

**Wojciech NAPADŁEK\***, **Wojciech PRZETAKIEWICZ\*\***,  
**Czesław PAKOWSKI\***, **Adam WOŹNIAK\***

## **ODPORNOŚĆ NA ZUŻYCIE STALI 41CrAlMo7 PO AZOTOWANIU JARZENIOWYM ORAZ ABLACYJNYM TEKSTUROWANIU LASEROWYM**

**LABORATORY INVESTIGATIONS OF WEAR RESISTANCE  
UNDER FRICTION OF A SURFACE LAYER  
OF 41CrAlMo7 STEEL AFTER GLOW DISCHARGE  
NITRIDING AS WELL AS ABLATION LASER TEXTURING**

### **Słowa kluczowe:**

stal 41CrAlMo7, warstwa wierzchnia, ablacyjne teksturowanie laserowe, odporność na zużycie w warunkach tarcia

### **Key words:**

steel 41CrAlMo7, surface layer, ablative laser texturing, wear resistance under friction

---

\* Zakład Tribologii Inżynierii Powierzchni i Logistyki Płynów Eksploatacyjnych, Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, Wydział Mechaniczny, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, tel.: (22) 683-73-57, e-mail: wnapadlek@wat.edu.pl, cpakowski@wat.edu.pl, awozniak@wat.edu.pl.

\*\* Instytut Podstawowych Nauk Technicznych, Wydział Mechaniczny, Akademia Morska w Szczecinie, ul. Podgórna 51/53, 70-205 Szczecin, tel.: (91) 4318539, e-mail: wprzetakiewicz@wp.pl.

## Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki modelowych badań laboratoryjnych, obejmujących pomiary wybranych parametrów w węźle tarcia, tj.: temperatury, siły tarcia, zużycia mierzonego metodą liniową dla warstwy wierzchniej próbek wykonanych ze stali stopowej 41CrAlMo7 po azotowaniu i teksturowaniu laserowym w skojarzeniu z żeliwnymi przeciwpróbkami. Warstwę wierzchnią ww. stali po azotowaniu jarzeniowym poddano modyfikacji, wykorzystując ablacyjną mikroobróbkę laserową w celu zmiany jej makro- i mikrogeometrii. Do wytworzenia regularnych mikrozasobników olejowych w kształcie mikroczasz kulistych oraz mikrokanalów stosowano laser Nd: YAG ze specjalnym systemem ogniskowania. Badaniom porównawczym poddana została warstwa wierzchnia stali ukształtowana na drodze tradycyjnej obróbki mechanicznej i azotowania jarzeniowego oraz zmodyfikowana w wyniku azotowania jarzeniowego i ablacyjnej mikroobróbki laserowej. Materiałem przeciwpróbki było żeliwo szare niskostopowe. W badaniach tribologicznych zastosowano metodę „pin on disc” w oparciu o tribometr T-11. Najlepsze efekty w zakresie zwiększenia odporności na zużycie przez tarcie uzyskano dla modelowego skojarzenia, w którym próbki wykonane ze stali stopowej 41CrAlMo7 po azotowaniu jarzeniowym oraz ablacyjnym teksturowaniu laserowym (mikroczasze w układzie geometrycznym ze stopniem przekrycia ok. 25%) współpracowały z żeliwnymi przeciwpróbkami.

## WPROWADZENIE

Właściwości użytkowe elementów silników spalinowych zależą nie tylko od możliwości przeniesienia obciążeń mechanicznych przez całe czynne przekroje elementów, zwykle wykonanych z tworzyw kompozytowych, metali oraz ich stopów, najczęściej obrobionych cieplnie, lecz także od mikrostruktury i właściwości warstwy wierzchniej (WW) [L. 1, 2].

Aby zapobiec przedwczesnym procesom zużywania się elementów w skojarzeniu np. czop wału korbowego/wałka rozrządu silnika spalinowego dużej mocy–łożysko ślizgowe, zachodzi konieczność modyfikacji WW co najmniej jednego elementu tego zespołu. Spowodowane jest to względami ekonomicznymi, ekologicznymi i – co najistotniejsze – użytkowymi [L. 3, 4].

Rozwój konstrukcji wymienionych wyżej węzłów ślizgowych oraz doskonalenie ich jakości są możliwe pod warunkiem właściwego poznania zjawisk smarowania i zużycia, występujących podczas współpracy elementów tworzących dany węzeł tribologiczny, a także pod warunkiem umiejętnego modelowania i prognozowania ich zużycia eksploatacyjnego. Istotne znaczenie w skojarzeniu powierzchni roboczej czopa wałka oraz łożyska ślizgowego odgrywa WW, rozumiana jako „system areologiczny”, w którym ważną rolę odgrywają przede wszystkim właściwości materiałowe, topografia powierzchni oraz do-

kładność wykonania elementów. Kształtowanie topografii powierzchni czopów wałów korbowych oraz wałków rozrządu silników spalinowych realizowane jest przez różnego rodzaju obróbki mechaniczne gładkościowe (np. szlifowanie, honowanie, dogładzanie), stosowanie nowoczesnych powłok przeciwzużyciowych (np. chromu technicznego, powłok natryskiwanych cieplnie) oraz coraz częściej – precyzyjnych technologii wiązkowych, głównie laserowych [L. 5, 6].

Jedną z najnowocześniejszych i perspektywicznych technologii modyfikacji WW elementów maszyn jest ablacyjna mikroobróbka laserowa, stosowana m.in. w zakresie tzw. teksturowania laserowego ich powierzchni. Dzięki specyficznym właściwościom fizycznym wiązki laserowej, bardzo krótkiemu czasowi i wysokiej precyzji jej oddziaływania, a także powtarzalności procesu oraz łatwości sterowania jego parametrami możliwe jest wytworzenie wielu wzorów tekstur powierzchni, które mogą znacząco poprawić warunki smarowania oraz zmniejszyć intensywność procesów zużycia tribologicznego w wielu węzłach tribologicznych [L. 7–9], m.in. w skojarzeniu czop–łożysko ślizgowe.

