

Józef Gruszka

**Technologiczne kształtowanie
cech funkcjonalnych warstwy
powierzchniowej tulei cylindrowych**

Poznań 2012

strona redakcyjna

Spis treści

Streszczenie	5
Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów	6
1. Wprowadzenie.....	9
2. Cechy funkcjonalne tulei cylindrowych w nowych konstrukcjach silników spalinowych	11
2.1. Kierunki rozwoju silników spalinowych o zapłonie samoczynnym	11
2.2. Charakterystyka cech funkcjonalnych warstwy powierzchniowej	15
2.3. Analiza zmian w kształtowaniu cech funkcjonalnych	18
2.3.1. Właściwości materiałów konstrukcyjnych.....	18
2.3.2. Właściwości struktury geometrycznej warstwy powierzchniowej.....	24
2.4. Podsumowanie	34
3. Problem badawczy.....	36
3.1. Zdefiniowanie problemu	36
3.2. Cele rozprawy	38
3.3. Zakres pracy	39
4. Charakterystyka modelu technologicznego oraz metodyka badań.....	41
4.1. Model technologiczny warstwy powierzchniowej.....	41
4.2. Charakterystyka modelu technologicznego procesu kształtowania odlewu oraz metodyka badań.....	41
4.3. Charakterystyka modelu technologicznego procesu gładzenia oraz metodyka badań	45
5. Badania wstępne cech funkcjonalnych warstwy powierzchniowej tulei cylindrowych.....	52
5.1. Badania właściwości nowych materiałów konstrukcyjnych	52
5.2. Badania nowych rozwiązań struktury geometrycznej.....	60
6. Badania technologiczne cech funkcjonalnych warstwy powierzchniowej tulei cylindrowych.....	73
6.1. Analiza cech funkcjonalnych	73
6.2. Badania technologiczne cech funkcjonalnych	76
6.2.1. Charakterystyka procesu odlewania.....	76
6.2.2. Badania zdolności technologicznej procesu odlewania	78

6.2.3. Charakterystyka procesu obróbki mechanicznej.....	80
6.2.4. Badania zdolności technologicznej procesu gładzenia	83
7. Analiza wyników badań oraz określenie kierunków rozwoju technologicznego tulei cylindrowych.....	91
7.1. Właściwości żeliw.....	91
7.2. Właściwości stali.....	95
7.3. Właściwości struktury geometrycznej warstwy powierzchniowej	96
7.4. Zestawienie wyników badań w doniesieniu do silników HDEP VOLVO.....	100
7.5. Kierunki rozwoju technologicznego tulei cylindrowych	102
8. Posumowanie i wnioski.....	104
8.1. Wprowadzenie	104
8.2. Wnioski poznawcze	104
8.3. Wnioski użytkowe.....	106
8.4. Kierunki dalszych prac.....	108
8.5. Wnioski końcowe.....	109
8.5.1. Stan dotychczasowy	109
8.5.2. Wkład do stanu wiedzy o technologicznym kształtowaniu cech funkcjonalnych warstwy powierzchniowej tulei	109
8.5.3. Stan aktualny.....	109
Literatura	110
Abstract.....	123

Streszczenie

W pracy przedstawiono syntezę problemów dotyczących cech funkcjonalnych warstwy powierzchniowej gładzi tulei cylindrowych (materiał, struktura geometryczna powierzchni otworu), które mają wpływ na zmniejszenie zużycia oleju, emisję cząstek stałych oraz na zużycie tribologiczne elementów układu tłokowo-cylindrowego (tłok, pierścienie tłokowe–cylinder/tuleja cylindrowa) na przykładzie silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym.

Na podstawie analizy aktualnego stanu wiedzy oraz badań własnych w zakresie cech funkcjonalnych warstwy powierzchniowej gładzi tulei cylindrowych stwierdzono, że nowe wymagania środowiskowe w zakresie emisji cząstek stałych i zużycia oleju wyznaczają nie tylko dla silników spalinowych, ale i dla tulei cylindrowych nowe kierunki ich rozwoju. W związku z tym przyjęto, że w tulei cylindrowej występuje zespół cech funkcjonalnych, który można opisać ściśle określonymi parametrami, a które następnie stanowią podstawę wyboru określonej technologii ich wytwarzania i jednocześnie mają znaczący wpływ na pracę silnika spalinowego oraz na zużycie oleju.

W celu rozwiązania tego zagadnienia opracowano model technologiczny tulei cylindrowej oraz metodykę badań i opierając się na nich przeprowadzono badania cech funkcjonalnych w procesie odlewania i następnie w procesie obróbki mechanicznej.

Opierając się na wielkościach i parametrach opisujących cechy funkcjonalne, przeprowadzono badania kierunków rozwoju technologicznego nowych materiałów stosowanych w konstrukcji tulei cylindrowych oraz rozwoju technologii kształtujących strukturę geometryczną powierzchni gładzi tulei cylindrowych.

Wyniki badań pozwoliły na przeanalizowanie zdolności technologicznych w warunkach przemysłowych nowych gatunków żeliw w procesie ich odlewania i następnie obróbki mechanicznej. Uzyskane wyniki stanowiły podstawę weryfikacji założeń do przyjętego modelu technologicznego oraz kwalifikacji tulei do montażu silników nowej platformy HDEP VOLVO.

Wyniki przeprowadzonych badań własnych wskazują kierunki rozwoju technologicznego nowych materiałów stosowanych w konstrukcji tulei cylindrowych oraz możliwości technologicznego kształtowania struktury geometrycznej warstwy wierzchniej w związku z rozwojem wymagań środowiskowych i z tym związanych nowych konstrukcji silników spalinowych typu HDD.

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów

A [%]	– wydłużenie względne materiału
C_p	– wskaźnik zdolności technologicznej procesu
C_{pk}	– wskaźnik położenia wartości średniej w badaniach zdolności technologicznej procesu
E [GPa]	– moduł sprężystości wzdłużnej Younga
EN-GJL	– oznaczenia żeliwa szarego
EN-GJV	– oznaczenia żeliwa wermikularnego
EN-GJS	– oznaczenia żeliwa sferoidalnego
HBW	– jednostka pomiaru twardości metodą Brinela
LH	– surówka hematytowa
Mr1 [%]	– udział materiałowy
Mr2 [%]	– udział materiałowy
P_g	– siła ciśnienia gazów
P_m	– siła bezwładności masy pierścienia
P_{max} [MPa]	– maksymalne ciśnienie spalania
PM [g]	– zawartość cząstek stałych w spalinach (sadza)
P_E	– siła sprężystości własnej pierścieni
Ra [μm]	– średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości
Rz [μm]	– największa wysokość profilu chropowatości
Rmax [μm]	– maksymalna głębokość profilu chropowatości
Rpk [μm]	– zredukowana wysokość wzniesień
Rk [μm]	– głębokość rdzenia chropowatości
Rvk [μm]	– zredukowana głębokość wgłębień
R_m [MPa]	– doraźna granica wytrzymałość na rozciąganie
$R_{0,2}$ [MPa]	– umowna granica plastyczności
TWW	– technologiczna warstwa wierzchnia
W	– siła docisku kołnierza tulei cylindrowej do bloku
V_c [m/min]	– składowa ruchu wypadkowego prędkości V_o/V_h w procesie gładzenia
V_h [m/min]	– prędkość ruchu posuwisto-zwrotnego głowicy w procesie gładzenia
V_o [m/min]	– prędkość obrotowa głowicy w procesie gładzenia
α [10^{-6}K^{-1}]	– współczynnik rozszerzalności cieplnej
α [°]	– kąt gładzenia
λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$]	– współczynnik przewodności cieplnej

σ	– odchylenie standardowe
AADI	– <i>Asforming Austempered Ductile Iron</i> – żeliwo sferoidalne hartowane z przemianą izotermiczną poddawane niskotemperaturowej obróbce cieplno-plastycznej
ADI	– <i>Austempered Ductile Iron</i> – żeliwo sferoidalne hartowane z przemianą izotermiczną
AGI	– <i>Austempered Gray Iron</i> – żeliwo z grafitem płatkowym poddawane hartowaniu z przemianą izotermiczną
AVCI	– <i>Austempered Vermicular Cast Iron</i> – żeliwo z grafitem wermikularnym poddawane hartowaniu z przemianą izotermiczną
APS	– <i>Atmospheric Plasma Spraying</i> – proces natryskiwania plazmowego z zastosowaniem proszku bioceramicznego
CAI	– <i>Cold Air Intake</i> – dolot zimnego powietrza
CKD	– rodzaj atestowanych wzorców spektrometrycznych
CNG	– <i>Compressed Natural Gas</i> – sprężony gaz ziemny
DADI –	– <i>Direct Austempered Ductile Iron</i> – żeliwo sferoidalne poddawane bezpośredniemu hartowaniu z przemianą izotermiczną
DMP	– dolny martwy punkt (tłoka)
DPF	– <i>Diesel Particular Filter</i> – filtr cząstek stałych
Euro	– oznaczenie norm europejskich w zakresie emisji spalin i zużycia oleju
FEV	– <i>Forschungsgesellschaft für Energietechnik und Verbrennungsmotoren</i> – przedsiębiorstwo badawczo-rozwojowe specjalizujące się w układach napędowych
FG	– proces gładzenia strumieniem cieczy z ziarnem diamentowym
EGR	– <i>Exhaust Gas Recirculation</i> – system recyrkulacji spalin służący do obniżenia zawartości NO _x w spalinach
FM	– <i>Federal Mogul</i> – producent tulei cylindrowych
GDC	– <i>Goetze-Diamond-Coating</i> – pokrycie pierścieni drobinami diamentu w osnowie chromu
GKN-Z	– <i>Zhongyuan Cylinder Liner Company</i> – producent tulei cylindrowych
GMP	– górny martwy punkt (tłoka)
GPS	– <i>Geometrical Product Specifications</i> – specyfikacja geometryczna wyrobu
HCCI	– <i>Homogenous Charge Compression Ignition</i> – spalanie w aktywnej termicznie atmosferze
HDD	– <i>Heavy Duty Diesel</i> – silniki ZS do ciężkich pojazdów
HDEP	– <i>Heavy Duty Engine Platform</i> – platforma silników do ciężkich pojazdów

HSDI	– <i>High Speed Direct Injection</i> – szybkoobrotowy silnik ZS z bezpośrednim wtryskiem paliwa
HVOF	– <i>High Velocity Oxygen Fuel</i> – technologia nanoszenia powłok termicznych metodą natryskową
KOD	– liczba cząstek liczona według ich rozmiaru
LDV	– <i>Light Duty Vehicle</i> – lekki użytkowy pojazd samochodowy
LPG	– <i>Liquid Petroleum Gas</i> – ciepla mieszanka propanu i butanu
LVD	– <i>Light Duty Diesel</i> – silniki ZS do pojazdów LDV
MPI	– <i>Multi Point Injection</i> – wielopunktowy wtrysk paliwa
MPS	– <i>Material Product Specifications</i> – specyfikacja materiałowa wyrobu
MD	– ziarno diamentu syntetycznego
ND	– ziarno diamentu naturalnego
NQD	– ziarno Norton Quantum
PCCI	– <i>Premixed Charge Compression Ignition</i> – system wtrysku paliwa do komory
PDP	– <i>Product Development Process</i> – proces rozwoju produktu
ppm (wagowo)	– <i>parts per milion</i> – jednostka udziału wagowego
PPM	– <i>parts per milion</i> – miara jakości, wskazuje liczbę wad na milion (statystyczna możliwość ich powstania)
PTWA	– <i>Plasma Transferred Wire Arc</i> – technologia termicznego nanoszenia powłok z zastosowaniem plazmy
PVD	– <i>Physical Vapor Deposition</i> – technologia osadzania powłok z wykorzystaniem fazy gazowej plazmy
SCR	– <i>Selective Catalytic Reduction</i> – selektywna katalityczna redukcja spalin
SEM	– <i>Scanning Electron Microscope</i> – skaningowy mikroskop elektronowy
SGG	– ziarno kubitronu
SUS	– rodzaj atestowanych wzorców spektrometrycznych
TPC	– układ tłok–pierścienie tłokowe–cylinder
VGT	– <i>Variable Geometry Turbocharger</i> – turbosprężarka o zmiennej geometrii
VFT	– <i>Variable Flow Turbine</i> – turbosprężarka o zmiennym przepływie
ZI	– zapłon iskrowy
ZS	– zapłon samoczynny
VDA	– <i>Verband der Automobilindustrie</i> – Stowarzyszenie Niemieckiego Przemysłu Motoryzacyjnego

1. Wprowadzenie

Silniki spalinowe pomimo swojej ponadstuletniej historii nadal pozostają i prawdopodobnie pozostaną na najbliższe dziesięciolecia podstawowym źródłem napędu środków transportu i maszyn roboczych. W przeszłości silniki spalinowe były konstruowane pod kątem możliwości uzyskiwania wysokich osiągnięć, głównie w zakresie mocy i momentu obrotowego. Aktualny rozwój układów napędowych w skali rynku globalnego jest oparty na rozwiązaniach konwencjonalnych silników tłokowych ZI i ZS, które na przestrzeni ostatnich lat zostały poddane intensywnemu rozwojowi technologicznemu, głównie w zakresie:

- osiągnięć (wartość mocy/momentu, zdolność napędowa),
- ochrony środowiska (emisja związków toksycznych, hałas, zużycie paliwa, efekt cieplarniany),
- źródeł energii (dostępność ropy naftowej, paliwa alternatywne),
- jakości (niezawodność, wytrzymałość).

Spełnienie wymogów dotyczących ochrony środowiska, utrzymanie odpowiedniego poziomu osiągnięć pojazdów, ich niezawodności i trwałości w całym cyklu życia, bezpieczeństwa i atrakcyjności handlowej stwarzają nową sytuację dla przemysłu silnikowego oraz dostawców poszczególnych systemów i elementów silnikowych. Ważnym zagadnieniem dla producentów silników pozostaje kwestia obniżania kosztów wytwarzania i kosztów eksploatacji, co przy obecnych procesach globalizacji stwarza często przeciwstawne wymagania, które branża silnikowa zmuszona jest realizować.

Tuleja cylindrowa jako podstawowy element układu tłokowo-cylindrowego odgrywa bardzo ważną, a zarazem złożoną rolę w rozwiązaniach nowych konstrukcji silników spalinowych w świetle wymogów środowiskowych. Nowe rozwiązania konstrukcyjne silników spalinowych wymagają od tulei cylindrowych spełnienia ściśle określonych kryteriów w zakresie:

- dużej odporności na zużycie ściernie (abrazyjne) i korozyjne oraz braku skłonności do zacierania się,
- dobrej zdolności do tłumienia drgań i związanej z tym odporności na zjawiska kawitacji,
- dobrej przewodności cieplnej i możliwości przeniesienia zwiększonych obciążeń mechaniczno-termicznych, przy zachowaniu trwałości kształtu w zakresie makro- i mikrogeometrii otworu,
- możliwości zmniejszenia masy.

Całość rozwiązań powinna mieć znaczący wpływ na spełnienie wymagań środowiskowych w zakresie zmniejszenia zużycia oleju i emisji cząstek stałych

oraz zmniejszenia hałasu, przy zachowaniu ekonomicznie uzasadnionych kosztów wytwarzania.

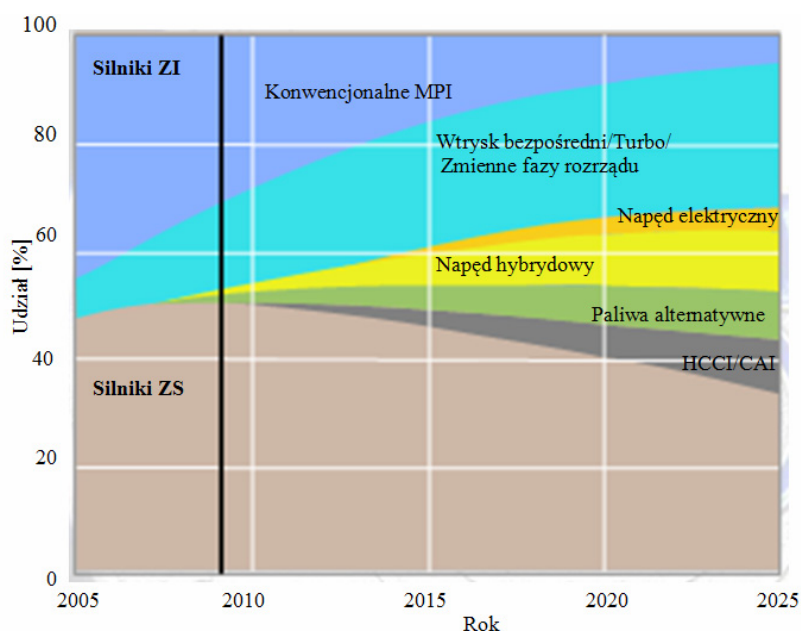
Zamierzeniem autora tej rozprawy jest wskazanie możliwości technologicznego rozwoju cech funkcjonalnych warstwy powierzchniowej tulei cylindrowych w zakresie materiału oraz makro- i mikrogeometrii otworu. Rozwój ten pozwoli na spełnienie przez tuleje cylindrowe nie tylko wymagań związanych z przeniesieniem zwiększonych obciążeń mechaniczno-termicznych, przy zachowaniu trwałości kształtu otworu, ale również wymagań tribologicznych i związanych z tym nowych wymagań dotyczących ochrony środowiska w odniesieniu do silników spalinowych typu HDD.

2. Cechy funkcjonalne tulei cylindrowych w nowych konstrukcjach silników spalinowych

2.1. Kierunki rozwoju silników spalinowych o zapłonie samoczynnym

Prognozy rozwoju układów napędowych (rys. 2.1) wskazują, że w najbliższej przyszłości silniki ZI i ZS będą nadal dominowały jako źródła napędu pojazdów. Wprowadzenie paliw alternatywnych będzie stanowić nowe wyzwanie. W dalszej perspektywie przewiduje się umocnienie pozycji napędów hybrydowych oraz rozwój ich masowej produkcji [15, 100, 112–115, 144].

W perspektywie długoterminowej (lata 2020-2025) przewiduje się ewolucję ogniw paliwowych połączoną z jednoczesnym rozwojem struktury źródeł energii [3, 15, 28, 82, 113, 114].



Rys. 2.1. Prognoza rozwoju napędów [15, 100, 112–115, 144]

Prognozy rozwoju układów napędowych z silnikami ZS w poszczególnych regionach świata [82, 100, 109, 112–115, 144] charakteryzują się różnymi scenariuszami rozwoju:

- Ameryka Północna: zastosowanie silników ZS głównie w samochodach ciężarowych oraz osobowych przede wszystkim z uwagi na wzrost wymagań środowiskowych (rys. 2.2),
- Ameryka Łacińska, Afryka, Bliski Wschód: rozwój technologiczny nie będzie stymulowany przez wymagania w zakresie emisji i zużycia oleju,
- Europa: silniki ZS wysokiej technologii, aby osiągnąć cele emisji CO₂, a także spełnić surowe normy emisji NO_x i PM (rys. 2.2),
- Azja – rejon Pacyfiku: 3–4-cylindrowe silniki „taniej technologii”.

Obszar / Rok	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
USA	5,4	NO _x + HC 3,35		NO _x 1,6			NO _x 0,27						
	PM 0,13	PM 0,13		PM 0,013			PM 0,013						
	US 02 (EPA 04)				US 07 (EPA 07)			US 10 (EPA 10)					
Europa	NO _x 5,0		NO _x 3,5			NO _x 2,0			NO _x 0,4				
	PM 0,10		PM 0,02			PM 0,02			PM 0,01				
	Euro 3		Euro 4			Euro 5			Euro 6				
Ameryka Południowa	NO _x 7,0		NO _x 5,0			NO _x 3,5							
	PM 0,10		PM 0,10			PM 0,02							
Japonia	NO _x 4,5	NO _x 3,38		NO _x 2,0			NO _x 0,26						
	PM 0,18	PM 0,18		PM 0,027			PM 0,013						
Korea	NO _x 6,0												
	PM 0,15												
Chiny	NO _x 8,0		NO _x 7,0										
	PM 0,30		PM 0,15										
Taiwan	NO _x 6,7												
	PM 0,13												
Australia	NO _x 6,0		NO _x 4,0										
	PM 0,20		PM 0,20										

Przybliżona skala emisji – NO_x / PM – g / kWh



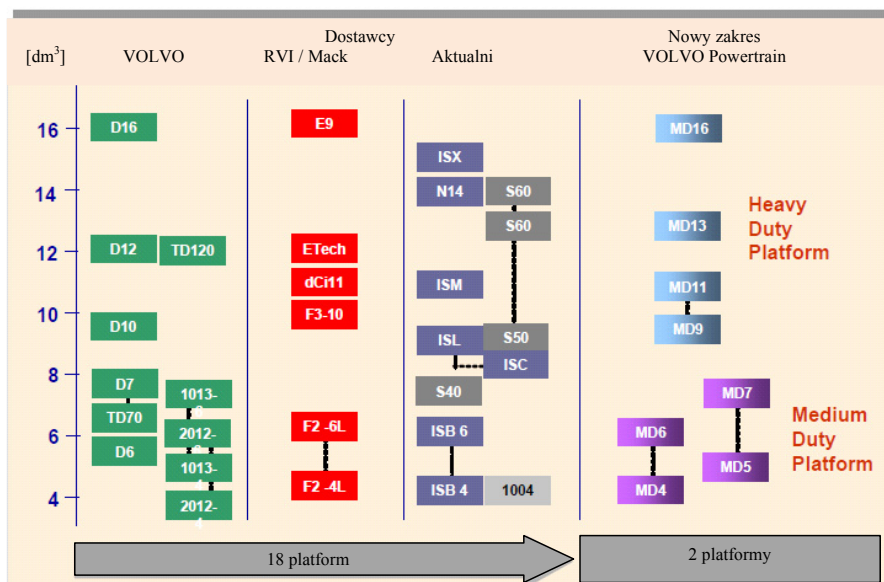
Rys. 2.2. Zakres rozwoju standardów emisji spalin w świecie [13, 51, 59, 186]

Z uwagi na posiadany przez silniki ZS znaczny potencjał w obniżaniu zużycia paliwa są one uważane za najlepsze rozwiązanie do spełnienia rozwijających się standardów emisji spalin w Europie (Euro), USA (US – United States i EPA – *Environment Protection Agency* – Urząd Ochrony Środowiska w USA) i Japonii (Mode) [13, 14, 51, 59, 107–110, 112, 115, 186].

W obowiązujących standardach emisji spalin przyjęto stopniowe ograniczanie maksymalnych ilości najbardziej szkodliwych związków (NO_x i PM), jakie mogą być emitowane do atmosfery przez silnik spalinowy (rys. 2.3).

W konsekwencji konstrukcje silników ZS będą nadal doskonalone głównie przez wprowadzanie na szerszą skalę zaawansowanych technologii, które obecnie są jeszcze w fazie rozwoju lub w początkowej fazie wdrożeń do produkcji:

- nowe systemy spalania oraz łączenie systemów spalania (gdy jest to możliwe),
- nowe paliwa łączące dobrą odparowalność z dużą zdolnością do samozapłonu (metan – CNG *Compressed Natural Gas* – sprężony gaz ziemny, gaz upłynniony – LPG *Liquid Petrol Gas* – ciekła mieszanka propanu i butanu, biopaliwa i wodór),
- zastosowanie głowic wielozaworowych oraz systemu zmiennych faz rozrządu i wzniosu zaworów,
- rozwój układów wtryskowych w kierunku dowolnego kształtowania charakterystyki wtrysku, a także wprowadzenie wtryskiwaczy o zmiennym przekroju wypływu paliwa i wzroście ciśnienia wtrysku do 300 MPa oraz wtrysku wielofazowego,
- zastosowanie doładowania dynamicznego i turbosprężarki typu VGT (*Variable Geometry Turbocharger* – turbosprężarka o zmiennej geometrii) lub VFT (*Variable Flow Turbine* – turbosprężarka o zmiennym przepływie z chłodzeniem powietrza doładowanego),
- zmniejszenie wymiarów głównych silników (przede wszystkim zmniejszenie pojemności skokowej),



Rys. 2.3. Zakres nowej platformy HDEP silników VOLVO [59]

- zmniejszenie strat tarcia: nowe technologie, materiały i rozwiązania konstrukcyjne poszczególnych elementów i całych systemów oraz układów, w tym między innymi elementów układu tłokowo-korbowego,
- pozasilnikowe metody oczyszczania spalin (system SCR – *Selective Catalytic Reduction*, system selektywnej redukcji NO_x) oraz filtr cząstek stałych (DPF – *Diesel Particular Filter*) [3, 13–15, 59, 80–81, 100, 112–115, 187, 189].

Dla producentów branży motoryzacyjnej bardzo istotną kwestią jest postępująca globalizacja i jej wpływ na profil produkcji. Rozwój technologiczny w znacznym stopniu zależy od uwarunkowań produkcyjnych, takich jak na przykład: czas realizacji nowych projektów i następnie ich wdrożenia, kompromisu pomiędzy jakością a kosztem produktu, łańcucha dostawców i ich dostępności dla nowych technologii, dojrzałości technologii oraz rozwój infrastruktury w danym regionie świata [108].

Według danych głównych producentów silników ZS typu HDD (*Heavy Duty Diesel* – silniki ZS do ciężkich pojazdów o pojemnościach skokowych > 2,4 dm³) VOLVO, Daimler Mercedes, MAN, Scania czy DAF ich nowe konstrukcje charakteryzują się:

- poziomem emisji toksycznych składników spalin i hałasu według obowiązujących wymagań,
- małym zużyciem paliwa,
- wysoką mocą/momentem obrotowym (zgodnie z przeznaczeniem),
- dużą trwałością i niezawodnością,
- zwartością konstrukcji (ograniczony ciężar i gabaryty),
- możliwością wykorzystania globalnego (różne rynki i w różnych zastosowaniach),
- niższymi kosztami produkcji i eksploatacji [59].

Potwierdzeniem tych cech są:

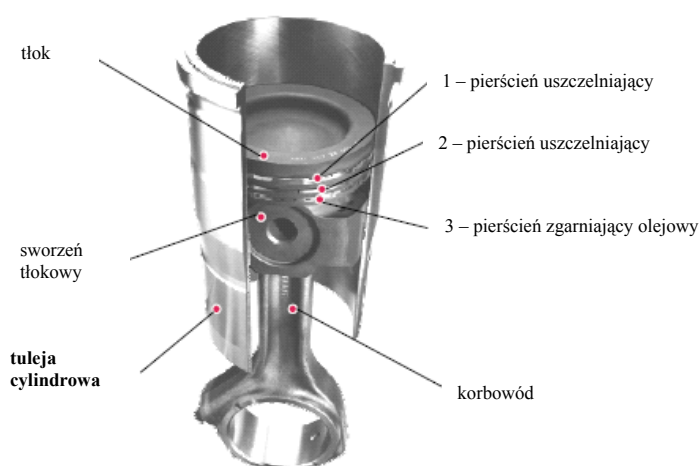
- nowa rodzina silników *Heavy Duty Engine Platform* (HDEP – platforma silników do ciężkich pojazdów) firmy Daimler AG i Daimler Truck, która istniejące w świecie osiem rodzin silników zastąpi trzema o pojemności 12 dm³, 14,8 dm³ i 15,6 dm³,
- rodzina silników HDEP firmy VOLVO, która zredukowała 18 platform do dwóch (rys. 2.3),
- rzędowy silnik 6-cylindrowy o pojemności skokowej 12,9 dm³ firmy DAF pod nazwą Paccar Mx w technologii SCR,
- silniki DC 9, DC 13 i DC 16 firmy Scania,
- silniki MAN: D08 CR, D20 CR i D26 CR.

Konstrukcje tych silników zostały oparte między innymi na nowych rozwiązaniach konstrukcyjno-technologicznych tulei cylindrowych z grupy MAHLE, które powstały w ramach prac projektowych, w których uczestniczył autor niniejszej pracy.

2.2. Charakterystyka cech funkcjonalnych warstwy powierzchniowej

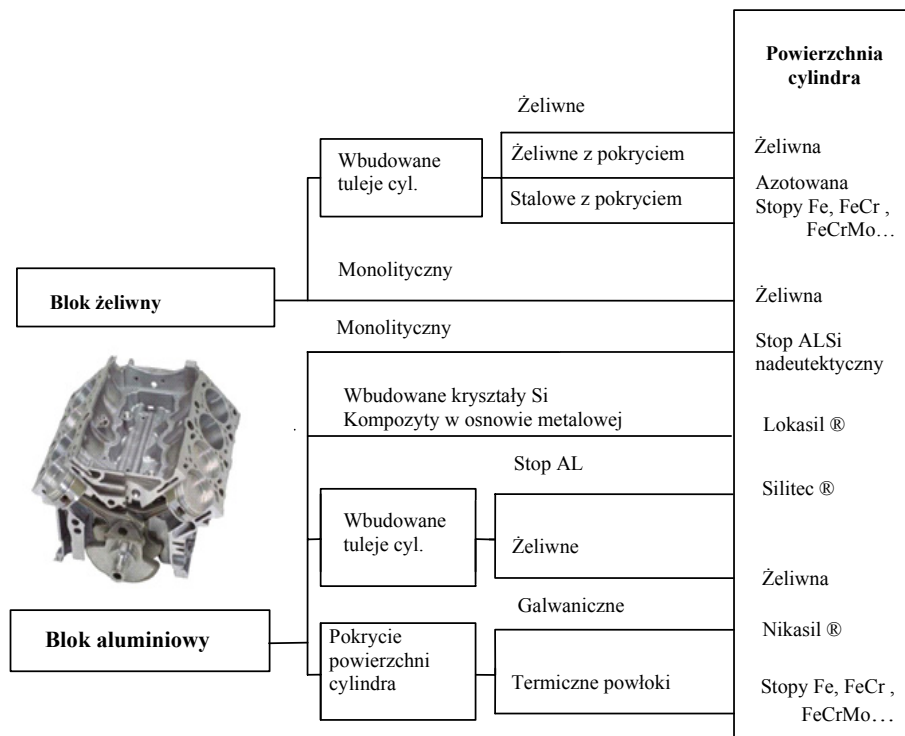
W budowie każdego silnika spalinowego centralne położenie zajmuje układ tłokowo-cylindrowy, nazywany często systemem lub zespołem tłok–pierścienie–cylinder (w skrócie TPC – rys. 2.4). W przestrzeni roboczej tego układu zachodzą podstawowe dla pracy silnika procesy przemiany termodynamicznej spalania i zamiany siły gazowej na ruch posuwisto-zwrotny. W związku z tym układ TPC i jego poszczególne elementy mają ściśle określone zadania i funkcje do spełnienia. Podstawowym zadaniem warstwy powierzchniowej gładzi tulei w układzie TPC (rys. 2.5) jest utworzenie wspólnie z tłokiem i pierścieniami tłokowymi uszczelnienia labiryntowego przestrzeni roboczej ponad denkiem tłoka oraz zminimalizowanie strat tarcia i zużycia oleju powstającego podczas suwu tłoka z pierścieniami po powierzchni gładzi cylindra pomiędzy GMP a DMP. Pozostałymi zadaniami tulei cylindrowej w układzie TPC są:

- prowadzenie tłoka i pierścieni tłokowych w czasie suwów pracy pomiędzy GMP a DMP,
- odprowadzenie ciepła z tłoka i z pierścieni tłokowych przez ściankę cylindra do czynnika chłodzącego,
- przeniesienie zmiennych obciążeń mechanicznych oraz termicznych [32, 39, 61, 80, 81, 86, 127, 128, 186, 204].



Rys. 2.4. Elementy układu tłokowo-korbowego w silniku typu HDEP

Układ TPC pod względem obciążeń roboczych stanowi najbardziej złożony i obciążony układ tribologiczny w silniku spalinowym. Poszczególne jego elementy: tłok, pierścienie tłokowe i tuleja cylindrowa tworzą pomiędzy sobą skojarzenia ruchowe, które pod względem tribologicznym stanowią odrębne układy (tabl. 2.1).

