

Tadeusz BURAKOWSKI\*, Wojciech NAPADŁEK\*\*

## RODZAJE TEKSTUROWANIA LASEROWEGO W TRIBOLOGII

### KINDS LASER TEXTURING IN TRIBOLOGY

#### Słowa kluczowe:

areologia, warstwa powierzchniowa, teksturowanie laserowe, tribologia

#### Key-words:

aerology, superficial layer, laser texturing, tribology

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono ideę teksturowania laserowego, autorski podział oraz schematy ideowe różnych tekstur. Przedstawiono wybrane przykłady technologiczne zastosowania teksturowania laserowego w areologii na przykładzie żeliwa szarego EN-GJL300 i stopu aluminium ENAW-2618A (PA31). Przedstawiono również kierunki rozwoju teksturowania w areologii i tribologii.

---

\* Politechnika Koszalińska, Instytut Mechatroniki, Nanotechnologii i Techniki Próżniowej, ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin; Instytut Mechaniki Precyzyjnej, ul. Duchnicka 3, 01-796 Warszawa; tel. (22) 663 43 19, tel. kom. 601374812, e-mail: wach@imp.edu.pl

\*\* Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, Wydział Mechaniczny, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 49, tel.: (0-22) 683-73-57, 683-70-46, kom. 664494297; e-mail: wnapadlek@wat.edu.pl

## TEKSTUROWANIE I JEGO RODZAJE

Pojęcie tekstura (łac. *textura* – tkanina, złączenie, od łacińskiego *texo* – tkam, plotę) ma kilka tradycyjnych znaczeń [L. 1]:

- w *poligrafii* oznacza dawny rodzaj pisma (lub czcionki drukarskiej),
- w *geologii* – budowę wewnętrzną skały rozpatrywaną pod względem przestrzennego rozmieszczenia jej składników i stopnia wypełnienia przestrzeni,
- w *krystalografii* – uprzywilejowaną przestrzenną wzajemną orientacją krystalitów w materiale polikrystalicznym; układ ziaren, warstw lub włókien w wewnętrznej budowie materiału.

Rozmieszczenie składników, stopień ich wykryzalizowania, orientacja, wielkość i kształt ziaren w materiale polikrystalicznym nazywane jest często *teksturą krystaliczną* [L. 2]. Tekstura powoduje anizotropię właściwości fizycznych krystalitów i udziela się całemu polikrystalicznemu agregatowi.

Rozróżnia się [L. 3]:

- pod względem formy: teksturę krystaliczną *osiową* – wykazującą orientację krystalitów względem pewnego kierunku i *płaską* – wykazującą orientację krystalitów względem pewnej płaszczyzny;
- pod względem przyczyny powodującej powstawanie tekstury krystalicznej: *odlewniczą* – spowodowaną kierunkowym odpływem ciepła w trakcie stygnięcia odlewu, *odkształceniową* – spowodowaną kierunkowym działaniem sił podczas odkształcania plastycznego materiału na zimno, *rekrystalizacyjną* – powstającą w trakcie rekrystalizacji, zależną głównie od tekstury odkształcenia, składu stopu i temperatury wyżarzania.