## CEL, ZAKRES I METODYKA BADAŃ

Głównym celem pracy było określenie wpływu ablacyjnego teksturowania laserowego WW stali stopowej do ulepszania cieplnego oraz azotowania 41CrAlMo7, stosowanej w produkcji wałów korbowych oraz wałków rozrządu tłokowych silników spalinowych dużej mocy, na odporność na zużycie przez tarcie w modelowym węźle tribologicznym typu czop–łożysko ślizgowe.

Badania tribologiczne przeprowadzono na ww. stali w stanie po obróbce mechanicznej i azotowaniu jarzeniowym oraz po azotowaniu jarzeniowym, ablacyjnym teksturowaniu laserowym i wykańczającej obróbce mechanicznej, przy wcześniej dobranych parametrach technologicznych zastosowanych obróbek. W przypadku obróbki laserowej gęstość mocy  $q$  zmieniano w przedziale  $0,5 \div 3,55 \cdot 10^7$  W/cm<sup>2</sup>, częstotliwość repetycji impulsów  $f$  w zakresie 1–10 kHz zaś prędkość skanowania w przedziale 200–800 mm/s. Przeprowadzone zostały także pomiary zużycia metodą liniową, siły tarcia oraz temperatury w rozważanym skojarzeniu. Zdecydowano się na zastosowanie jednej metody badań tribologicznych, tj. „pin-on-disc” z wykorzystaniem testera tribologicznego T-11 (Tab. 1). Stanowisko zostało uzupełnione o układy umożliwiające ciągłą rejestrację wskaźników przebiegu procesu tribologicznego: siły tarcia, temperatury w strefie współpracy oraz zmiany wymiarów elementów skojarzenia ciernego.

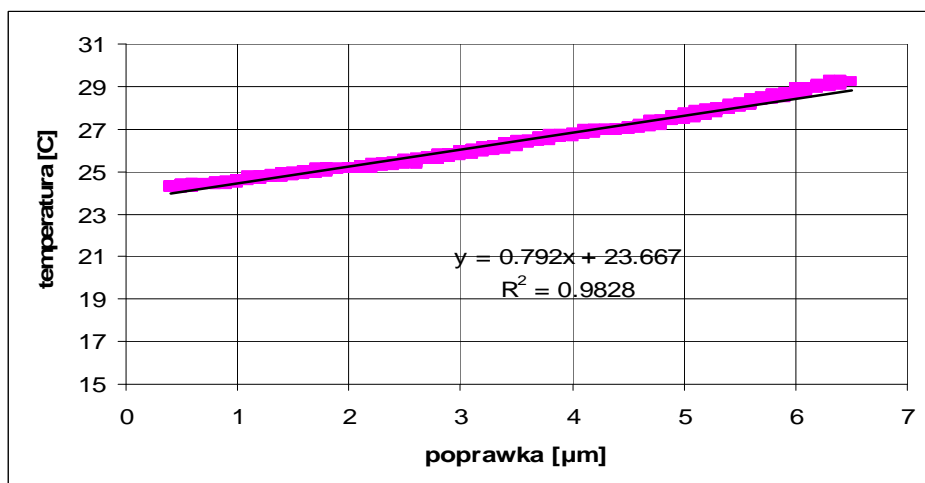
Pozwoliło to na wyznaczenie liniowego zużycia elementów skojarzenia ciernego, przy uwzględnieniu efektu rozszerzalności cieplnej wywołanego zmianą temperatury współpracujących materiałów. Poprawkę na zmianę wymiarów wyznaczano dla każdego biegu badawczego podczas chłodzenia skojarzenia po zakończeniu procesu tarcia. Poprawkę wyznaczano, stosując przybliżenie liniowe (Rys. 1).

Do badań tribologicznych wykorzystano próbki wykonane ze stali 41CrAlMo7 azotowanej jarzeniowo oraz wariantowo teksturowanej laserowo na stanowisku laserowym wyposażonym w laser Nd: YAG firmy Allprint DN z głowicą Galvo (**Rys. 2**).

**Tabela 1. Warunki badania odporności na zużycie za pomocą testera T-11**

Table 1. The conditions of the investigation of wear resistance with a tester T-11

Materiał	Próbki
	Stal 41CrAlMo7 po azotowaniu jarzeniowym – wariant nr I Stal 41CrAlMo7 po azotowaniu jarzeniowym, ablacyjnym teksturowaniu laserowym i szlifowaniu – wariant nr II
	Przeciwpróbki
	Żeliwo szare niskostopowe
czas docierania wstępnego	120 s
prędkość ślizgania	0,21 m/s
sposób smarowania	syntetyczny olej silnikowy Mobil 1
obciążenie styku	12,42 MPa
droga tarcia	6000 m



**Rys. 1. Sposób wyznaczania poprawki na rozszerzalność termiczną**

Fig. 1. The way of marking the correction on thermal expansibility

Efektom teksturowania było wytworzenie mikrozasobników olejowych w kształcie półczasz kulistych oraz mikrokanałów współpracujących z przeciwpróbkami wykonanymi z żeliwa szarego niskostopowego. Próbki wykonane ze stali odwzorowywały czop wałka rozrządu, a przeciwpróbki łożysko ślizgowe osadzone w kadłubie silnika spalinowego dużej mocy. Ocena procesów lasero-

wego teksturowania powierzchni została wykonana za pomocą mikroskopu optycznego stereoskopowego Zeiss Discovery V12 SteREO. Do badań użyto także nowoczesnego mikroskopu optycznego ze światłowodową transmisją obrazu VH-S5 firmy Keyence. Analizę topografii powierzchni próbek zmodyfikowanych próbek i przeciwpróbek wykonano za pomocą profilometru skanującego Form Talysurf Series 2 firmy Taylor Hobson. Badania mikrotwardości wykonano z użyciem mikrotwardościomierza FM-700 firmy Future Tech metodą Vickersa.