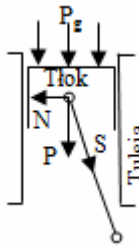
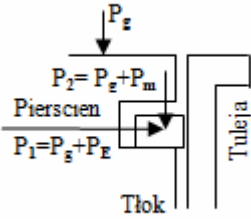
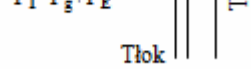
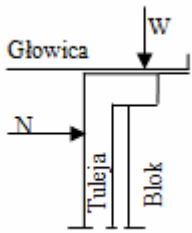


Rys. 2.5. Rozwiązania konstrukcyjne warstwy powierzchniowej cylindrów w zależności od zastosowanego materiału bloku [204]

Obciążenie poszczególnych układów tribologicznych jest ściśle związane z przebiegiem procesu spalania oraz zamianą siły gazowej na ruch posuwisto-zwrotny. Można ustalić zbiór czynników oddziałujących na współpracę poszczególnych elementów, określić rodzaj tarcia i zużycia występującego w poszczególnych układach oraz ich wpływ na pracę silnika spalinowego [31, 59, 60, 61, 80, 81, 86, 121, 127, 128, 174, 204].

Analiza poszczególnych układów tribologicznych na podstawie prac [47–48, 61, 81, 82, 86, 107, 119, 128, 178, 204] oraz badań własnych autora w ramach prac [8, 9, 14, 30–35] wskazują, że układ pierścienie tłokowe–tuleja cylindrowa ma dominujące znaczenie funkcjonalne i tribologiczne w układzie TPC. Z właściwości tribologicznych tulei cylindrowej i pierścieni tłokowych najpierw wymienia się materiał i jego właściwości mechaniczne (wytrzymałość, twardość), następnie jego strukturę i skład chemiczny. W dalszej kolejności dla tulei cylindrowych wymienia się błędy makrokształtu otworu (okrągłość, prostoliniowość lub współosiowość) oraz mikrogeometrii otworu (metoda gładzenia, układ rys, kąt, chropowatość, głębokość deformacji oraz czystość powierzchni gładzi). Dla pierścieni, w szczególności pierwszego pierścienia uszczelniającego, poza materiałem dominujące znaczenie ma jego profil i pokrycie.

Tablica 2.1. Czynniki kształtujące współpracę tribologiczną elementów układu TPC w silniku spalinowym

Układ tribologiczny	Schemat obciążenia	Czynniki oddziałujące	Rodzaj tarcia i zużycie	Oddziałuje w silniku na
Tłok–tuleja cylindrowa		N – siła nacisku tłoka na gładź tulei Pg – siła ciśnienia gazów Parametry obciążenia cieplnego Prędkość względna Hydrodynamiczny film olejowy	Tarcie ślizgowe płynne i graniczne Zużycie ściernne, korozyjne i zmęczeniowe	Trwałość i niezawodność
Tłok–pierścienie		Okresowo zmienna siła ciśnienia gazów Pg i siła bezwładności masy pierścienia Pm Siła sprężystości własnej pierścieni	Tarcie graniczne lub mieszane Zużycie ściernne, korozyjne, cieplne oraz odkształcenia plastyczne	Trwałość i niezawodność Zmiany makro- i mikrogeometrii styku Przedmuchy spalin
Pierścienie tłokowe–tuleja cylindrowa		Przebieg ciśnień – P1 Strumień cieplny, gorące spaliny Hydrodynamiczny film olejowy	Tarcie mieszane, graniczne i płynne Zużycie ściernne, adhezyjne, zmęczeniowe i korozyjne	Trwałość i niezawodność Skuteczność uszczelnienia Zużycie oleju
Tuleja cylindrowa–blok		W – siła docisku kołnierza tulei cylindrowej do bloku N – siła nacisku tłoka na gładź tulei	Tarcie suche Zużycie korozyjne	Sztywność układu Kształt otworu tulei

Wyniki analizy tribologicznej układu pierścienie tłokowe–tuleja cylindrowa pozwalają na określenie cech funkcjonalnych tulei cylindrowej, parametrów, które charakteryzują daną cechę oraz ich wzajemnych zależności i wpływu na pracę silnika spalinowego (tabl. 2.2).

Tablica 2.2. Wpływ zależności parametrów cech funkcjonalnych tulei cylindrowej na pracę silnika spalinowego

Cechy funkcjonalne	Parametry cech funkcjonalnych	Wpływ parametrów	Wpływ na pracę silnika							
			Czas docierania	Zużycie oleju	Przedmuchy	Strata mocy	Awaryjny postój	Ślady zatarć – zatarcie	Trwałość	
Materiał tulei	Skład chemiczny	Struktura	Przewodność cieplna							
			Możliwość awaryjnego biegu							
			Zużycie własne							
	Twardość	Zużycie pierścieni								
		Zużycie własne								
		Zużycie pierścieni								
Wytrzymałość	Deformacje otworu									
Struktura geometryczna powierzchni otworu tulei	Makroształt	Okrągłość	Uszczelnienie przestrzeni roboczej pierścieni–cylinder							
		Prostoliniowość								
		Współosiowość								
	Mikroształt	Układ rys	Rozdział oleju							
			Film olejowy							
			Zużycie							
		Kąt gładzenia	Rozdział oleju							
			Zużycie							
		Chropowatość	Objętość oleju							
			Objętość oleju							
		Głębokość deformacji	Odprowadzenie ciepła							
			Zużycie							
Czystość	Zużycie									

2.3. Analiza zmian w kształtowaniu cech funkcjonalnych

2.3.1. Właściwości materiałów konstrukcyjnych

Z przeprowadzonej analizy tribologicznej układu TPC wynika, że podstawowymi cechami funkcjonalnymi tulei cylindrowej w tym układzie są materiał oraz makro- i mikrogeometria otworu.

Według danych Ricardo (rys. 2.6) podstawowym materiałem konstrukcyjnym stosowanym na tuleje cylindrowe ciągle jest żeliwo szare niskostopowe z grafitem płatkowym o osnowie perlitycznej, głównie dzięki swoim właściwościom konstrukcyjno-tribologicznym:

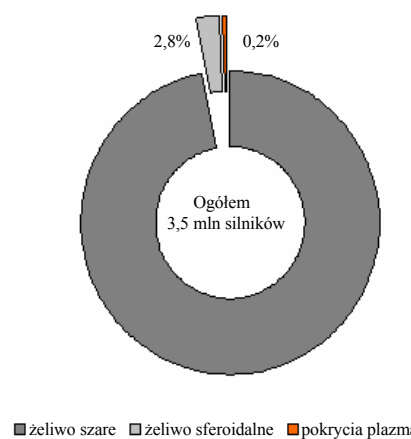
- dobra wytrzymałość i odporność zmęczeniowa w temperaturze pokojowej i w podwyższonej temperaturze (np. EN-GJL-250 wytrzymałość na rozciąganie $R_m = 250\text{--}300$ MPa, przy temperaturze 400 °C),
- moduł sprężystości $E = 100\text{--}120$ GPa,
- dobra rozszerzalność cieplna $\alpha = 10\text{--}12$ (20–200 °C) [10^{-6} K $^{-1}$],
- duża przewodność cieplna $\lambda = 47$ (20 °C) [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$ K $^{-1}$],
- odporność na zużycie (ścierne, korozyjne i kawitacyjne),
- brak skłonności do zacierania się,
- dobra zdolność do tłumienia drgań [17, 103].

Żeliwo z grafitem płatkowym o osnowie perlitycznej ma dobre właściwości odlewnicze – zdolność do wypełnienia formy i obrabialności w procesie obróbki mechanicznej. Istnieje możliwość odzysku materiału z procesu obróbki mechanicznej w formie wiórów, co pozwala na zamknięty obieg materiału pomiędzy obróbką a odlewnią. Żeliwo to charakteryzuje się niskimi kosztami wytwarzania [12, 13, 30, 31, 54, 55, 59, 61, 86, 128, 134, 178, 186, 187, 189, 204].

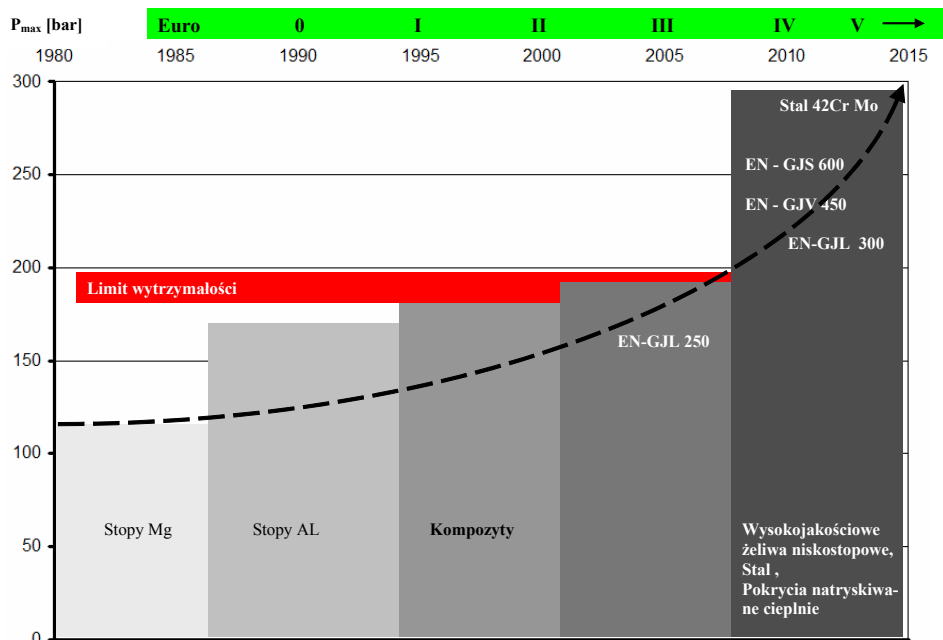
Nowe rozwiązania konstrukcyjne silników spalinyowych typu HDD, głównie z powodu wzrostu maksymalnych ciśnień spalania (rys. 2.7), wymagają od materiału tulei cylindrowych wysokiej wytrzymałości $R_m > 300$ MPa i trwałości kształtu przy mechanicznym i cieplnym obciążeniu wraz ze spełnieniem dotychczasowych wymagań w zakresie:

- dużej odporności na zużycie (ścierne, korozyjne i kawitacyjne),
- braku skłonności do zacierania się,
- dobrej zdolności do tłumienia drgań,
- dobrej przewodności cieplnej,
- zadowalających właściwości technologicznych (odlewniczych i w zakresie obróbki mechanicznej),
- uzasadnionych kosztów wytwarzania [59].

Nowy materiał tulei po procesie obróbki mechanicznej i uzyskaniu określonych dokumentacją konstrukcyjną wymagań w zakresie makro- i mikrogeome-



Rys. 2.6. Wykorzystanie materiałów konstrukcyjnych na tuleje i bloki cylindrowe w silnikach typu HDD według danych Ricardo [103]



Rys. 2.7. Krzywa (-----) wzrostu ciśnienia spalania w silnikach spalinowych ZS [16, 41, 56, 105]

trii otworu tulei powinien gwarantować, że współpraca tribologiczna powierzchni gładzi tulei cylindrowej i pierścieni tłokowych będzie przebiegać z niskim współczynnikiem tarcia, przy zmniejszonym zużyciu oleju bez zatarć, przedmuchów oraz zjawisk kawitacyjnych [59].

Pozostałe wymagania w zakresie procesu wytwarzania odlewów pod względem jakościowym i ekonomicznym są znane i stosowane w praktyce produkcyjnej przez producentów tulei cylindrowych.

Przyjmując zasadę, że wytrzymałość żeliwa szarego jest przede wszystkim funkcją jego struktury, rodzaju osnowy jak również udziału i postaci oraz rozmieszczenia wydzieleni grafitu [141], w tablicy 2.3 zestawiono podstawowe właściwości wysokojakościowych żeliw niskostopowych. Żeliwa te są przedmiotem wielokierunkowych badań technologicznych zarówno w zakresie odlewniczym, jak i obróbczym oraz silnikowym jako nowe materiały z przeznaczeniem na tuleje cylindrowe do silników typu HDD [13, 39, 54, 55, 59, 103, 105, 186, 187, 189].

Pierwszą grupę wysokojakościowych żeliw niskostopowych, których właściwości wytrzymałościowe spełniają kryterium $R_m > 300$ MPa (rys. 2.7, tabl. 2.3) stanowią:

- żeliwo z zawartością pierwiastków stopowych Mo, Cu, Ni, Cr i Mn, które mają wpływ na wzrost wytrzymałości i twardości przez stabilizację oraz/albo rozdrobnienie perlitu, hartowanie kryształów roztworu stałego lub podniesie-

Tablica 2.3. Właściwości wysokojakościowego niskostopowego żeliwa i jego odmian z przeznaczeniem na tuleje cylindrowe do silników typu HDD

Rodzaj żeliwa	Symbol żeliwa	Minimalne właściwości mechaniczne			Twardość HB	Baza nowych materiałów na tuleje cylindrowe typu HDEP rodzaj osnowy
		R _m [MPa]	R _{0,2} [MPa]	A [%]		
Żeliwo z grafitem płatkowym	EN-GJL-250	250	–	–	–	Perlit
	EN-GJL-300	300	–	0,2	–	P
	EN-GJL-350	350	–	–	–	P
Żeliwo z grafitem wermikularnym	EN-GJV-300	300	220	1,5	140–210	Ferryt
	EN-GJV-350	350	260	1,5	160–220	F
	EN-GJV-400	400	300	1,0	180–240	F
	EN-GJV-450	450	340	1,0	200–250	P
	EN-GJV-500	500	380	0,5	220–260	P
Żeliwo z grafitem kulkowym	EN-GJS-350-22	350	220	22	≤ 160	F
	EN-GJS-400-18	400	250	18	130–175	F
	EN-GJS-400-15	400	250	15	135–180	F
	EN-GJS-450-10	450	310	10	160–210	F
	EN-GJS-500-7	500	320	7	170–230	F
	EN-GJS-600-3	600	370	3	190–270	P
	EN-GJS-700-2	700	420	2	225–305	P
	EN-GJS-800-2	800	480	2	245–335	P
Żeliwa hartowane z przemianą izotermiczną	EN-GJS-900-2	900	600	2	270–360	P
	EN-GJS-800-8	800	500	8	260–320	Bainit
	EN-GJS-1000-5	1000	700	5	300–360	B
	EN-GJS-1200-2	1200	850	2	340–440	B
	EN-GJS-1400-1	1400	1100	1	380–480	Martenzyt

– żeliwo bazowe,
 – żeliwo z dodatkami stopowymi,
 – żeliwo sferoidalne

nie liczby ziaren eutektycznych. Jako wadę w procesie odlewania tulei cylindrowych autorzy prac [16, 41, 168, 176] wymieniają skłonność żeliwa do tworzenia jam skurczowych oraz wysokie koszty Mo, Ni i Cu,

- żeliwo z dodatkiem azotu (N). Azot w znacznym stopniu zwiększa wytrzymałość dzięki perlityzacji osnowy oraz korzystnemu wpływowi na postać grafitu. Istotą tego rozwiązania jest właściwy dobór nośnika N oraz miejsce i ilości jego dodania, tak aby spadek N był jak najniższy [12, 75, 84, 116,

142, 165, 170, 184]. Zdaniem części autorów prac dotyczących tego tematu [142, 170, 184] problemem okazały się techniki podawania N oraz ustalenie stałego poziomu N, który gwarantowałby wzrost wytrzymałości a jednocześnie nie był źródłem powstawania wad w odlewach w postaci porowatości gazowej.

Drugą grupą żeliw, które stanowią bazę dla nowych materiałów konstrukcyjnych tulei cylindrowych są żeliwa sferoidalne z wydzieleniami grafitu wermikularnego (grafit w kształcie robaczkowym) lub z wydzieleniami grafitu kulkowego [16, 40, 137–139, 142, 187, 204]. Najistotniejszym elementem technologii tego typu żeliw jest wprowadzenie do ciekłego żeliwa odpowiedniego modyfikatora w postaci:

- pierwiastków ziem rzadkich, najczęściej w postaci miszmetalów (metoda austriacka),
- technicznego czystego magnezu Mg lub jego stopów z ewentualnymi dodatkami żelazotytanu i miszmetalów (Mg – Ce – metoda General Motors, Mg – Zr – metoda węgierska, FeMgSiCeTiAl – metoda amerykańska),
- cyrkonu z intensywnym odsiarczaniem ($< 0,002\%$ S), a następnie szybkim studzeniem odlewów (metoda kanadyjska) i przeprowadzenie odpowiedniego zabiegu modyfikowania grafityzującego.

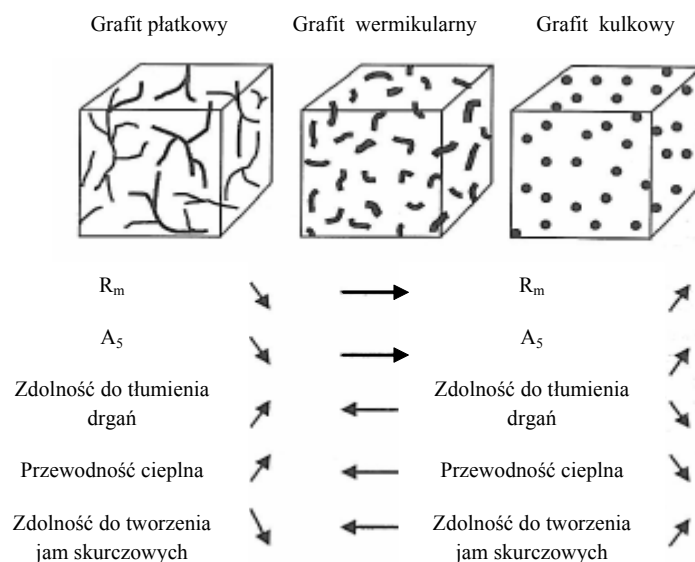
Technologie otrzymania żeliwa sferoidalnego z wydzieleniami grafitu wermikularnego oraz kulkowego wymagają wielu działań metalurgicznych (proces odsiarczania ciekłego żeliwa, zabieg sferoidyzacji/modyfikowania żeliwa), które zostały w sposób zwarty i przejrzysty omówione w pracach Guzika [40–42] Melonikowej [105], Podrzuckiego [142] oraz Pietrowskiego [137–139].

Żeliwo z grafitem wermikularnym uzyskuje szczególne znaczenie przez korzystną kombinację swoich właściwości mechanicznych, fizycznych i technologicznych. Właściwości tego żeliwa zawierają się między właściwościami, jakie ma grafit płatkowy a grafit kulkowy (rys. 2.8).

Ważną cechą tego żeliwa jest to, że przy dobrze wykształconym graficie wermikularnym właściwości materiałowe nie mają żadnej zależności od procesów obróbki. Problemem jest zależność struktury i właściwości żeliwa od grubości ścianki i szybkości schładzania. W tej zależności sposób zachowania tego żeliwa jest zbliżony do zachowania żeliwa z grafitem płatkowym [105].

Szczególnie interesującą kombinacją właściwości wytrzymałościowych i plastycznych jest ostatnia grupa żeliw hartowanych z przemianą izotermiczną. W literaturze z tego tematu [40–42, 103, 137–139, 168] prezentuje się wiele badań poświęconych żeliwu z grafitem kulkowym, wermikularnym i płatkowym poddanych zabiegowi hartowania z przemianą izotermiczną, które oznaczono jako żeliwa typu:

- ADI (*Austempered Ductile Iron*) – żeliwo sferoidalne hartowane z przemianą izotermiczną),
- DADI (*Direct Austempered Ductile Iron*) – żeliwo sferoidalne poddawane bezpośredniemu hartowaniu z przemianą izotermiczną,



Rys. 2.8. Schemat właściwości żeliwa modyfikowanego z grafitem płatkowym i żeliwa z grafitem wermikularnym oraz kulkowym (strzałki ↓↑ oznaczają małą lub dużą wartość danej właściwości) a także pokazujący kierunek (strzałki ← →) zmian danej właściwości dla żeliwa z grafitem wermikularnym [40]

- AADI (*Austempered Ductile Iron*) – żeliwo sferoidalne hartowane z przemianą izotermiczną poddawane niskotemperaturowej obróbce cieplno-plastycznej),
- AVCI (*Austempered Vermicular Cast Iron*) – żeliwo z grafitem wermikularnym poddawane hartowaniu z przemianą izotermiczną,
- AGI (*Austempered Gray Iron*) – żeliwo z grafitem płatkowym poddawane hartowaniu z przemianą izotermiczną.

Zastosowanie izotermicznego hartowania pozwala na uzyskanie żeliwa o wyjątkowo korzystnych właściwościach wytrzymałościowych i plastycznych.

W wyniku obecności grafitu kulkowego bądź wermikularnego lub płatkowego otrzymuje się dobrą zdolność do tłumienia drgań oraz lepszą skrawalność odlewów. Ponadto odlewy wykonane z tych rodzajów żeliwa, z uwagi na dużą twardość (wpływ osnowy) i smarujące oddziaływanie grafitu, odznaczają się wyjątkową odpornością na ścieranie oraz charakteryzują się mniejszą o około 10% gęstością w porównaniu do stali czy staliwa [103].

Istotnymi elementami procesu otrzymywania żeliwa wysokojakościowego o strukturze ausferytu czy bainitu według prac Guzika [40–42] są:

- przeprowadzenie zabiegu sferoizydowania bądź wermikularyzowania żeliwa o określonym składzie chemicznym i otrzymanie odlewów o wymaganym

kształcie zawierającym dużą liczbę wydzielań grafitu o małych wymiarach oraz o największym udziale perlitu w strukturze,

- zastosowanie hartowania z przemianą izotermiczną o optymalnych wartościach temperatury i czasu austenitzowania oraz temperatury i czasu przemiany izotermicznej, zapewniających osnowę ausferrytu, składającą się zwykle z rozgałęzionych płytek ferrytu i wysokowęglowego austenitu (bez wydzielań martenzytu bądź węglików).

Osobną grupą materiałów stosowanych na tuleje cylindrowe w zastosowaniu specjalnym do silników silnie obciążonych lub kiedy decyduje masa silnika (samochodów wyczynowych, pojazdów wojskowych, tłokowe silniki lotnicze) stanowią staliwo i stal (42CrMo4) [103, 183]. Są to materiały, które cechują się w stosunku do żeliwa gorszymi właściwościami ciernymi i dużą skłonnością do zacierania przy współpracy z pierścieniami tłokowymi. Dlatego tuleje cylindrowe poddaje się dodatkowo obróbce utwardzenia przez chromowanie, hartowanie, powierzchniowe azotowanie lub pokrycie powierzchni powłokami typu Fe, FeCr, FeCrMo z wykorzystaniem technologii PTWA [22]. Główną zaletą staliw i stali są parametry wytrzymałościowe (1000–1200 MPa), co pozwala na zmniejszenie grubości ścianek i tym samym zmniejszenie ciężaru jednostkowego. Istotną wadą natomiast są koszty wytwarzania (znaczące koszty odlewów, obróbki skrawaniem oraz koszty dodatkowej obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej na powierzchni gładzi [55, 59, 86, 183].

Podsumowując omawianie możliwości doboru materiałów na nowe rozwiązania konstrukcyjne tulei cylindrowych z przeznaczeniem do silników HDD, można przyjąć, że właściwości wysokojakościowych niskostopowych żeliw opartych na strukturze perlitycznej oraz postaci i rozmieszczeniu wydzielań grafitu mają właściwości podstawowego kryterium wymagań wytrzymałości $R_m > 300$ MPa. Podstawą rozwoju tego typu odmian może być żeliwo szare niskostopowe z grafitem płatkowym o osnowie perlitycznej, dotychczas stosowane na odlewy tulei cylindrowych. Pozostaje do rozwiązania temat możliwości technologicznego topienia tego typu odmian żeliwa oraz kształtowania odlewów wraz z analizą podstawowych właściwości w warunkach przemysłowych. Osobnym problemem są możliwości dalszej obróbki mechanicznej i potwierdzenia właściwości tribologicznych w nowych rozwiązaniach konstrukcyjnych silników typu HDD.

2.3.2. Właściwości struktury geometrycznej warstwy powierzchniowej

Drugą podstawową cechą określającą funkcjonalność tulei cylindrowej w układzie TPC silnika spalinowego jest struktura geometryczna powierzchni otworu, na którą składają się:

- struktura makro i z nią związane parametry błędów kształtu typu okrągłość i prostoliniowość lub współosiowość,

- struktura mikro związana z parametrami chropowatości powierzchni, kątem gładzenia, obrazem ukształtowania rys i głębokością ich deformacji oraz czystość powierzchni gładzi po procesie gładzenia.

Zadaniem struktury makro- i mikrogeometrii powierzchni otworu tulei w układzie z pierścieniami tłokowymi jest zapewnienie szczelności komory spalania i zapobieganie możliwościom przedostawania się oleju do komory spalania oraz niekorzystnego zjawiska przedmuchu spalin.

Dlatego w nowych konstrukcjach silników typu HDD celem spełnienia wymagań związanych z emisją związków szkodliwych oraz zmniejszeniem zużycia oleju konstruktorzy silników ustalają założenia konstrukcyjne dla otworu tulei:

- tolerancję błędu kształtu na poziomie 6–10 μm [32, 59], pomimo że błąd ten ulega zwiększeniu po montażu tulei w kadłubie silnika (docisku uszczelki przez głowicę) i dalej poprzez oddziaływanie zmiennych ciśnień dynamiczno-termicznych w czasie pracy silnika do poziomu 30–60 μm [197–199],
- ukształtowanie powierzchni gładzi tulei cylindrowej powinno gwarantować współpracę tribologiczną z pierścieniami tłokowymi z niskim współczynnikiem tarcia, przy zmniejszonym zużyciu oleju bez zatarć i przedmuchów spalin [187].

Stąd procesy technologiczne kształtowania struktury makro- i mikrogeometrii otworu tulei na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat stały się przedmiotem intensywnego rozwoju głównie z powodu:

- możliwości technologicznych pozwalających na uzyskanie korzystnej pod względem eksploatacyjnym struktury geometrycznej powierzchni otworów gładzonych, dostosowania struktury powierzchni do zmiennych warunków smarowania w czasie pracy układu TPC oraz możliwości usunięcia śladów po poprzedniej obróbce konwencjonalnej (zgnioty i umocnienia oraz naprężenia powierzchniowe) [13, 14, 31, 43, 44, 53, 97, 133, 134, 186],
- maszyn do gładzenia i przejścia z gładzenia jedno/dwustopniowego do gładzenia wielostopniowego z możliwością automatyzacji procesu gładzenia i pomiarów w zakresie błędów kształtu i jego korekty w toku procesu wraz z możliwością pomiarów i analiz SPC parametrów chropowatości powierzchni po zakończonym gładzeniu [25, 26, 66, 165, 65, 166, 177, 199, 202],
- narzędzi skrawających o wydłużonej trwałości i jednorodnej strukturze kryształów, charakterystyce cięcia i samoostrzenia ziarna diamentowego (ND, MD) oraz ziarn z węgla krzemu (SiC), kubitronu (SGG) i ziarn Norton Quantum (NQD) [25, 57, 58, 60, 171, 172, 177, 188],
- rozwoju technik stosowanych w pomiarach struktury geometrycznej warstwy powierzchniowej (pomiar stykowy, optyczne, wykorzystanie mikroskopii skaningowej), zwiększenia zakresu przyrządów (rozdzielczości, różne filtry i prędkości przesuwu, pomiar 2D i 3D) – łącznie około 300 parametrów profilu i kilkadziesiąt parametrów topograficznych wraz z możliwością graficznej prezentacji wyników [13, 133, 186, 200, 201],

- wykorzystania laserów jako narzędzi technologicznych w procesie wielostopniowego gładzenia jako jeden ze stopni w tym procesie (nacinanie rys w formie zasobników olejowych, ablacji laserowej, nanoszenia pokryć [1, 2, 4, 5, 29, 36, 48, 83, 90, 95, 101, 117–124, 189, 203].

Wynikiem rozwoju procesu gładzenia jest możliwość jego realizacji w wielu wariantach technologicznych (tabl. 2.4).

Tablica 2.4. Warianty procesu technologicznego gładzenia w zastosowaniu do tulei cylindrycznych

Wariant	Liczba stopni gładzenia			Rodzaj narzędzi stosowanych w procesie gładzenia									
	2	3	4	diament i / lub ceramika					szczotki	ciecz + SiC/FG	laser		
				ND	MD	SiC	SGG	NQG			nacięcie rys	hartowanie	
1	gładzenie normalne (dwustopniowe)												
2	gładzenie plateau standardowe												
3	gładzenie plateau gładkie												
4	gładzenie plateau spiralne												
5	gładzenie plateau spiralne gładkie												
6	gładzenie plateau z nacięciem zasobników olejowych laserem												
7	gładzenie plateau z hartowaniem powierzchni laserem												

Oznaczenia:
 ND – ziarno diament naturalny
 NQG – ziarno Norton Quantum
 MD – ziarno diament syntetyczny
 FG – gładzenie strumieniem cieczy z ziarnem diamentowym
 SiC – ziarno węglik krzemu
 SGG – ziarno kubitron

Z analizy literatury oraz badań opublikowanych w pracach [31–39] wynika, że po przejściu z gładzenia dwustopniowego do gładzenia trzystopniowego plateau uzyskuje się wyraźne polepszenie parametrów eksploatacyjnych silników spalinyowych: skrócenie okresu docierania, zmniejszenie zużycia oleju, ograniczenie zjawiska przedmuchów i zatarć oraz zmniejszenie zużycia eksploatacyjnego

współpracujących elementów układu TPC. Powyższe rozwiązania, pomimo upływu czasu, są do dziś stosowane w warunkach produkcyjnych. Proces gładzenia dwustopniowego odbywa się częściowo w procesie produkcji tulei cylindrowych z przeznaczeniem na części zamienne lub w produkcji tulei jako półfabrykatów do dalszej obróbki przed montażem. Natomiast proces gładzenia trzystopniowego plateau jest stosowany w procesach produkcji tulei na pierwszy montaż.

Dostępność pozostałych wariantów procesu gładzenia stała się przedmiotem wielokierunkowych badań ośrodków naukowych, producentów silników oraz producentów tulei cylindrowych głównie w zakresie:

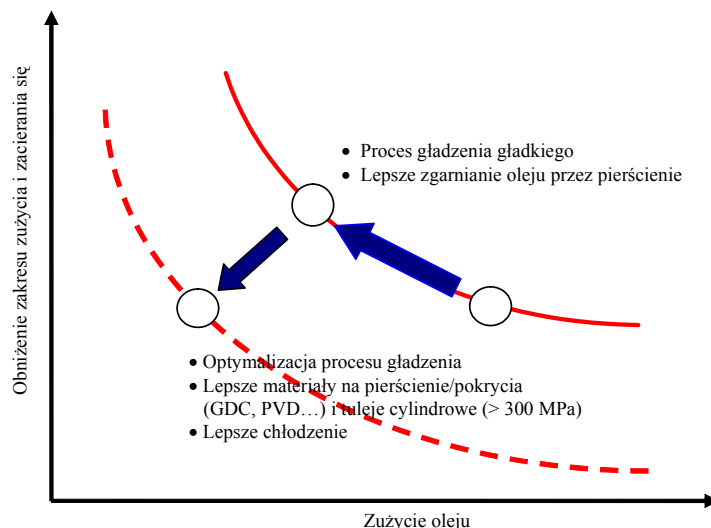
- możliwości dalszego zmniejszenia zużycia oleju, zmniejszenia emisji cząstek stałych, współczynnika tarcia oraz zatarć i przedmuchów spalin w powstających lub modernizowanych konstrukcjach silników typu HDD,
- dostępności nowych wariantów technologicznych gładzenia w warunkach produkcyjnych w sytuacji zmian materiałów na tuleje cylindrowe (warunek $R_m > 300$ MPa).

Na podstawie opublikowanych danych z badań poszczególnych wariantów technologicznych można sformułować następujące wnioski:

1. W ramach projektu AVL UE „Oil – Free Powertrain” [22, 169], w którym uczestniczył producent tulei FM [163] oraz producent maszyn do gładzenia NAGEL [49, 52, 172–175], badaniom symulacyjno-modelowym, silnikowym oraz optymalizującym [85] poddano warianty technologiczne nr 2, 3, 5 i 7 (tabl. 2.4), w wyniku których stwierdzono, że:
 - zużycie oleju, emisja cząstek stałych i tarcie są w znacznym stopniu zależne od obróbki powierzchni gładzi tulei cylindrowej i pierścieni tłokowych,
 - przez konsekwentne rozwijanie i optymalizację trzystopniowego procesu gładzenia w kierunku gładzenia gładkiego i innowacyjne technologie dla gładzi cylindrowej silników HDD można sprostać wymaganiom w zakresie zużycia oleju (zmniejszenie $> 50\%$) i emisji cząstek stałych (zmniejszenie ok. 20%) oraz związanym z tym kosztom (tabl. 2.5, rys. 2.9).