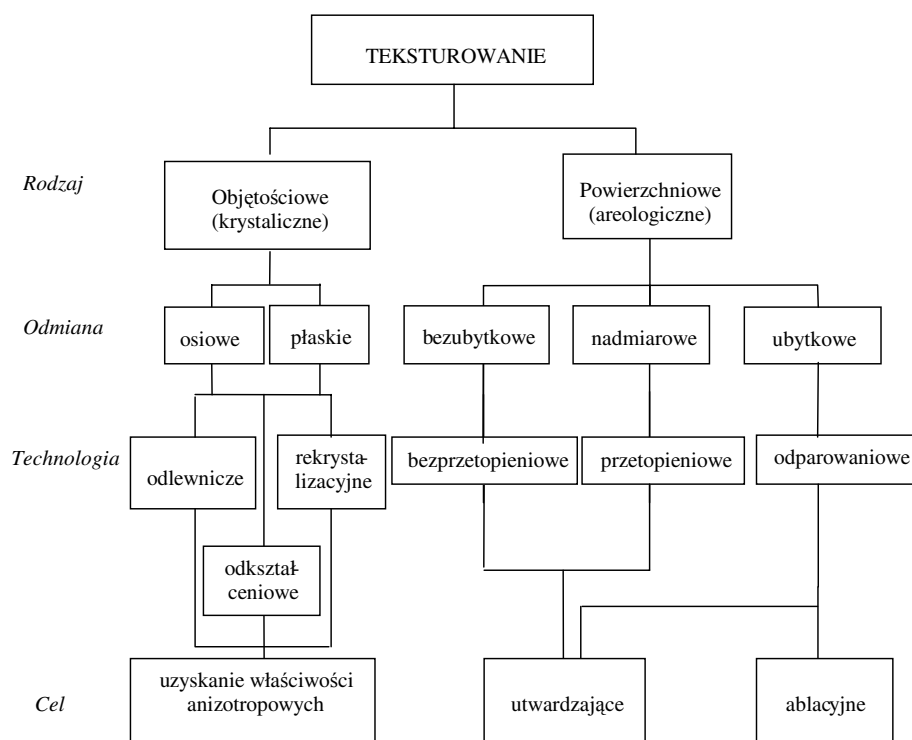
Wytwarzanie tekstury można nazwać teksturoowaniem: osiowym, płaskim, odlewniczym, odkształceniowym, rekrystalizacyjnym.

Ze zrozumiałych względów ww. pojęcia tekstury dotyczyły uprzywilejowanej budowy przestrzennej materiałów, którą można nazwać teksturą objętościową.

Wraz z rozwojem areologii pojawiła się potrzeba nadania nazwy powierzchniowemu rozmieszczeniu elementów budowy powierzchni i wypełnieniu przez nie powierzchni. Zaproponowano nazwę rastru [L. 4], wzoru (ang. *pattern*) [L. 5] i – chronologicznie najpóźniej – tekstury (ang. *textura*, *texturing*) [L. 6]. Ta ostatnia nazwa wydaje się być najwłaściwsza [L. 7–9].

Logiczne wydaje się być wyodrębnienie (**Rys. 1**):

- tekstury objętościowej – rozumianej jako uprzywilejowana i uporządkowana struktura krystaliczna materii w określonej objętości,
- tekstury powierzchniowej – rozumianej jako uprzywilejowane i uporządkowane rozmieszczenie elementów budowy warstwy wierzchniej lub powłoki albo stereometrii powierzchni, jako relief powierzchni, któremu mogą być poddawane warstwy powierzchniowe po różnych obróbkach areologicznym. Rozmieszczenie takie powstaje w wyniku określonych obróbek powierzchniowych, najczęściej w wyniku wiązkowych obróbek areologicznych, realizowanych przez wiązkę fotonów, elektronów lub jonów. Nadawanie powierzchni uporządkowanego rozmieszczenia powtarzalnych elementów budowy przez wykorzystanie wysokoenergetycznych ww. technologii wiązkowych – to teksturuwanie powierzchniowe: *laserowe, elektronowe, plazmowe*.



**Rys. 1. Podział rodzajów teksturowania**

Fig. 1. The partition kinds of texturing

Jednym z bardzo nowoczesnych źródeł energii w procesie teksturowania jest promieniowanie laserowe, które dzięki bardzo wielu zaletom fizycznym oraz technologicznym stosowane jest z dużym powodzeniem w technologiach areologicznych głównie na potrzeby inżynierii powierzchni oraz tribologii.

### RODZAJE I CEL POWIERZCHNIOWEGO TEKSTUROWANIA LASEROWEGO

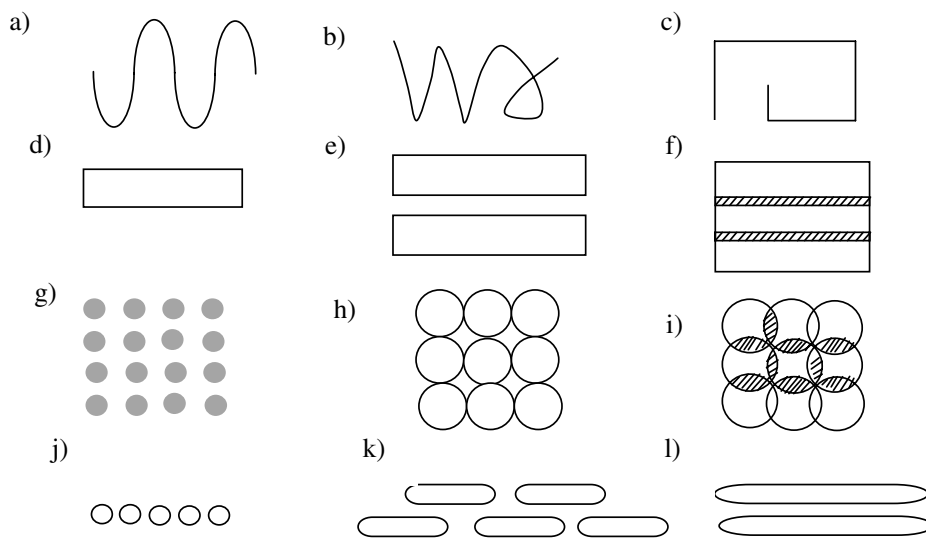
Powierzchniowe teksturowanie laserowe może być (**Rys. 1**):