**Rys. 2. Laser Nd: YAG Allprint DN ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ,  $f = 1 \div 100 \text{ kHz}$ ,  $E = 50 \text{ J}$ ,  $P = 50 \text{ W}$ )**

Fig. 2. Laser Nd: YAG Allprint DN ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ,  $f = 1 \div 100 \text{ kHz}$ ,  $E = 50 \text{ J}$ ,  $P = 50 \text{ W}$ )

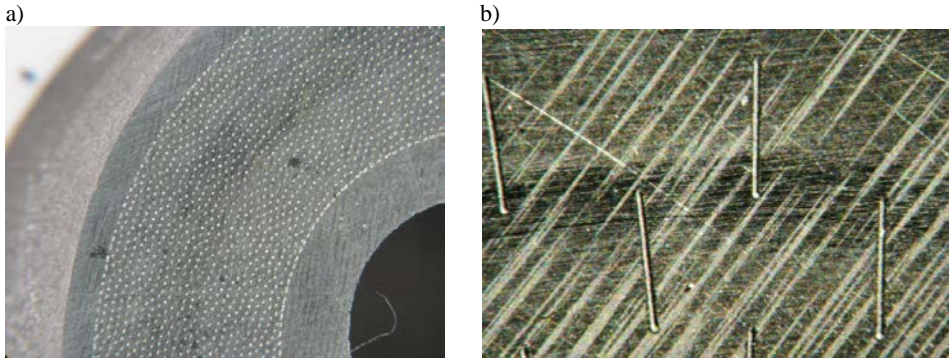
Powierzchnia przeciwpróbek poddana była szlifowaniu wykańczającemu aż do uzyskania średniej chropowatości na poziomie  $R_a \sim 0,32 \mu\text{m}$ . Próbki stalowe po szlifowaniu i azotowaniu jarzeniowym poddane zostały polerowaniu na papierach ściernych o ziarnistości 1000 i 2000. Próbki po azotowaniu i teksturowaniu laserowym w celu usunięcia mikrowypływek, powstałych w strefie przyległej do mikrozasobników olejowych, poddane zostały szlifowaniu wykańczającemu oraz polerowaniu na papierach ściernych 1000 i 2000. Wszystkie próby (po 5 prób dla każdego wariantu stanu WW próbek) przeprowadzone zostały w takich samych warunkach laboratoryjnych (**Tab. 1**).

Jak już wspomniano, zastosowano dwa warianty ablacyjnego teksturowania laserowego powierzchni próbek:

- I – wytworzenie mikrozasobników olejowych w kształcie półkula kulistych (średnica 70–100  $\mu\text{m}$ , głębokość około 50  $\mu\text{m}$ ), 25% udziału powierzchniowego) – **Rys. 3a**,
- II – wytworzenie mikrozasobników olejowych w kształcie mikrokanalów (długość 1 mm, szerokość 70–100  $\mu\text{m}$ , głębokość około 50  $\mu\text{m}$ , 10% udziału powierzchniowego) – **Rys. 3b**.

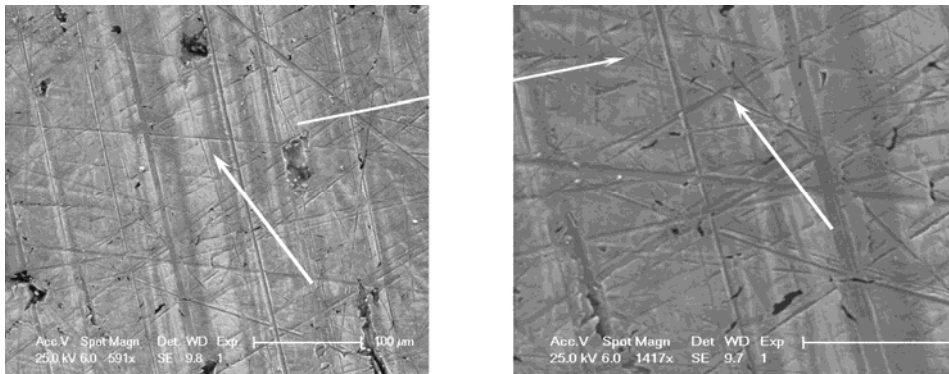
## WYNIKI BADAŃ

Badania topografii powierzchni próbek po testach tribologicznych wykazały liczne ślady współpracy (**Rys. 4÷6**) oraz zmniejszenie chropowatości (**Rys. 7÷10**). W wyniku procesu tarcia wierzchołki mikronierówności próbek i przeciwpróbek uległy ścięciu.



**Rys. 3.** Powierzchnia próbki ze stali 41CrAlMo7 azotowanej jarzeniowo oraz teksturowanej laserowo: a) z zasobnikami olejowymi w kształcie mikrocząstek (pow. 12x), b) z zasobnikami olejowymi w kształcie mikrokanalów (pow. 50x)

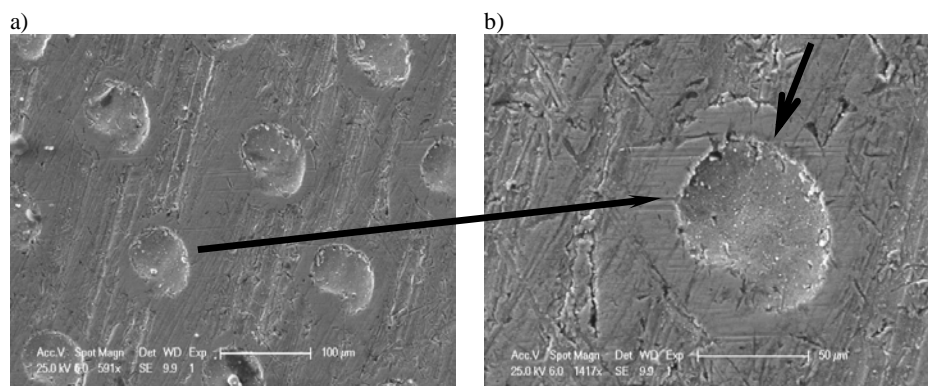
Fig. 3. The surface of glow discharge nitrated 41CrAlMo7 steel sample as well as laser textured: a) with oil storage tanks in the form of microparticles (12x), b) with storage tanks in the shape of microchannels (50x)