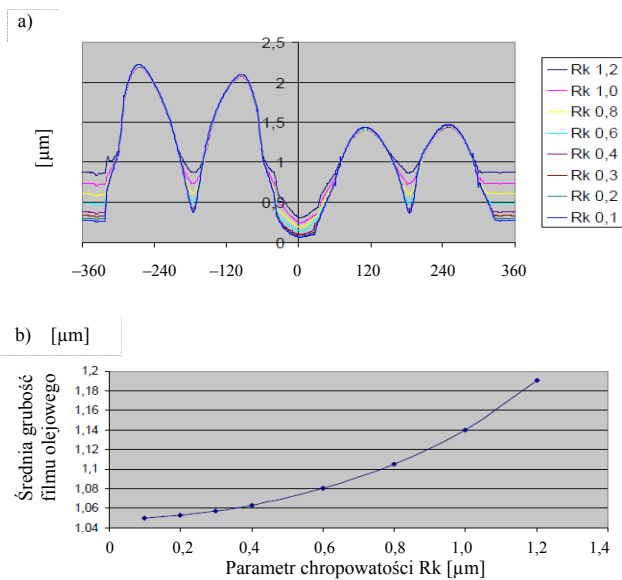
Tablica 2.5. Zmniejszenie zużycia oleju przez optymalizację procesu gładzenia i innowacyjne technologie (HDD) [169]

Badane warianty gładzenia	Zużycie oleju	Parametry chropowatości powierzchni gładzi							
		Ra	Rz	Rmax	Rpk	Rk	Rvk	Mr1	Mr2
	[g/kWh]	[μm]						[%]	
Standard	0,17	0,6	4,6	5,4	0,2	0,7	1,8	3,3	61
Gładkie	0,06	0,1	0,7	0,9	0,1	0,2	0,1	9,2	86
Pokrycie plazmą	0,04	–	–	–	<0,1	0,2–0,5	1,0–2,0	–	75–85

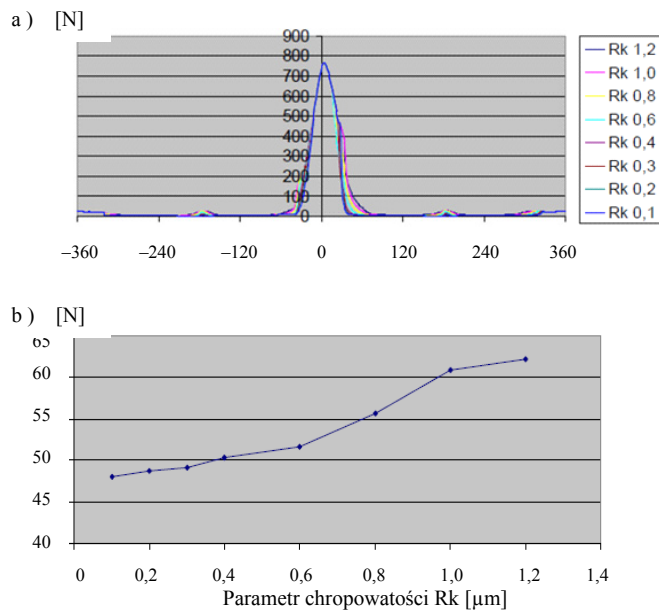


Rys. 2.9. Schemat wyników badań AVL w zakresie obniżenia zużycia liniowego i zacierania się w powiązaniu ze zużyciem oleju [22, 169]

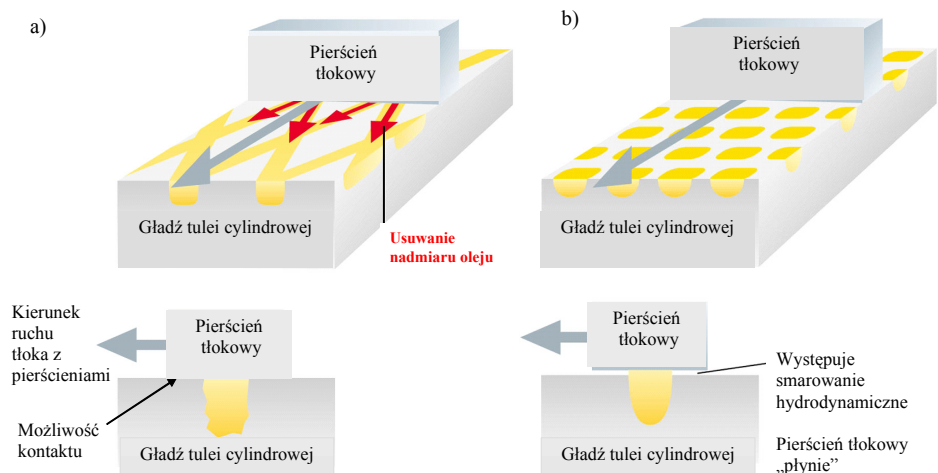
2. W ramach projektu nowej platformy silników VOLVO HDEP – MAHLE przeprowadzono wiele badań symulacyjno-modelowych i silnikowych z różnymi wariantami technologicznymi tulei gładzonych wraz z naciętymi laserem zasobnikami olejowymi oraz po procesie ablacji powierzchni gładzi laserem [8, 9, 13, 14, 34–39, 74, 75, 129, 135, 180, 190–192] i stwierdzono, że:
 - w wyniku zmiany procesu gładzenia plateau na gładzenie gładkie związane ze zmniejszeniem parametru R_k (rys. 2.10 i 2.11) zarówno w wariancie tulei gładzonych gładko, jak i w wariancie z użyciem lasera uzyskano zmniejszenie grubości filmu olejowego oraz współczynnika tarcia,
 - bardzo istotny w próbach okazał się dobór pokrycia i parametru chropowatości pierścieni uszczelniających (na przykład z pokryciem PVC – *Physical Vapor Deposition*, $R_k \leq 0,1 \mu\text{m}$).
 Wyniki badań symulacyjno-silnikowych stały się podstawą dalszych badań i prac w kierunku optymalizacji procesu gładzenia gładkiego w warunkach produkcyjnych [13, 14].
3. W wyniku zastosowania czterostopniowej technologii gładzenia gładkiego „Diamant – FG” przez firmę VW kształtuje się system „komór mikrociśnieniowych” (rys. 2.12), który zapewnia hydrodynamiczne smarowanie pomiędzy pierścieniem a gładzią cylindra. Zmniejszeniu uległo zużycie oleju (średnio o 79% w stosunku do gładzi cylindra dwustopniowo gładzonego) i emisja cząstek. Mniejsze są straty tarcia oraz zmniejszyło się zużycie liniowe gładzi i pierścieni tłokowych. Powierzchnia gładzi charakteryzowała się parametrami chropowatości: $R_{pk} < 0,3 \mu\text{m}$, $R_k < 0,6 \mu\text{m}$ oraz $R_{vk} < 0,8 \mu\text{m}$ [177].



Rys. 2.10. Wynik badań symulacyjnych w zakresie zależności: a) grubości filmu olejowego od kąta obrotu wału korbowego, b) średniej grubości filmu olejowego od parametru chropowatości Rk (GMP przy 0°) [74]



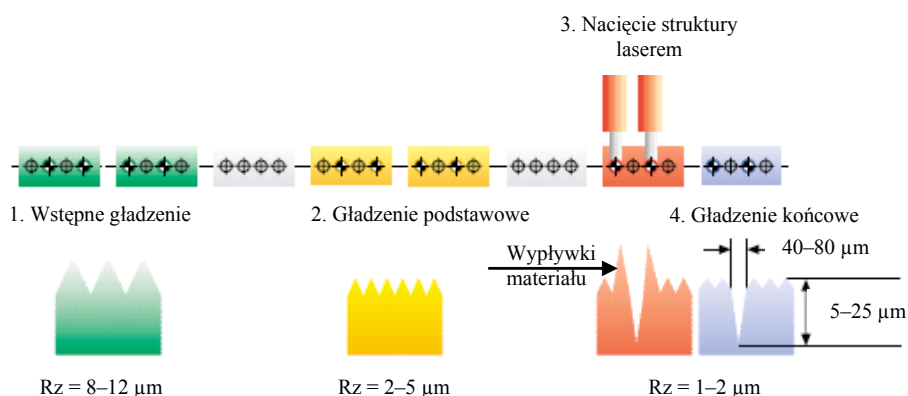
Rys. 2.11. Wynik badań symulacyjnych: a) wielkości siły tarcia w zależności od kąta obrotu wału korbowego i od parametru chropowatości Rk, b) wielkości średniej siły tarcia w zależności od parametru chropowatości Rk (GMP przy 0°) [74]



Rys. 2.12. Schemat transportu oleju na gładzi tulei cylindrowej w wyniku: a) systemu kanałów połączonych utworzonego w procesie gładzenia standardowego, b) mikrostruktury zapewniającej smarowanie hydrodynamiczne utworzonej w wyniku gładzenia „Diamant – FG” [177], nacięć laserem kieszeni olejowych oraz laserowego hartowania powierzchniowego w osłonie azotu [48]

4. Firma Deutz w ramach programu rozwoju silników TCD2012 L06 – 4V i TCD 20 10 LO4 – 4V badaniom poddała dwa warianty gładzenia:
 - standardowe plateau (jako baza odniesienia o parametrach $R_{pk} = 0,2\text{--}0,8 \mu\text{m}$, $R_k = 0,5\text{--}1,5 \mu\text{m}$, $R_{vk} = 1,0\text{--}3,5 \mu\text{m}$) oraz
 - gładzenie spiralne gładkie (o parametrach $R_{pk} = 0,18 \mu\text{m}$, $R_k = 0,4 \mu\text{m}$, $R_{vk} = 1,2\text{--}2,7 \mu\text{m}$).
 W wyniku trwałościowych badań silnikowych stwierdzono:
 - zmniejszenie zużycia liniowego cylindrów o około 40% w strefach GMP/DMP,
 - zmniejszenie grubości filmu olejowego, co prowadzi do zmniejszenia zużycia oleju,
 - brak skłonności do tworzenia się wybłyszczeń w strefie współpracy z pierścieniami,
 - nie stwierdzono różnic w przedmuchu spalin [52].
5. Zakres przeprowadzonych badań tulei cylindrowych z wykorzystaniem mikroobróbki laserowej w formie:
 - modyfikacji struktury powierzchni gładzi w procesie gładzenia przez nacięcie laserem kieszeni olejowych,
 - laserowego hartowania powierzchniowego w osłonie azotu powierzchni gładzi po procesie gładzenia,
 - pokrycia plazmą powierzchni otworu tulei stalowych
 potwierdził możliwości zastosowania tego typu wariantów technologicznych w nowych konstrukcjach silników typu HDD [1, 4, 5, 36, 74, 83, 90, 101, 117–124, 129, 205].

- 5.1. W wyniku przeprowadzonych badań przez GM/Fiat przy współpracy z firmą Gehring stwierdzono, że:
- proces modyfikacji struktury powierzchni gładzi w formie nacięć laserem kieszeni olejowych w strefie GMP (przed gładzeniem końcowym) charakteryzuje się tendencją do zmniejszenia parametru chropowatości $Rz = 1-2 \mu\text{m}$ (rys. 2.13),
 - zoptymalizowana struktura nacięć kieszeni olejowych tworzy system komór ciśnieniowych (rys. 2.12b), który zapewnia smarowanie hydrodynamiczne i z tym związane zmniejszenie zużycia oleju (o 15–30%), zmniejszenie emisji cząstek stałych oraz zmniejsza siłę tarcia i zużycie liniowe (o 40–50 %),
 - istnieją technologiczne możliwości stosowania produkcyjnego tego typu wariantu gładzenia z udziałem lasera (na przykład silniki 1,3 dm^3 produkowane w zakładzie Fiata w Bielsku-Białej z poziomem Euro 4/5) [1, 34, 83, 134].

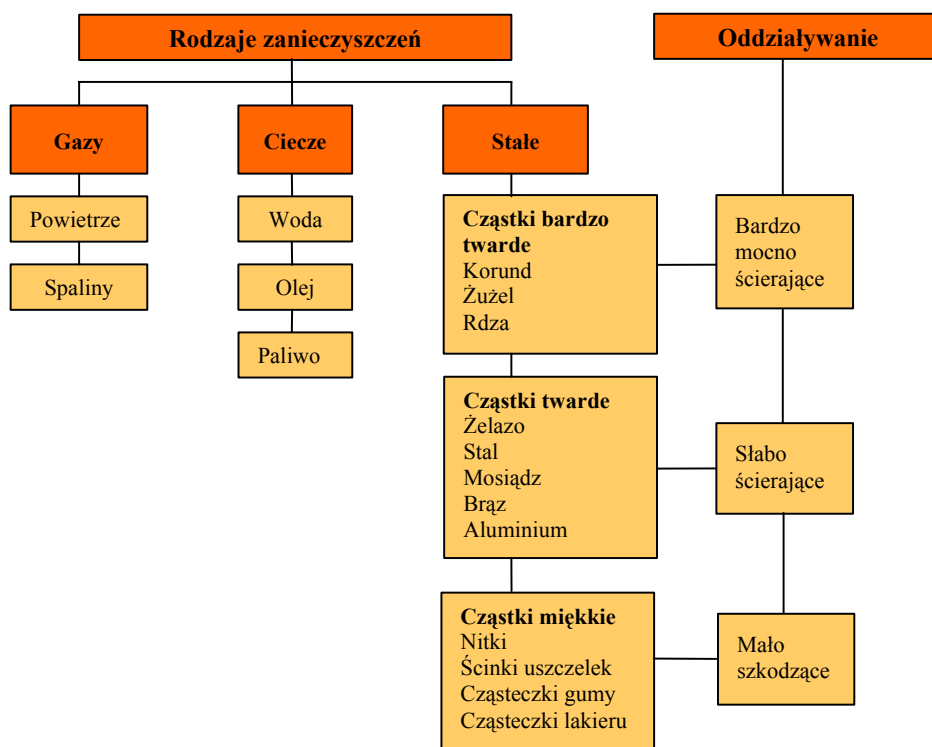


Rys. 2.13. Przebieg zoptymalizowanego procesu gładzenia ze strukturą nacięć laserem kieszeni olejowych według technologii firmy Gehring [1]

- 5.2. Struktura powierzchni gładzi poddana procesowi laserowego hartowania powierzchniowego w osłonie azotu według firmy Audi charakteryzuje się nanokrystaliczną strukturą z udziałem azotu (16–18%) oraz systemem mikrokomór hydrodynamicznych (rys. 2.12). System mikrokomór hydrodynamicznych powstaje w miejscach wyjść grafitowych ze struktury żeliwa, które zostają odsłonięte przez laser. Badania trwałościowe silnika wysokoprężnego Audi 1,91/81 kW R4 TDI wykazały:
- redukcję zużycia oleju do 75%, redukcję ilości cząstek stałych PM oraz NO_x ; nastąpiło zmniejszenie strat tarcia do 40% oraz zużycia liniowego $> 80\%$,
 - dobre właściwości rozruchowe,
 - możliwość zwiększenia ciśnienia doładowania [45, 101].

5.3. Struktura powierzchni gładzi stalowych tulei cylindrowych pokrytych plazmą (80% Fe, 20% ceramika) w ramach badań silnikowych w projekcie AVL UE „Oil-Free Powertrain” w porównaniu do struktur gładzonych standardowo i gładzonych z optymalizacją uzyskała najlepsze wyniki pod względem zużycia oleju (tabl. 2.5) [22, 169].

Nowością w wymaganiach określających jakość struktury warstwy powierzchniowej po procesie gładzenia jest parametr czystości. Zgodnie z zapisem normy ISO 16232-1 [63] parametr czystość przyjmuje się jako stan powierzchni gładzi tulei cylindrowej, która charakteryzuje się brakiem zanieczyszczeń w postaci cząstek stałych. Jako cząstkę określa się materiał stały usuwalny w specyficznych warunkach i mający kohezję/spójność mechaniczną. Zanieczyszczenia na powierzchni gładzi mogą być wytworzone w wyniku gładzenia przez odrywające się cząstki materiału tulei lub materiału z narzędzi gładzących (ziarna diamentowe lub węgiel krzemu). Autorzy prac [7, 47, 62, 79] przyjmują, że w tłokowych silnikach spalinowych występują zanieczyszczenia zawarte w gazach (powietrze, spaliny), w cieczach (olej, paliwo) oraz bezpośrednio na powierzchniach elementów silnikowych (rys. 2.14).



Rys. 2.14. Rodzaje zanieczyszczeń [7]

Zanieczyszczeniami wpływającymi na intensywność zużycia elementów silnikowych są:

- ziarniste substancje stałe, o różnym składzie granulometrycznym, fizycznym i chemicznym,
- substancje smoliste (na przykład laki, nagary),
- substancje chemiczne aktywne (powodujące zużycie na skutek procesów korozyjnych, utleniania i innych),
- substancje płynne, tworzące z płynami eksploatacyjnymi roztwory sprzyjające innym procesom zużycia (typu kawitacja, zmęczenie struktury warstwy wierzchniej i inne).

Są to typowe zanieczyszczenia zewnętrzne i wewnętrzne tworzące się w silniku podczas jego pracy oraz zanieczyszczenia przenoszone z procesu wytwarzania elementów silnikowych lub pozostające w nim po montażu. Znaczna część tego typu zanieczyszczeń jest eliminowana z silnika przez układy filtracyjne (powietrza, oleju czy paliwa) [7, 62, 79].

Niektóre cząsteczkowe zanieczyszczenia (rys. 2.14) typu stałego, na przykład korund, żużel, rdza są bardzo twarde (ok. 900 N/mm^2), natomiast cząstki żelaza, stali, mosiądzu, brązu czy aluminium są twarde ($85\text{--}390 \text{ N/mm}^2$) i pozostając w silniku, powodują niekorzystne zjawiska w procesach tribologicznego zużycia typu ściernego, czy zmęczenie powierzchniowe [13, 14, 19].

Jeżeli nie będą podjęte odpowiednie działania prewencyjne eliminujące cząstki bardzo twarde i twarde z przestrzeni elementów współpracujących, to nastąpią reakcje łańcuchowe prowadzące do tworzenia się coraz większej wielkości cząstek i tym samym zjawisko zużycia przybiera na sile. Powiększają się przyjęte luzy i z reguły dochodzi do zużycia awaryjnych, co jest niepożądane w rozwiązaniach konstrukcyjnych silników spalinowych.

Wymagania czystości powierzchni w stosunku do elementów układu TPC są bardzo zróżnicowane [106, 130–132, 159, 181, 192]. Z jednej strony są to wymagania bardzo ogólne w formie:

- podziału odpowiedzialności za czystość do momentu montażu,
- rozpoznania materiałów w sytuacjach specjalnych (reklamacje, powstanie szkód),

z drugiej strony producenci silników żądają od dostawców tulei cylindrowych (tabl. 2.6):

- zdefiniowania procesów kontroli,
- wielkości zanieczyszczeń (maksymalne cząstki, liczba, waga, skład),
- rozdziału wielkości cząstek,
- przeprowadzania badań czy audytów.

Tablica 2.6. Zakres wymagań czystości powierzchni dla elementów układu TPC [35]

Producent silnika	Masa zanieczyszczeń	Rozmiar i liczba cząstek	KOD
Volvo	10 mg/1000 cm ²	750 cząstek/mm ²	–
DAF	10 mg/1000 cm ² 20 mg/10000 cm ² dla cząstek miękkich	– max dopuszczalny obliczony poziom: ≥ 1000 μm (pierwsza wartość), ≥ 15 μm < 100 μm (druga wartość), ≥ 5 μm < 15 μm (trzecia wartość), – rozmiar max cząstki twardej: 1000 × 100 × 100 μm, – rozmiar max cząstki miękkiej: 2000 × 100 × 100 μm, – rozmiar max włókna Ø100 × 10000 μm	7/14/18 dla cząstek metalicznych
PSA	10 mg/1000 cm ²	– max 1000 cząstek > 150 μm, – 0 cząstek > 700 μm	–
Renault	10 mg/1000 cm ²	– 0 cząstek > 500 μm – 32 cząstki > 400 μm – 1000 cząstek > 150 μm – 130 000 cząstek > 15 μm	–
VW	5 mg/element	– 0 cząstek > 1000 μm	–
Fiat	4 mg/element	–	–

2.4. Podsumowanie

Nowe rozwiązania konstrukcyjne silników spalinowych typu HDD wymagają od tulei cylindrowych spełnienia ściśle określonych cech funkcjonalnych, które mają wpływ na zmniejszenie zużycia oleju i emisji cząstek stałych. Cechy te również stanowią podstawę wyboru określonej technologii wytwarzania tulei cylindrowych. Stąd ważnym aspektem w spełnieniu wymagań środowiskowych przez nowe konstrukcje silników spalinowych typu HDD jest dobór parametrów opisujących te cechy w konstrukcji tulei cylindrowej, a następnie wybór określonej technologii ich wytwarzania.

Rozwiązania konstrukcyjno-technologiczne tulei cylindrowych powinny mieć wpływ na spełnienie wymagań nowych rozwiązań konstrukcyjnych silników spalinowych typu HDD w zakresie:

- zmniejszenia zużycia oleju i emisji cząstek stałych,
- dużej odporności na zużycie ścierne, korozyjne i kawitacyjne,
- dobrej zdolności do tłumienia drgań i związanej z tym odporności na zjawiska kawitacji,

- dobrej przewodności cieplnej i możliwości przeniesienia zwiększonych obciążeń mechaniczno-termicznych, przy zachowaniu trwałości kształtu w zakresie makro- i mikrogeometrii otworu,
- struktura warstwy powierzchniowej gładzi tulei cylindrowej powinna zapewnić współpracę tribologiczną z pierścieniami tłokowymi z niskim współczynnikiem tarcia, przy zmniejszonym zużyciu oleju bez zatarć i przedmuchów spalin,
- o wyborze nowego materiału tulei powinny decydować technologiczne możliwości jego kształtowania na etapie odlewania jak i jego dalszej obróbki mechanicznej, w szczególności na etapie gładzenia przez dobór określonego wariantu gładzenia oraz jego optymalizację dla danego typu silnika HDD,
- bardzo istotny jest też dobór pokrycia i parametru chropowatości pierścieni uszczelniających,
- możliwości zmniejszenia masy.

Zmiany w kształtowaniu struktury warstwy powierzchniowej gładzi tulei cylindrowej powinny uwzględniać rachunek uzasadnionych kosztów wytwarzania, na który zwracają szczególną uwagę konstruktorzy silników.

3. Problem badawczy

3.1. Zdefiniowanie problemu

Przeprowadzona analiza stanu wiedzy w odniesieniu do cech funkcjonalnych warstwy powierzchniowej gładzi tulei cylindrowej i ich wpływu na właściwości eksploatacyjne silników spalinowych wykazała, że:

1. Wymagania środowiskowe dotyczące emisji cząstek stałych i zużycia oleju, a także wymagania ekologiczne dotyczące „cyklu życiowego” silnika oraz postępujące procesy globalizacji wyznaczają dla nowych konstrukcji silników kierunki ich rozwoju oraz zakresy zmian, między innymi w układzie TPC (tłok–pierścienie–cylinder).
2. Dla podstawowych cech funkcjonalnych tulei cylindrowych (materiał oraz makrokształt otworu i mikrogeometria warstwy powierzchniowej gładzi) można określić parametry i wzajemne zależności, które mają wpływ na pracę silnika spalinowego, jego trwałość i niezawodność, w związku ze zmieniającymi się wymaganiami prawnymi dotyczącymi emisji cząstek stałych i zużycia oleju.
3. Dla materiału tulei cylindrowych podstawowym parametrem określającym jego właściwości w nowych konstrukcjach silników do pojazdów ciężkich (HDD – *Heavy Duty Diesel*) jest jego wytrzymałość oraz związane z tym parametry: skład chemiczny, struktura i twardość.
4. Drugą podstawową cechą funkcjonalną tulei w zakresie:
 - makrokształtu otworu określają parametry tolerancji okrągłości i prostoliniowości lub walcowości,
 - mikrogeometrii warstwy powierzchniowej gładzi określają parametry chropowatości, kąt gładzenia, obraz ukształtowania rys po gładzeniu, głębokość deformacji struktury warstwy powierzchniowej oraz czystość powierzchni.

Analiza zmian w kształtowaniu cech funkcjonalnych struktury warstwy powierzchniowej gładzi tulei cylindrowych w świetle publikacji i wymagań nowych konstrukcji silników spalinowych typu HDD wykazała, że:

- dotychczas podstawowym materiałem konstrukcyjnym stosowanym na tuleje cylindrowe było żeliwo szare niskostopowe z grafitem płatkowym o osnowie perlitycznej, które cechuje się wytrzymałością minimalną na rozciąganie na poziomie $R_m = 250\text{--}300\text{ MPa}$,
- w związku ze wzrostem maksymalnego ciśnienia spalania P_{\max} w przestrzeni roboczej silnika do poziomu 230–250 MPa, tuleje cylindrowe wymagają nowych materiałów konstrukcyjnych o wytrzymałości $R_m > 300\text{ MPa}$.

Dlatego przedmiotem wielokierunkowych badań technologicznych zarówno w zakresie odlewniczym, jak i obróbczym i dalej badań modelowych oraz silnikowych stały się wysokojakościowe niskostopowe żeliwa szare:

- z grafitem płatkowym i dodatkami pierwiastków stopowych oraz azotu,
- sferoidalne z grafitem wermikularnym i kulkowym,
- z grafitem płatkowym, wermikularnym i kulkowym hartowane z przemianą izotermiczną oraz staliwo i stal.

W odniesieniu do procesu gładzenia powierzchni otworu tulei prace ukierunkowane są na gładzenie gładkie wielozabiegowe wraz z możliwością zmiany kąta gładzenia oraz użycia lesera. Dwa ostatnie rozwiązania wymagają zmian w dotychczasowych procesach technologicznych, głównie odnośnie do nowych maszyn do gładzenia oraz zastosowania laserów w jednym z zabiegów procesu gładzenia.

Podsumowując analizę stanu wiedzy w aspekcie technologicznego kształtowania cech funkcjonalnych struktury warstwy powierzchniowej gładzi tulei cylindrowej oraz jej wpływu na właściwości eksploatacyjne silników spalinowych, można sformułować następujące problemy w formie pytań badawczych, na które odpowiedzi oczekują konstruktorzy nowych silników typu HDD:

1. Materiał tulei cylindrowej ma z jednej strony oddziaływać na trwałość i niezawodność układu TPC oraz charakterystykę danego silnika, a z drugiej strony ma mieć znaczący wpływ na spełnienie wymagań środowiskowych, przy zachowaniu ekonomicznie uzasadnionych kosztów wytwarzania. Czy istniejące rozwiązania technologicznie pozwalają na spełnienie tych oczekiwań?
2. Jakie są możliwości technologicznego rozwoju poszczególnych cech funkcjonalnych tulei cylindrowych w warunkach przemysłowych?
3. Czy technologiczne możliwości wytwarzania wysokojakościowych żeliw niskostopowych o wytrzymałości $R_m > 300$ MPa pozwalają na zastosowanie danego typu żeliwa na odlewy tulei cylindrowych, z jakim poziomem zdolności procesowej?
4. Czy zmiany w technologii kształtowania warstwy powierzchniowej gładzi tulei, które decydują o zmniejszeniu zużycia oleju oraz obniżeniu emisji toksycznych składników spalin, w aspekcie zmieniających się wymagań środowiskowych, można optymalizować pod kątem zdolności procesowych?
5. Jakie są zależności pomiędzy parametrami chropowatości gładzi tulei cylindrowej a zużyciem oleju i emisją cząstek stałych w poszczególnych standardach emisji spalin (Euro – Europa, US – Stany Zjednoczone i EPA – *Environment Protection Agency* – Urząd Ochrony Środowiska, Mode – Japonia)?

Zamierzeniem tej pracy było wskazanie możliwości technologicznego rozwoju poszczególnych cech funkcjonalnych tulei cylindrowych kształtowanych na podstawie dotychczasowych procesów technologicznych. Powinno to pozwolić na spełnienie przez tuleje cylindrowe nie tylko wymagań wytrzymałościowych, ale również wymagań tribologicznych i związanych z tym nowych wymagań

środowiskowych. Całość rozwiązania powinna powstać przy zachowaniu ekonomicznie uzasadnionych kosztów wytwarzania jako jednego z wymogów w nowych konstrukcjach silników spalinowych typu HDD.

3.2. Cele rozprawy

Przewiduje się, że w najbliższej przyszłości silniki ZS będą dalej dominowały jako źródła napędu pojazdów, a ich konstrukcje będą nadal doskonalone, głównie przez wprowadzanie na szerszą skalę zaawansowanych technologii, które obecnie są jeszcze w fazie rozwoju lub w początkowej fazie wdrożenia do produkcji.

Na tej podstawie postawiono tezę, że w konstrukcji tulei cylindrowej występuje zespół cech funkcjonalnych, który można opisać ściśle określonymi parametrami, a które następnie stanowią podstawę wyboru określonej technologii wytwarzania tulei i jednocześnie mają znaczący wpływ na pracę silnika spalinowego.

Postawiono dwa cele niniejszej pracy – naukowy i użytkowy.

Naukowym celem rozprawy jest określenie cech funkcjonalnych tulei cylindrowych oraz dobór modelu technologicznego, na podstawie którego byłyby kształtowane cechy funkcjonalne w procesie odlewania i dalej w procesie obróbki mechanicznej wraz z metodyką ich badań, z przeznaczeniem tulei do nowej konstrukcji silnika spalinowego typu HDD. Osiągnięcie celu naukowego będzie możliwe dzięki analizie trybologicznej elementów układu tłokowo-cylindrowego oraz określeniu wzajemnych zależności parametrów opisujących poszczególne cechy i ich wpływu na pracę silnika. Weryfikacja modelu technologicznego odbędzie się na drodze pomiarów i badań przemysłowych.

Użytkowym celem rozprawy jest przeprowadzenie badań zdolności procesów technologicznych w warunkach przemysłowych, dla przyjętych cech funkcjonalnych na etapie kształtowania odlewów i gładzenia tulei cylindrowych, przeznaczonych dla silników nowej platformy HDEP VOLVO (*Heavy Duty Engine Platform* – platforma silników do ciężkich pojazdów), spełniających kryteria wymagań środowiskowych. Zakres rozwiązań konstrukcyjnych silników VOLVO w ramach nowej platformy wyznacza przyszłościowe kierunki rozwoju dla silników typu HDD i elementów w układzie TPC (tłok–pierścienie tłokowe–cylinder).

Badania zdolności procesów technologicznych pozwolą na określenie stopnia spełnienia przez te procesy wymogów jakościowych. W tym celu w badaniach przeprowadzona będzie analiza wskaźników zdolności Cp i Cpk. Wskaźnik Cp określa potencjalne możliwości procesu technologicznego produkcji wyrobów w określonej tolerancji, a Cpk jest miarą wycelowania procesu, czyli położenia wartości średniej w stosunku do granic tolerancji. W wyniku badań określony zostanie poziom prawdopodobieństwa wystąpienia liczby wyrobów niezgod-

nych, których badane wartości nie mieszczą się w założonych granicach specyfikacji, co jest ważne z punktu sterowania jakością procesów technologicznych o wysokim poziomie technologii.

3.3. Zakres pracy

Osiągnięcie przyjętych celów pracy wymaga przeprowadzenia wstępnych badań w zakresie:

- określenia rodzajów wysokojakościowych żeliw i stali oraz ich podstawowych właściwości (skład chemiczny, struktura, twardość, wytrzymałość) decydujących o przydatności materiału jako tworzywa konstrukcyjnego o wytrzymałości $R_m > 300$ MPa wraz z analizą kosztów ich wytwarzania,
- określenia rodzaju metod gładzenia oraz parametrów charakteryzujących podstawowe cechy funkcjonalne struktury geometrycznej powierzchni gładzi (błędu kształtu, kąta gładzenia, parametrów chropowatości, obrazu ukształtowania struktury powierzchni gładzi, czystości powierzchni) wraz z analizą zmian parametrów chropowatości określonych metodą profilową na podstawie krzywej udziału materiałowego (Abbotta), które oddziałują na zmniejszenie zużycia oleju i współczynnik tarcia.

