

PRZEGLĄD METOD KSZTAŁTOWANIA TOPOGRAFII POWIERZCHNI GŁADZI CYLINDRÓW SILNIKÓW SPALINOWYCH

Mgr inż. Zbigniew KURZYNA, Prof. dr hab. inż. Kazimierz LEJDA, Dr inż. Paweł WOŚ

Artykuł zawiera przegląd i krótki opis metod kształtowania topografii powierzchni gładzi cylindrów silników spalinowych. Na początku omówiono warunki współpracy elementów układu T-P-C, ich wpływ na sprawność silnika i niezawodność pracy. Przedstawiono tradycyjne sposoby kształtowania gładzi cylindrów ze stopów aluminium i z żeliwa oraz metody z wykorzystaniem obróbki laserowej i wysokociśnieniowego strumienia cieczy.

1. WARUNKI PRACY UKŁADU TŁOK – PIERŚCIENIE – CYLINDER

Układ T-P-C jest najbardziej obciążonym układem silnika spalinowego. Na obciążenia te składają się: wysokie maksymalne ciśnienia obiegu, które według Kozaczewskiego [1] w silnikach ZS mogą przekraczać 12 MPa, a w ZI dochodzą do 7 MPa, bardzo duża dynamika obciążeń charakteryzująca się szybkością narastania ciśnienia $0,2...0,4 \text{ MPa}/^{\circ}\text{OWK}$ w silnikach o ZI i około $1 \text{ MPa}/^{\circ}\text{OWK}$ w silnikach o ZS, wysoka średnia temperatura obiegu mogąca przekraczać 900 K.

Zmienny charakter ruchu tłoka, którego prędkość w czasie jednego suwu zmienia się od 0 w górnym i dolnym martwym punkcie do prawie dwukrotnie większej od średniej prędkości tłoka w połowie skoku powoduje, że w układzie T-P-C mamy do czynienia ze wszystkimi rodzajami tarcia, od tarcia płynnego w środkowym obszarze cylindra poprzez tarcie mieszane, graniczne i suche w zwrotach zewnętrznych tłoka. Dodatkowo wysoka temperatura wpływa na lepkość oleju, a produkty spalania oddziałują bezpośrednio na pierwszy pierścień uszczelniający. Kozaczewski [1] podaje, że jeśli zapewni się tarcie płynne przez 99,99% czasu, to zużycie gładzi cylindra i pierścieni jest pomijalne, ale jeśli ten czas zmniejszy się do 99%, to zużycie jest już duże.

Według [1] układ T-P-C generuje około 50% strat tarcia w silniku spalinowym, z czego 70...80% są to straty tarcia pierścieni o gładź cylindra. Biorąc pod uwagę fakt, że to głównie trwałość układu T-P-C silnika decyduje o osiąganych przebiegach pojazdów, które w obecnie produkowanych samochodach wahają się w granicach 150...400 tys. km, a dla ciężkich pojazdów ciężarowych sięgają 1 mln km, poświęca się temu układowi wiele uwagi podczas prac projektowych.

Pierwszym elementem pary trącej są pierścienie tłokowe współpracujące z gładzią cylindra. Mają one za zadanie uszczelnić cylinder, równomiernie rozprowadzić olej po powierzchni cylindra i odprowadzić ciepło przejmowane przez tłok. W tłokach niechłodzonych 60...80% ciepła odprowadzają pierścienie [1]. Grubość filmu olejowego pozostającego na powierzchni gładzi cylindra po przejściu pierścieni zależy od nacisków jednostkowych pierścieni ich elastyczności i kształtu krawędzi zgarniających.

Zmniejszenie tarcia pierścieni o gładź można uzyskać poprzez zwiększenie wymiaru baryłkowatości powierzchni roboczej pierścieni, zmniejszenie powierzchni styku czy zmniejszenie ilości pierścieni [3]. Trzeba jednak pamiętać, że zabiegi te zwiększają zużycie oleju, a tym samym emisję węglowodorów, podwyższają temperaturę tłoka i pogarszają szczelność cylindra.