**Rys. 4.** Charakterystyczna topografia powierzchni próbki ze stali 41 CrAlMo7 azotowanej jarzeniowo po próbie tribologicznej w układzie pin-on-disc z widocznymi śladami (mikrorzysy) współpracy z żeliwnym trzpieniem – obciążenie styku 12,42 MPa

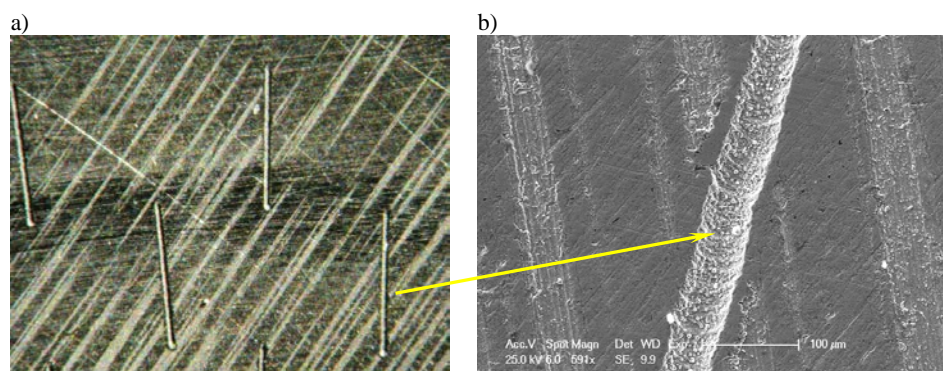
Fig. 4. The distinctive topography of the sample surface made of 41 CrAlMo7 steel toughened and tempered as well as glow discharge nitrated after tribological test in pin-on-disc system with visible traces of cooperation (microcracks) with iron rod – contact load 12,42 MPa

We wszystkich wariantach prób tribologicznych nastąpiło zmniejszenie wartości mierzonych parametrów chropowatości powierzchni. Jest to efekt docierania powierzchni współpracujących elementów. W obu wariantach teksturowania laserowego stwierdzono znacznie mniejszą intensywność zużywania się próbek w stosunku do obrabianych tradycyjnie, przy porównywalnym zużyciu przeciwpróbek we wszystkich analizowanych wariantach. Potwierdza to



**Rys. 5.** Charakterystyczna topografia powierzchni próbki ze stali 41 CrAlMo7 azotowanej jarzeniowo oraz teksturowanej laserowo (mikroczasze) po próbie tribologicznej w układzie pin-on-disc z widocznymi śladami współpracy z żeliwnym trzpieniem

Fig. 6. The distinctive topography of the sample surface made of 41 CrAlMo7 steel as glow discharge nitrided as well as laser textured (micro channels) after tribological tests in pin-on-disc system with visible traces of cooperation with iron rod



**Rys. 6.** Charakterystyczna topografia powierzchni próbki ze stali 41 CrAlMo7 azotowanej jarzeniowo oraz teksturowanej laserowo (mikrokanaly) po próbie tribologicznej w układzie pin-on-disc z widocznymi śladami współpracy z żeliwnym trzpieniem

Fig. 5. The distinctive topography of the sample surface made of 41 CrAlMo7 steel as glow discharge nitrided as well as laser textured (micro chanel) after tribological tests in pin-on-disc system with visible traces of cooperation with iron rod



korzystny wpływ zasobników olejowych na procesy tribologiczne, a zwłaszcza na zmniejszenie intensywności zużywania WW. Poniżej przedstawiono wybrane wyniki badań.

W przypadku próbek z mikrokanałami stwierdzono nieznaczne zmniejszenie wysokości nierówności, natomiast dla wariantu z mikroczaszami wytworzonymi na próbkach stalowych można potwierdzić około 3-krotny spadek wysokości najwyższych wzniesień nierówności (np. strefa mikroczasz przed próbą tribologiczną wynosiła  $R_p = 1,643 \mu\text{m}$ , a po próbie  $R_p = 0,595 \mu\text{m}$  – **Tab. 2**). Wraz ze spadkiem wysokości nierówności wzrastała powierzchnia współpracy, co wpływało na zmniejszenie nacisku jednostkowego trzpienia na powierzchnię próbki, a co za tym idzie zmniejszało się zużycie przez tarcie współpracujących elementów.

**Tabela 2. Przykładowe wartości parametrów chropowatości powierzchni badanych próbek ze stali**

Table 2. Sample surface roughness parameters of samples of the steel

Stan WW próbek	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]
Materiał wyjściowy	0,627	1,114	1,752	0,329
Materiał wyjściowy po próbie tribologicznej	0,516	1,093	1,541	0,217
Próbki z mikroczaszami przed próbą tribologiczną	1,643	3,706	5,362	0,742
Próbki z mikroczaszami po próbie tribologicznej	0,595	3,539	4,298	0,691
Próbki z mikrokanałami przed próbą tribologiczną	1,075	1,899	2,976	0,567
Próbki z mikrokanałami po próbie tribologicznej	0,954	1,819	2,841	0,455

$R_p$  – wysokość najwyższego wzniesienia;