Podstawowym celem badań jest potwierdzenie prawidłowości założeń przyjętego modelu technologicznego w zakresie kształtowania odlewów z nowych rodzajów wysokojakościowych niskostopowych żeliw oraz w zakresie ukierunkowania parametrów chropowatości w różnych metodach gładzenia, z uwagi na brak w literaturze odpowiednich danych liczbowych na ten temat.

Takie badania wstępne pozwolą na przeprowadzenie badań zdolności procesów technologicznych, które kształtują poszczególne cechy w warunkach przemysłowych na etapie odlewania oraz obróbki mechanicznej tulei cylindrowych. Uzyskane wyniki badań zdolności procesów technologicznych będą stanowiły podstawę weryfikacji założeń do przyjętego modelu technologicznego oraz klasyfikacji tulei do montażu silników nowej platformy HDEP VOLVO.

Wyniki badań zaprezentowane w tej rozprawie są rezultatem wieloletnich działań badawczych autora. Powstawały one początkowo w Wytwórni Sprzętu Mechanicznego PZL – Krotoszyn S.A., a później MAHLE i Katedrze Mechaniki i Budowy Maszyn Wydziału Politechnicznego Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Kaliszu oraz w laboratoriach MAHLE, WAT w Warszawie, WSK PZL – Kalisz i Hartowni TSZ Zbąszynek Sp. z o.o.

Zakres i strukturę pracy w sposób schematyczny przedstawiono na rys. 3.1.

Funkcja w pracy	Tytuł rozdziału i zawartość	Rozdział
Geneza	<p style="text-align: center;">WPROWADZENIE</p> <p>Geneza problemu – ukierunkowania zakresu pracy w tematyce technologicznego kształtowania cech funkcjonalnych tulei cylindrowych silników spalinowych ZS</p>	1
Analiza stanu wiedzy	<p style="text-align: center;">CECH FUNKCJONALNE TULEI CYLINDROWYCH W NOWYCH KONSTRUKCJACH SILNIKÓW SPALINOWYCH ZS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kierunki rozwoju silników spalinowych ZS • Charakterystyka cech funkcjonalnych warstwy powierzchniowej • Analiza zmian w kształtowaniu cech funkcjonalnych • Podsumowanie 	2
Problem badawczy	<p style="text-align: center;">PROBLEM BADAWCZY</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zdefiniowanie problemu • Cel i zakres rozprawy 	3
Metodyka badań	<p style="text-align: center;">CHARAKTERYSTYKA MODELU TECHNOLOGICZNEGO ORAZ METODYKA BADAŃ</p> <ul style="list-style-type: none"> • Model technologiczny warstwy powierzchniowej • Charakterystyka modelu technologicznego procesu kształtowania odlewów oraz metodyka badań • Charakterystyka modelu technologicznego procesu gładzenia oraz metodyka badań 	4
Badania wstępne	<p style="text-align: center;">BADANIA WSTĘPNE CECH FUNKCJONALNYCH WARSTWY POWIERZCHNIOWEJ</p> <ul style="list-style-type: none"> • Badania właściwości nowych materiałów konstrukcyjnych • Badania nowych rozwiązań struktury geometrycznej 	5
Badania technologiczne	<p style="text-align: center;">BADANIA TECHNOLOGICZNE CECH FUNKCJONALNYCH WARSTWY POWIERZCHNIOWEJ</p> <ul style="list-style-type: none"> • Analiza cech funkcjonalnych • Badania technologiczne cech funkcjonalnych 	6
Analiza wyników	<p style="text-align: center;">ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ ORAZ OKREŚLENIE KIERUNKÓW ROZWOJU TECHNOLOGICZNEGO TULEI CYLINDROWYCH</p> <ul style="list-style-type: none"> • Właściwości żeliw • Właściwości struktury geometrycznej warstwy powierzchniowej • Zestawienie wyników badań na tle rozwiązań silników platformy HDEP VOLVO 	7
Wnioski	<p style="text-align: center;">PODSUMOWANIE I WNIOSKI</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wnioski poznawcze • Wnioski uylitarne • Kierunki dalszych badań • Wnioski końcowe 	8

Rys. 3.1. Schemat realizacji zakresu pracy

4. Charakterystyka modelu technologicznego oraz metodyka badań

4.1. Model technologiczny warstwy powierzchniowej

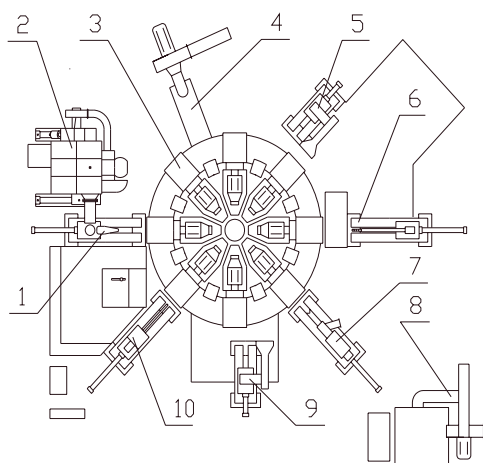
Każdy proces technologiczny stanowi uporządkowany ilościowo i jakościowo zbiór czynności, które mają na celu, w odniesieniu do materiału konstrukcyjnego, ukształtowanie jego właściwości fizykochemicznych i mechanicznych, w formie odlewu lub półfabrykatu, albo przekształcenie materiału konstrukcyjnego w końcową postać geometryczną wyrobu. Można przyjąć, że wynikiem procesów technologicznych jest uzyskanie przez wyrób strukturalnej budowy, w której można wyróżnić strukturę warstwy powierzchniowej oraz rdzeń materiału. Struktura warstwy powierzchniowej ma zawsze budowę i właściwości zależne od rodzaju materiału rdzenia, jego składu chemicznego i właściwości fizykochemicznych, a także od rodzaju dalszych operacji technologicznych. Zakres dostępnych technologii i technik wytwarzania warstw powierzchniowych jest bardzo szeroki, a jednocześnie ciągle dokonuje się postęp technologiczny, zwłaszcza w przemyśle motoryzacyjnym. Z tego względu wielu autorów prac [6, 46, 76, 91, 96, 102, 196] odstępuje od budowy ogólnych modeli warstw powierzchniowych, w których trudno jest opracować ogólne prawidłowości budowy strukturalnej warstwy powierzchniowej na korzyść modeli technologicznych odnoszących się do aktualnego stanu technologii. Technologiczne metody kształtowania warstwy powierzchniowej współcześnie ukierunkowane są na zwiększenie trwałości i niezawodności pracy pary trącej, przy minimalizacji kosztów wytwarzania. Jednocześnie zauważa się tendencje technologicznego przygotowania warstw powierzchniowych (na przykład geometrii powierzchni gładzi tulei cylindrowej) do stanu występującego na tych powierzchniach w eksploatacji, czego potwierdzeniem jest niniejsza praca, jak również aktualne wymagania konstruktorów silników spalinowych w stosunku do tulei cylindrowych typu HDD/HDEP.

Na podstawie powyższego określono modele technologiczne procesów, w których są kształtowane cechy funkcjonalne tulei. Są to procesy formowania odlewu oraz gładzenia w procesie obróbki mechanicznej.

4.2. Charakterystyka modelu technologicznego procesu kształtowania odlewu oraz metodyka badań

Odlewy żeliwnych tulei cylindrowych są wytwarzane metodą wirującej formy w procesie odlewania odśrodkowego (rys. 4.1). Proces ten pozwala na speł-

nienie wymagań konstrukcyjnych materiału tulei w zakresie wytrzymałości, twardości i struktury, natomiast metoda wirującej formy ma tę zaletę, że można nią kształtować odlewy żeliwne i stalowe ściśle związane z końcową postacią geometryczną tulei (rys. 4.2). W zależności od potrzeb i przeznaczenia produkcji urządzenie odlewnicze tego typu ma możliwości mechanizacji i automatyzacji procesu.



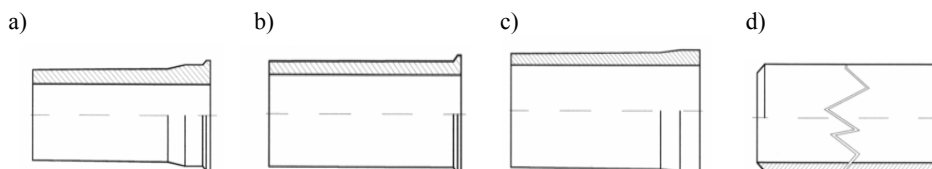
Rys. 4.1. Schemat urządzenia odlewniczego do formowania odlewów żeliwnych tulei cylindrowych metodą wirującej formy: 1 – zalewanie kokili, 2 – piec dozująco-przetrzymujący, 3 – chłodzenie odlewu, 4 – odciąg pary, 5 – otwieranie kokili, 6 – wyciąganie odlewu, 7 – czyszczenie kokili, 8 – odciąg pyłów, 9 – zamykanie kokili, 10 – nanoszenie płynnego pokrycia

Typowymi kształtami odlewów uzyskiwanych metodą wirującej formy są odlewy:

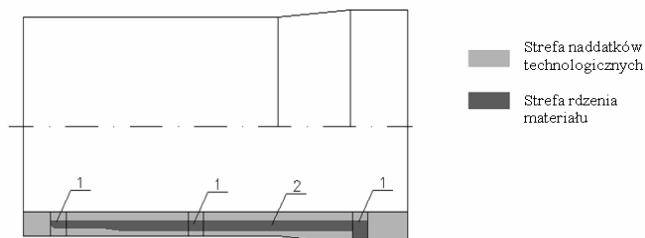
- kołnierzone (rys. 4.2a, b) – stosowane dla tulei typu mokrego,
- bezkołnierzone (rys. 4.2c) – dla tulei typu suchego,
- wielokrotne (rys. 4.2d) – mają zastosowanie dla tulei z przeznaczeniem do zalewania w blokach aluminiowych.

Przyjęty model technologiczny odlewu w swej strukturalnej budowie obejmuje strefę rdzenia materiału oraz strefę naddatków technologicznych (rys. 4.3).

Główną rolą naddatków technologicznych, które są charakterystyczne dla odlewania kokilowego jest wyeliminowanie lub znaczne ograniczenie porowatości oraz wtrąceń niemetalicznych ze strefy rdzenia podczas wirowania ciekłego żeliwa i krzepnięcia odlewu.



Rys. 4.2. Typowe kształty odlewów tulei cylindrowych odlewanych metodą odśrodkową: a, b) odlew kołnierzowy, c) odlew bezkołnierzowy, d) odlew wielokrotny typu rura

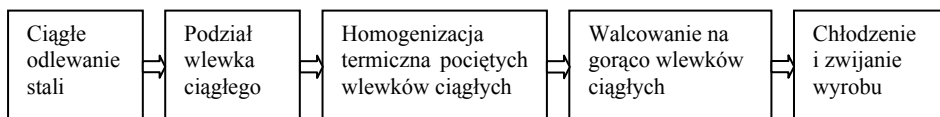


Rys. 4.3. Model technologiczny odlewu z żeliwa tulei wraz z zaznaczeniem miejsc w strefie rdzenia do pobierania próbek do badań: 1 – twardości i struktury, 2 – wytrzymałości

Strefa rdzenia jest strefą o jednorodnych właściwościach mechanicznych, istotnych dla cech funkcjonalnych tulei, typu wytrzymałość, twardość i mikrostruktura. Strefa ta stanowi miejsce położenia końcowego dla pozostałych cech funkcjonalnych w zakresie kształtu otworu i powierzchni gładzi tulei; cechy te są kształtowane w procesie obróbki skrawaniem. Położenie strefy rdzenia jest istotne dla prawidłowej eksploatacji warstwy powierzchniowej [91, 96].

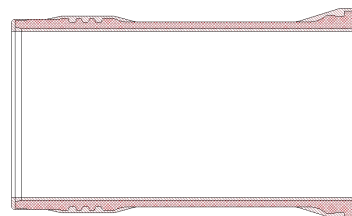
Aktualnie, w sytuacji masowej produkcji stali, stosuje się dwie metody odlewania stali:

- metodę do wlewnic (rys. 4.1), nazywaną również metodą konwencjonalną,
- metodę ciągłego odlewania i walcowania stali – najbardziej rozwijanego pod względem techniczno-technologicznym kierunku w metalurgii stali (rys. 4.4) [92].



Rys. 4.4. Model zintegrowanego odlewania i walcowania stali [92]




Odlewane wlewki ciągłe, w systemach zintegrowanego odlewania i walcowania, mają kształty przekroju poprzecznego zbliżone do kształtu wyrobu gotowego. W odniesieniu do tulei cylindrowych jest to rura (rys. 4.2d). Projekt modelu technologicznego stalowej tulei cylindrowej typu HDEP po procesie odlewania i walcowania przyrostowego przedstawiono na rysunku 4.5.



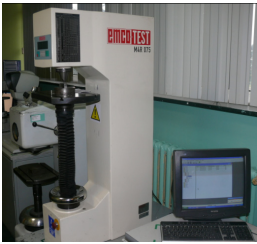

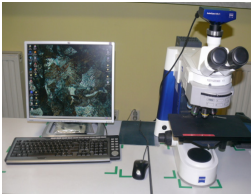
Rys. 4.5. Model technologiczny odlewu stalowego tulei cylindrowej po procesie walcowania przyrostowego (projekt firmy TIMKEN)

W celu przeprowadzenia badań cech funkcjonalnych, które są kształtowane na etapie topienia żeliwa i krzepnięcia odlewu oraz odlewu stalowej tulei po procesie przyrostowego walcowania przyjęto określoną w tablicach 4.1 i 4.2 metodykę badań. Metodyka obejmuje dobór: stanowisk kontrolno-pomiarowych, warunków pomiarów oraz wzorców odniesienia według wymagań dotyczących kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących, ujętych w normie PN-EN ISO/IEC 17025 [157].

Tablica 4.1. Metodyka badań składu chemicznego żeliwa na etapie topienia

Etap procesu	Cechy funkcjonalne	Metodyka badań	Stanowiska kontrolno-pomiarowe	Warunki pomiarów	Wzorce odniesienia
Topienie żeliwa	Skład chemiczny	Spektrometria emisyjna ze wzbudzeniem widma emisyjnego próbki w atmosferze argonu za pomocą iskry niskonapięciowej	ARL 3460 firmy Thermo 	Pobieranie i przygotowanie próbki z każdego wytopu wg PN-ISO 14284	Spektralne wzorce: – podstawowe CKD – kontrolne SUS 3/20
		Metoda spalania próbki umieszczonej w tyglu ceramicznym w strumieniu czystego tlenu i powietrza. Ocena węgla (C) i siarki (S) za pomocą detektora absorpcji w podczerwieni (IR)	Analizator CS 244 firmy Leco 	Masa próbki 0,5 g Tlen czysty 99,5% Powietrze bez wilgoci i zanieczyszczeń Odczynniki chemiczne: – bezwodny nadchloran magnezu – wodorotlenek sodu na bazie obojętnej – platynowy żel silikonowy	Wzorzec stały jednopunktowy 501-024
		Metoda topienia próbki umieszczonej w tyglu ceramicznym w strumieniu czystego helu i powietrza. Ocena tlenu (O ₂) i azotu (N) za pomocą detektora absorpcji w podczerwieni (IR)	Analizator TC 500 firmy Leco 	Masa próbki 0,5 g Hel czysty 99,99% Powietrze bez wilgoci i zanieczyszczeń Odczynniki chemiczne: – bezwodny nadchloran magnezu – wodorotlenek sodu na bazie obojętnej – tlenek miedzi	Wzorzec stały jednopunktowy 501-644

Tablica 4.2. Metodyka badań twardości, wytrzymałości oraz struktury żeliwnych tulei cylindrycznych na etapie kształtowania odlewu

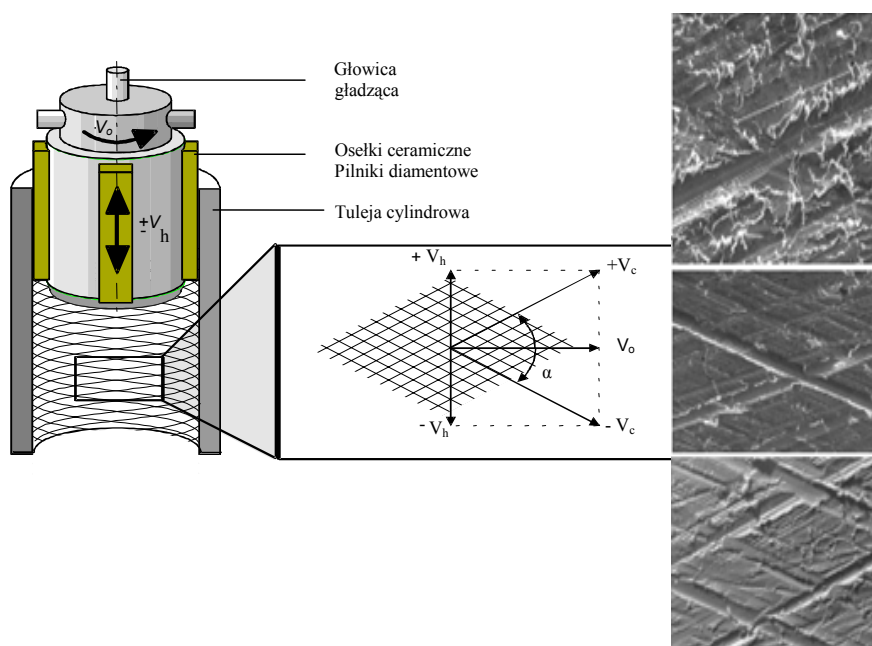
Etap procesu	Cechy funkcjonalne	Metodyka badań	Stany kontrolno-pomiarowe	Warunki pomiarów	Wzorce odniesienia
Kształtowanie odlewu	Twardość	Pomiar twardości metodą Brinella HBW 5/750 według PN-EN ISO65066-1	MK 4 firmy EMCO-TEST 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pobieranie próbek z odlewu tulei (1 szt./wytop) ze strefy rdzenia – kołnierz tulei według rys. 4.3. 2. Przygotowanie próbek do pomiarów według PN-EN 1561, EN 10003-1, oraz PN-EN ISO 6506-2 i 3 3. Sprawdzanie i kalibracja wzorców 	Wzorzec 251 HBW 5/750
	Wytrzymałość	Próba rozciągania R_m	Inspekt 150 firmy Hegewald & Paschke 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pobieranie próbek z odlewu tulei (1 szt./wytop) ze strefy rdzenia według rys. 4.3 2. Przygotowanie próbek do badań według PN-EN 1561 3. Sprawdzanie i wzorcowanie według PN-EN ISO 75001 przy temperaturze otoczenia według PN-EN ISO 1000-1 	–
	Struktura	Obserwacja mikroskopowa zglądu metalograficznego w zakresie grafitu i osnowy metalowej	Axio-Imager. A1m firmy Zeiss 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pobieranie próbek z odlewu tulei (1 szt./wytop) ze strefy rdzenia według rys. 4.3. 2. Przygotowanie zglądu do obserwacji – powierzchnia gładzi według PN-61/H-04503 	Katalog struktur wzorcowych: – grafit – osnowa

4.3. Charakterystyka modelu technologicznego procesu gładzenia oraz metodyka badań

W procesie obróbki mechanicznej powstaje końcowa postać geometryczna tulei, która obejmuje cechy funkcjonalne związane ze strukturą geometryczną powierzchni otworu w zakresie:

- makro – odchyłki kształtu,
- mikro – układu rys,
 - kąta gładzenia,
 - chropowatości,
 - głębokości deformacji,
 - czystości powierzchni.

Te technologiczne cechy są kształtowane w procesie gładzenia wielozabiegowego (rys. 4.6).



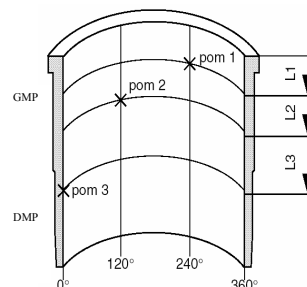
Rys. 4.6. Schemat procesu gładzenia i związany z tym charakterystyczny obraz 2D/3D ukształtowania powierzchni gładzi tulei cylindrowej [37]

W wyniku procesu gładzenia uzyskuje się strukturę anizotropową o wyraźnie ukierunkowanym kształcie skrzyżowanych rys pod kątem α (rys. 4.6) oraz określonej wielkości i odległości rys.

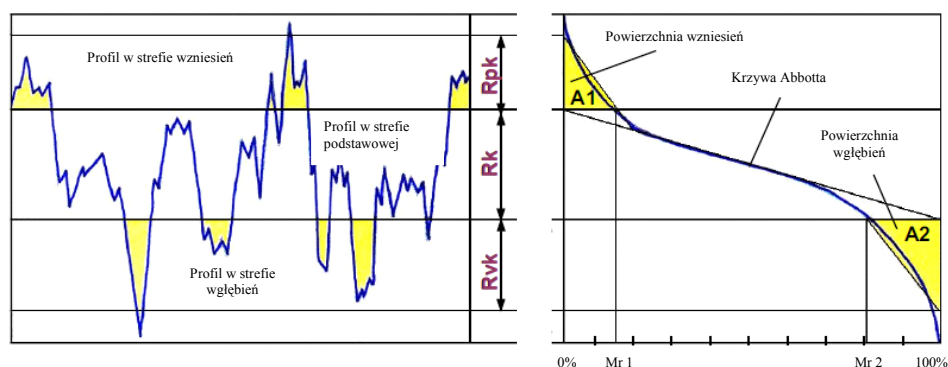
Dla celów konstrukcyjno-technologicznych i badań tribologicznych niezbędny jest opis i pomiar struktury geometrycznej powierzchni gładzi. Z tego względu przyjęto metodykę pomiarów odchyłek kształtu otworu i parametrów chropowatości opartą na dwuwymiarowym przekroju profilu (2D) zmierzonej powierzchni o określonym położeniu punktów pomiarowych względem powierzchni nominalnej (rys. 4.7 i 4.8). Wynika to z praktycznego podejścia, ponieważ w warunkach przemysłowych obecnie jeszcze nie ma możliwości realizacji szybkich pomiarów w układzie 3D [200, 201].

Do scharakteryzowania powierzchni gładzonej wielu autorów prac [20, 126, 193] oraz ośrodków naukowych (rozdz. 2 pkt. 2.3.2) powszechnie wykorzystuje opis parametrów chropowatości określonych metodą profilową na podstawie krzywej udziału materiałowego (Abbotta) (rys. 4.8), według normy PN-EN ISO 13565-2 [154]. Przekrój profilu chropowatości 2D pozwala na opis warstwowego modelu powierzchni i związanych z tym właściwości funkcjonalnych powierzchni.

Strefę wzniesień opisuje parametr Rpk [μm] – zredukowana wysokość wzniesień. Strefa ta jest powierzchnią nośną dla pierścieni tłokowych, a parametr Rpk [μm] charakteryzuje zachowanie powierzchni podczas docierania. Mała wartość tego parametru jest „miarą” dużej odporności na ścieranie, czyli dobrego zachowania się podczas docierania.



Rys. 4.7. Rozmieszczenie punktów pomiarowych dla parametrów chropowatości (pom 1–3) oraz parametrów błędów kształtu (płaszczyzna L1–3)



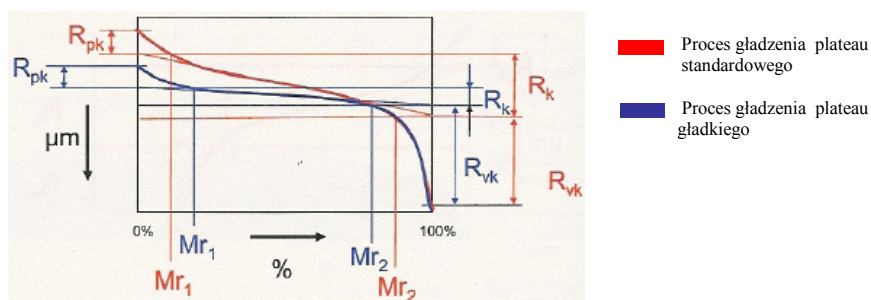
Rys. 4.8. Opis parametrów chropowatości określonych metodą profilową na podstawie krzywej udziału materiałowego (Abbotta) [154]

Strefę podstawową opisuje parametr Rk [μm] – głębokość rdzenia chropowatości. Jest to strefa efektywnej pracy eksploatacyjnej powierzchni.

Parametr Rvk [μm] – zredukowana głębokość wgłębien opisuje strefę wgłębien poniżej powierzchni podstawowej. Parametr ten jest miarą zdolności utrzymania oleju przez powierzchnię.

Pozostałe parametry to parametry udziału materiałowego $Mr1$ i $Mr2$ wyrażane w procentach. Wyznaczone są przez linię przecięcia oddzielającą dla $Mr1$ wystające wzniesienia od profilu rdzenia chropowatości, a dla $Mr2$ głębokie wgłębienia od profilu rdzenia chropowatości.

Metoda profilowa pozwala wyznaczyć również wartości parametrów opisujących profil chropowatości powierzchni przy powiększaniu się udziału materiałowego wraz ze wzrostem głębokości, co występuje na przykład przy przejściu z metody gładzenia standardowego plateau na metodę gładzenia plateau gładkiego (rys. 4.9).



Rys. 4.9. Wpływ zmiany procesu gładzenia na wielkość parametrów opisujących profil chropowatości [198]

Opierając się na opisanych założeniach zasad pomiarów w układzie 2D, przyjęto metodykę pomiarów i badań kształtu otworu tulei i powierzchni gładzi (tabl. 4.3). Metodyka obejmuje dobór stanowisk kontrolno-pomiarowych, warunków pomiarów oraz wzorców odniesienia według wymagań dotyczących kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących ujętych w normie PN-EN ISO/IEC 17025 [157].




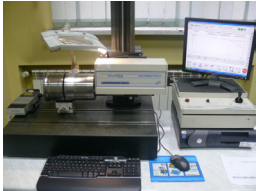
W zakresie badań czystości powierzchni gładzi po procesie gładzenia przyjęto zasadę, że dobór metodyki i przebiegu badań powinien w pełni i trafnie pozwolić określić istniejące na powierzchniach zanieczyszczenia wynikające z procesu i związanego z tym otoczenia.

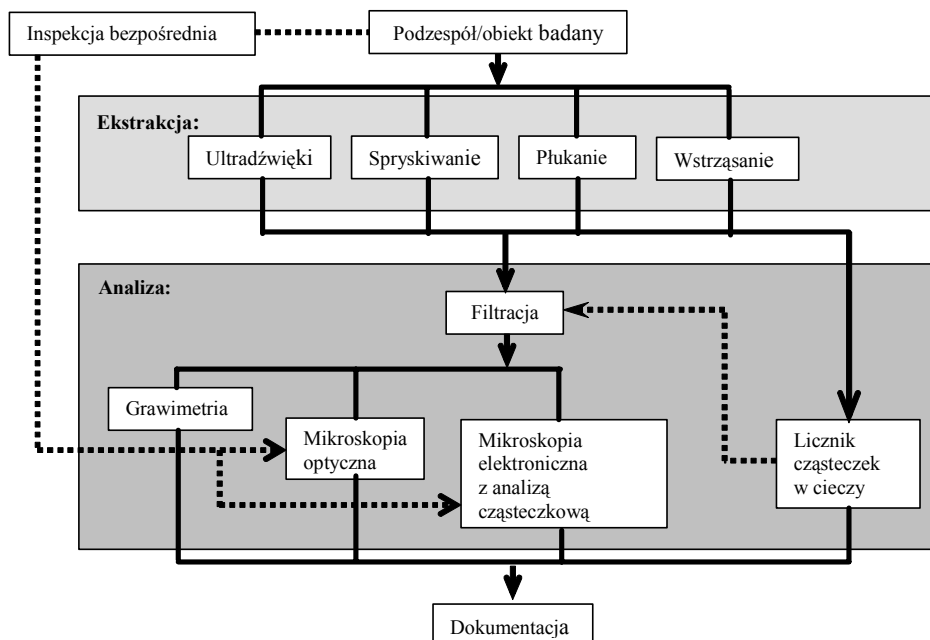
Ponieważ wymagania niektórych producentów silników spalinowych HDD narzucają określenie wielkości i ilości zabrudzeń resztkowych na powierzchniach współpracujących (tabl. 2.6), przyjęto według wymagań VDA [195] następującą kolejność postępowania w doborze metodyki badań (rys. 4.10):

- pobieranie próbek wyrobów do badań,
- kwalifikacja procedury ekstrakcyjnej,
- analiza techniczno-pomiarowa cząstek,
- dokumentowanie wyników.

Przy wyborze metody ekstrakcji kierowano się przede wszystkim geometrią i materiałem, z jakiego jest wykonana tuleja cylindrowa, a następnie doбором i optymalizacją sposobu ekstrakcji. Według zasad okręgu Sinnersa [167] przyjęto do analizy cztery podstawowe parametry: ciecz kontrolną, temperaturę, mechanizm czyszczenia oraz czas, które mają wpływ na wynik ekstrakcji (rys. 4.11).

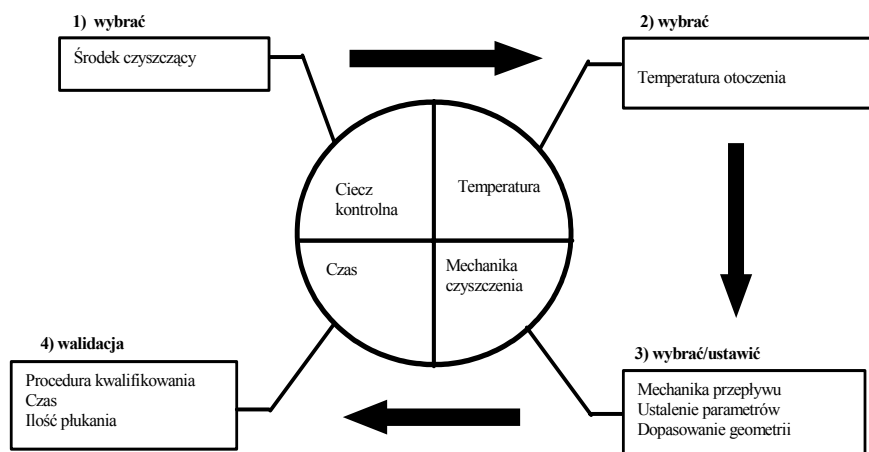
Tablica 4.3. Metodyka badań w zakresie kształtu otworu i parametrów chropowatości

Etap procesu		Cechy funkcjonalne	Metodyka badań	Stanowiska kontrolno-pomiarowe	Warunki pomiarów	Wzorce odniesienia
Gładzenie wielozabiegowe	Kształt otworu tulei	Okrągłość	Pomiar metodą bezodniesieniową w biegunowym układzie współrzędnych	Talyround 365 firmy Taylor Hobson 	– filtr: typu Gauss, rodzaj LSS, zakres 1–50 – miejsce pomiarów według rys. 4.7, poziom L1	–
		Prostoliniowość				
	Powierzchnia gładzi	Kąt gładzenia + układ rys	Obserwacja powierzchni gładzi poprzez system wizyjny kamery CCD i zespołu obiektywów typu Zoom i Focus	System wizyjny CCD 	– powiększenie 25–100× – oświetlenie kątowe i osiowe – miejsce ocen według rys. 4.7	– wzorzec kliszy 50 ±0,01 mm – katalog obrazów
		Układ rys + głębokość deformacji	Obserwacja topografii próbki powierzchni gładzi po skanowaniu próbki nanometrową wiązką elektronów uformowaną przez układ elektrooptyczny mikroskopu	Mikroskop skanujący Leo firmy Zeiss 	– powiększenie 400–1000× – miejsce pobrania próbki według rys. 4.7, poziom L1	– katalog obrazów
	Chropowatość	Pomiar stykowy metodą profilową według ISO 13565-2	Form Talysurf Series 2 firmy Taylor Hobson 	– filtr typu Rk – odcinek Lm = 12,5 mm cut-off = 2,5 mm – miejsce pomiarów według rys. 4.7	– wzorzec typu Ra, Rk	






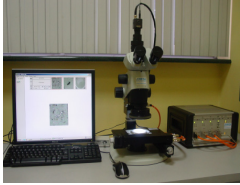

Rys. 4.10. Kolejność postępowania przy doborze metodyki badań czystości [195]

Ostatecznie przyjęto metodę ekstrakcji przez spryskiwanie z zachowaniem doboru stanowisk kontrolno-pomiarowych, warunków pomiarów oraz wzorców odniesienia (tabl. 4.4) według ogólnych wymagań dotyczących kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących ujętych w normie PN-EN ISO/IEC 17025 [157].