- bezubytkowe: bez usuwania materiału z obszaru padania wiązki laserowej (plamki laserowej), a tylko ze zmianami strukturalnymi materiału obrabianego, zachodzącymi bądź w wyniku przemian fazowych w stanie stałym, bądź w wyniku przetapiania i krzepnięcia materiału; takie technologie to *hartowanie laserowe bezprzetopieniowe i przetopieniowe*;
- nadmiarowe: przebiegające z doprowadzeniem materiału (składnika) stopującego do obszaru padania wiązki laserowej (bądź przez wdmuchiwanie składnika stopującego do jeziora laserowego, bądź przez naniesienie przetapianej laserowo powłoki z tego składnika); takie technologie to *stopowanie laserowe wtopieniowe i natopieniowe*;
- ubytkowe: przebiegające z usuwaniem materiału z obszaru padania wiązki laserowej, w wyniku odparowania i ablacji materiału obrabianego; takie technologie to laserowe: *znakowanie, grawerowanie, tworzenie „kieszni smarowych” (obszarów na zasobniki smaru), chropowacenie powierzchni, udarowe umacnianie laserowe* (kulowanie laserowe).

Celem powierzchniowego teksturowania laserowego w odniesieniu do tribologii jest:

- utwardzanie materiału warstwy wierzchniej przez: *hartowanie, stopowanie, kulowanie*, stosowane do przenoszenia większych obciążeń i zmniejszenia zużycia tribologicznego,
- usuwanie (ablacja) *materiału przez odparowanie* stosowane w celu utworzenia kieszni smarowych dla smaru stałego lub ciekłego, umożliwiających zmniejszenie współczynnika tarcia i zużycia tribologicznego lub w celu kierunkowego chropowacenia powierzchni.

Na **Rys. 2** pokazano schematy typowych wzorów tekstury – mogą one występować samodzielnie lub mogą być tworzone różne kombinacje.



**Rys. 2. Schematy typowych wzorów tekstury: a – sekwencyjna; b, c – dowolnie programowana; d–f paskowa; g – punktowa; h, i – kropkowa; j–l – rzędowa; na rys. f, i pokazano przypadek zachodzenia na siebie ścieżek i kropek laserowych (miejsca potencjalnego odpuszczenia materiału)**

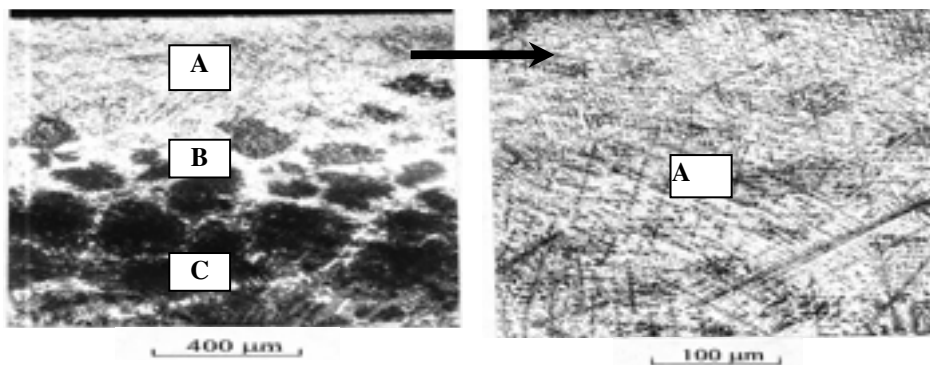
Fig. 2. The scheme of the typical texture pattern: a – sequential; b, c – arbitrarily programmed; d–f – bar code; g – punctual; h, i – dotted; j–l – row; on fig. f, i was showed the case of drawing ahead on oneself paths and laser dots (the place of the potential tempering of the material)