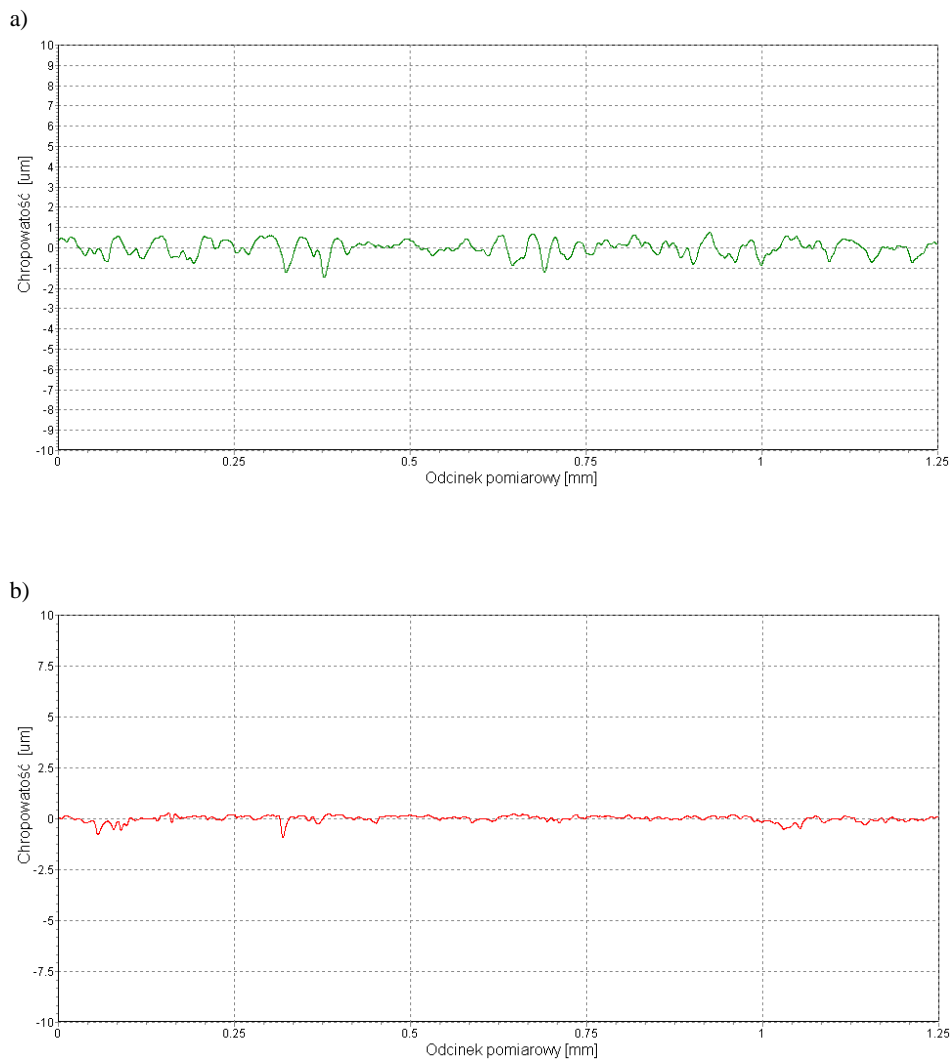
$R_v$  – największe wgłębienie profilu nierówności;

$R_z$  – wysokość chropowatości według dziesięciu punktów profilu;

$R_a$  – średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii średniej.

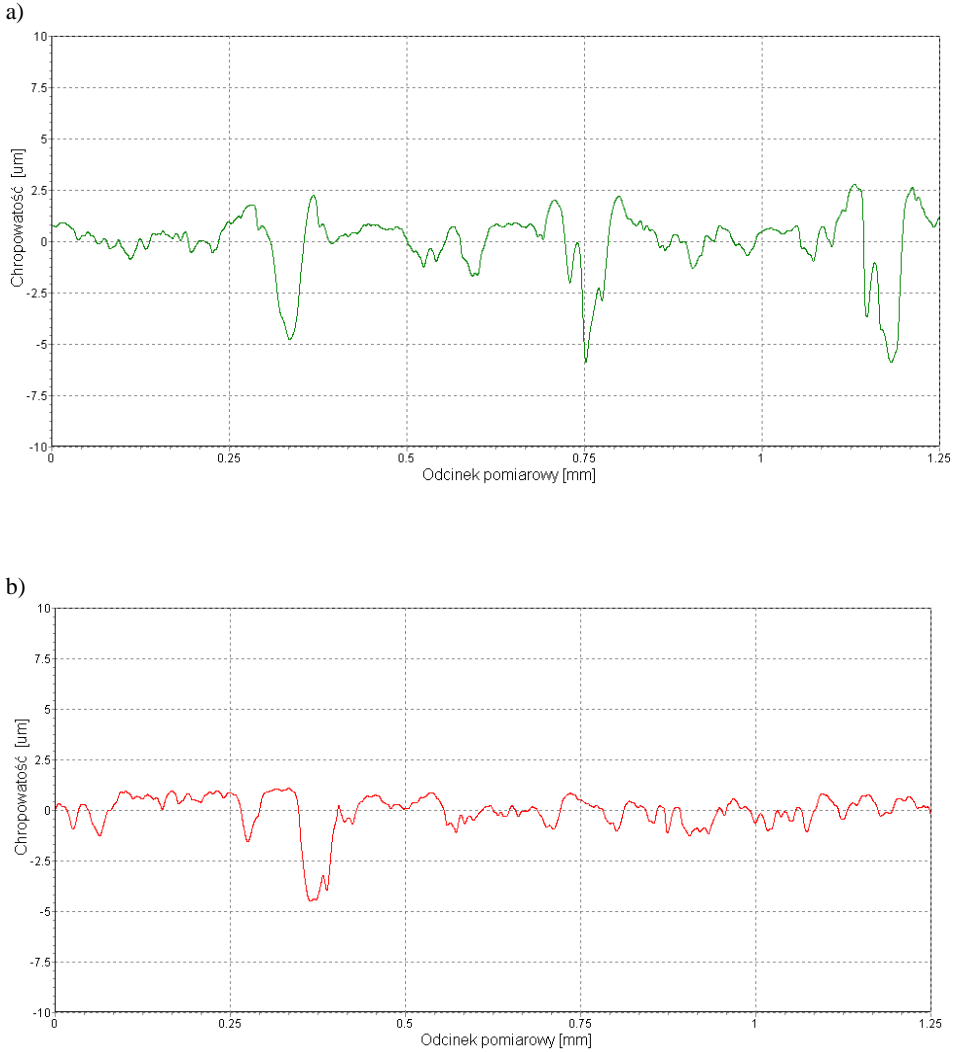
Charakterystyczne profile chropowatości powierzchni próbek wykonanych ze stali 41CrAlMo7 azotowanej jarzeniowo, a także wariantowo teksturowanej laserowo (warianty z mikroczaszami oraz mikrokanałami) przedstawiono na **Rys. 7–9**. Profilogramy potwierdzają wcześniejsze wyniki badań stereometrii powierzchni i dowodzą m.in. znacznego zmniejszenia chropowatości powierzchni, zwłaszcza próbek wykonanych z ww. stali azotowanej jarzeniowo (**Rys. 7**).