Rys. 4.11. Sposób postępowania przy wyborze metody ekstrakcji [195]

Tablica 4.4. Metodyka badań czystości powierzchni otworu

Etap procesu	Cecha funkcjonalna	Metodyka badań	Stanowiska kontrolno-pomiarowe	Warunki pomiarów	Wzorce odniesienia
Mycie	Czystość powierzchni	Metoda ekstrakcji poprzez spryskiwanie powierzchni gładzi	Stanowisko firmy Hydac CTU 1000-M-Z-Z 	<ul style="list-style-type: none"> - ciecz kontrolna: G 60 Spezial, 6L dla tła, 10L dla tulei - temperatura otoczenia 22 ± 2 °C - spryskiwanie lancą natryskową o średnicy 2,5 mm przy ciśnieniu 2 bar i kącie natrysku $> 20^\circ$ - wielkość filtra 1,2 μm 	-
		Analiza całkowitej masy zanieczyszczeń metodą grawimetryczną	Eksykator  Waga analityczna 	<ul style="list-style-type: none"> - temperatura otoczenia 22 ± 2 °C - wilgotność $50 \pm 10\%$ - dokładność wagi 0,01 mg 	wzorce masy
		Mikroskopia optyczna – analiza membrany filtra w zakresie wielkości i ilości cząstek zanieczyszczeń	Mikroskop stereoskopowy James 	-	wzorzec czystości Jamesa V1.1-108
		Mikroskopia elektroniczna – analiza rentgenowska składu pierwiastkowego cząstek	Mikroskop scanningowy Leo firmy Zeis z analizą EDX 	<ul style="list-style-type: none"> - rozdzielczość detektora Leo - pomieszczenie według PN-EN ISO 14644-1 	-

5. Badania wstępne cech funkcjonalnych warstwy powierzchniowej tulei cylindrowych

5.1. Badania właściwości nowych materiałów konstrukcyjnych

W celu określenia rodzajów wysokojakościowych żeliw i stali oraz ich podstawowych właściwości decydujących o przydatności jako materiały na tuleje cylindrowe ($R_m > 300$ MPa) do silników typu HDD, wykonano badania własne w zakresie:

- stosowanych w świecie żeliwnych tulei cylindrowych (tabl. 5.1),
- żeliwa standardowego stosowanego dotychczas w silnikach typu HDD (tabl. 5.2),
- żeliwa z dodatkiem: pierwiastków stopowych Mo (0,02–0,48%), Cu (0,03–0,84%), pierwiastków stopowych z udziałem N (0,019%), pierwiastków stopowych z udziałem Mg (0,01–0,06%) (tabl. 5.2),
- żeliw oferowanych przez światowych producentów tulei cylindrowych FM, GKN – Z i MAHLE (tabl. 5.3),
- stali chromowo-molibdenowych 41CrAlMo7 i 42CrMo4 przed i po procesie azotowania (tabl. 5.4 i 5.5).

Badania przeprowadzono na podstawie przyjętego modelu technologicznego i związanej z tym metodyki badań (rozdz. 4.2).

Analiza uzyskanych wyników z badań zawartych w tablicach 5.1–5.5 pozwala na zestawienie badanych żeliw i stali w następujące grupy:

- a. Żeliwo standardowe – niskostopowe z grafitem płatkowym o strukturze perlitycznej. Jest materiałem najczęściej stosowanym na tuleje cylindrowe w Europie. Udział pierwiastków stopowych jest mały i zróżnicowany: Cr na poziomie 0,2–0,6%, Mo 0,0–0,2%. Są to tuleje stosowane w silnikach Volvo, Scania, Libherr i DAF. Żeliwo to ma wytrzymałość $R_m = 250$ – 280 MPa ($R_m < 300$ MPa) i twardości 220–250 HBW. Ten rodzaj żeliwa w warunkach normalnej eksploatacji cechuje się dobrą odpornością na ścieranie, korozję i na zmęczenie. Żeliwo to dobrze spełnia stawiane mu wymagania przez konstruktorów silników dotychczas eksploatowanych, przede wszystkim z powodu osnowy perlitycznej z niewielkim udziałem ferrytu (< 5%).
- b. Żeliwo z dodatkiem pierwiastków stopowych P, Cr, Mo i Cu w stosunku do żeliwa standardowego cechuje się głównie wzrostem udziału Mo z 0,16% do 0,4–0,5% i udziału Cu na poziomie 0,75%, co pozwala na uzyskanie wytrzymałości $R_m > 300$ MPa. W badanych odlewach wytrzymałość minimalna kształtowała się na poziomie $R_m = 320$ MPa przy twardości 250 HBW. Obraz

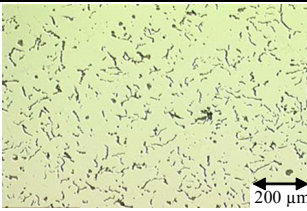
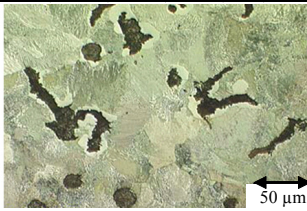
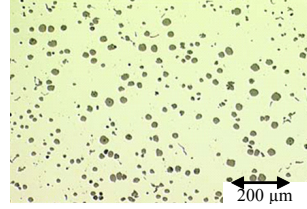
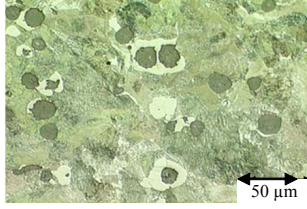
ukształtowania grafitu i osnowy był zbliżony do struktury perlitycznej żeliwa standardowego. Bazując na zakresach składów chemicznych, można przyjąć, że silniki IVECO, RVI/Mac i MAN mogą posiadać tuleje cylindrowe o zwiększonej wytrzymałości.

- c. Żeliwo z dodatkiem pierwiastków stopowych i udziałem N (0,019%) jest stosowane na tuleje cylindrowe o średnicy 145 mm silnika Iveco. Badany odlew żeliwa z udziałem N (0,016%) cechował się zmniejszonym udziałem P (0,27%), S (0,01%), Mo (0,05%) i Ni (0,04%), ale zwiększonym udziałem Cu (0,80%). Wytrzymałość minimalna była na poziomie $R_m = 347$ MPa, a twardość 265 HBW. Istotną zmianą w obrazie mikrostruktury jest kształt grafitu, który ma zmienioną wielkość przy niezmienionej osnowie perlitycznej w stosunku do osnowy żeliwa standardowego.

Tablica 5.1. Skład chemiczny żeliwnych tulei cylindrowych najczęściej stosowanych w silnikach typu HDD [32]

Region	Producent silnika	Średnica cylindra [mm]	Udział pierwiastków [%]															
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu	Ni	B	Nb	N				
Ameryka	RVI/Mack	124	indukcyjnie hartowane			0,2					0,5							
	Caterpillar	137				0,2			0,4									
	DDC	130	prawdopodobnie wysoka twardość – żeliwo bainityczne															
Europa	IVECO	115	2,8–3,6	1,4–2,9	0,4–0,8	0,2	max 0,04–0,12	0,2–0,6				0,04						
		125				0,45			0,4	0,6								
		145				0,45					0,6		0,019					
	DC	128				0,6												
	Scania	127				0,55												
	RVI	102				0,6			0,5		0,7							
		123				0,6			0,5									
	VOLVO	130				0,6												
	Liebherr	122				0,7												
	MAN	128				0,7			0,2		0,8							
	Deutz	132				0,4												
DAF	130	0,4																
Japonia	Hino	114				0,27		0,4			0,027							
		135				0,27		0,4	0,7		0,085							
	Nissan	136				0,02		0,4	0,8		0,05	0,011						
	Mitsubishi	118				0,02			0,8		0,027	0,017						
		115				0,02			0,8		0,027	0,014						
	Isuzu	147				0,35		0,4	0,7		0,076							

Tablica 5.2 cd. Zestawienie podstawowych właściwości żeliw poddanych badaniom

Rodzaj materiału	Skład chemiczny [%]												Właściwości mechaniczne		
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Ti	N	Mg	R _m [MPa]	HBW
	Obraz ukształtowania osnowy metalicznej														
Zeliwo z dodatkiem Mg	3,38	2,54	0,48	0,036	0,013	0,006	0,06	0,015	0,03	0,73	0,01		0,06	660	266
															
Zeliwo z dodatkiem Mg	3,6	2,55	0,5	0,04	0,01	0,06	0,02	0,03	0,67		0,01		0,01	842	286
															

- e. W Japonii używane są żeliwa, które zawierają określoną ilość fazy węglkowej uzyskiwanej w wyniku stosowania dodatków stopowych typu Cr, Mo, Nb, B. Dzięki fazie węglkowej tuleje cechują się dużą odpornością na ścieranie oraz odpornością na korozję. Ze względu na bardzo trudną obrabialność odlewy tulei poddaje się obróbce cieplnej przez wyżarzanie, dzięki czemu zmniejsza się ilość fazy węglkowej i następuje częściowa sferoidyzacja węglików. Obraz ukształtowania osnowy metalicznej jest typu bainitycznego. Tego rodzaju żeliwa mają specyficzne właściwości, które ogólnie mieszczą się między właściwościami żeliwa z grafitem płatkowym a właściwościami żeliwa z grafitem kulkowym (tabl. 5.2 i 5.3). Można przyjąć, że jest to żeliwo zbliżone do struktury żeliwa wermikularnego.
- f. Żeliwo z wydzieleniami grafitu wermikularnego (grafit w kształcie robaczkowym) lub z wydzieleniami grafitu kulkowego jest materiałem, którego właściwości mechaniczne w zakresie wytrzymałości w badanych odlewach ukształtowały się na poziomie odpowiednio $R_m = 660$ MPa i $R_m = 842$ MPa przy bardzo małym udziale $P = 0,04\%$ i $S = 0,01\%$; jako modyfikator użyty był magnez (należy mieć na uwadze wymagania środowiskowe – zmniejszenie zużycia paliwa i możliwości utylizacji – między innymi w zakresie zredukowania wagi – szczególnie wagi silnika, która wynosi około 15% wagi pojazdu). Ta grupa żeliw ma dobrą kombinację właściwości; w sytuacji stabilnego i korzystnego cenowo wytwarzania może być stosowana nie tylko na tuleje cylindrowe, ale także na bloki cylindrowe. Obecnie materiał ten jest

przedmiotem zainteresowania wielu koncernów samochodowych (Ford, Audi-V8, BMW-V8, Renault, Fiat, Isuzu, Hyundai, DAF oraz MAN), które uruchomiły lub zamierzają produkować głównie bloki silnikowe i tuleje cylindrowe [16, 103].

Tablica 5.3. Podstawowe właściwości żeliwnych tulei cylindrowych produkowanych przez FM, GKN – Z i MAHLE przeznaczonych do silników typu HDD [32, 61, 198, 200, 216]

Rodzaj żeliwa i jego właściwości		Żeliwo z grafitem płatkowym		Żeliwo z grafitem wermikularnym
Mikrostruktura		perlit	bainit	perlit
Twardość HBW 30		180–300	270–330	240–300
Wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]		200–350	400–600	500–650
Moduł sprężystości E [GPa] ¹⁾		100–120	120–140	130–160
Rozszerzalność cieplna α [$10^{-6}K^{-1}$] ¹⁾		11–12	11–12	11–14
Przewodność cieplna λ [$W \cdot m^{-1}K^{-1}$] ¹⁾		47	32	35
Skład chemiczny [%]	C	2,8–3,2	2,6–2,8	3,0–3,6
	Si	1,8–2,1	1,4–2,0	1,8–2,9
	Mn	0,6–1,0	max 0,8	0,2–0,8
	P	max 1,0	max 0,08	max 0,04
	S	max 0,12	max 0,08	max 0,01
	Cr	0,1–0,3	–	–
	Mo	max 0,6	1,0–1,5	–
	Cu	max 0,8	–	max 0,8
	B	max 0,7	–	–
	Ti	–	–	max 0,06
Ni	max 1,2	1,0–1,5	–	

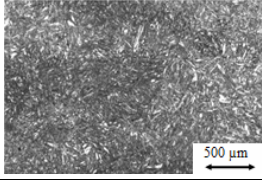
¹⁾ Dane z badań producentów tulei.

Inną grupą materiałów poddanych badaniom były stale chromowo-molibdowe, gatunek 41CrAlMo7 i 42CrMo4. Jako materiał z przeznaczeniem na tuleje cylindrowe te gatunki stali stopowej z udziałem odpowiednio chromu ($Cr = 0,9$ i $1,25\%$), molibdenu ($Mo = 0,18$ i $0,21\%$), wanadu (V max $0,04$ i $0,21\%$) oraz aluminium ($Al = 0,94$ i $0,8\%$) (tabl. 5.4) poddane były obróbce cieplno-chemicznej, podczas której warstwa powierzchniowa wzbogacona została dyfuzyjnie azotem.

W zależności od przyjętej technologii azotowania uzyskano różne grubości warstwy azotowanej (tabl. 5.5). Badane tuleje cylindrowe tłokowego silnika lotniczego typu ASz-62IR z gatunku stali 41CrAlMo7, produkcyjnie poddane procesowi azotowania długotrwałego (75–85 h) według tradycyjnej technologii dwustopniowej z przepływem amoniaku (20–65%), miały grubość warstwy azotowanej 600–700 μm o twardości 974–1033 HV (tabl. 5.5). Badane próbki stali

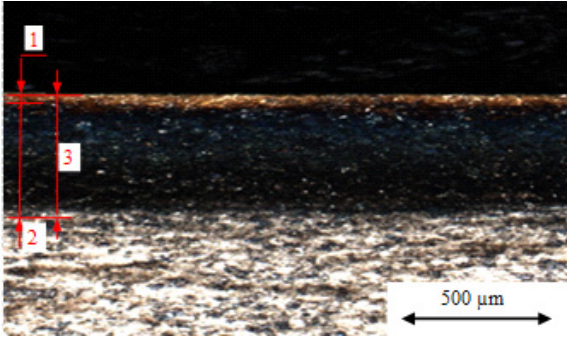

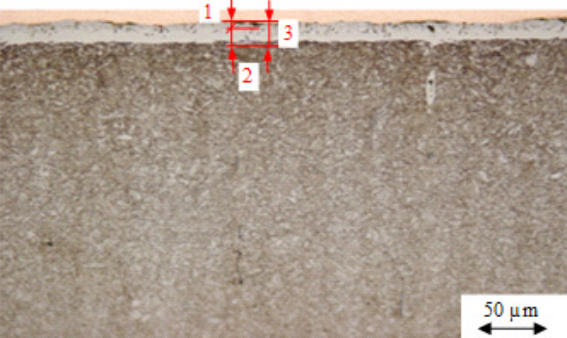
42CrMo4 poddane procesowi krótkotrwałego azotowania w czasie 90 min w kąpeli solnej według technologii HEF/Durferrit w Hartowni TS Zbąszynek wykazały w temperaturze 590 °C grubość warstwy azotowanej 15 μm o twardości 630 HV (proces ARCOR V), a w temperaturze 580 °C w procesie TENIFER uzyskano grubość warstwy azotowanej 12 μm o twardości 660 HV (tabl. 5.5). Wyniki badań w zakresie wytrzymałości na rozciąganie (R_m) potwierdziły średni wzrost wytrzymałości po procesie azotowania odpowiednio dla stali 41CrAlMo7 o 22%, a dla stali 42CrMo4 o 32% (tabl. 5.4).

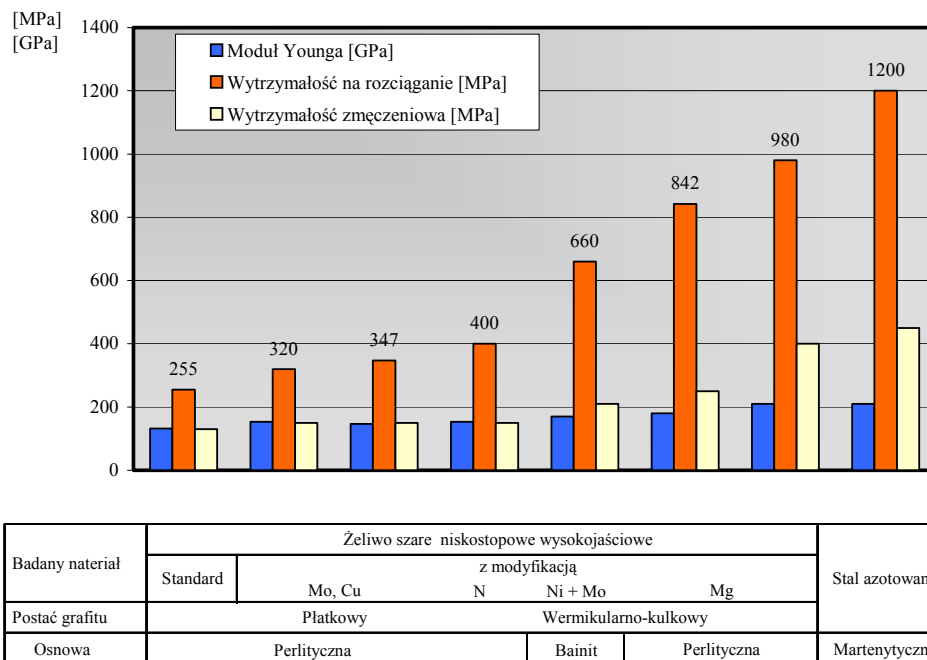
Tablica 5.4. Podstawowe właściwości stali chromowo-molibdenowych

Gatunek stali i jej właściwości		41CrAlMo7	42CrMo4
Skład chemiczny [%]	C	0,39	0,41
	Si	0,41	0,35
	Mn	0,46	0,49
	P	0,013	0,02
	S	0,001	0,025
	Cr	1,58	1,25
	Mo	0,18	0,21
	V	0,004	0,21
	Cu	0,091	0,08
	W	0,019	0,09
	Ti	0,03	
Al	0,94	0,8	
Struktura			
		Struktura martenzytyczna	
R _m [MPa]	przed/po azotowaniu	900/1100 ¹⁾	980/1200 ²⁾
Oznaczenia: ¹⁾ Dane z badań w WSK PZL-Kalisz, ²⁾ Dane z badań MAHLE [103, 190].			

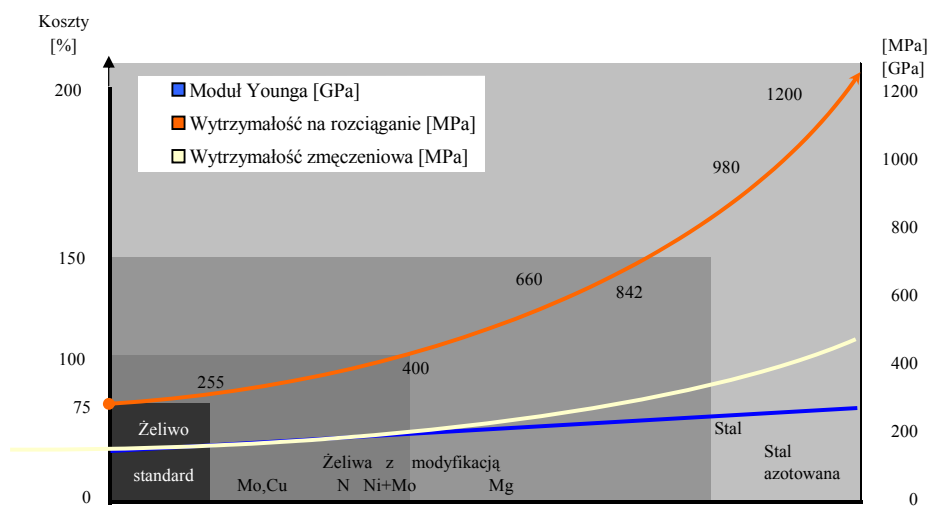
W podsumowaniu przeprowadzonych badań (rys. 5.1) zestawiono podstawowe wielkości właściwości mechanicznych poszczególnych grup żeliw w porównaniu do żeliwa standardowego oraz stali jako materiału z przeznaczeniem na nowe konstrukcje tulei cylindrowych ($R_m > 300$ MPa). Wyniki analizy kosztowej, z uwzględnieniem zapewnienia przez żeliwo warunku wytrzymałości $R_m > 300$ MPa w stosunku do kosztów żeliwa standardowego dotychczas stosowanego na tuleje cylindrowe oraz kosztów stali poddanej procesowi azotowania, przedstawiono na rysunku 5.2.

Tablica 5.5. Właściwości warstwy związków po procesie azotowania

Gatunek stali	Technologia procesu azotowania	Właściwości warstwy związków po procesie azotowania
41CrAlMo7	I stopień <ul style="list-style-type: none"> • podgrzewanie wsadu 10 h • wygrzewanie wsadu 15 h • temperatura 505–515 °C • stopień dysocjacji amoniaku 20–35% II stopień <ul style="list-style-type: none"> • temperatura 535–550 °C • stopień dysocjacji amoniaku 40–65% • czas 50–60 h • studzenie wsadu przy przepływie amoniaku 	 <p>3 – Strefa dyfuzji azotu 600–700 μm, HV = 974–1033¹⁾</p>
42CrMo4	HEF/Durferrit – ARCOR (azotonawęglanie) <ul style="list-style-type: none"> • podgrzewanie wsadu temperatura 350–400 °C • azotowanie w kąpeli solnej temperatura 590 °C • pasywacja w temperaturze 430 °C • hartowanie i mycie w wodzie • czas 90 min 	 <p>3 – Strefa dyfuzji azotu 15 μm, HV = 630²⁾</p>
42CrMo4	HEF/Durferrit – TENIFER (węgloazotowanie) <ul style="list-style-type: none"> • podgrzewanie wsadu temperatura 350–400 °C • azotowanie w kąpeli solnej temperatura 580 °C • pasywacja w temperaturze 430 °C • hartowanie i mycie w wodzie • czas 90 min 	 <p>3 – Strefa dyfuzji azotu 12 μm, HV = 660²⁾</p>
Oznaczenia: 1 – zewnętrzna strefa mieszana dwufazowa: faza ε – azotek Fe ₂ N + faza γ' – azotek Fe ₄ N 2 – strefa jednofazowa: faza ε z małą ilością fazy γ', 3 – strefa dyfuzji azotu ¹⁾ Dane z badań w WSK-PZL Kalisz, ²⁾ Dane z badań w Hartowni TSZ Zbąszynek		



Rys. 5.1. Podstawowe właściwości badanych wysoko jakościowych niskostopowych żeliw oraz stali



Rys. 5.2. Udział kosztów wytwarzania nowych materiałów konstrukcyjnych z przeznaczeniem na tuleje cylindrowe w stosunku do materiału dotychczas stosowanego (żeliwa standardowego)

5.2. Badania nowych rozwiązań struktury geometrycznej

W celu określenia parametrów charakteryzujących podstawowe cechy funkcjonalne struktury geometrycznej powierzchni gładzi tulei cylindrycznych wykonano badania:

- błędów kształtu, kąta gładzenia i parametrów chropowatości żeliwnych tulei cylindrycznych najczęściej stosowanych w świecie w silnikach typu HDD (tabl. 5.6),
- kąta gładzenia, parametrów chropowatości oraz obrazu ukształtowania struktury powierzchni gładzi tulei cylindrycznych wykonanych według wariantów technologicznych gładzenia (tabl. 2.4); uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 5.7,
- walidacyjne dla przyjętej metodyki badań czystości, aby określić warunki ekstrakcji przez pomiary zanikające. Uzyskane wyniki badań i analiz zostały szczegółowo opisane i opublikowane w pracy [35], a ich syntezę zawiera zestawienie w tabeli 5.8.

Wszystkie badania przeprowadzono, opierając się na przyjętym modelu technologicznym i związanej z tym metodyce badań (rozdz. 4.3).

Tablica 5.6. Wyniki badań żeliwnych tulei cylindrycznych najczęściej stosowanych w świecie w silnikach typu HDD [32]

Region	Ameryka			Europa												Japonia													
Producent silnika	RVI/Mack	Caterpillar	DDC	IVECO		DC		Scania		RVI		VOLVO		Lihbert		MAN		Deutz		DAF		Hino		Nissan		Mitsubishi		Isuzu	
Ø [mm]	124	137	130	115	125	145	128	127	102	123	131	122	128	132	130	114	135	136	118	115	147								
○ [µm]	10															7		10											
— [µm]	10															20		15											
⊖ [µm]	5															10		5											
α [°]	38	50	40	30	60	38	58	60	52	48	50	60	57	55	55	28	38	44	38	26	28								
[µm]																													

W wyniku przeprowadzonych badań parametrów opisujących strukturę makro otworu (tabl. 5.6) zauważono, że tolerancja zarówno parametru kołowości, jak i parametru prostoliniowości nie powinna przekraczać 10 μm . Firma Nissan zawęży tolerancję kołowości do 7 μm , a Deutz i DAF dopuszczają parametr tolerancji prostoliniowości odpowiednio do 20 μm i 15 μm . Są to tolerancje, które są stosowane równocześnie w stosunku do powierzchni otworu. Z zasady odnoszą się do powierzchni otworu tulei pomiędzy GMP a DMP związanej ze współpracą z pierścieniami tłokowymi, w przeciwieństwie do tolerancji walcowości DC i MAN 5 μm oraz VOLVO 10 μm , która odnosi się do całej powierzchni otworu. Tolerancja walcowości jest wymaganiem istotniejszym niż jednoczesne zastosowanie tolerancji okrągłości i prostoliniowości o tej samej wartości [141] oraz wymaga określenia strategii pomiarowej w celu oceny całej powierzchni otworu tulei, na co zwrócono uwagę w badaniach własnych, których wyniki opublikowano w pracy [37].

W praktyce otwory tulei mają w swoich końcowych obszarach większe odchyłki kształtu, które wynikają z końcowych wyjść zwrotnych głowicy do gładzenia. Dlatego w rozwiązaniach konstrukcyjnych tulei korzysta się z możliwości zdefiniowania większych tolerancji kształtu okrągłości i prostoliniowości w tych obszarach.

Analiza parametrów mikro ukształtowania powierzchni gładzi według poszczególnych wariantów technologicznych, zestawionych w tablicy 5.7, oraz parametrów powierzchni gładzi tulei cylindrowych najczęściej stosowanych w świecie w silnikach HDD (tabl. 5.7) wykazała, że część badanych wariantów technologicznych jest procesami standardowymi stosowanymi w produkcji seryjnej tulei cylindrowych. Są to procesy:

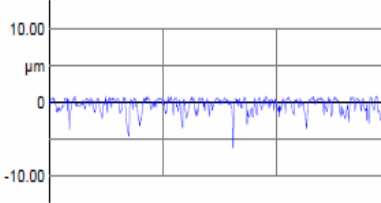
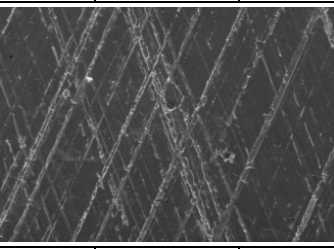
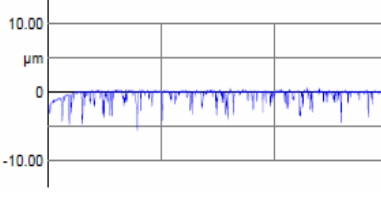
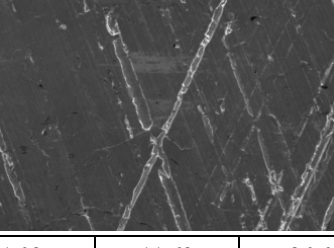
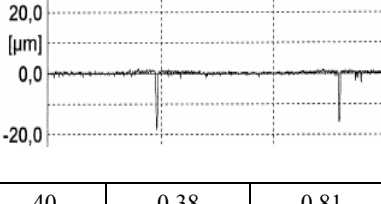
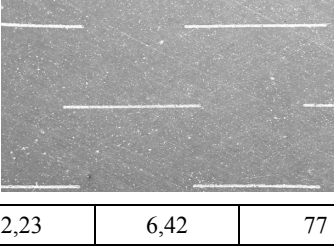
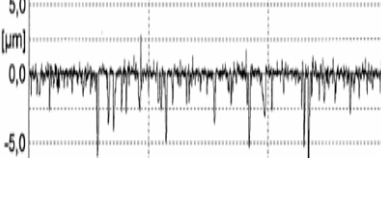
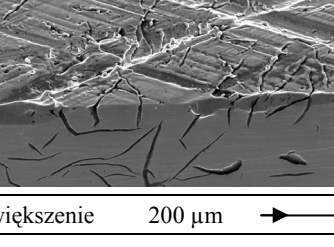
Dwustopniowe gładzenie (gładzenie wstępne i wykańczające) – jest procesem stosowanym w produkcji tulei z przeznaczeniem głównie na części zamienne na przykład do silników Peugeot (TU 9, XC7, XU5), Perkins (4.236). Proces gładzenia kształtuje powierzchnię gładzi z dużą chropowatością, bez udziału nośnego $Rpk = 2,95\mu\text{m}$, $Rk = 5,8\mu\text{m}$, $Rvk = 2,27\mu\text{m}$, $Mr1 = 10,91\%$, $Mr2 = 90,1\%$, co ilustruje profilogram powierzchni oraz obraz SEM (tabl. 5.7).

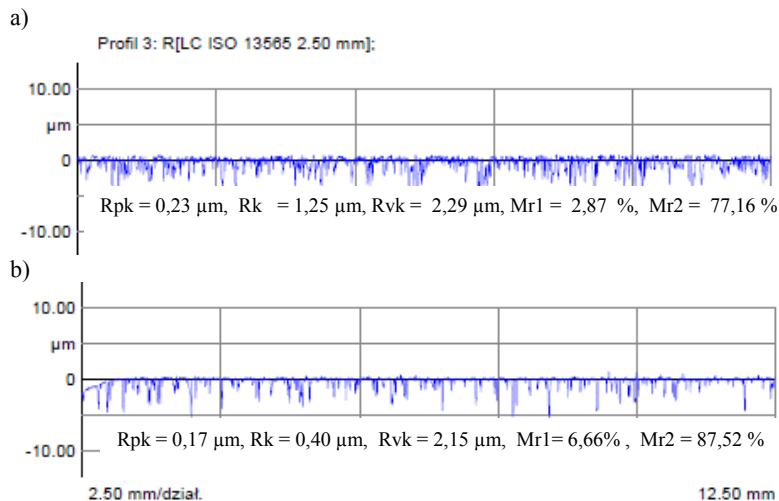
Gładzenie plateau standardowe – jest procesem najszerszej stosowanym w konstrukcjach tulei cylindrowych na całym świecie, przed wprowadzeniem wymagań związanych z emisją cząstek stałych i zużyciem oleju. Jest to grupa tulei stosowanych w silnikach Libherr, Deutz, Iveco, DDC, Caterpillar, VOLVO, RVI/Mac, MAN i DAF, których parametry chropowatości zawarte są w przedziale $Rk = 0,19\text{--}2,7\mu\text{m}$, $Rk = 1,0\text{--}4,0\mu\text{m}$, $Rvk = 1,0\text{--}2,8\mu\text{m}$. Struktura powierzchni gładzi jest zbliżona do powierzchni po procesie docierania w silniku. Struktura ta pozwala na zmniejszenie zużycia oleju, ale dopiero po dłuższym okresie współpracy z pierścieniami tłokowymi, kiedy całkowicie dotarta powierzchnia wykazuje małą chropowatość rdzeniową Rk i powierzchni nośnej Rpk (rys. 5.3).