### **LASEROWE TEKSTUROWANIE UTWARDZAJĄCE BEZPRZETOPINIOWE**

Bezprzetopieniowe tekstutowanie utwardzające z wykorzystaniem promieniowania laserowego ma na celu w bardzo krótkim czasie spowodowanie przemian fazowych polegających na nagraniu modyfikowanego materiału do odpowiedniej temperatury oraz szybkie lub ultraszybkie samochłodzenie, powodujące najczęściej hartowanie w celu utwardzenia wybranych fragmentów warstw powierzchniowych.

Przykładem tej technologii może być hartowanie bezprzetopieniowe żeliwa szarego niskostopowego (**Rys. 3**), które realizowane jest przy gęstości mocy  $q \sim 10^2 \div 2 \cdot 10^4 \text{ W/cm}^2$ , czasie ekspozycji  $10^{-2} \div 1 \text{ s}$ . Przeważnie szybkość nagrzewania wynosi ok.  $10^6 \text{ K/s}$ , a szybkość chłodzenia ok.  $10^4 \text{ K/s}$  [**L. 10**].

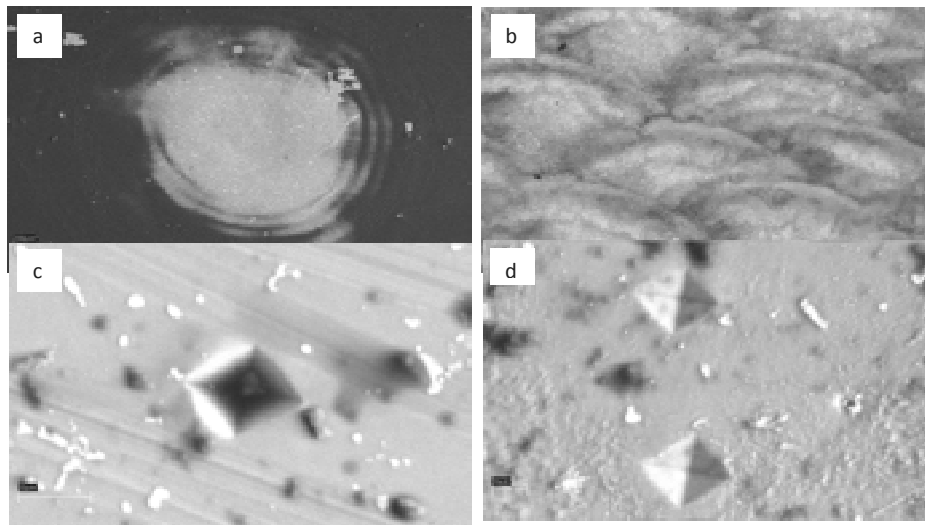
W czasie hartowania laserowego np. stopów żelaza z węglem na ogół wraz ze wzrostem zawartości węgla wzrasta twardość i grubość warstwy zahartowanej, przy zastosowaniu tych samych parametrów obróbki, a także zmniejsza się zużycie triboologiczne. Spowodowane jest to m.in. wzrostem hartowności oraz obniżeniem temperatury austenitizacji.



**Rys. 3. Mikrostruktura żeliwa szarego niskostopowego w charakterystycznych strefach laserowej obróbki cieplnej bez przetopienia: A – strefa utwardzenia (odbielenia), B – strefa wpływu laserowej obróbki cieplnej, C – materiał rodzimy przed laserową obróbką cieplną**

Fig. 3. The microstructure of grey cast iron low-alloy in the characteristic zones of the laser thermal processing without melting: A – zone of hardening, B – the zone of the influence of the laser thermal processing, C – the native material before the laser thermal processing