2. METODY KSZTAŁTOWANIA POWIERZCHNI GŁADZI CYLINDRA ZE STOPÓW ALUMINIUM

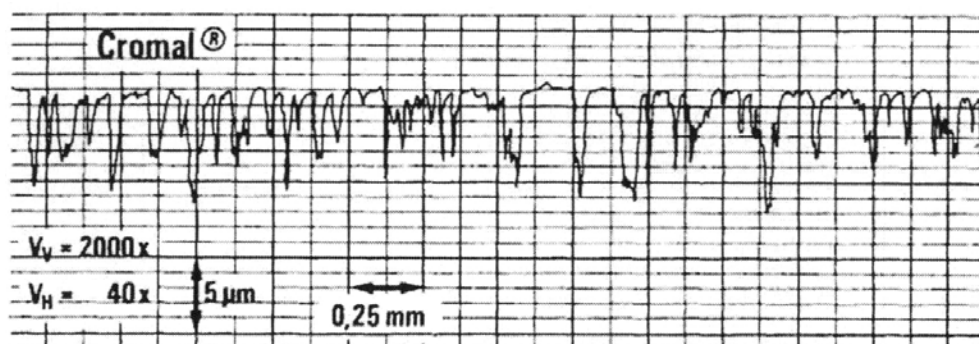
Coraz częściej stosowanym materiałem na kadłuby, zwłaszcza małych silników o ZI, są stopy aluminium. W porównaniu do żeliwa odznaczają się one około dwuipółkrotnie mniejszą gęstością i trzykrotnie większą zdolnością do przewodzenia ciepła. Jednak złe właściwości cierne pary tłok – cylinder, skutkujące nadmiernym zużyciem i dużą skłonnością do zacierania, powodowały ograniczenia w stosowaniu tego materiału na kadłuby. Na szersze zastosowanie stopów aluminium pozwoliło opracowanie nowych technologii kształtowania gładzi cylindra. W tabeli 1 podano rodzaje obróbki cylindrów ze stopów aluminium stosowane przez firmy KOLBENSCHMIDT i MAHLE [8].

Tabela 1. Rodzaje obróbki cylindrów ze stopów aluminium [8]

KOLBENSCHMIDT	MAHLE
ALUSIL	SILUMAL
GALNIKAL	NIKASIL
CHROME CYLINDER	CROMAL
LOKASIL	

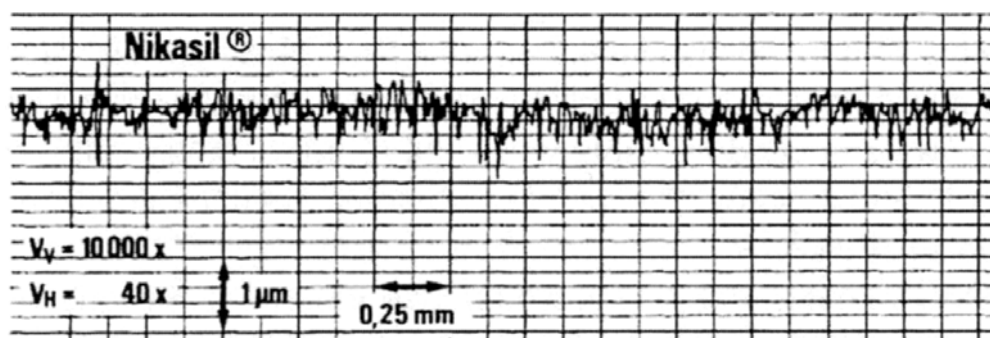
Cylindry ALUSIL wykonane są ze stopu oznaczonego A390 i zawierają kryształy krzemu o wymiarach 20...50 μm . Po honowaniu cylindry poddaje się trawieniu elektrochemicznemu dzięki, któremu uzyskuje się powierzchnię nośną ukształtowaną z kryształów krzemu wystających około 0,7...1,5 μm z metalicznego podłoża. Pomędzy kryształami krzemu, którego powierzchnia stanowi 80% powierzchni gładzi cylindra jest 20% wgłębień stanowiących zasobniki oleju [1].