Tablica 5.7. Wyniki badań powierzchni gładzi tulei cylindrycznych wykonanych według wariantów technologicznych gładzenia

Metoda gładzenia	Parametry chropowatości powierzchni					
	α [°]	Rpk [μm]	Rk [μm]	Rvk [μm]	Mr1 [%]	Mr2 [%]
	Ukształtowanie powierzchni					
	Profilogram		Obraz SEM			
Gładzenie normalne dwustopniowe	30	2,95	5,80	2,27	10,91	90,10
Gładzenie plateau trzystopniowe	50	0,19	0,89	2,25	3,99	69,75
Gładzenie plateau ze szrotkowaniem	35	0,13	0,73	1,91	4,81	72,18
Gładzenie plateau gładkie	48	0,17	0,48	1,82	4,51	61,44
Gładzenie plateau gładkie z docieraniem	45	0,07	0,31	0,94	5,16	71,47
				Powiększenie 200 μm		

Tablica 5.7 cd. Wyniki badań powierzchni gładzi tulei cylindrycznych wykonanych według wariantów technologicznych gładzenia

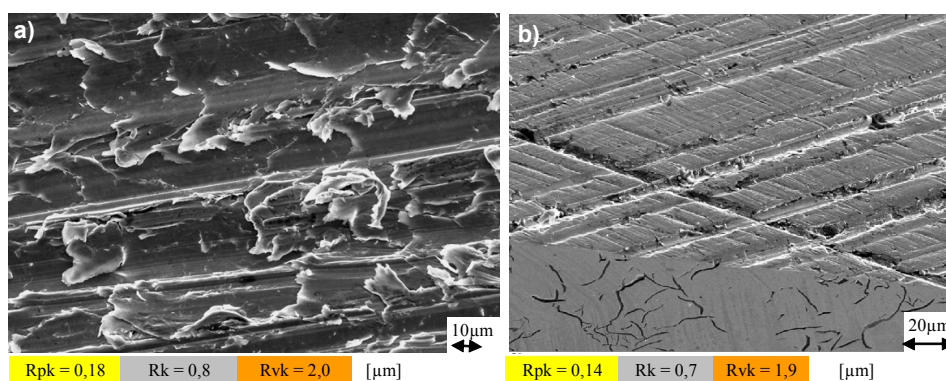
Metoda gładzenia	Parametry chropowości powierzchni					
	α [°]	Rpk [μm]	Rk [μm]	Rvk [μm]	Mr1 [%]	Mr2 [%]
	Ukształtowanie powierzchni					
	Profilogram			Obraz SEM		
Gładzenie plateau spiralne	135	0,30	1,08	1,69	4,45	65,27
						
Gładzenie plateau spiralne gładkie	135	0,09	0,35	1,43	5,43	67,03
						
Gładzenie plateau z nacięciem zasobników olejowych laserem	45	0,28	0,54	1,02	11,62	86,61
						
Gładzenie plateau z hartowaniem powierzchni laserem	40	0,38	0,81	2,23	6,42	77
						
				Powiększenie 200 μm \longleftrightarrow		



Rys. 5.3. Zakres zmian parametrów chropowatości powierzchni gładzi tulei cylindrowej 1677874 silnika D 12 VOLVO po okresie początkowej pracy ok. 400 h

Gładzenie plateau ze szczotkowaniem – jest w pewnym stopniu odmianą procesu gładzenia plateau lub może być dodatkową obróbką tulei po gładzeniu plateau. Jako narzędzie jest używana głowica, w której w miejsce osełek wmontowane są szczotki z włókien poliamidowych z osadzonym węglikiem krzemu o ziarnistości 320. Szczotkowanie ma na celu oczyszczenie i usunięcie pozostałości z poprzedniej operacji typu łuskowatości materiału oraz postrzępionych krawędzi rys, co ilustrują struktury powierzchni przedstawione na rys. 5.4.

Przez gładzenie ze szczotkowaniem struktura powierzchni gładzi została wygładzona i tym samym zmniejszeniu uległy parametry chropowatości (rys. 5.4). Ważna dla gromadzenia oleju smarującego struktura rowków została zachowana.



Rys. 5.4. Struktura powierzchni gładzi: a) po procesie gładzenia plateau standardowego, b) po procesie szczotkowania

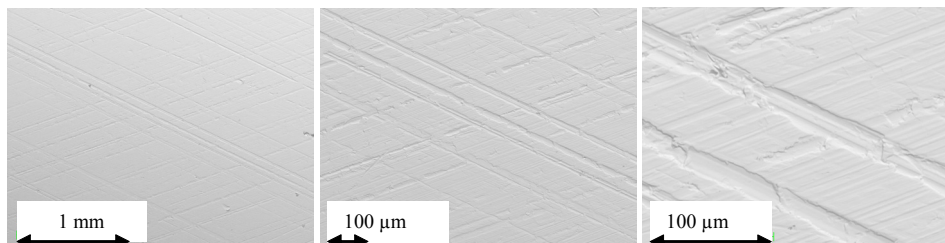
Według prac [25, 26] oraz danych zawartych w specyfikacji tego procesu w firmie Mercedes [179], dzięki zaokrągleniom krawędzi rys zostaje polepszona jakość wlotu oleju i zmniejszeniu ulega jego zużycie, co stwarza korzystniejsze warunki tribologiczne wpływające na trwałość silników HDD. Potwierdzeniem powyższego są również badania autora, które zostały przeprowadzone na tulejach cylindrowych z przeznaczeniem do silników typu NHDD dla firmy FORD Otosan w Turcji [33].

Uregulowania prawne w zakresie emisji cząstek stałych i zmniejszenia zużycia oleju przyczyniły się do prac nie tylko nad nowymi konstrukcjami silników i tulei cylindrowych, ale również prac związanych z optymalizacją powierzchni gładzi i procesu gładzenia. W wyniku tego powstały następane nowe metody gładzenia typu gładkiego, spiralnego oraz z udziałem lasera.

Uzyskane wyniki z badań tych metod wykazały, że:

Metoda gładzenia plateau gładkiego jest wynikiem prac optymalizujących strukturę powierzchni gładzonych metodami konwencjonalnymi, przede wszystkim w zakresie zmniejszenia głębokości chropowatości rdzeniowej ($R_k < 0,9 \mu\text{m}$) i chropowatości powierzchni nośnej ($R_{pk} < 0,3 \mu\text{m}$), zredukowania szerokości rys i dostosowania wartości R_{vk} w zależności od zastosowań silników (tabl. 5.6 i 5.7). Jest to grupa silników firm: Iveco, Scania, DC, Hino i Isuzu, w której to grupie parametry chropowatości tulei cylindrowych są zawarte w przedziale: $R_{pk} = 0,2\text{--}0,3 \mu\text{m}$, $R_k = 0,6\text{--}0,9 \mu\text{m}$, $R_{vk} = 0,4\text{--}2,1 \mu\text{m}$. W grupie silników firm: RVI, Nissan, Mitsubishi i Iveco zakres zmniejszenia chropowatości rdzeniowej jest na poziomie $R_k = 0,4\text{--}0,5 \mu\text{m}$ i chropowatości powierzchni nośnej $R_{pk} = 0,1\text{--}0,4 \mu\text{m}$ przy parametrze $R_{vk} = 0,7\text{--}1,0 \mu\text{m}$.

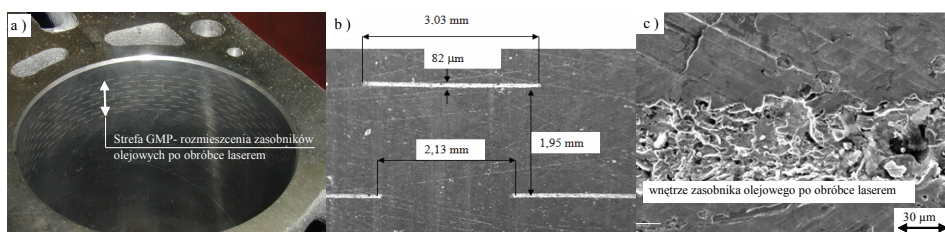
Metoda gładzenia strumieniowego gładkiego według technologii VW polega na obniżeniu wartości $R_{pk} < 0,3 \mu\text{m}$, $R_k < 0,6 \mu\text{m}$ oraz $R_{vk} < 0,8 \mu\text{m}$ w wyniku dwustopniowego gładzenia diamentami, następnie natrysku strumieniem cieczy diamentowej z równoczesnym gładzeniem na gładko. Natrysk strumieniem cieczy diamentowej ma na celu oczyszczenie powierzchni zawalcowanych i złuszczonej po dwustopniowym gładzeniu pilnikami diamentami, podobnie jak w metodzie gładzenia ze szczotkowaniem. Badania próbek pobranych z cylindrów silnika o pojemności skokowej $1,9 \text{ dm}^3$ potwierdzają poziom obniżonych parametrów chropowatości $R_{pk} = 0,07 \mu\text{m}$ ($R_{pk} < 0,3 \mu\text{m}$) i $R_k = 0,31 \mu\text{m}$ ($R_k < 0,6 \mu\text{m}$). Parametr $R_{vk} = 0,94 \mu\text{m}$ jest wyższy od zalecanej wartości $R_{vk} < 0,8 \mu\text{m}$. Z kolei analiza obrazów ukształtowania powierzchni przy użyciu mikroskopu SEM (rys. 5.5) nie potwierdza mikrokomór (niewidoczne w analizie obrazu SEM), zgodnie ze schematem – rys. 2.12. Struktura powierzchni jest czysta i nie ma zawalcowań i złuszczeń, tym samym zagadnienie dotyczące mikrokomór wymagałoby głębszej analizy na większej liczbie próbek pobranych z cylindrów.



Rys. 5.5. Obraz SEM ukształtowania struktury powierzchni gładzi według technologii i danych VW

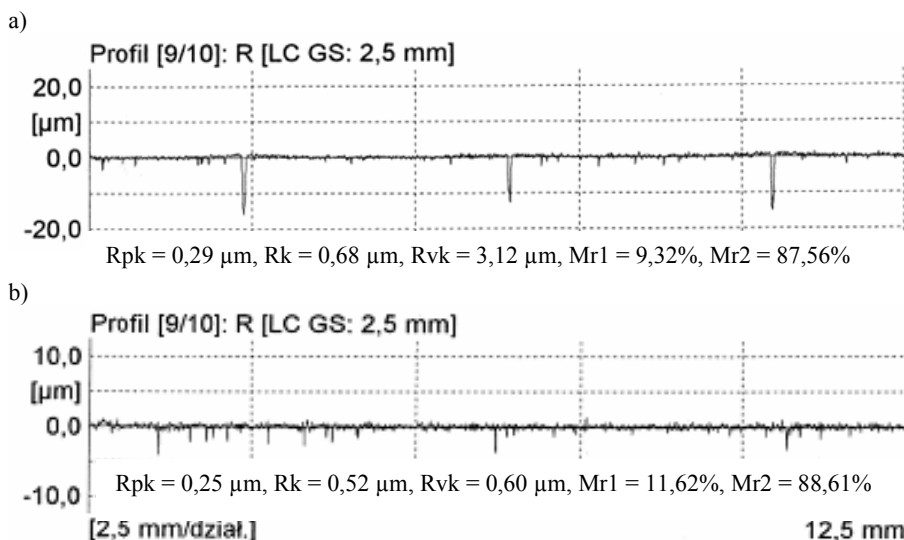
Metoda gładzenia spiralnego typu plateau i gładkiego jest wynikiem prac optymalizujących strukturę powierzchni gładzonych metodami konwencjonalnymi, z tym że kąt gładzenia α jest zmieniony i wynosi 140° . Z tego względu ten proces gładzenia wymaga nowych maszyn gładzących, o znacznie zwiększonej szybkości posuwu osiowego (V_h – rys. 4.6) i wysokim momencie obrotu przy niskich obrotach (V_o – rys. 4.6) [164, 165, 172]. Są to warunki przeciwstawne do warunków tradycyjnych typów gładzarek używanych w gładzeniu konwencjonalnym. Struktura powierzchni gładzi parametrami jest zbliżona do parametrów struktury powierzchni gładzonych przy kącie $\alpha = 30\text{--}60^\circ$.

Metoda gładzenia plateau z wykorzystaniem lasera według technologii firmy Gehringer polega na kształtowaniu laserem powierzchni gładzi po dwustopniowym gładzeniu diamentami zasobników olejowych w formie kieszeni, rozmieszczonych obwodowo w strefie GMP tulei (rys. 5.6a).



Rys. 5.6. Obraz ukształtowania struktury powierzchni cylindra silnika o pojemności $1,3 \text{ dm}^3$: a) w strefie obróbki laserem, b) rozmieszczenie zasobników olejowych, c) wewnątrz zasobnika olejowego

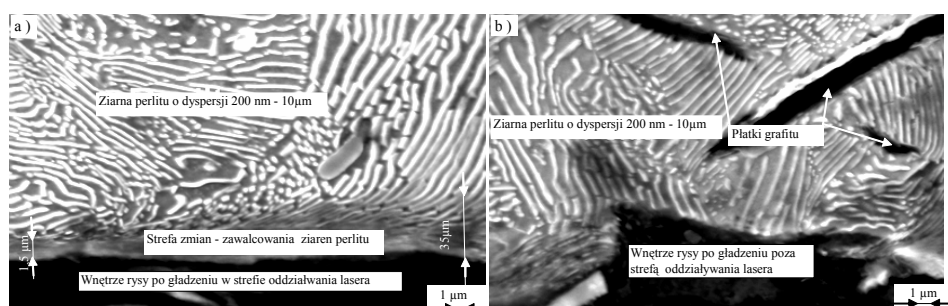
Struktura naciętych zasobników jest następnie gładzona pilnikami diamentowymi, aby usunąć pozostałości przetopionego materiału z krawędzi. Nacięte kieszenie są rozmieszczone równomiernie zarówno po obwodzie cylindra (długość $3,03 \text{ mm}$ i odległość pomiędzy kieszeniami $2,13 \text{ mm}$), jak i wzdłuż tworzącej co $1,95 \text{ mm}$ – łącznie 8 poziomów (rys. 5.6a). Z tego względu występują różnice w wartościach parametrów chropowatości w strefie oddziaływania lasera i poza tą strefą (rys. 5.7).



Rys. 5.7. Profilogramy z pomiarów struktury powierzchni w strefie: a) nacięc zasobników olejowych, b) poniżej tej strefy

W strefie oddziaływania wiązki lasera zaobserwowano zmiany w osnowie metalowej wywołane przetopieniem (rys. 5.8), zmiany w dyspersji perlitu płytkowego (z 0,2 do 1,0) oraz lekkie zawalcowanie płytek cementytu w perlicie w strefie od 1,5 do 3,3 μm od strony gładzi. Potwierdzeniem zmian w strefie oddziaływania wiązki laserowej (ok. 30 μm) są wyniki badań porównawczych twardości w strefie oddziaływania wiązki laserowej (1210 HV_{0,1}) i poza zakresem jej oddziaływania (656 HV_{0,1}).

Omawiana metoda jest stosowana produkcyjnie w grupie GM i została wdrożona między innymi w zakładzie Fiata w Bielsku-Białej do produkcji silnika 1.3 JTD (Euro 4 i 5). Struktury powierzchni z tego typu silnika były przedmiotem szczegółowych badań własnych [34, 36] oraz w pracy [186].

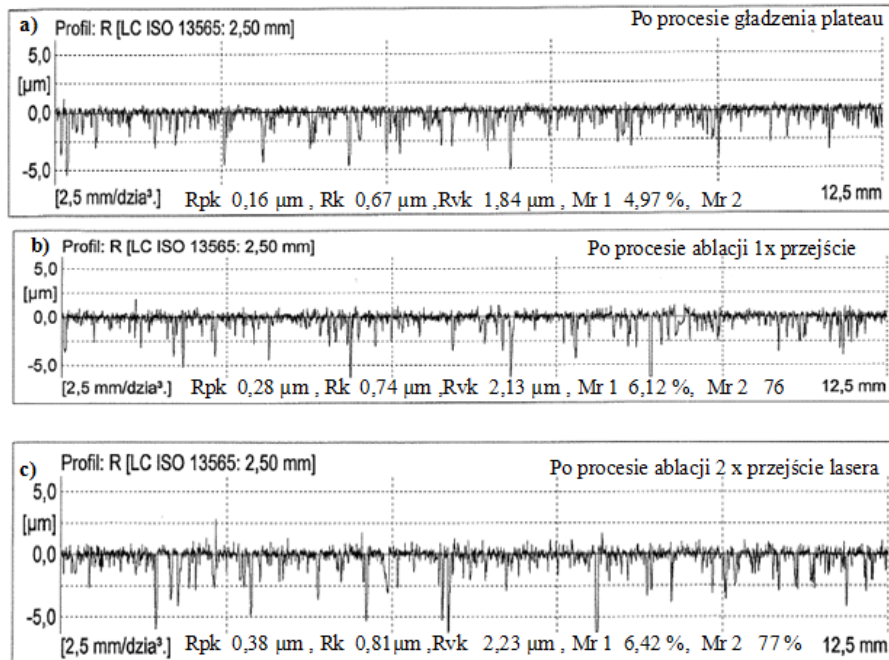


Rys. 5.8. Zmiany w dyspersji perlitu: w wyniku oddziaływania wiązki lasera (a) i poza strefą oddziaływania lasera (b)

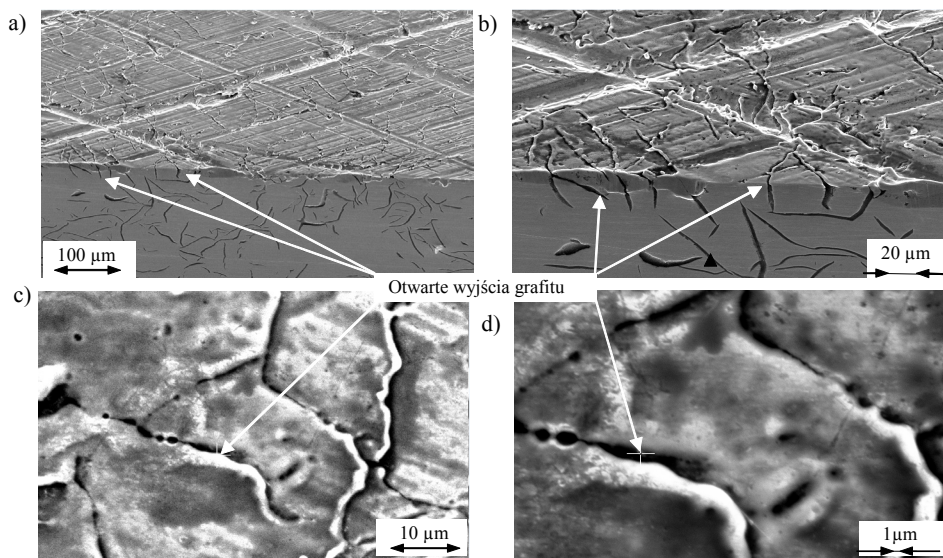
Metoda gładzenia plateau z wykorzystaniem procesu ablacji laserowej jest technologią opartą na konwencjonalnym gładzeniu tulei w trzech operacjach, po których laserem wykonuje się proces ablacji, czyli oczyszczenia powierzchni gładzi. Proces ten polega na usunięciu pozostałości po gładzeniu diamentami, po którym na strukturze powierzchni często pozostają zaciągnięcia materiału oraz występują ostre krawędzie rys (rys. 5.4), a wyjścia grafitu są z reguły zamknięte. Jako zaletę tej technologii autorzy prac [48, 101] wymieniają możliwość dodatkowego wzbogacenia struktury powierzchni azotem podczas procesu ablacji laserowej. W ramach badań własnych tego typu struktur autor tej pracy przy współdziałaniu zespołu Wojskowej Akademii Technicznej wykonał próby ablacji laserowej na tulejach cylindrowych po procesie gładzenia plateau gładkim (rys. 5.9 i 5.10). Pomiary geometrii kształtu otworu tulei przed i po procesie ablacji laserowej wykazały, podobnie jak w przypadku parametrów chropowatości, wzrost wartości:

- kołowości z $0,72\text{--}5,47\ \mu\text{m}$ do $0,75\text{--}6,63\ \mu\text{m}$,
- prostoliniowości z $2,1\text{--}9,29\ \mu\text{m}$ do $2,23\text{--}10,34\ \mu\text{m}$,
- walcowości z $5,9\text{--}9,95\ \mu\text{m}$ do $6,35\text{--}13,86\ \mu\text{m}$,

przy czym istotą prób było potwierdzenie możliwości uzyskania otwartych wyjść grafitu (rys. 5.10d), podobnie jak to uzyskali autorzy prac [48, 101]. Wyniki badań własnych zostały opublikowane w pracach [36, 37, 39].



Rys. 5.9. Profilogramy struktury geometrycznej powierzchni gładzi po procesie: a) gładzenia typu plateau gładkiego i następnie po procesie ablacji laserowej, b) $1 \times$ przejście lasera, c) $2 \times$ przejście lasera



Rys. 5.10. Obraz z mikroskopu skaningowego ukształtowania struktury warstwy powierzchniowej tulei cylindrycznych po procesie gładzenia typu plateau gładkiego oraz ablacji laserem z charakterystycznymi otwartymi wyjściami grafitu

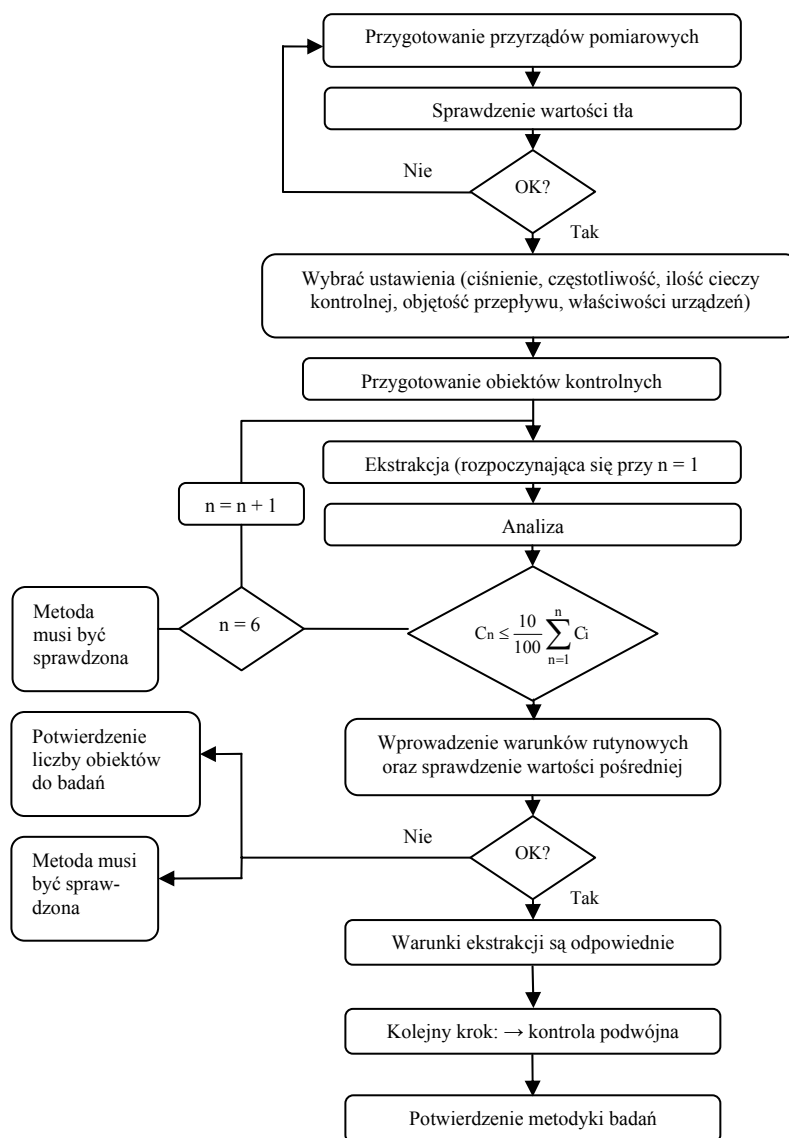
Pewną odmianą tej technologii było wykorzystanie wiązki lasera w ramach projektu AVL [22] do pokrycia powierzchni gładzi tulei stalowych warstwą FeCr. Warstwa składała się w 80% z żelaza i w 20% z ceramiki o twardości 400 HV. Następnie powierzchnię poddano procesowi obróbki gładzeniem typu plateau gładkiego, w wyniku którego uzyskano wartości parametrów chropowatości: $R_{pk} < 0,1 \mu\text{m}$, $R_k < 0,2\text{--}0,5 \mu\text{m}$, $R_{vk} = 1,0\text{--}2,0 \mu\text{m}$, $Mr1 < 7,0\%$, $Mr2 = 75\text{--}85\%$. W teście 3-cylindrowego silnika typu HSDI [29] powierzchnia tego typu uzyskała porównywalne wyniki w zużyciu oleju i zmniejszeniu współczynnika tarcia do wyników metody gładzenia spiralnego gładkiego.

Ponieważ badania czystości (tabl. 4.4) metodą ekstrakcji cieczą wymagają ustalenia warunków ekstrakcji, istotne okazały się badania wstępne, w których podano założenia dla tej metody badań. Procedura walidacyjna (rys. 5.11) została oparta na kryterium zanikania, określającym wartość pośrednią, która nie ma decydującego wpływu na wynik kontroli. Procedura objęła następujące kroki:

- przygotowanie stanowiska do badań (tabl. 4.4),
- pomiary tła – ilości zanieczyszczeń z otoczenia jako potwierdzenie, że warunki ekstrakcji są odpowiednie,
- warunki rutynowego próbkowania określające całkowitą ilość cieczy do spryskiwania,
- określenie wartości pośredniej,
- sprawdzenie warunków próbkowania – kontrola podwójna potwierdzająca skuteczność procedury uwalniania cząstek,

- warunki ekstrakcji są prawidłowe, gdy uzyskana wartość pośrednia jest zbliżona do wartości kryterium zanikania.

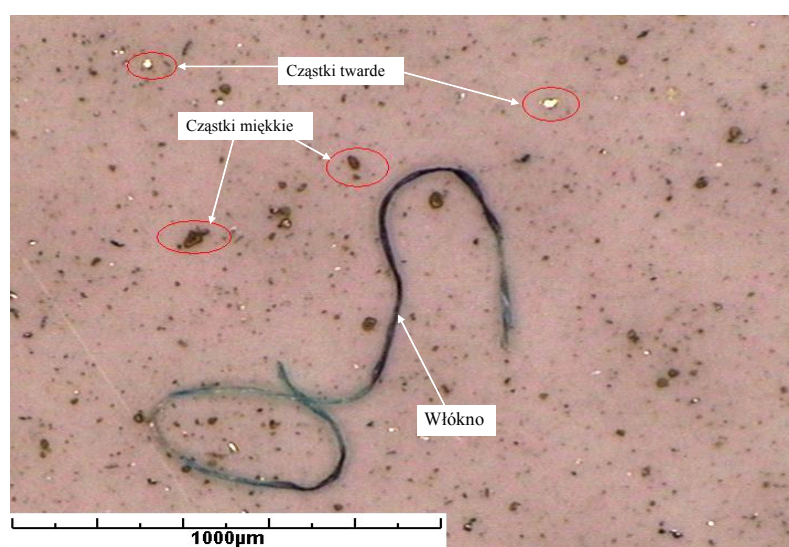
Wyniki analizy grawimetrycznej oraz analizy mikroskopowej z podziałem na wielkości i charakter cząstek (metaliczne i niemetaliczne) zestawiono w tablicy 5.8 i na rysunku 5.12.



Rys. 5.11. Diagram procedury walidacyjnej ustalającej warunki ekstrakcji przez pomiary zanikające [35]

Tablica 5.8. Wyniki badań wstępnych [35]

Zakres badań	Tłó urządzenia	Tuleje cylindrowe
Masa zanieczyszczeń [μm]	0,24–0,79	0,89–4,68
Wielkości maksymalne cząstek metalicznych [μm]	55–379	155–1036
Wielkości maksymalne cząstek niemetalicznych [μm]	91–392	134–1579
KOD	–	min 3/11/11 max 7/14/14

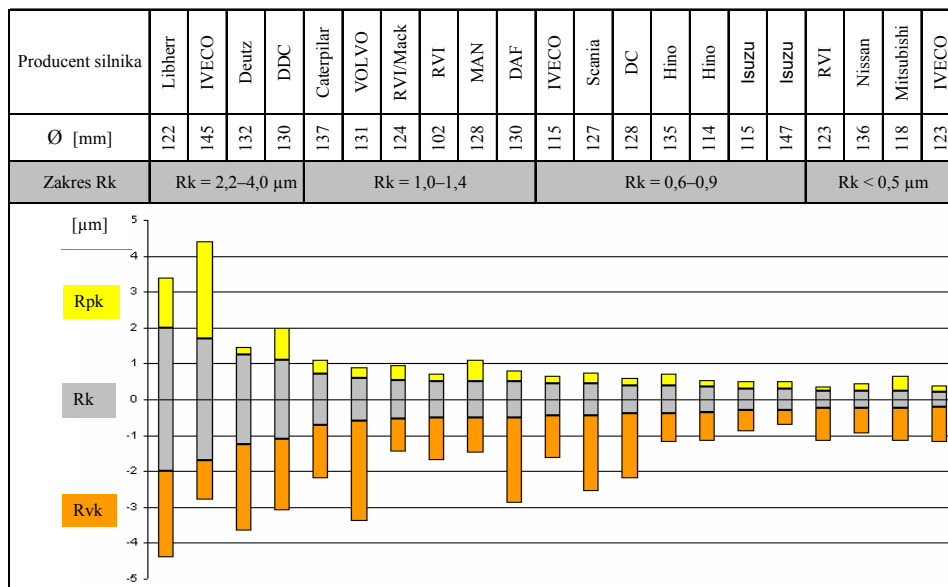


Rys. 5.12. Obraz z analizy powierzchni filtra analitycznego pokazujący cząstki miękkie i twarde oraz włókno (mikroskopia świetlna)

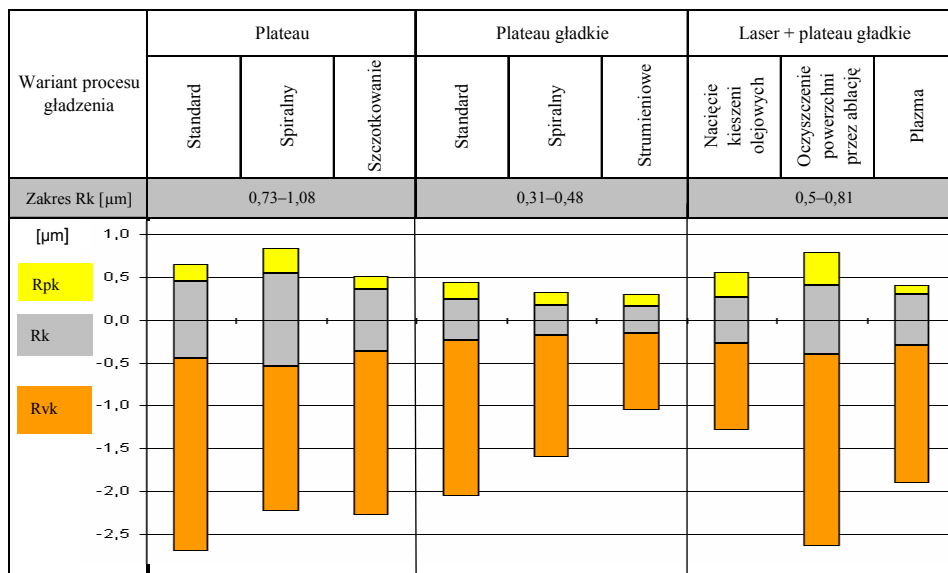
Wyniki analiz mikroskopowych wykazały, że główną część zabrudzeń stanowią włókna organiczne typu nitki, cząstki niemetaliczne, które pod mikroskopem wyglądają jak wełna drzewna. Bardzo mały jest udział cząstek metalicznych typu twardego, których źródłem może być na przykład żeliwo (materiał konstrukcyjny tulei cylindrowych, pierścieni tłokowych). Nie stwierdzono udziału cząstek bardzo twardego typu diament, korund, których źródłem pochodzenia mogą być na przykład pilniki/osełki ściernie z procesu gładzenia otworu tulei cylindrowych.

Ta część badań potwierdza prawidłowość założeń przyjętego modelu technologicznego w odniesieniu do gładzenia gładkiego, w którym to modelu przyjęto założenie parametrów R_{pk} i $R_k \rightarrow 0 \mu\text{m}$ (tabl. 5.9 i 5.10).