Inną nowoczesną i bardzo perspektywiczną technologią jest umacnianie warstwy wierzchniej materiałów konstrukcyjnych falą uderzeniową generowaną impulsem laserowym (udarowe umacnianie laserowe, z ang. LSP – *Laser Shot Peening*) (Rys. 4) [L. 11]. Wykorzystuje się tu zjawisko fizyczne tzw. ablacji laserowej występującej przy bardzo dużej gęstości mocy i krótkich czasach ekspozycji promieniowania laserowego (od pikosekund do kilkudziesięciu nanosekund). Zjawisku temu towarzyszy fala uderzeniowa o wysokiej amplitudzie ciśnienia, osiągającej wartości nawet do 10 GPa, dzięki czemu w bardzo krótkim czasie następuje lokalne odkształcenie plastyczne, powodujące wytworzenie istniejących naprężeń normalnych i stycznych, korzystnie wpływających na właściwości użytkowe warstwy wierzchniej, zwłaszcza na odporność zmęczeniową. Lokalne umocnienie (utwardzenie) może być wytworzone w sposób programowalny i dlatego istnieje możliwość tekstuowania sekwencyjnego warstwy powierzchniowej materiałów konstrukcyjnych.



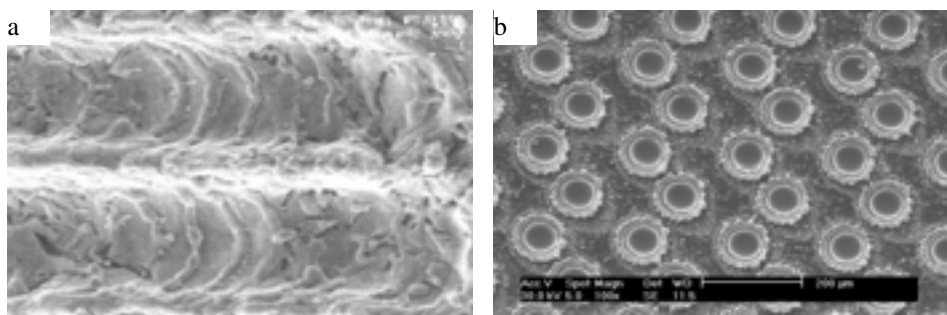
**Rys. 4. Topografia powierzchni stopu aluminium ENAW-2618A (PA31) po udarowym umacnianiu laserowym impulsem lasera Nd:YAG: *a* – powierzchnia próbki polerowana, pokryta grafitem koloidalnym i ograniczona warstwą inercyjną (5 mm słup wody + szkło), *b* – strefy umocnione w wariacie przykrycia 50%; *c, d* – widok charakterystycznych odcisków wgłębnika po badaniach mikrotwardości ( $F = 50G$ ) w materiale wyjściowym (*c*) oraz w materiale umocnionym laserowo LSP w wariacie z rysunku *a* – pomiar w środkowej strefie umocnienia, gęstości energii ok.  $33 J/cm^2$ , czas trwania impulsu 10 ns, jeden impuls laserowy, mikroskopia elektronowa skaningowa (SEM)**

**Fig. 4.** Topography of the surface of the alloy of aluminum PA31 (ENAW-2618A) after percussive strengthening the laser impulse of the laser Nd: YAG: *a* the surface of the sample polishes, covered the graphite colloidal and limited the inert shell (5. mm the prism of water + the glass), *b* – zones strengthened in the variant of the lap 50%, *c, d* – view of characteristic imprints after the investigations of microhardness ( $F = 50 G$ ) in the material output (*c*) and in the material strengthened by laser LSP in the variant from the drawing *a* – measurement in the central zone of the consolidation, near the thickness of energy approx.  $33 J/cm^2$ , time of duration of the impulse 10 ns, one the laser impulse the electron microscopy scanning (SEM)

## LASEROWE TEKSTUROWANIE ODPAROWANIOWE

Realizując procesy technologiczne przy dużych i bardzo dużych gęstościach mocy promieniowania laserowego (np.  $10^7 \div 10^{11} W/cm^2$ ) oraz przy krótkich czasach ekspozycji (nano- lub pikosekundowe), można realizować laserowe tekstutowanie odparowaniowe.

W procesach mikroobróbki laserowej dąży się, aby osiągnąć efekt czystej ablacji laserowej (gwałtowne rozrywanie wiązań atomowych oraz przejście materii w stan pary bez tzw. efektu termicznego). Efekt termiczny towarzyszący ablacji powoduje uboczne skutki w postaci intensywnego nagrzewania, topnienia oraz ekstruzji ciekłego materiału, powstania strefy wpływu ciepła, w której zachodzą przemiany fazowe i strukturalne. Strefy oddziaływania laserowego mogą mieć wtedy różne kształty, np. tekstura rzędowa (**Rys. 5a** – mikrokanaly) lub tekstura kropkowa (**Rys. 5b** – półczaszce), stanowiących np. zasobniki smarowe dla elementów maszyn pracujących w różnych systemach tribologicznych.