Innym sposobem podniesienia właściwości ciernych cylindra ze stopu aluminium jest chromowanie powierzchni. Chrom stanowi twarde pokrycie (950...1100 HV) [2] odporne na zużycie i o małym współczynniku tarcia. Ze względu na małą zwilżalność chromu olejem, powierzchnia do chromowania wymaga specjalnego przygotowania lub obróbki elektrochemicznej w celu uzyskania zagłębień na zbiorniki oleju. Powierzchnia charakteryzuje się średnią wartością odchyłki od profilu około 1,2 μm z maksymalnymi zagłębieniami wynoszącymi około 4,5 μm . Na rys. 1 przedstawiono profilogram chromowanej powierzchni roboczej cylindra ze stopu aluminium CROMAL firmy MAHLE.



Rys. 1. Profilogram chromowanej powierzchni roboczej cylindra CROMAL firmy MAHLE [2]

Powierzchnia cylindra może być również pokryta naniesioną elektrolitycznie warstwą niklu o grubości 0,006...0,1 mm z jednorodnymi wtrąceniami twardych cząstek krzemu i węglików o wymiarze mniejszym niż 2,5 μm , która następnie podlega honowaniu. Średnia wartość odchyłki od profilu wynosi dla tej powierzchni około 0,4 μm z maksymalnymi zagłębieniami około 1,2 μm [2]. Na rys. 2 przedstawiono profilogram niklowanej powierzchni roboczej cylindra aluminiowego po honowaniu.



Rys. 2. Profilogram niklowanej powierzchni roboczej cylindra aluminiowego po honowaniu [2]

Firma Kolbenschmidt pod nazwą LOKASIL stosuje technologię zalewania tulei ze stopu aluminium o zwiększonej zawartości krzemu w stopie aluminium typowym dla kadłuba. Dzięki temu uzyskuje się twardą i odporną na zużycie powierzchnię.

3. METODY OBRÓBKİ GŁADZI ŻELIWNYCH TULEI CYLINDROWYCH

Podstawowym materiałem do produkcji cylindrów jest żeliwo szare. Żeliwo cechuje się stosunkowo dużą twardością (240...280 HB) [2], odpornością na pracę w wysokich temperaturach, dużym wskaźnikiem wytrzymałości zmęczeniowej, odpornością na ścieranie, dobrymi własnościami ślizgowymi, wysoką zdolnością tłumienia drgań, dobrymi cechami technologicznymi.

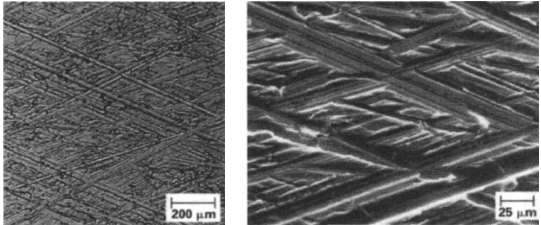
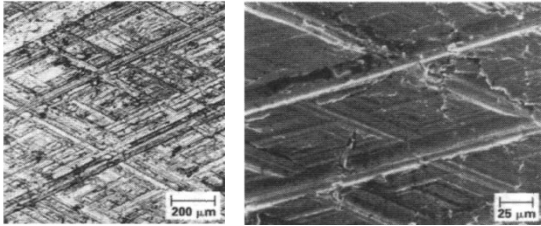
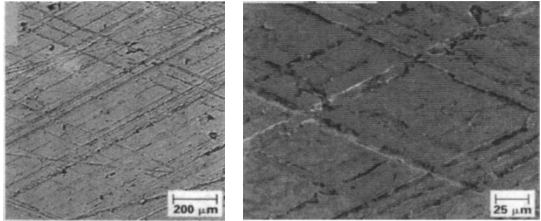
Gładź cylindra musi zapewniać dostateczną powierzchnię nośną i zdolność utrzymywania oleju. Wstępna gładkość powierzchni decyduje o czasie trwania okresu docierania i wielkości zużycia w tym okresie. Powszechną metodą stosowaną do obróbki cylindrów jest honowanie. W tabeli 2 przedstawiono stosowane obecnie metody honowania [1].

