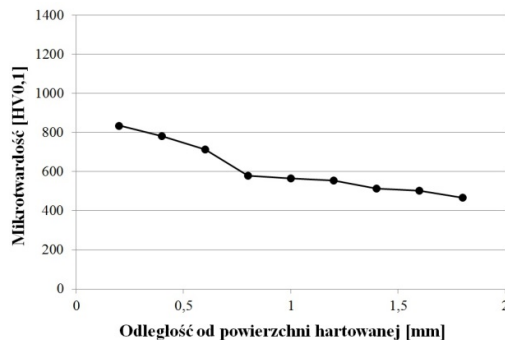
Rys. 5. Rozkład mikrotwardości w warstwie wierzchniej próbki ze stali 16MnCr5 hartowanej laserowo, prędkość głowicy 10 mm/s

Fig 5. Hardness of face sample after laser hardening steel 16MnCr5, speed laser head 10 mm/sec



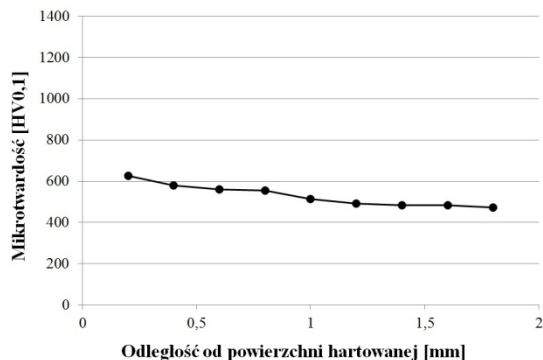
Rys. 6. Rozkład mikrotwardości w warstwie wierzchniej próbki ze stali 16MnCr5 hartowanej laserowo, prędkość głowicy 20 mm/s

Fig 6. Hardness of face sample after laser hardening steel 16MnCr5, speed laser head 20 mm/sec



Rys. 7. Rozkład mikrotwardości w warstwie wierzchniej próbki ze stali 16MnCr5 hartowanej laserowo, prędkość głowicy 30 mm/s

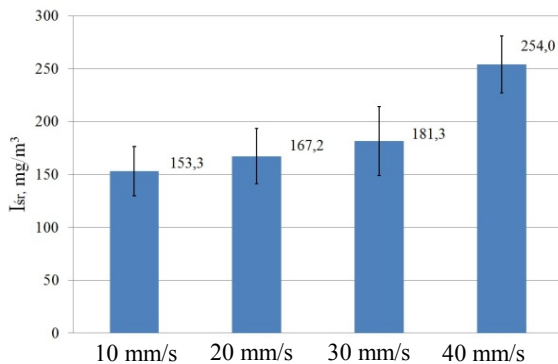
Fig 7. Hardness of face sample after laser hardening steel 16MnCr5, speed laser head 30 mm/sec



**Rys. 8. Rozkład mikrotwardości w warstwie wierzchniej próbki ze stali 16MnCr5 hartowanej laserowo, prędkość głowicy 40 mm/s**

Fig 8. Hardness of face sample after laser hardening steel 16MnCr5, speed laser head 40 mm/sec

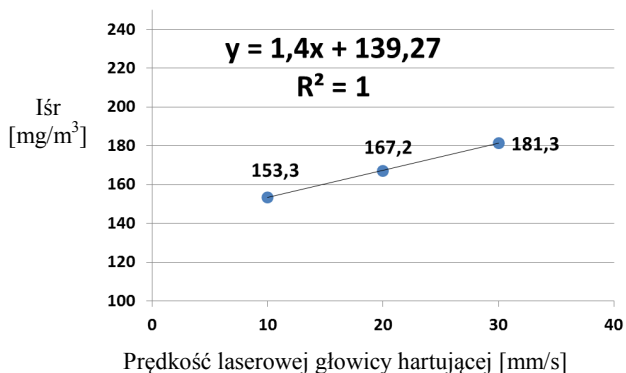
Wyniki intensywności zużycia w zależności od prędkości głowicy hartującej pokazano na **Rys. 9**.