**Rys. 5. Przykładowe efekty oddziaływania impulsowego promieniowania laserowego ze stopami Fe–C: a) tekstura rzędowa, b) tekstura kropkowa: laser impulsowy Nd: YAG ( $\lambda = 1064$  nm), czas ekspozycji 25 ns, częstotliwość repetycji 3 kHz**

Fig. 5. The example effects of the influence of the impulse radiation of laser with the alloys of Fe–C: a) row texture, b) the texture dot: the laser impulse Nd:YAG ( $\lambda = 1064$  nm), time of the exposure 25 ns, the frequency of the repetition 3 kHz

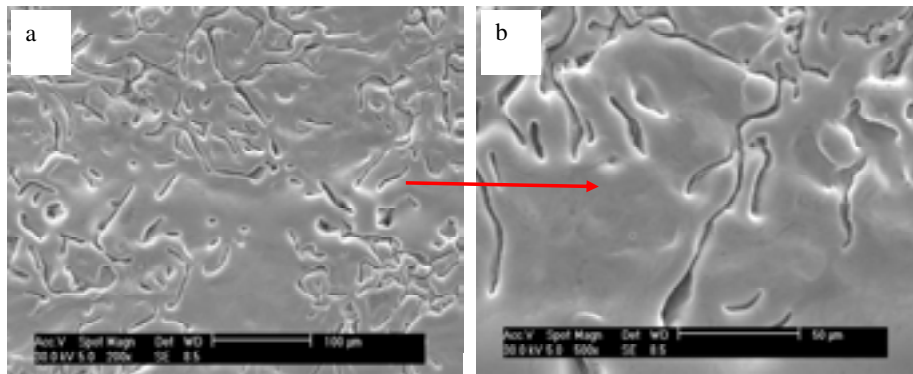
## LASEROWE TEKSTUROWANIE PRZETOPIENIOWE

Jedną z bardzo często stosowanych technologii laserowych jest teksturowanie przetopieniowe. Przy długich czasach nagrzewania (od kilku do kilkudziesięciu milisekund) warstwy powierzchniowej materiałów lub elementów maszyn, dominuje głównie efekt cieplny, powodujący nagrzewanie i topnienie obrabianych materiałów. W wyniku zjawiska samochłodzenia zachodzą przemiany fazowe, powodujące rozdrobnienie mikrostruktury. Bardzo często następuje wzrost mikrotwardości, głównie dla stopów Fe–C i innych stopów podlegających procesom hartowania. Przy dużych mocach laserów po skupieniu wiązki laserowej na małej powierzchni można uzyskać bardzo wysokie gęstości mocy, co dzięki



dobremu przewodnictwu cieplnemu pozwala na bardzo głębokie wnika-  
nie promieniowania w materiał. Uzyskuje się wtedy warstwę powierzch-  
niową nadtopioną lub przetopioną o wysokich walorach technologicz-  
nych oraz głębiej położoną strefę (strefa wpływu ciepła SWC). We  
współczesnych procesach technologicznych, głównie dotyczących mody-  
fikacji warstwy powierzchniowej, dominują obróbki w mikro- i nanoska-  
li. Dzięki temu obróbki te mogą być stosowane jako ostateczne (wykoń-  
czające). Przy bardzo krótkich impulsach (mikro-, nano-, piko i femtose-  
kundowych) oddziaływanie cieplne jest bardzo małe lub tak znikome, że  
dominuje praktycznie czysta ablacja. Przy tak krótkich czasach oddzia-  
ływania i odpowiednim zogniskowaniu wiązki laserowej, można uzyskać  
bardzo duże gęstości mocy, a zachodzące procesy przemian fazowych są  
zbliżone do amorfizacji. Taką obróbkę często nazywa się szkliwieniem  
(amorfizacją). Oddziaływanie promieniowania laserowego jest na ogół  
bardzo małe i płytkie (od kilkudziesięciu nano- do kilkudziesięciu mi-  
krometrów), w szczególnych przypadkach kilkuset mikrometrów.