Tablica 5.9. Analiza zmian parametru Rk (max → min) w tulejach cylindrowych najczęściej stosowanych w świecie silników typu HDD



Tablica 5.10. Analiza zmian parametru Rk (max → min) w badanych wariantach procesu gładzenia typu plateau

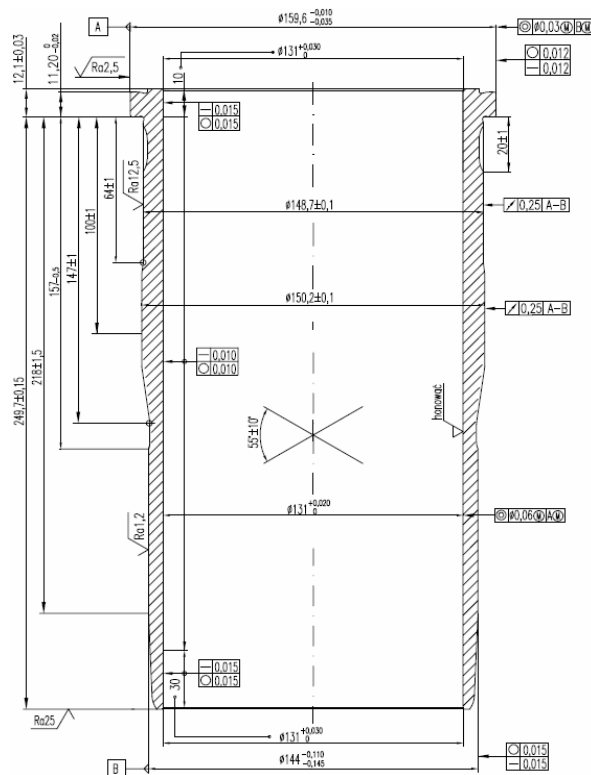


6. Badania technologiczne cech funkcjonalnych warstwy powierzchniowej tulei cylindrowych

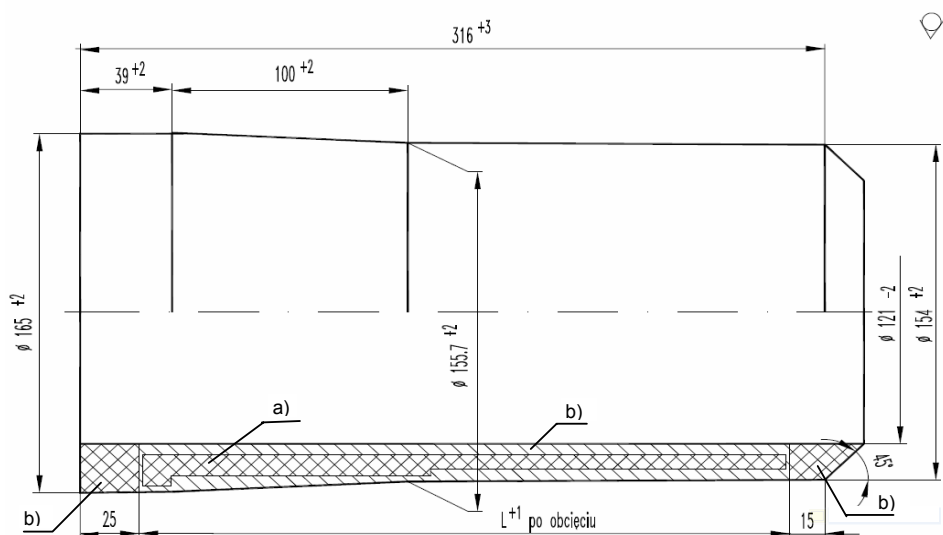
6.1. Analiza cech funkcjonalnych

Do przeprowadzenia badań technologicznych cech funkcjonalnych struktury warstwy powierzchniowej według przyjętego modelu technologicznego (rozd. 4.3) wybrano tuleję cylindrową o średnicy wewnętrznej otworu 131 mm (rys. 6.1), która jest reprezentatywna dla nowych konstrukcji silników typu HDEP. Podstawą dla tej tulei był odlew (rys. 6.2) z żeliwa:

- standardowego,
- z dodatkami stopowymi Mo i Cu,
- z dodatkami stopowymi Mo, Cu z udziałem N.



Rys. 6.1. Konstrukcja tulei cylindrowej typu mokrego z przeznaczeniem do silników VOLVO typu HDEP



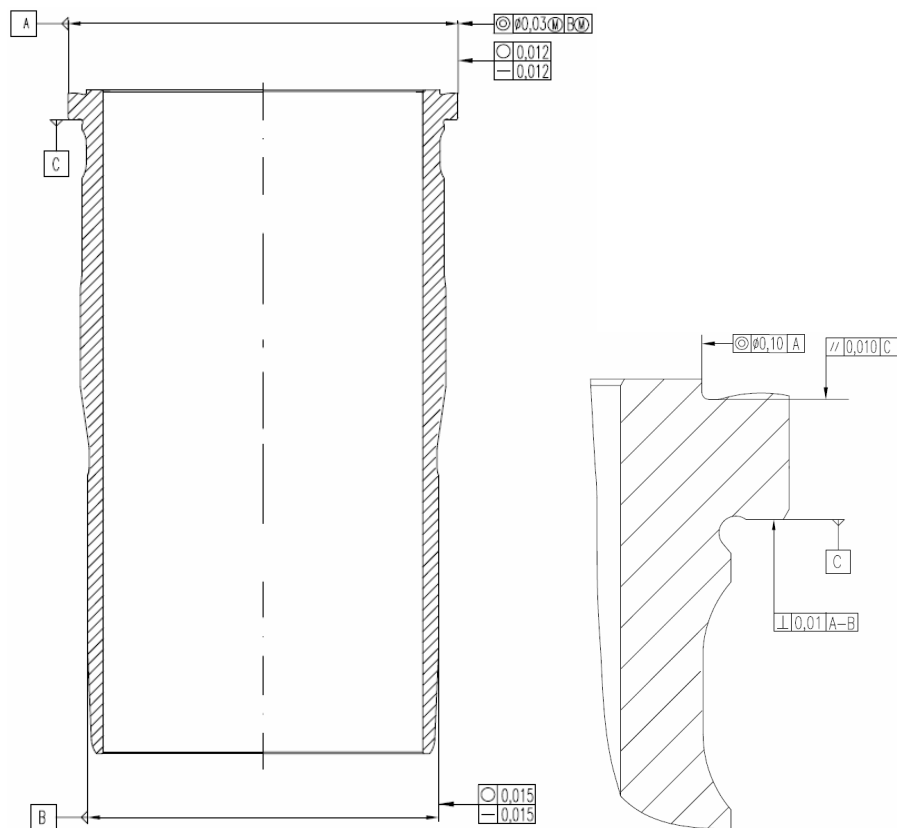
Rys. 6.2. Rysunek konstrukcyjny odlewu dla tulei cylindrowej o średnicy wewnętrznej 131 mm i długości $L = 262$ mm: a) rdzeń materiału, b) strefa nadatków technologicznych

Na rysunku 6.2 zaznaczono strefę rdzenia materiału (rys. 6.2a), która stanowi podstawę końcowej postaci geometrycznej tulei w procesie obróbki mechanicznej według rysunku 6.1, oraz jest strefą pożądaną dla cech funkcjonalnych struktury warstwy wierzchniej powierzchni gładzi.

Wokół rdzenia są rozmieszczone nadatki technologiczne (rys. 6.2b), które są charakterystyczne dla odlewania kokilowego i mają na celu wyeliminowanie lub znaczne ograniczenie porowatości oraz wtrąceń niemetalicznych w strefie rdzenia podczas wirowania ciekłego żeliwa i krzepnięcia odlewu.

Przyjęta do badań konstrukcja tulei zawiera następujące cechy:

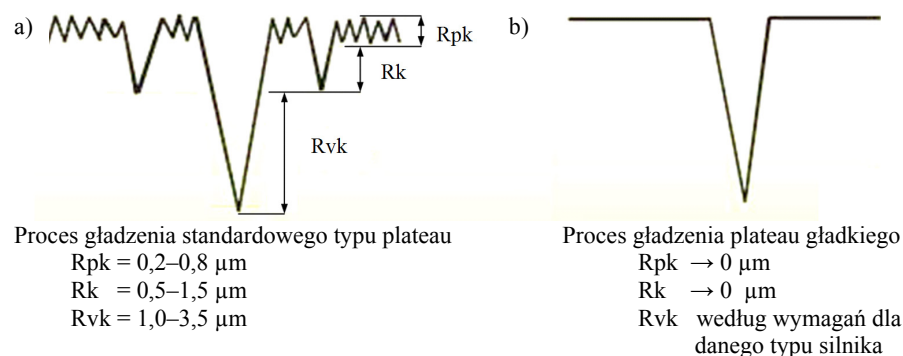
1. Tolerancja ogólna, która jest wyznaczona dla:
 - wymiarów, błędów kształtu i położenia,
 - chropowatości ogólnej powierzchni tulei poza średnicą wewnętrzną otworu,
 - promieni i faz.
2. Położenie elementów odniesienia i pasowania tulei w kadłubie silnika: elementami odniesienia są średnica zewnętrzna kołnierza oznaczona bazą **A** i średnica dolna osadzenia oznaczona bazą **B**. Występuje osiowe podparcie tulei na dolnej powierzchni kołnierza oznaczone jako baza **C** (rys. 6.3).
3. Powierzchnia płaszczka wodnego jest objęta tolerancją wymiarową średnic zewnętrznych oraz tolerancją bicia, która jest przypisana do wspólnej osi tulei w stosunku do baz A-B.



Rys. 6.3. Położenie elementów odniesienia i podparcia oraz pasowania tulei

4. Powierzchnia wewnętrzna otworu tulei stanowi powierzchnię funkcjonalną, której wymagania są zapisane w formie:
 - dopuszczalnych błędów kształtu otworu w zakresie prostoliniowości i kołowości oraz położenia osi tulei, która powinna zawierać wewnątrz pole tolerancji o średnicy 0,06 mm w kształcie walca, którego osią jest oś walca skojarzonego do powierzchni zaobserwowanej A,
 - kąta gładzenia w zakresie $\alpha = 55^\circ \pm 10^\circ$,
 - symbolu powierzchni obrabianej przez gładzenie (honowanie), który nie określa żadnego wymagania dotyczące chropowatości powierzchni. Z reguły w tym miejscu występuje odnośnik do szczegółowych zapisów dodatkowych warunków technicznych. Na potrzeby pracy przyjęto model technologiczny procesu gładzenia standardowego typu plateau, dotychczas stosowany w produkcji tulei VOLVO (rys. 6.4a) oraz model gładzenia gładkiego, którego zakres parametrów chropowatości wynika z typu danej konstrukcji silnika HDEP (rys. 6.4a, b) i związanych z tym wymagań Euro,

- wymagań czystości, podobnie jak wymagań parametrów chropowatości struktury geometrycznej warstwy wierzchniej. Przyjęto, według warunków VOLVO (tabl. 2.6), maksymalną masę zanieczyszczeń 10 mg/1000 cm² oraz maksymalną liczbę cząstek 750/mm².



Rys. 6.4. Model technologiczny procesu gładzenia: a) gładzenie standardowe typu plateau, b) gładzenie typu plateau gładkiego

6.2. Badania technologiczne cech funkcjonalnych

6.2.1. Charakterystyka procesu odlewania

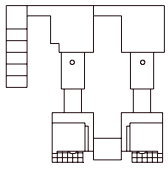
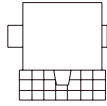
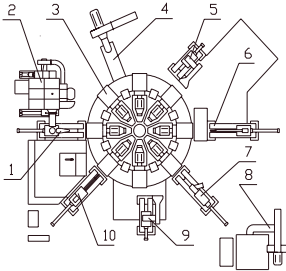
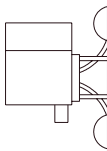
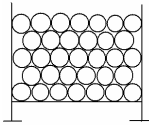
Schemat przebiegu i opis poszczególnych operacji w procesie odlewania żeliwnych tulei cylindrowych wraz z zaznaczeniem operacji, w których kształtowane są cechy funkcjonalne przedstawiono w tablicy 6.1.

Proces ten składa się z dwóch etapów:

Etap I to operacja 001 wytwarzania żeliwa, która składa się z czynności: przygotowania struktury wsadu, topienia wsadu w piecu indukcyjnym i badania składu chemicznego. Ostatnia czynność to spust metalu do kadzi rozlewającej i transport płynnego metalu do magazynu przetrzymującego (operacja 002) lub bezpośrednio do pieca dozująco-przetrzymującego metal przy urządzeniu kształtującym odlew (operacja 003).

Wsad metalowy składa się z surówki LH (10–20%), złomu stalowego (8–40%), złomu żeliwnego między innymi w postaci wiórów (30–80%) oraz dodatków typu: żelazokrzem, żelazomangan, żelazofosfor, żelazochrom i nawęglacz (3–8%). Obowiązuje zasada maksymalnego zbliżenia wartości składu chemicznego materiałów wsadowych (C, Si, P, Mo, Cu...) do założonego składu chemicznego żeliwa. W tej fazie procesu kształtowany jest podstawowy skład chemiczny żeliwa, który każdorazowo przed spustem jest kontrolowany, z możliwością jego korekty, z zachowaniem stałej temperatury przegrzania ($1500 \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$).

Tablica 6.1. Schemat przebiegu procesu odlewania żeliwnych tulei cylindrycznych

Numer operacji	Stanowisko – opis operacji	Schemat stanowiska	Miejsce kształtowania cech funkcjonalnych
001	WYTWARZANIE ŻELIWA – przygotowanie struktury wsadu – topienie i badanie składu chemicznego – spust	Piec tyglowy średniej częstotliwości 	Skład chemiczny żeliwa
002	MAGAZYN METALU Zabezpieczenia ciągłości procesu topienia i kształtowania odlewu	Piec kanałowy sieciowej częstotliwości 	–
003	KSZTAŁTOWANIE ODLEWU 1. Zalewanie kokili 2. Piec dozująco-przetrzymujący 3. Chłodzenie odlewu 4. Odciąg pary 5. Otwieranie kokili 6. Wyciąganie odlewu 7. Czyszczenie kokili 8. Odciąg pyłów 9. Zamykanie kokili 10. Nanoszenie płynnego pokrycia	Odśrodkowe urządzenie odlewnicze 	Skład chemiczny żeliwa – twardość – wytrzymałość – struktura
004	CZYSZCZENIE ODLEWÓW Oczyszczenie powierzchni zewnętrznej odlewów z pozostałości pokrycia	Oczyszczarka 	–
005	MAGAZYN ODLEWÓW Stabilizacja odlewów na wolnym powietrzu przed procesem obróbki mechanicznej	Pojemnik odlewów 	–

Etap II to operacja 003 kształtowania odlewu przez odśrodkowe odlewanie żeliwa metodą wirującej formy. Wytwarzanie odlewów odbywa się na agregacie karuzelowym (rys. 4.2, tabl. 6.1), przy którym jest umieszczony piec dozująco-przetrzymujący, który zabezpiecza stałą temperaturę zalewania w czasie całego cyklu poboru żeliwa z dozatora (1400 ± 30 °C). Modyfikację żeliwa przeprowadza się w tyglu przed zalaniem kokili przy użyciu modyfikatora na bazie krzemu. Przez dobór i zachowanie stałych parametrów w zakresie:

- temperatury kokil (300 ± 20 °C) przed zalaniem,
- ilości pokrycia izolacyjnego,
- ilości wlewanego metalu do kokili,
- prędkości obrotowych kokili,
- czasu przebywania odlewu w kokili

zagwarantowana jest przemiana eutektyczna, która zapewnia uzyskanie określonej mikrostruktury (grafitu i eutektyki) oraz właściwości mechanicznych odlewu (wytrzymałości i twardości).

Wynikiem tej operacji jest końcowa postać geometryczna odlewu (rys. 6.1). Jego wymiary, związki pomiędzy nimi wraz z ciężarem odlewu oraz zapewnienie cech funkcjonalnych dla przyjętej do badań tulei pokazano na rysunku 6.2.

Po formowaniu odlewu pobierana była próbka kontrolna odlewu do badań na pozostałe cechy funkcjonalne typu twardość, wytrzymałość i mikrostruktura zgodnie z przyjętą metodyką badań (rozdz. 4.2, tabl. 4.1).

W końcowych operacjach (operacja 04) odlewy są poddawane czyszczeniu z podsypki metodą śrutowania i następnie kierowane są na okres 2 tygodni do otwartego magazynu odlewów (operacja 05) w celu stabilizacji przed obróbką mechaniczną.

6.2.2. Badania zdolności technologicznej procesu odlewania

Celem przeprowadzonych badań była analiza technologiczna procesu kształtowania odlewów tulei cylindrowych o zwiększonej wytrzymałości ($R_m > 300$ MPa), opierając się na materiale standardowym, na podstawie dotychczasowej technologii topienia oraz kształtowania odlewów (rozdz. 6.2.1).

Przedmiotem badań były następujące rodzaje żeliw:

- bazowe standardowe dotychczas stosowane na odlewy tulei z przeznaczeniem do silników typu HDD o wytrzymałości $R_m > 250$ MPa,
- z zawartością pierwiastków stopowych Mo = 0,02–0,48% i Cu = 0,03–0,84%, o wytrzymałości $R_m > 300$ MPa,
- z zawartością pierwiastków stopowych z udziałem azotu (N = 0,019%) o wytrzymałości $R_m > 300$ MPa

wytapiane każdorazowo w piecu tyglowym średniej częstotliwości (wsad 6 ton).

Badano składy chemiczne, twardość, wytrzymałość oraz mikrostrukturę według metodyki badań opisanej w rozdz. 4.2 tej pracy (tabl. 4.1 i 4.2). Badaniami objęto 150 wytopów, po 50 wytopów z każdego rodzaju badanego żeliwa.

Uzyskane wyniki badań składów chemicznych (tabl. 6.2) i właściwości mechanicznych (tabl. 6.3) poddano analizie statystycznej w zakresie wartości oczekiwanej (\bar{x}) oraz odchylenia standardowego (σ). Badania wskaźników zdolności technologicznej (C_p) oraz wskaźnika położenia wartości średniej w badaniach zdolności technologicznej (C_{pk}) dla parametru doraźnej granicy wytrzymałości na rozciąganie R_m (tabl. 6.3) oparto na oprogramowaniu qs-STAT firmy Q-DAS GmbH [18]. Wyniki analizy mikroskopowej dotyczące obrazów mikrostruktury badanych żeliw zestawiono w tablicy 6.4. Szczegółową analizę otrzymanych rezultatów badań zamieszczono w rozdziale 7 tej pracy.





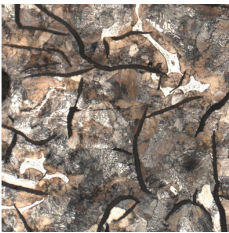
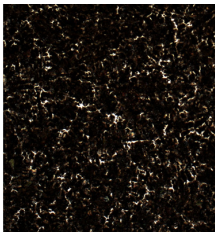

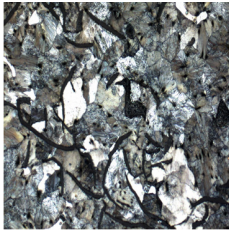
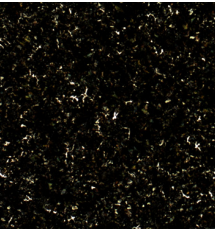
Tablica 6.2. Skład chemiczny badanych żeliw

Rodzaj żeliwa	Standardowe			Z dodatkiem						
				Mo i Cu			N			
Zakres	min – max	\bar{x}	σ	min – max	\bar{x}	σ	min – max	\bar{x}	σ	
Skład chemiczny [%]	C	3,20 – 3,50	3,30	0,05	2,81 – 3,09	2,94	0,04	2,82 – 3,02	2,92	0,03
	Si	2,16 – 2,58	2,33	0,13	1,80 – 2,00	1,90	0,03	1,80 – 2,19	2,04	0,05
	Mn	0,64 – 0,80	0,74	0,03	0,54 – 0,67	0,59	0,02	0,60 – 0,70	0,64	0,02
	P	0,55 – 0,67	0,58	0,02	0,29 – 0,39	0,30	0,03	0,21 – 0,34	0,27	0,02
	S	0,04 – 0,10	0,06	0,01	0,02 – 0,07	0,04	0,01	0,004 – 0,024	0,01	0,004
	Cr	0,45 – 0,57	0,50	0,02	0,26 – 0,39	0,31	0,02	0,42 – 0,52	0,49	0,01
	Mo	0,05 – 0,28	0,17	0,04	0,25 – 0,42	0,30	0,02	0,001 – 0,14	0,05	0,04
	Ni	0,04 – 0,83	0,12	0,06	0,05 – 0,24	0,09	0,02	0,02 – 0,08	0,04	0,01
	Cu				0,68 – 0,80	0,75	0,02	0,78 – 0,89	0,84	0,02
	V							0,01 – 0,02	0,01	0,002
	Ti							0,01 – 0,02	0,01	0,002
	N							0,01 – 0,02	0,01	0,002

Tablica 6.3. Właściwości mechaniczne badanych żeliw

Rodzaj żeliwa		Standardowe	Z modyfikacją	
Zakres			Mo i Cu	N i O
Twardość [HBW 5/750]	min	230	240	251
	max	270	288	309
	\bar{x}	244	253	269
	σ	8,73	5,33	10,17
Doraźna wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]	min	250	320	327
	max	270	370	386
	\bar{x}	255	331	354
	σ	3,96	7,2	18,34

Tablica 6.4. Mikrostruktura badanych żeliw

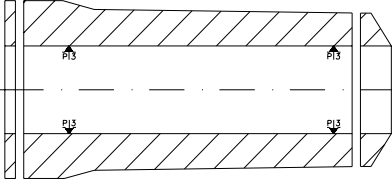
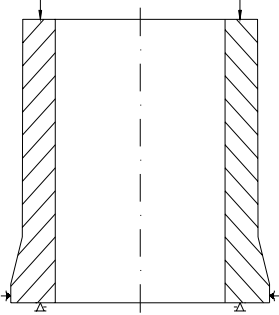
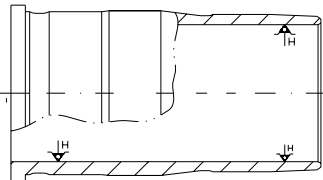
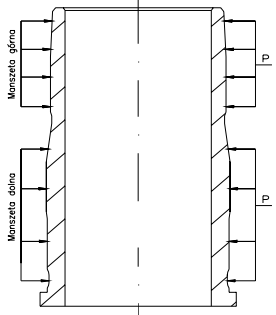
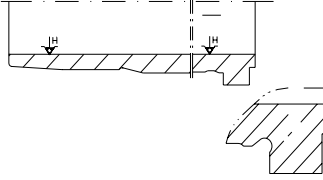
	Grafit	Osnowa	Eutektyka
Żeliwo standardowe			
	I A 95% B 5% wielkość 4/6	Perlityczna, ferryt 1 %	Równomiernie rozmieszczona
Żeliwo stopowe			
	I A 96% D i E 4% wielkość 4/7	Perlityczna, ferryt 0,5%	Równomiernie rozmieszczona
Żeliwo azotowe			
	I A 100% 4/6	Perlityczna	Równomiernie rozmieszczona
	← 500 μm →	← 100 μm →	← 1000 μm →

6.2.3. Charakterystyka procesu obróbki mechanicznej

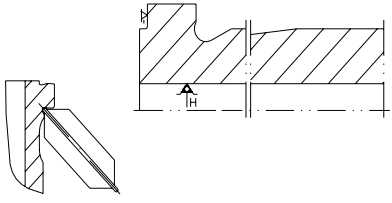
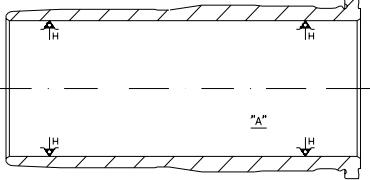
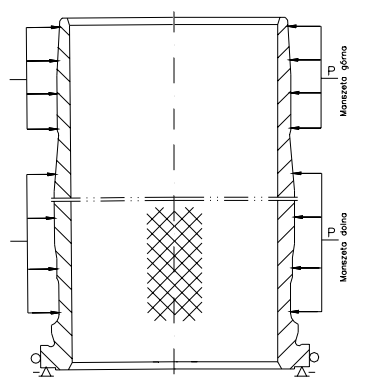
Schemat procesu obróbki mechanicznej dla przyjętej do badań tulei cylindrowej (rys. 6.2) przedstawiono w tablicy 6.5 wraz z znaczeniem operacji gładzenia, w której kształtowane były cechy funkcjonalne struktury geometrycznej warstwy wierzchniej.

Uzyskanie określonej struktury geometrycznej powierzchni gładzi otworu tulei wymaga nadania powierzchni w pierwszej kolejności kształtu, a następnie kierunkowości i chropowatości struktury.

Tablica 6.5. Uproszczony schemat obróbki mechanicznej tulei

Numer operacji	Stanowisko – opis operacji	Schemat operacji	Miejsce i zakres badań cech funkcjonalnych
010	Tokarka TZC-32N Obcinanie końcówek		—
020	Wytaczarka BKFx Wytaczanie wstępne		—
030	Tokarka HEID S-300 Toczenie kształtowe		—
040	Gładzarka Nagel 2VS10-80T Gładzenie wstępne		—
050	Tokarka TUR-50SN Toczenie kołnierza		—

Tablica 6.5 cd. Uproszczony schemat obróbki mechanicznej tulei

Numer operacji	Stanowisko – opis operacji	Schemat operacji	Miejsce i zakres badań cech funkcjonalnych
060	Tokarka TUR-50S Rolowanie gładkościowe		—
070	Tokarka HEID S-200 Toczenie na gotowo		—
080	Gładzarka Nagel 3VSM10-80T Gładzenie kształtowe		Błędy kształtu Ukształtowanie powierzchni Parametry chropowatości
090	Mycie i znakowanie	—	—
100	Kontrola końcowa i pakowanie	—	—

W pierwszej fazie gładzenia (tabl. 6.5 operacja 080) wrzeciono I gładzarki uzbrojone w głowicę z aktywnym pomiarem i pilniki diamentowe kształtują formę otworu tulei, opisaną tolerancją kształtu (okrągłość i prostoliniowość). W tej fazie gładzenia następuje też końcowe usuwanie zgniotów i umocnień oraz naprężeń powierzchniowych wprowadzonych wcześniejszą obróbką konwencjonalną.

W drugiej fazie procesu gładzenia wrzeciono II gładzarki (głowica z aktywnym pomiarem uzbrojona w pilniki diamentowe) kształtuje strukturę podstawową powierzchni gładzi w formie wierzchołków i wgłębień (rys. 4.6).

W trzeciej fazie gładzenia (wrzeczono III) głowica również z aktywnym pomiarem i uzbrojona w pilniki diamentowe lub osełki ceramiczne kształtuje powierzchnię nośną pomiędzy wgłębieniami (rys. 4.8).

W zależności od wymagań postawionych strukturze geometrycznej, zarówno w zakresie kształtu, jak i ukształtowania warstwy wierzchniej, następuje dobór:

- nastaw na maszynie do gładzenia głównie ze względu na wydajność gładzenia i przestrzegania zasady mikroskrawania narzędzi (pilniki/osełki – dobór rodzaju, długości i szerokości, wielkości i koncentracji ziarna), tak aby ślady poszczególnych przejść ziaren krzyżowały się wzajemnie pod określonym kątem α (rys. 4.6),
- charakterystyki chłodziwa (skład, lepkość, zdolność zwilżania, czystość) oraz stanu wyjściowego struktury (geometryczny i fizyczny) powierzchni warstwy wierzchniej przed gładzeniem [13].

Po procesie gładzenia tuleje są poddawane kontroli końcowej, sprawdzaniu na pęknięcia, znakowaniu oraz myciu w myjkach ultradźwiękowych, aby spełnić wymagania dotyczące czystości powierzchni.

6.2.4. Badania zdolności technologicznej procesu gładzenia

Przeprowadzone badania miały na celu analizę technologiczną procesu gładzenia metodą gładzenia standardowego i gładzenia gładkiego, według przyjętego modelu przedstawionego na rysunku 6.4. Przedmiotem badań była partia 2000 sztuk tulei cylindrowych wykonanych z żeliwa z dodatkami Mo i Cu o wytrzymałości $R_m > 330$ MPa, które poddano obróbce mechanicznej, według przebiegu przedstawionego w tabelicy 6.5.

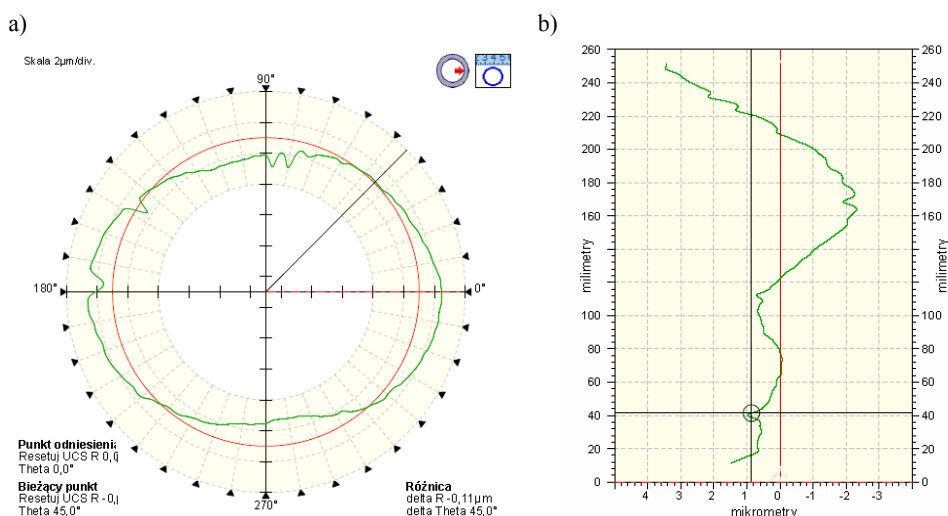
Przeprowadzono badania:

- tolerancji kształtu w zakresie prostoliniowości i okrągłości,
- parametrów chropowatości krzywej udziału materiałowego wraz z analizą zdolności procesowej parametru R_k ,
- ukształtowania rys i odkształceń powierzchni,
- czystości powierzchni.

Tablica 6.6. Wyniki badań tolerancji kształtu

Wyniki analizy	Błędy kształtu [mm]	
	okrągłość	prostoliniowość
x_{\min}	0,002	0,004
x_{\max}	0,009	0,007
\bar{x}	0,004	0,005
σ	0,001	0,001

Całość badań przeprowadzono według metodyki określonej w rozdz. 4.3. Uzyskane wyniki opracowano statystycznie w odniesieniu do wartości oczekiwanej (\bar{x}) oraz odchylenia standardowego (σ) i zestawiono tabelarycznie. W zakresie tolerancji kształtu wyniki podano w tablicy 6.6 oraz zilustrowano graficznie dla wartości średnich okrągłości na rys. 6.5a i prostoliniowości na rys. 6.5b.



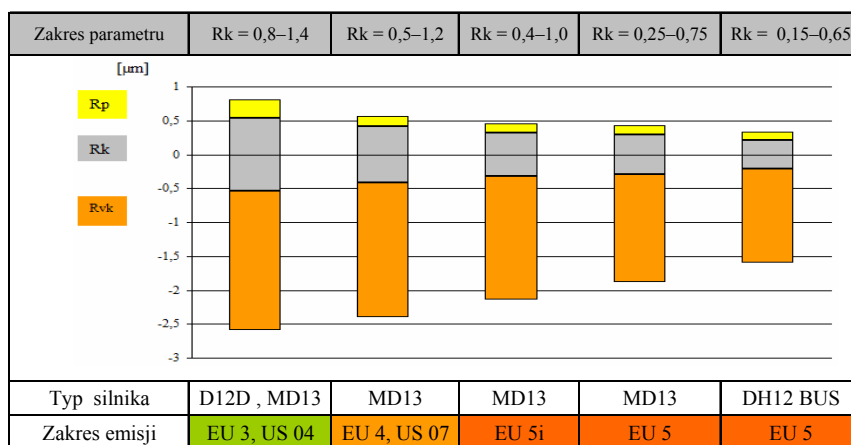
Rys. 6.5. Przykład wyników pomiarów tulei cylindrowej dla wartości średnich w zakresie parametru : a) okrągłości 3,26 μ m, b) prostoliniowości 5,78 μ m

Wyniki badań parametrów chropowatości powierzchni zestawiono w tablicy 6.7 wraz z analizą zdolności procesowej (C_p/C_{pk}) poszczególnych zakresów parametru R_k w zależności od przeznaczenia tulei dla danych typów silników HDEP VOLVO – rys. 6.6. Badania wskaźników zdolności technologicznej (C_p) oraz wskaźnika położenia wartości średniej w badaniach zdolności technologicznej (C_{pk}) dla parametru chropowatości R_k oparto na oprogramowaniu qs-STAT firmy Q-DAS GmbH [18]. Przykłady z badań ukształtowania struktury rys wierzchołków, wgłębień oraz powierzchni pomiędzy rysami zestawiono w formie profilogramów powierzchni (rys. 6.7) oraz obrazów z mikroskopii skaningowej (rys. 6.8 i 6.9).