**Rys. 9. Zależność intensywności zużycia od prędkości głowicy laserowej wraz z odchyleniem standardowym**

Fig. 9. Dependence of wear intensity of the laser head speed with a standard deviation

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że hartowanie laserowe stali 16MnCr5 z prędkościami głowicy powyżej 30 mm/s (przy podanych wcześniej parametrach procesu) powoduje skokowy wzrost intensywności zużycia. Dlatego w dalszych rozważaniach pominięto wartości uzyskane przy prędkości 40 mm/s, a na podstawie pozostałych wyznaczono równanie opisujące zależność intensywności zużycia od prędkości głowicy hartującej (**Rys. 10**).



**Rys. 10. Równanie opisujące zależność intensywności zużycia od prędkości głowicy laserowej**  
 Fig. 10. The equation describing the dependence of intensity on the speed of laser head

Na podstawie uzyskanego równania, które ma postać:

$$y = 1,4x + 139,27 \quad (3)$$

możemy prognozować, jaka będzie intensywność zużycia w zależności od prędkości głowicy hartującej, przyjmując pozostałe parametry procesu takie jak przyjęto w eksperymencie.

## PODSUMOWANIE

Odporność na zużycie ściernie stali 16MnCr5 poddanej hartowaniu laserowemu różni się w zależności od prędkości głowicy lasera. Zbadany zakres obejmował prędkości: 10, 20, 30 i 40 mm/s, a moc wiązki lasera była identyczna w każdej próbie i wynosiła 600 W. Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że:

- stal 16MnCr5 może być hartowana laserowo w celu uzyskania warstwy odpornej na zużycie ściernie,
- hartowanie laserowe z prędkościami do 30 mm/s dla badanej stali wytwarza warstwę o właściwościach zbliżonych do jednorodnych i wysokiej twardości,
- stal 16MnCr5 hartowana laserowo z prędkością do 30 mm/sec charakteryzuje się wysoką odpornością na zużycie ściernie, a zwiększenie prędkości hartowania powyżej 30 mm/sec skutkuje skokowym spadkiem odporności na zużycie ściernie.
- wyznaczone równanie w postaci:  $y = 1,4x + 139,27$  pozwala na prognozowanie intensywności zużycia ściernego w zależności od prędkości laserowej głowicy hartującej.

*Praca finansowana z pracy własnej W/WM/20/2013.*



## LITERATURA

1. Астапчик С.А., Голубев В.С., Маклаков А.Г.: Лазерные технологии: возможности и перспективы обработки деталей и инструмента, Тяжелое машиностроение 2004, No. 2, pp. 33–37.
2. Астапчик С.А., Голубев В.С., Маклаков А.Г. и др.: Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке. Минск, Белорусская наука, 2008, pp. 256.
3. Babul T., Nakonieczny A., Senatorski J.: Możliwości podwyższenia właściwości eksploatacyjnych stali narzędziowych przy wykorzystaniu procesów nawęglania. Inżynieria Powierzchni nr 2, 2006, s. 3–8.
4. Dobrzański L.A.: Wprowadzenie do nauki o materiałach. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007.
5. Gordienko A.I., Golubev V.S., Volocko A.T., Tarasiuk W.: Lazernye tehnologii obrabotki materialov: VII-th International symposium on mechanics of materials and structures, Wydaw. Politechniki Białostockiej, Augustów 2013, pp. 82–83.
6. Lisiecki A.: Welding of thermomechanically rolled fine-grain steel by different types of lasers, Arch. Metall. Mater. 59(4), 1625–1631 (2014). DOI: 10.2478/amm-2014-0276.
7. Napiórkowski J.: Elementarne procesy zużycia tworzyw wielofazowych w piasku luźnym. Inżynieria Rolnicza, nr 2 (120), s. 71–77.
8. Tarasiuk W., Szczucka-Lasota B., Piwnik J., Majewski W.: Tribological Properties of Super Field Weld with Micro-Jet Process, Advanced Materials Research, Vol. 1036, 2014, pp. 452–457.
9. Tarasiuk W., Krupicz B.: Analiza właściwości materiałów stosowanych na płyty form cegły silikatowej, Acta Mechanica & Automatica, Vol. 3, No 1, 2009, s. 107–110.

## Summary

**The paper presents the results of research on the tribological properties of steel 16MnCr5 after laser hardening. The quality of the hardened surface was influenced by laser head speed. The study was conducted on friction tester pin-on-disc type T-11, and a counter sample disc was silicate. The intensity of wear determined the quality of the surface layer. Based on the results, we obtained information about the laser head speed to temper steel 16MnCr5 to maintain a high resistance to wear.**