Jednym z charakterystycznych przykładów tego typu teksturowania  
jest mikronadtapianie warstwy powierzchniowej żeliwa szarego niskos-  
topowego (**Rys. 6**). Stosując np. głowicę Galvo i odpowiednie opro-  
gramowanie można osiągnąć dobre efekty wysokiej precyzji i powtarzal-  
ności procesu.

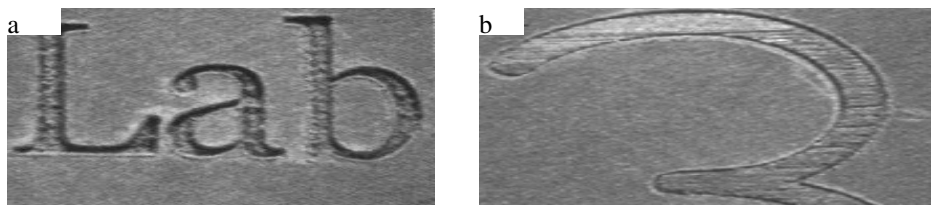


**Rys. 6. Topografia powierzchni żeliwa szarego niskostopowego po mikroteksturo-  
waniu laserowym przetopieniowym**

Fig. 6. The topography of the surface of the grey cast iron after melt laser microtexturing

## LASEROWE TEKSTUROWANIE UBYTKOWE (GRAWEROWANIE)

Technologie laserowe znalazły zastosowanie w inżynierii powierzchni również przy tekstutowaniu ubytkowym, np. grawerowaniu warstwy powierzchniowej materiałów metalowych niemetalowych oraz elementów maszyn. Chcąc uzyskać trwałą i estetyczną teksturę powierzchniową wykorzystuje się najczęściej zjawisko ablacji laserowej z efektem termicznym oraz wyrzucaniem i częściowym odparowaniem obrabianego materiału. Przykłady grawerowania elementów metalowych przedstawiono na rys. 7. Dzięki nowoczesnym systemom laserowym (np. laser włóknowy z głowicą Galvo) uzyskuje się bardzo precyzyjne i powtarzalne tekstury, które mogą być również wykorzystywane do opisywania, znakowania, tworzenia ozdobnych tekstów oraz wytwarzania tekstur we współczesnych węzłach tribologicznych.



Rys. 7. Przykład tekstutowania ubytkowego (grawerowania) na elementach metalowych

Fig. 7. The example decrease texturing of (engraving) on metal elements.

## PODSUMOWANIE I KIERUNKI ROZWOJU TEKSTUROWANIA LASEROWEGO

Przedstawiony w artykule autorski podział tekstutowania laserowego porządkuje i systematyzuje rodzaje, odmiany, stosowane technologie oraz stawiane cele tej nowoczesnej metodzie, coraz szerzej stosowanej w modyfikacji warstwy wierzchniej materiałów i elementów maszyn.

Aby właściwie dobrać aplikację technologiczną tekstutowania laserowego dla wybranego elementu maszyny lub elementów węzła tribologicznego, należy dokładnie rozpoznać warunki pracy oraz charakter zużycia. Należy pamiętać, że na pierwszym etapie projektowania procesu należy dobrać właściwie długość fali promieniowania laserowego, gdyż wpływa ona w bardzo istotny sposób na jego absorpcyjność oraz procesy ablacji laserowej. Im mniejsza długość promieniowania, tym większa

precyzja geometryczna oddziaływania, ale również mniejsza głębokość strefy oddziaływania ze względu na mniejszą energię w impulsie oraz znacznie mniejszą głębokość wnikania w warstwę wierzchnią. Należy pamiętać także, że mniejsze długości fali promieniowania laserowego skutecznie oddziałują na tworzywa sztuczne oraz powłoki lakierowe.

W procesach technologicznych teksturowania laserowego bardzo istotnym czynnikiem jest czas oddziaływania impulsu laserowego na materiał. Przy bardzo krótkich czasach ekspozycji wiązki laserowej (czasy piko- i femtosekundowe) występuje tzw. „czysta ablacja”, ale występują również bardzo płytkie strefy wnikania promieniowania laserowego w materiał, a tym samym występują także małe strefy przemian strukturalnych. Dla takich parametrów teksturowania laserowego można osiągnąć bardzo dobre wyniki modyfikacji warstwy wierzchniej, ale tylko w skali od nano do mikro.