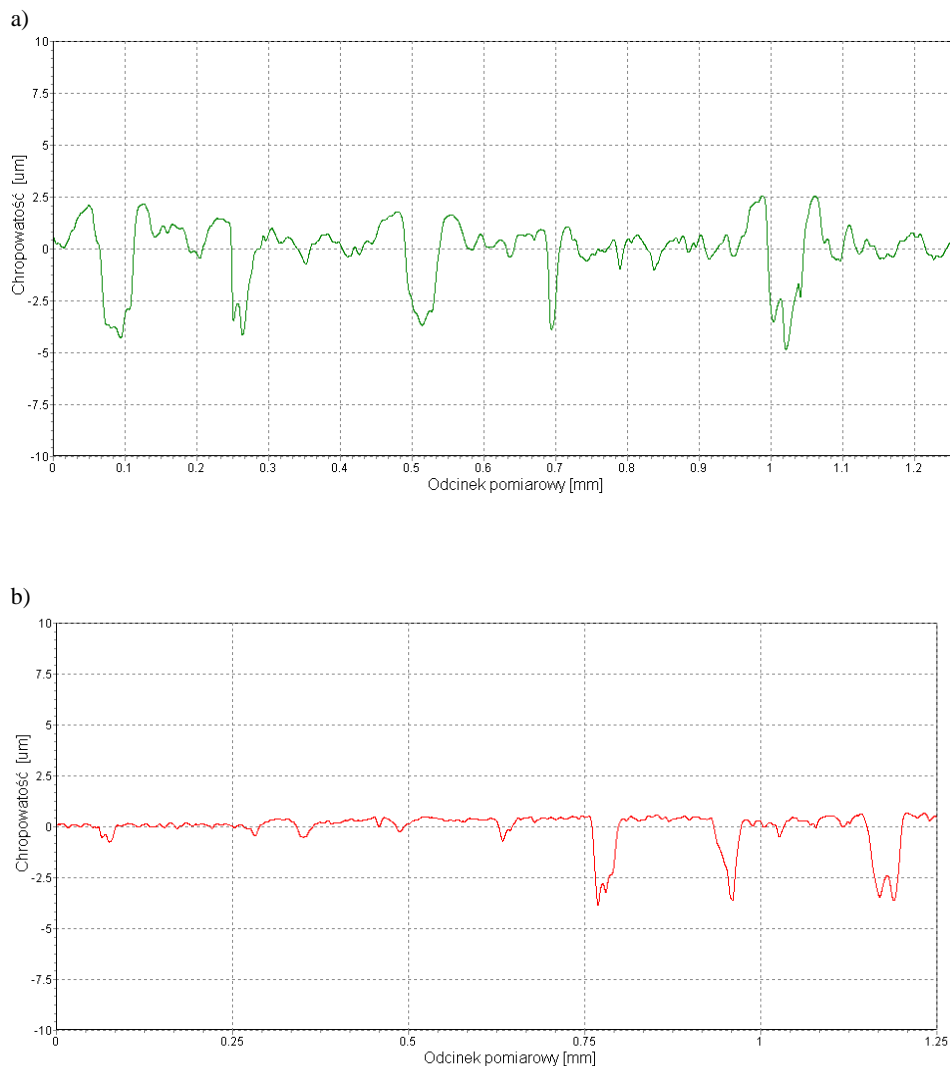
**Rys. 7. Profil chropowości powierzchni próbki ze stali 41CrAlMo7 azotowanej jarzeniowo: a) przed próbą tribologiczną, b) po próbie tribologicznej**

Fig. 7. The profile of the surface roughness of sample made of 41CrAlMo7 steel as glow discharge nitrided: a) before tribological test, b) after tribological test



**Rys. 8. Profil chropowatości powierzchni próbki ze stali 41CrAlMo7 azotowanej jarzenio-  
wo i teksturowanej laserowo w wariancie I – z mikroczaszami: a) przed próbą tri-  
bologiczną, b) po próbie tribologicznej**

**Fig. 8. The profile of the surface roughness of sample made of 41CrAlMo7 steel as glow  
discharge nitrided and laser textured in the first scenario – with micro spherical caps:  
a) before tribological test, b) after the tribological test**



**Rys. 9. Profil chropowatości powierzchni próbki ze stali 41CrAlMo7 azotowanej jarzeniowo i teksturowanej laserowo w wariancie II – z mikrokanalami: a) przed próbą tribologiczną, b) po próbie tribologicznej**

Fig. 9. The profile of the surface roughness of sample made of 41CrAlMo7 steel as glow discharge nitrided and laser textured in the second scenario – with micro channels: a) before tribological test, b) after tribological test