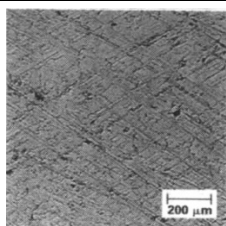
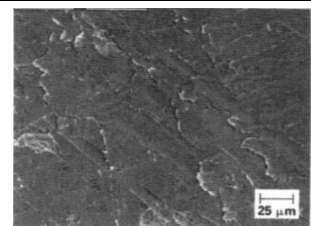
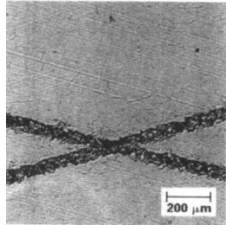
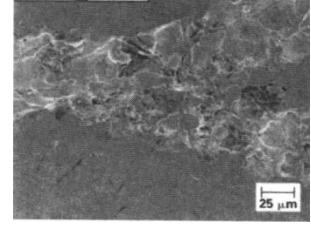
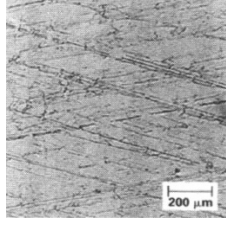
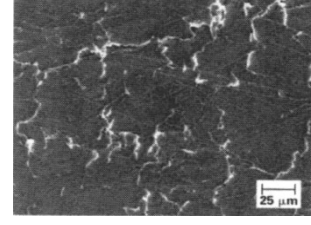
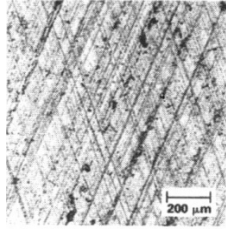
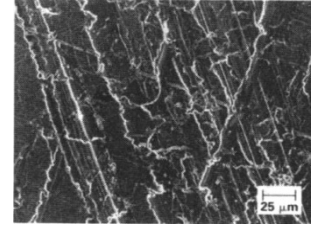
4. KSZTAŁTOWANIE TOPOGRAFII POWIERZCHNI GŁADZI CYLINDROWEJ SKONCENTROWANYM STRUMIENIEM ENERGII

Do kształtowania topografii powierzchni gładzi cylindrowej, oprócz metod tradycyjnych, stosuje się metody wykorzystujące skoncentrowany strumień energii w szczególności wiązkę laserową czy ciecz pod wysokim ciśnieniem. Dzięki wysokiej gęstości mocy wiązki laserowej wynoszącej $10^{14} \dots 10^{16} \text{ W/cm}^2$ można nią topić i odparowywać wszystkie znane materiały [4]. Podstawowym sposobem jest drażnienie na powierzchni zagłębień stanowiących zasobniki oleju przy użyciu wiązki laserowej. Następuje usuwanie materiału przez miejscowe stopienie i odparowanie.

Według [5, 6] stosowanie zasobników oleju w formie wklęsłych czasz zwiększa grubość filmu olejowego w układzie T-P-C i dzięki temu zmniejsza intensywność zużycia cylindra i pierścieni. W czasie przejścia pierścieni przez obszar cylindra teksturowany laserowo następuje ściskanie oleju w mikro zasobnikach i wytworzenie ciśnienia, dzięki któremu smarowanie przybiera postać smarowania hydrodynamicznego. Układ staje się sprawniejszy i ma mniejsze skłonności do zacierania. Według [1] taka struktura powierzchni pozwala na zmniejszenie strat tarcia nawet o 30%.