W procesie doboru parametrów teksturowania laserowego należy również zastosować właściwy rozkład gęstości mocy (np. Gaussa, top head, prostokątny itp.), gdyż wpływa to w bardzo istotny sposób na kształt teksturowanej strefy oraz jednorodność oddziaływania promieniowania. Aby uzyskać oczekiwany efekt technologiczny, należy dla danej długości promieniowania dobrać właściwą (optymalną) gęstość mocy promieniowania laserowego.

Aby uzyskać właściwą i powtarzalną topografię powierzchni, należy zastosować w procesach teksturowania laserowego nowoczesne źródła laserowe, które zapewniają wysoką jakość procesu. Dzięki nowoczesnym systemom optycznym oraz precyzyjnemu sterowaniu elektronicznemu (np. sterowanie CNC, głowice Galvo) uzyskuje się bardzo wysokie dokładności w skali mikro-, a nawet naometrycznej.

W oparciu o przeprowadzoną analizę literatury oraz badania własne należy stwierdzić, że teksturowanie laserowe może mieć bardzo szerokie zastosowanie technologiczne w areologii, a w szczególności tribologii. Istotne znaczenie technologiczne ma rodzaj tekstury i stopień wypełnienia powierzchni (stosunek oraz pojemność kieszeni smarowych powierzchni teksturowanej do powierzchni całkowitej), co pozwala na regulację właściwości tribologicznych i ich adaptację do warunków pracy elementu maszyny w węzle tribologicznym. Analiza cech teksturalnych systemów areologicznych umożliwia przewidywanie kierunku wzrostu właściwości areologicznych.

Dzięki bardzo szybkiemu wzrostowi postępu technicznego w konstrukcjach laserów i optyki laserowej, dynamicznemu rozwojowi monito-

ringu procesów współczesnych obróbek laserowych, przewiduje się znaczne rozszerzenie obszaru zastosowań w areologii oraz wychodzenie poza obszary tradycyjne, nie tylko w budowie maszyn, ale także w skali mikro- i nanotechnologii, będących przyszłością w elektronice, kosmonautyce, lotnictwie, technice wojskowej, medycynie i innych.

*Praca naukowa finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2007–2010 jako projekt badawczy rozwojowy R15-0025-04/2008*

## LITERATURA

1. Słownik wyrazów obcych. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1970.
2. Wielka Encyklopedia Powszechna PWN. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1962.
3. Encyklopedia Techniki – Metalurgia, Wydawnictwo „Śląsk” Katowice 1978.
4. Burakowski T., Wierzchoń T.: Inżynieria powierzchni metali. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1995.
5. Burakowski T., Wierzchoń T.: Surface engineering of metals. CRC Press, Boca Raton – London – New York – Washington 1999.
6. Antoszewski B.: Kształtowanie warstw powierzchniowych dla poprawy własności eksploatacyjnych węzłów tarcia (w druku). Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2010.
7. Soveja A., Jouvard J. M., Grevey D.: Metal surface laser texturing multiphysics modeling of a single impact effect. Excerpt from the proceedings of the COMSOL Users Conference 2007 Grenoble.
8. Dobrzański L.A., Drygała A., Pank P., Lipiński M., Zięba P.: Development of the laser method of multicrystalline silicon surface texturization Archives of Materials Science and Engineering Vol. 38 Issue 1 July 2009.
9. Marian Victor: Lubrication of textured surface. International Conference Universitaria Enngineering, Petrosani 17–19 October 2002, vol. 2.
10. Napadłek W., Sarzyński A., Marczak J.: Kulowanie laserowe warstwy wierzchniej stopu aluminium PA31. Inżynieria Materiałowa nr 5(147), Katowice 2005.
11. Marczak J., Napadłek W., Sarzyński A.: Modyfikacja właściwości warstwy wierzchniej aluminium za pomocą laserowej fali uderzeniowej. Inżynieria Materiałowa nr 5(147), Katowice 2005.

**Recenzent:**  
**Stanisław LABER**

**Summary**

**The idea laser texturing was introduced in the article, his the author's mislaid in the aerology and the ideological patern of various textures. Chosen examples were introduced technological uses laser texturing in the engineering of surface on the example of grey cast iron EN-GJL300 and melt of aluminum ENAW-2618A (PA31). The directions of the development texturing were also introduced in the aerology and tribology.**