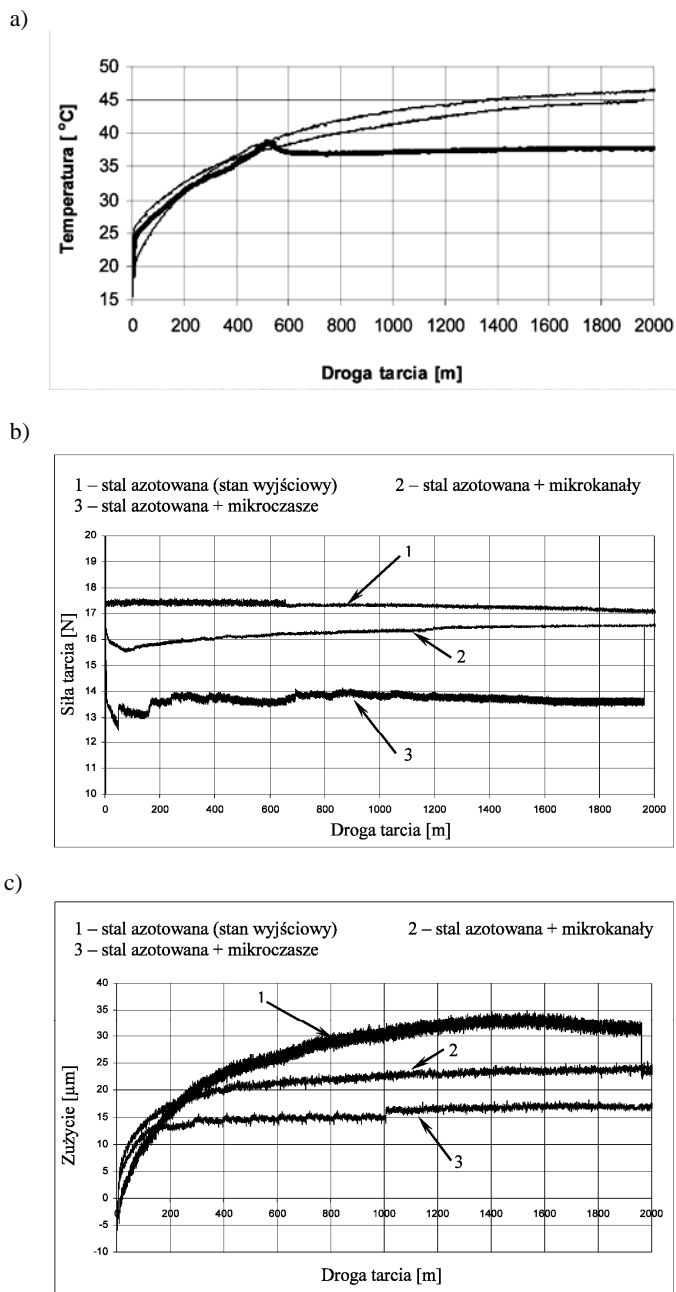
Wyniki badań tribologicznych realizowanych na testerze T-11 dla próbek ze stali 41CrAlMo7 w stanie wyjściowym, po azotowaniu jarzeniowym oraz po różnych wariantach teksturowania laserowego przedstawiono na **Rys. 10**.

Temperatura maksymalna próbek w stanie wyjściowym, a także z mikrokanalami podczas prób tribologicznych po osiągnięciu drogi tarcia 2000 m wynosiła około 45°C, natomiast próbek z mikroczaszami przy tym samym obciążeniu wynosiła odpowiednio 37°C (**Rys. 10a**). Przez cały czas trwania próby temperatura próbek z mikroczaszami była niższa niż w pozostałych wariantach. Mniejsza była również szybkość jej narastania, co może świadczyć o mniejszej intensywności procesu zużywania w tym skojarzeniu. Również zmiany siły tarcia (**Rys. 10b**) dowodzą, że ani próbki stali 41CrAlMo7 w stanie wyjściowym (po azotowaniu), ani po dodatkowym teksturowaniu laserowym nie wykazują skłonności do zatarcia we współpracy z żeliwnym trzpieniem.

Dla próbek z mikrokanalami współpracującymi z przeciwpróbkami mimo małej siły tarcia zaobserwowano pewną niestabilność, tj. skokowe wzrosty i spadki siły tarcia. Być może miała na to wpływ geometria oraz rozmieszczenie mikrokanalów na powierzchni stalowej próbki. Największą siłę tarcia zarejestrowano dla stali po azotowaniu jarzeniowym bez modyfikacji laserowej (**Rys. 10b** – krzywa 1). Siła ta osiągnęła wartość ok. 17,5 N i po ok. 650 m drogi tarcia ustabilizowała się, zmniejszając swoją wartość do ok. 17,2 N. Po przekroczeniu 1200 m wartość siły tarcia stopniowo zmniejszała się, aż osiągnęła wartość 17 N przy 2000 m. Proces ten łagodniej przebiegał dla próbek z wytworzonymi na ich powierzchni mikrokanalami (**Rys. 10b** – krzywa 2). Po osiągnięciu 1200 m drogi tarcia siła tarcia ustabilizowała się i osiągnęła wartość ok. 16,5 N, tj. mniejszą niż dla próbek w stanie po azotowaniu (**Rys. 10b** – krzywa 1).

Nieco odmienny przebieg zmiany siły tarcia w funkcji drogi tarcia obserwowano dla próbek z mikroczaszami. Proces ten w pierwszej fazie współpracy przebiegał burzliwie, powodując dynamiczne zmiany siły tarcia (**Rys. 10b** – krzywa 3). Prawdopodobnie przyczyną tego procesu były wzajemne docieranie się współpracujących powierzchni. Po dotarciu, tj. po ok. 800 m drogi tarcia, zaobserwowano stabilizację siły tarcia, a nawet tendencję do jej stopniowego zmniejszania się do wartości ok. 13,7 N przy ok. 2000 m. Mimo pewnej niestabilności procesu współpracy elementów skojarzenia w tym wariantcie uzyskano najmniejszą wartość siły tarcia.

W ramach prowadzonych testów tribologicznych analizowano także proces zużywania próbek oraz przeciwpróbek w modelowym węźle tarcia, którego efekty mierzono metodą liniową. Procesy niszczenia we wszystkich przypadkach przybierały gwałtowny przebieg w początkowej fazie procesu zużywania (**Rys. 10c**). Dla próbek w stanie wyjściowym w początkowej fazie stwierdzono znaczną intensyfikację procesu zużywania, po czym po około 1000 m drogi tarcia obserwowano wyraźną jego stabilizację (**Rys. 10c** – krzywa 1).



**Rys. 10.** Wyniki badań tribologicznych próbek ze stali 41CrAlMo7: zmiany temperatury (a), siły tarcia (b), zużycia liniowego w funkcji drogi tarcia (c)

Fig. 10. Tribological test results sample made of 41CrAlMo7: temperature change (a), friction force (b), linear wear versus sliding distance (c)

Nieco odmienny przebieg procesu zużywania obserwowano dla próbek z mikroczaszami oraz mikrokanalami. Dla tych wariantów procesy tarcia w pierwszej fazie współpracy przebiegały również dynamicznie, powodując przyspieszone zużycie do ok. 400 m drogi tarcia (**Rys. 10c** – krzywe 2 i 3). W późniejszej fazie nastąpiła stabilizacja procesu zużywania. Prawdopodobnie przyczyną tego procesu były wzajemne docieranie się powierzchni współpracy. Po zakończeniu próby tribologicznej w analizowanych wariantach stwierdzono znaczne mniejsze zużycie próbek, tj. ok. 16  $\mu\text{m}$  w wariacie I (mikroczasze) oraz ok. 23  $\mu\text{m}$  w wariacie II (mikrokanaly), co jest wynikiem bardzo obiecującym w porównaniu wariantem wyjściowym – krzywa 1, w którym maksymalne sumaryczne zużycie pary tribologicznej (próbka–przeciwpróbka) osiągnęło wartość ok. 34  $\mu\text{m}$ .