Tabela 2. Metody honowania gładzi cylindra [1]

Charakterystyka procesu honowania	Obrazy struktury	Wybrane parametry chropowości
Standardowe Honowanie dwuetapowe narzędziami o różnej ziarnistości		$R_a = 0,8 \mu\text{m}$ $R_z = 8 \mu\text{m}$ Kąt honowania 30 – 60°
Plateau trzyetapowe Po dwóch etapach stosuje się trzeci, który usuwa szczyty nierówności i wytwarza powierzchnię nośną. W wyniku tego procesu powstają na powierzchni w regularnych odstępach głębsze rysy stanowiące zasobniki oleju		$R_a = 0,6 \mu\text{m}$ $R_z = 6 \mu\text{m}$ Kąt honowania 30 – 60°
Brush honing (honowanie szczotkowe) W trzecim etapie drobnoziarniste oselki usuwają z powierzchni gładzi jedynie cząstki luźno związane z podłożem		$R_a = 0,7 \mu\text{m}$ $R_z = 7 \mu\text{m}$ Kąt honowania 30 – 60°

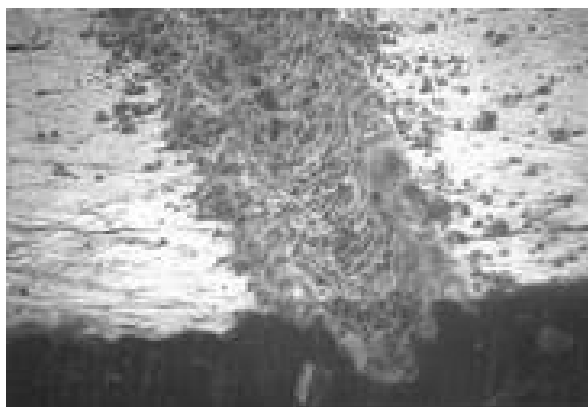
<p>Honowanie strumieniowe W czwartym etapie za pomocą strumienia cieczy o ciśnieniu około 12 MPa usuwa się cząstki bardzo słabo związane z podłożem, a w wyniku wypłukiwania cząstek węglików powstają zagłębienia stanowiące zasobniki oleju</p>			<p>$R_a = 0,4 \mu\text{m}$ $R_z = 5 \mu\text{m}$ Kąt honowania 40 – 50°</p>
<p>Obróbka laserowa Na powierzchni po honowaniu wykonuje się promieniami lasera zagłębienia w postaci linii, które stanowią zasobniki oleju. Po teksturoowaniu laserowym powierzchnię honuje się bardzo drobnymi ośłkami</p>			<p>$R_a = 0,1 \mu\text{m}$ $R_z = 1 \mu\text{m}$ Kąt honowania 30 – 60°</p>
<p>Gładkie honowanie Trzeci etap obróbki jest wykonywany bardzo drobnymi ośłkami diamentowymi. Powierzchnia jest zbliżona do powierzchni uzyskanej po dotarciu silnika</p>			<p>$R_a = 0,35 \mu\text{m}$ $R_z = 3,5 \mu\text{m}$ Kąt honowania 30 – 60°</p>
<p>Gładkie honowanie spiralne W celu obniżenia zużycia oleju rysy honownicze przecinają się pod kątem około 135°</p>			<p>$R_a = 0,45 \mu\text{m}$ $R_z = 4 \mu\text{m}$ Kąt honowania ok. 135°</p>

Istotnym elementem w teksturoowaniu laserowym gładzi cylindra jest optymalne dobranie kształtu, wielkości i rozmieszczenia zasobników oleju. Kozaczewski [1] podaje, że zasobniki oleju o średnicy około 100 μm i głębokości około 10 μm wykonane w górnym obszarze cylindra na powierzchni około 12% są optymalne dla zabezpieczenia układu przed zatarciem. Na rys. 3 przedstawiono gładź cylindra po teksturoowaniu laserowym w strefie GMP pierścieni tłokowych.

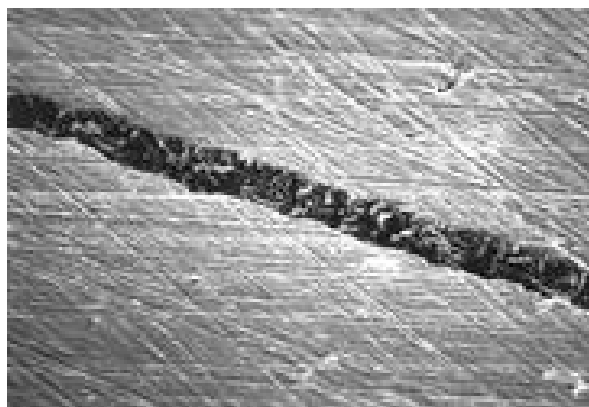


Rys. 3. Gładź cylindra po teksturoowaniu laserowym [7]

Proces obróbki gładzi cylindra obejmuje honowanie z uzyskaniem plateau, teksturowanie laserowe i honowanie gładkościowe bardzo drobnymi ośłkami w celu usunięcia wpływów powstałych po obróbce laserowej (rys. 4, 5).