Z przeprowadzonych badań tribologicznych w warunkach tarcia granicznego wynika, że proces ablacyjnej mikroobróbki laserowej powierzchni stalowych próbek azotowanych jarzeniowo zdecydowanie podwyższa ich odporność na zużycie przez tarcie. Przyczyn tego zjawiska można upatrywać m.in. w tym, że na powierzchni próbek wytworzono mikrozasobniki, wokół których powstały mikrostręfy o szerokości od kilku do kilkunastu mikrometrów, charakteryzujące się wysoką twardością (ok. 1100 – 1200 HV<sub>0,05</sub>) i tym samym dużą odpornością na zużycie przez tarcie. Mikroczasze oraz mikrokanaly stanowiły zarazem mikrozasobniki oleju silnikowego. Oba te czynniki pozwoliły osiągnąć zakładany wzrost odporności stali 41CrAlMo7 azotowanej jarzeniowo na zużycie w modelowych warunkach tarcia przy obciążeniu styku wynoszącym 12,42 MPa.

## WNIOSKI

1. Przeprowadzone modelowe badania laboratoryjne użytkowych efektów teksturowania laserowego warstwy wierzchniej stali 41CrAlMo7 azotowanej jarzeniowo wskazują na możliwości zastosowania tej technologii do podnoszenia odporności na zużycie elementów maszyn pracujących w warunkach tarcia granicznego ze smarowaniem olejem silnikowym. Wytworzone laserowo mikroczasze oraz mikrokanaly stanowiące mikrozasobniki olejowe poprawiają warunki współpracy elementów układu typu czop wału–łożysko ślizgowe.
2. Najlepsze efekty w zakresie zmniejszenia siły tarcia i temperatury oraz zwiększenia odporności na zużycie uzyskano w przypadku modelowego skojarzenia w wariacie I, w którym próbki poddane były teksturowaniu laserowemu przy dobranych parametrach obróbki laserowej w układzie geometrycznym mikroczasz z 25% ich udziałem powierzchniowym.
3. Po obróbce laserowej średnie sumaryczne zużycie elementów skojarzenia „pin-on-disc” zmniejszyło się, w stosunku do węzła referencyjnego o ok. 30% w przypadku wariantu II obróbki i o ok. 50% w przypadku wariantu I.

4. Proponowane warianty obróbki laserowej mogą stanowić alternatywę dla klasycznej obróbki mechanicznej. Konieczny jest jednak precyzyjny dobór warunków procesu tekstuowania laserowego oraz wykonanie dodatkowej wykańczającej obróbki mechanicznej, usuwającej powstałe na modyfikowanej laserowo powierzchni twarde mikrowypłytki. Proces obróbki laserowej powinien zapewniać uzyskanie mikrozasobników o powtarzalnych wymiarach geometrycznych (średnicy 30÷70  $\mu\text{m}$ , głębokości ok. 15  $\mu\text{m}$ ), rozmieszczonych równomiernie na modyfikowanej powierzchni przy 25% udziale powierzchniowym.

*Praca została sfinansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki – nr projektu N508 054 32/3758.*

## LITERATURA

1. Napadłek W.: Mikroobrobka laserowa warstwy wierzchniej tulei cylindrowej w aspekcie tribologicznym. Problemy Eksploatacji, 4(2011), s. 27–42.
2. Włodarski J.K.: Tłokowe silniki spalinowe – procesy tribologiczne. WKŁ, Warszawa 1982.
3. Burakowski T., Wierzchoń T.: Surface engineering of metals- principles, equipment, technology. CRC Press, Boca Ratan – New York – London – Washington 1999.
4. Antoszewski B.: The formation of antiwear surface layers on elements of machine parts. Tribology Scientific Problems Of Machines Operation And Maintenance 2 (158) 2009.
5. Antoszewski B.: Warstwy powierzchniowe z teksturą kształtowane wybranymi technologiami wiązkowymi oraz właściwości tribologiczne. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2010.
6. 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, Grenoble 2007.
7. Napadłek W.: Kształtowanie technologicznej warstwy wierzchniej pierścieni tłokowych silnika spalinowego za pomocą ablacyjnej mikroobrobki laserowej. Inżynieria Materiałowa nr 4 (2011), s. 628–632.
8. Napadłek W., Burakowski T.: Wybrane przykłady powierzchniowego tekstuowania laserowego. Inżynieria Materiałowa nr 4 (2011), s. 633–636.
9. Napadłek W., Przetakiewicz W.: Laserowe tekstuowanie płaszcza tłoka silnika spalinowego. Inżynieria Materiałowa nr 4 (2011), s. 637–640.

## Summary

**The paper presents the results of laboratory investigations including measurements of selected parameters in the node of friction (temperature, friction force, wear resistance) with the use of the measured line method for the surface layer of samples steel 41CrAlMo7 after nitriding and laser**



**texturing in combination with cast iron samples. Surface layers after glow discharge nitriding steel were modified using ablative laser micromachining to change its macro- and micro-geometry. In the manufacture regular shaped oil micro-channels and spherical micro-particles, we used a Nd: YAG laser with a special focusing system. Comparative research has been subjected to the steel surface topography formed by conventional machining and plasma nitriding and modified after nitriding and laser ablation micromachining. The laboratory tribological investigation used the "pin on disc" method based on a T-11 tribometer. The best results of increasing wear resistance under friction was obtained for the association sample made of steel 41CrAlMo7 after glow discharge nitriding and ablative laser texturing in the geometric arrangement mico-oil containers (micro spherical cap) with a degree of covering of about 25% worked with cast iron anti-samples.**