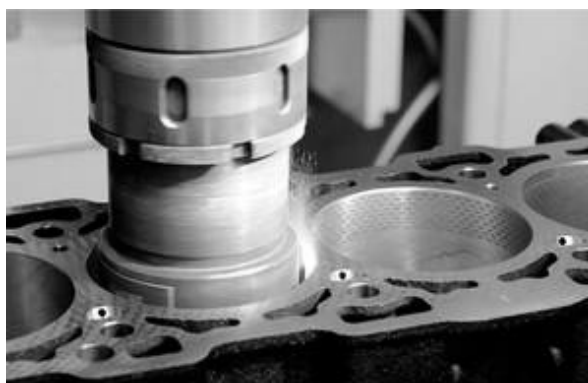


Rys. 4. Struktura po obróbce laserowej [7]



Rys. 5. Struktura po honowaniu gładkościowym [7]

Firma Gehring przewiduje, że teksturowanie laserowe gładzi cylindra ułatwi spełnienie norm emisji spalin Euro 5 i Euro 6.



Rys. 6. Proces obróbki laserowej gładzi cylindra [7]

Obróbka wysokociśnieniowym strumieniem cieczy wykorzystuje jako narzędzie zogniskowany w dyszy strumień cieczy o naddźwiękowej prędkości. Dzięki dużej prędkości przyłożenia obciążenia powstają mikropeknięcia powodujące odrywanie bardzo małych (rzędu kilku μm) cząstek materiału o różnych kształtach [4], a powstałe zagłębienia służą jako zasobniki olejowe.

Oznaczenia i skróty

- °OWK – stopień obrotu wału korbowego
- T-P-C – układ tłok-pierścienie-cylinder
- ZI – zapłon iskrowy
- ZS – zapłon samoczynny

Literatura

- [1] Kozaczewski W.: Konstrukcja grupy tłokowo – cylindrowej silników spalinowych. WKŁ, Warszawa 2004.
- [2] Luft S.; Podstawy budowy silników. WKŁ, Warszawa 2006.
- [3] Kaźmierczak A.: Tarcie i zużycie zespołu tłok-pierścienie-cylinder. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.
- [4] Oczóś K.: Kształtowanie materiałów skoncentrowanymi strumieniami energii. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1988.
- [5] Napadłek W.: Analiza możliwości wykorzystania mikroobróbki laserowej w procesie kształtowania topografii warstwy wierzchniej stalowych tulei cylindrowych azotowanych jarzeniowo. Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol.13, No. 4, ILOt, Warszawa 2006.
- [6] Napadłek W., Balicki P.: Teksturowanie warstwy powierzchniowej gładzi cylindrowej z wykorzystaniem ablacyjnej mikroobróbki laserowej. Logitrans – VII Konferencja Naukowo-Techniczna Logistyka, Systemy Transportowe, Bezpieczeństwo w Transporcie.
- [7] Gehring Laser Honing Technology Overview (www.gehring.de).
- [8] MSI Motor Service International GmbH: Kolbenschmidt Pierburg Technical Brochure “Reconditioning of Aluminium Engines” (www.ms-motor-service.com).

REVIEW OF METHODS FOR CYLINDER LINER SURFACE TEXTURING

The article presents an overview and brief description of the methods for cylinder ICE cylinder liner surface topography shaping. Working conditions of piston-rings-cylinder assembly and their impact on engine performance and reliability are discussed. Then the conventional ways of surface shaping of cylinders made of aluminum and iron, as well laser and high-pressure liquid stream texturing technologies are presented.