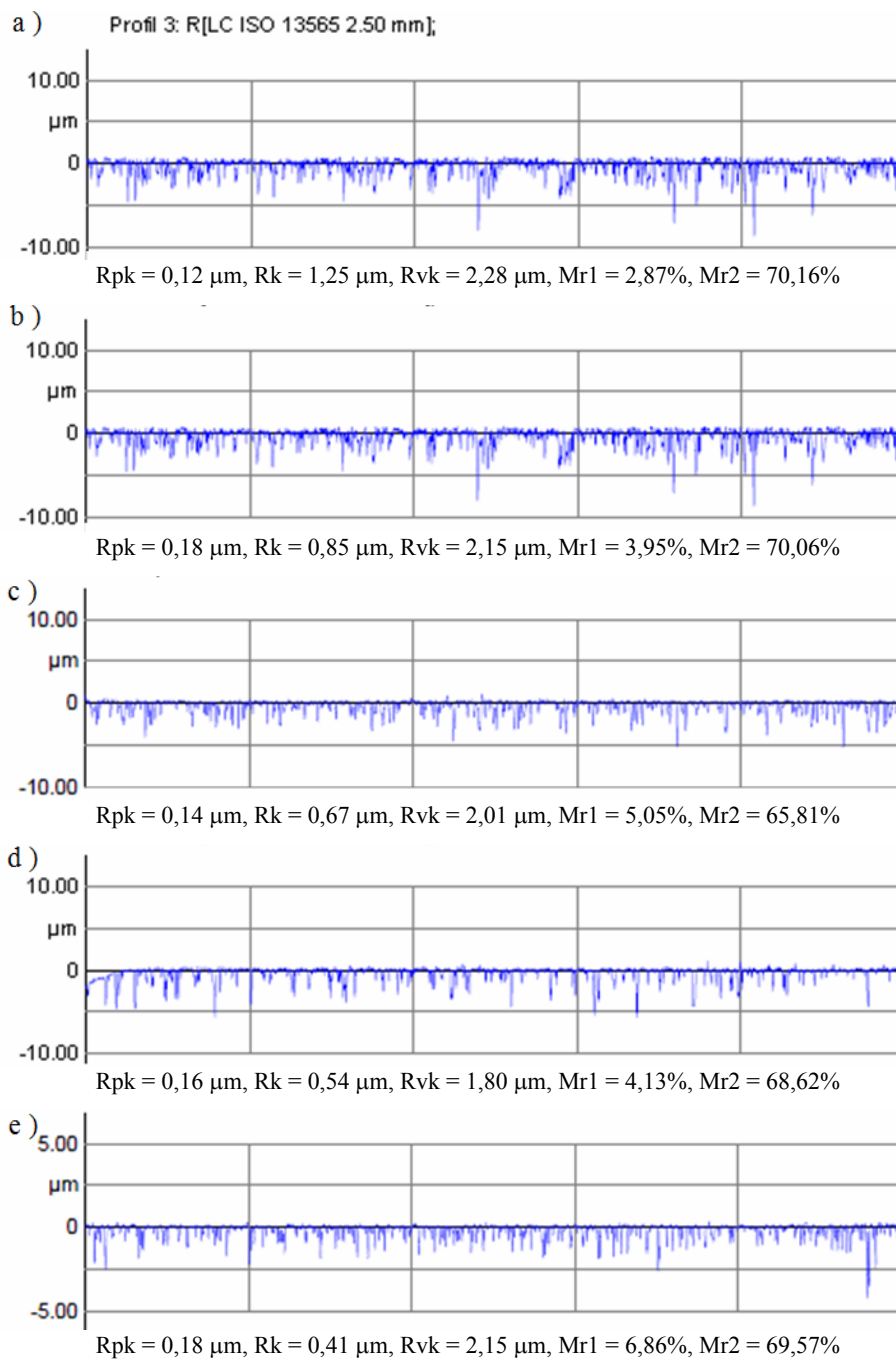
Wyniki badań obrazów ukształtowania struktury rys wierzchołków, wgłębień oraz powierzchni pomiędzy rysami metodą mikroskopii skaningowej posłużyły do weryfikacji katalogu VOLVO w zakresie ustalenia poziomów odkształceń powierzchni w wyniku procesu gładzenia. Następnie ustalono poziomy kwalifikacji obrazów powierzchni dopuszczalnych oraz obrazów powierzchni na poziomie nieakceptowalnym (rys. 6.10).

Tablica 6.7. Wyniki pomiarów chropowości wraz z analizą zdolności procesowej

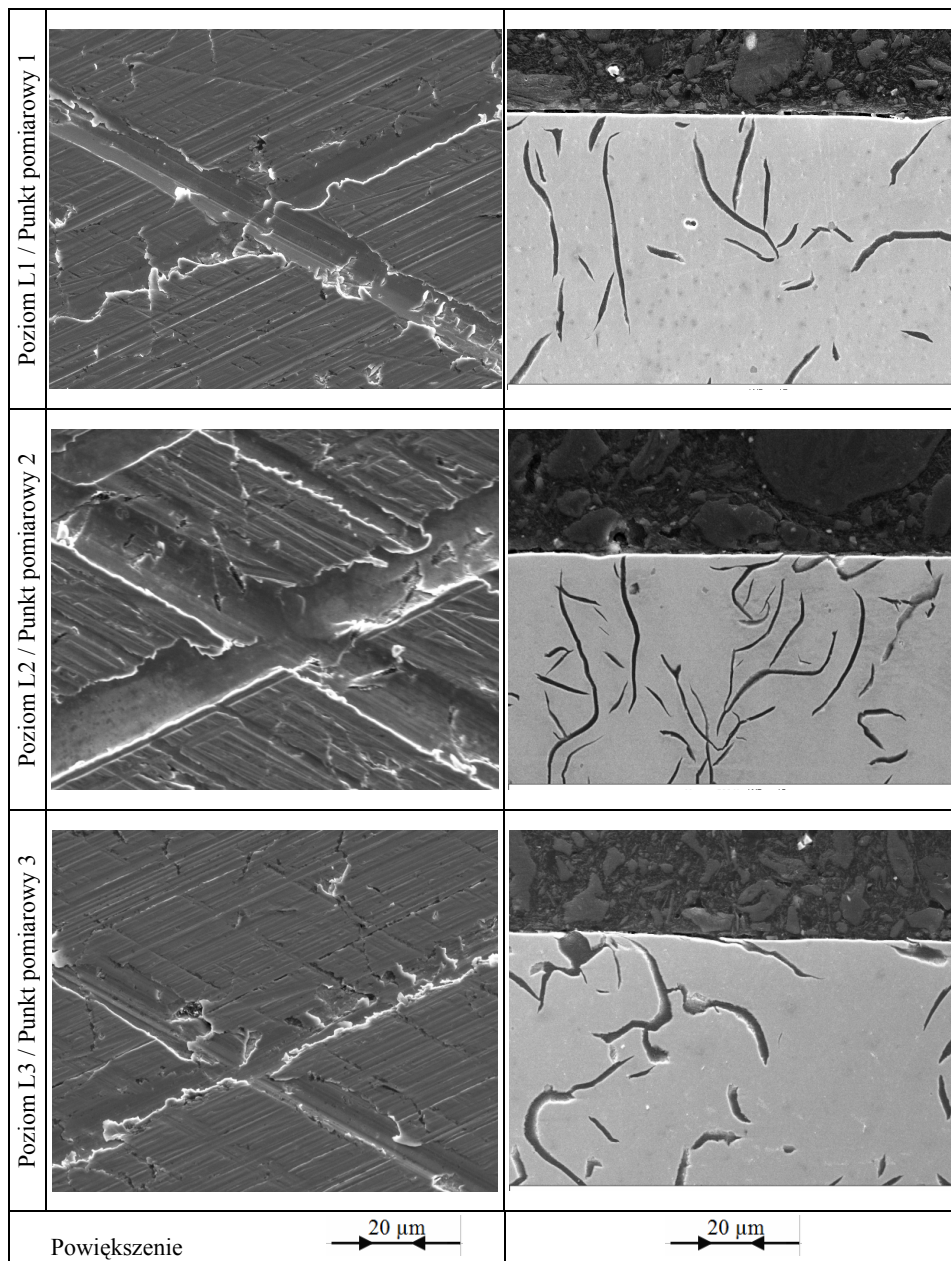
Zakres parametrów procesu [μm , %]		x_{\min}	x_{\max}	\bar{x}	σ	Cp	Cpk		
Proces gładzenia plateau	Standardowego	Rk = 0,8–1,4	Rpk	0,12	0,39	0,27	0,04		
			Rk	0,92	1,29	1,08	0,07	1,5	1,33
			Rvk	1,7	2,57	2,05	0,22		
			Mr1	5,9	9,6	5,01	1,49		
			Mr2	66,5	75,6	64,52	1,64		
	Gładkiego	Rk = 0,5–1,2	Rpk	0,07	0,26	0,14	0,05		
			Rk	0,66	1,1	0,84	0,08	1,28	1,04
			Rvk	1,65	2,22	1,98	0,09		
			Mr1	3,4	8,4	5,2	1,04		
			Mr2	65,8	75,7	70,24	2,06		
		Rk = 0,4–1,0	Rpk	0,08	0,27	0,13	0,04		
			Rk	0,58	0,8	0,65	0,04	1,42	1,21
			Rvk	1,6	2,18	1,82	0,12		
			Mr1	5,1	10	6,67	0,99		
			Mr2	68,2	80,3	76,29	2,03		
		Rk = 0,25–0,75	Rpk	0,06	0,27	0,13	0,04		
			Rk	0,54	0,74	0,59	0,04	1,39	1,09
			Rvk	1,6	2,23	1,59	0,12		
			Mr1	3,8	8,5	5,02	1,03		
			Mr2	68,5	77,5	70,42	2,01		
Rk = 0,15–0,65		Rpk	0,05	0,23	0,13	0,04			
		Rk	0,25	0,56	0,41	0,07	1,31	1,12	
		Rvk	1,69	2,64	1,4	0,19			
		Mr1	3,9	9,9	6,02	1,06			
		Mr2	67,9	78,5	73,33	2,3			



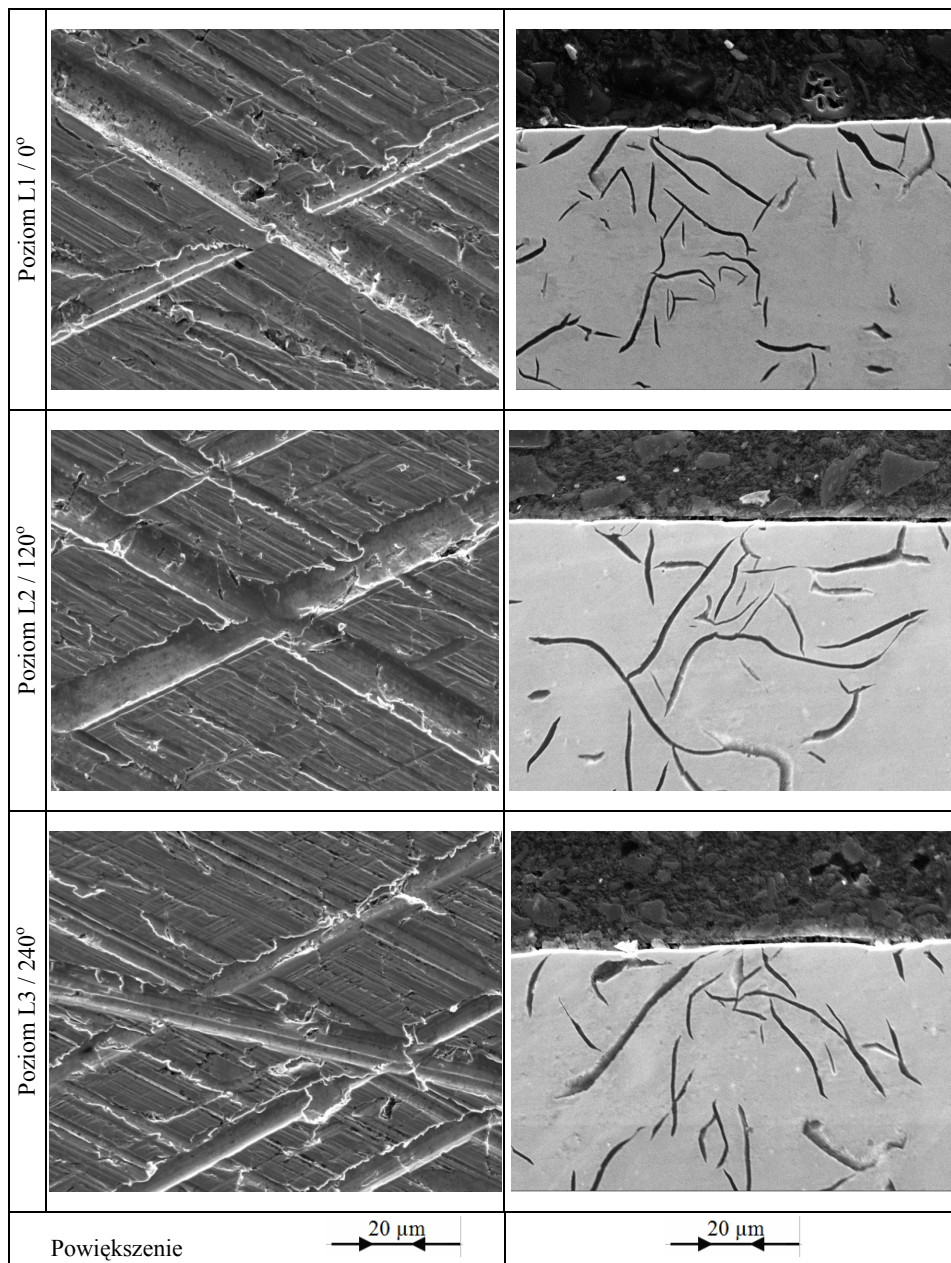
Rys. 6.6. Wyniki badań parametrów chropowości powierzchni w zależności od przeznaczenia tulei do danego typu silnika HDEP VOLVO



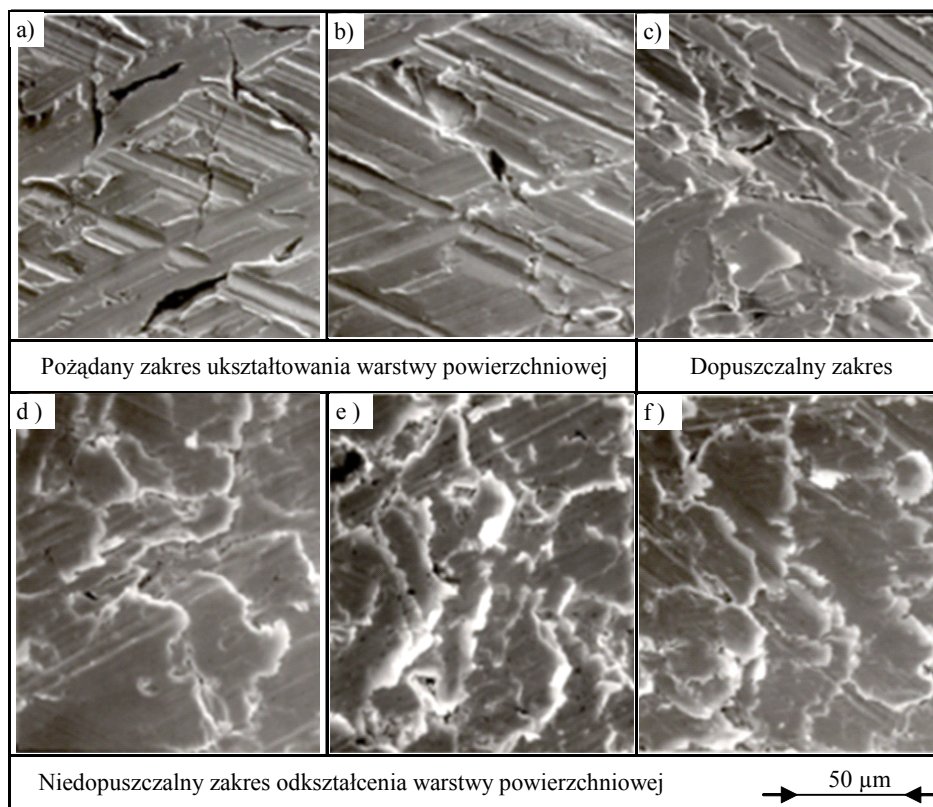
Rys. 6.7. Przykłady profilogramów powierzchni po procesie gładzenia plateau metodą gładzenia standardowego (a) oraz metodą gładzenia gładkiego (b–e) w zależności od zakresu parametru Rk



Rys. 6.8. Obraz struktury warstwy powierzchniowej po procesie gładzenia standardowego (mikroskopia skaningowa)



Rys. 6.9. Obraz struktury warstwy powierzchniowej po procesie gładzenia gładkiego (mikroskopia skaningowa)

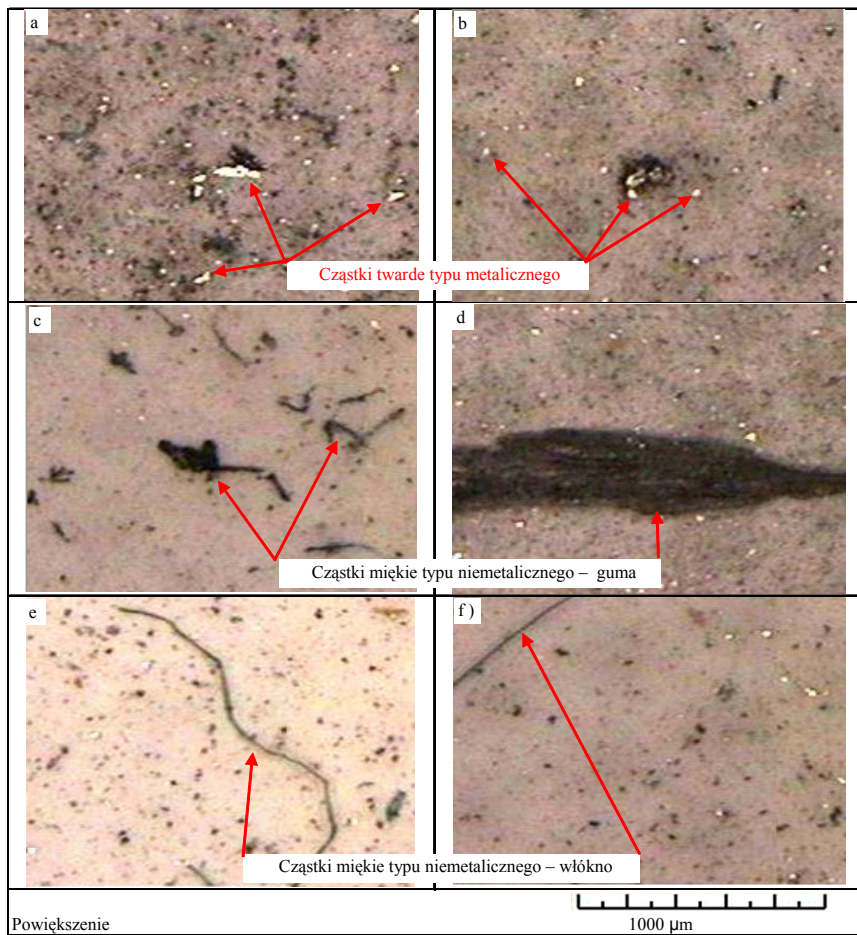


Rys. 6.10. Kwalifikacja obrazów SEM dla powierzchni po gładzeniu według wymagań VOLVO: a, b, c) pożądany zakres, d, e, f) niedopuszczalny zakres odkształceń warstwy powierzchniowej [15]

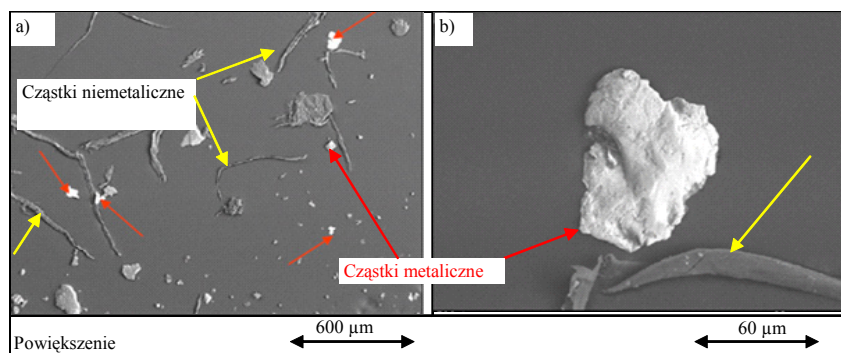
Wyniki badań czystości powierzchni zestawiono w tablicy 6.8 oraz przedstawiono w formie zdjęć mikroskopowych na rysunkach 6.11 i 6.12, które ilustrują przykłady stwierdzonych zanieczyszczeń powierzchni typu metalicznego, niemetalicznego oraz typu włókna.

Tablica 6.8. Wyniki badań czystości powierzchni w zakresie masy zanieczyszczeń oraz liczby i rozmiaru cząstek

Zakres	Masa zanieczyszczeń [mg/1000 cm ²]	Liczba cząstek [cząstka/mm ²]
x_{\min}	0,700	185
x_{\max}	7,400	747
\bar{x}	2,756	440
σ	1,218	119,322
Największa metalowa cząstka – długość/szerokość [µm]		306/38
Największa niemetalowa cząstka – długość/szerokość [µm]		616/185
Długość największego włókna [µm]		3195



Rys. 6.11. Obraz mikroskopowy zanieczyszczeń typu: metalicznego (1 i 2), niemetalicznego (3 i 4) oraz typu włókno (5 i 6)

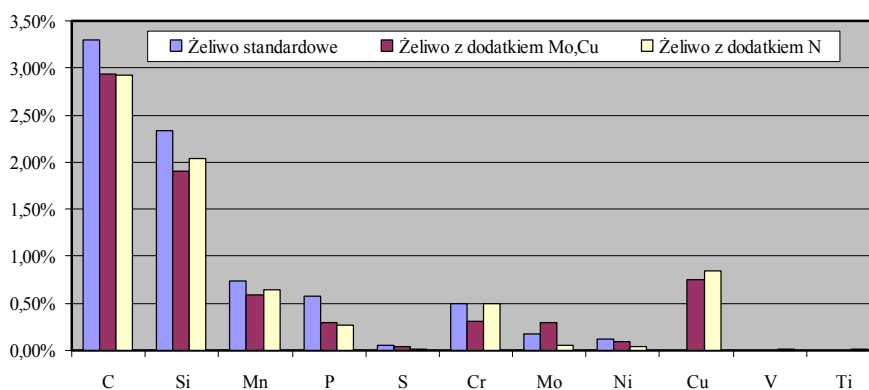


Rys. 6.12. Obraz mikroskopowy SEM: a) cząstek miękkich niemetalicznych oraz cząstek twardych metalicznych, b) cząstka metaliczna, żeliwo szare [180]

7. Analiza wyników badań oraz określenie kierunków rozwoju technologicznego tulei cylindrowych

7.1. Właściwości żeliw

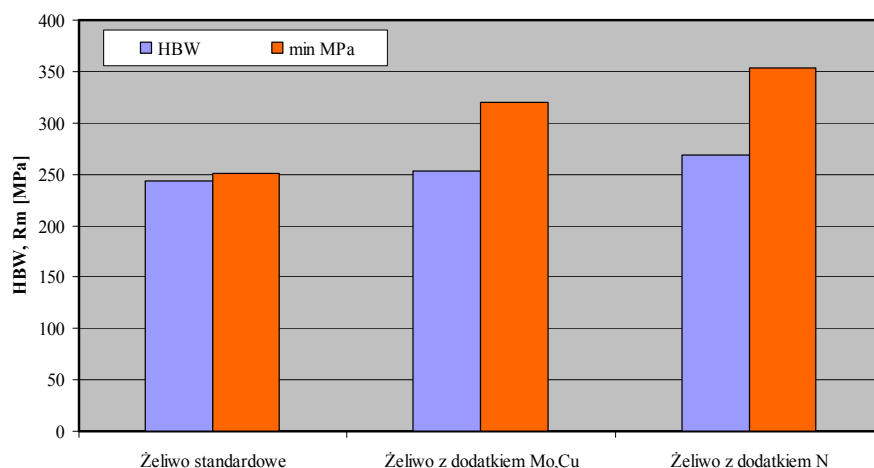
Z przedstawionych wyników badań w rozdz. 6 wynika, że przyjęte do badań żeliwo bazowe (tabl. 6.2 i rys. 7.1) ma typowy, standardowy skład chemiczny żeliwa niskostopowego stosowanego w odlewaniu tulei cylindrowych: C = 3,2–3,5%, Si = 2,16–2,58%, Mn = 0,64–0,80%, P = 0,55–0,67%, S = 0,04–0,10%, Cr = 0,45–0,57%, Mo = 0,05–0,28%, Ni = 0,04–0,83%. Mikrostrukturę tego typu żeliwa tworzą wydzielenia grafitu płatkowego (IA 95%, B 5% wielkości 4/6) na tle osnowy perlitycznej z niewielką ilością ferrytu 1% i eutektyką równomiernie rozłożoną (tabl. 6.4). Podstawowe właściwości mechaniczne żeliwa ukształtowały się dla wytrzymałości minimalnej na poziomie $R_m = 250$ MPa i twardości średniej 244 HBW (rys. 7.2). Podczas procesu technologicznego żeliwo cechowało się dobrymi właściwościami odlewniczymi, zdolnością do wypełnienia formy, miało dobrą obrabialność oraz, co jest istotne dla obniżenia kosztów, dawało możliwość wykorzystania zamkniętego obiegu materiałów z procesu obróbki mechanicznej.



Rys. 7.1. Udział poszczególnych pierwiastków w badanych żeliwach

Drugi typ żeliwa, który poddano badaniom z dodatkami Mo i Cu cechował się tym, że przy zmianie składu chemicznego żeliwa bazowego (rys. 7.1), głównie przez zmniejszenie udziału C, Si, Mn, P, S, Cr, Ni, wprowadzono dodatkowo

Cu w zakresie 0,68–0,80% oraz zwiększono udziału Mo z 0,05–0,28 do 0,25–0,42%. Udział pierwiastków stopowych zwiększył się z 1,37% (żeliwo standardowe) do 2,04 % (żeliwo z dodatkiem Mo i Cu). Przy zachowaniu tego samego przebiegu procesu i wyposażenia technologicznego uzyskano wyższą wytrzymałości żeliwa na poziomie minimalnej wartości $R_m = 320$ MPa. Średnia wartość twardości zwiększyła się minimalnie z wartości 244 do 253 HBW (rys. 7.2).



Rys. 7.2. Podstawowe właściwości mechaniczne badanych żeliw

Postać i rozmieszczenie wydzielní grafitu uległy zmianie (tabl. 6.4). Poza podstawową formą grafitu typu IA 96% na powierzchni gładzi, występuje grafit typu D i E 4% o wielkości 4/7 w kierunku zewnętrznej powierzchni odlewu tulei. Osnowa perlityczna z niewielką ilością ferrytu (0,5%) oraz równomiernie rozmieszczoną eutektyką fosforową ze zwiększoną liczbą ziaren jest naturalną konsekwencją wzrostu właściwości mechanicznych.

Podczas procesu technologicznego żeliwo cechowało się dobrymi właściwościami odlewniczymi. W procesie topienia żeliwa korzystano z obiegu materiałów z obróbki mechanicznej na poziomie około 60%. W procesie obróbki mechanicznej żeliwo wymagało właściwego doboru narzędzi, aby zapewnić optymalną trwałość.

Trzecim rodzajem żeliwa, które poddano badaniom technologicznym było żeliwo wzbogacone azotem (N). Żeliwo to w swoim składzie chemicznym, podobnie jak żeliwo z dodatkiem Mo i Cu w stosunku do składu żeliwa standardowego, ma zmniejszony udział C, Si, Mn, P, S, Cr, Ni, Mo. Dodatkowo wprowadzono Cu w ilości 0,78–0,84% oraz niewielkie ilości V i Ti na poziomie 0,01% (tabl. 6.2 i rys. 7.1). Zawartość rozpuszczonego azotu w badanych wytopach kształtowała się na poziomie 140–160 ppm. Jako nośnik azotu zastosowany był techniczny azotan wapnia CaNCN o zawartości azotu minimalnej 23,5%. Azo-

tan wapnia był podany do kadzi przy spuście metalu z pieca. Przebieg procesu, wyposażenie technologiczne oraz warunki przeprowadzonych badań były na tym samym poziomie co przy wytwarzaniu żeliwa standardowego.

Podstawowe właściwości mechaniczne żeliwa z dodatkiem N w zakresie wytrzymałości minimalnej $R_m = 350$ MPa są większe o 30% w stosunku do żeliwa standardowego $R_m = 250$ MPa. Było to możliwe dzięki:

- skróceniu i zaokrągleniu płatków grafitu
lub
- wzrostowi twardości kryształów roztworu stałego ferrytu w perlicie oraz zmniejszeniu zawartości ferrytu w osnowie [84, 164].

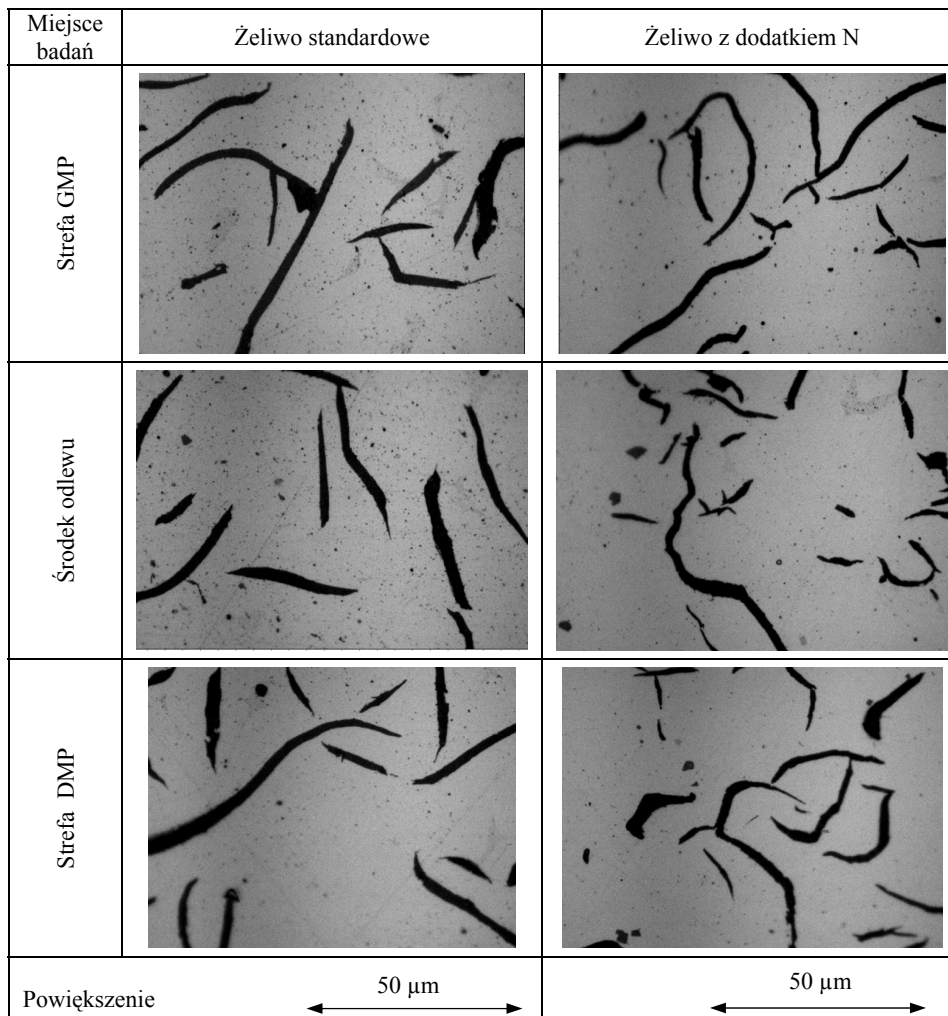
Badania porównawcze mikrostruktury kształtu i wielkości grafitów żeliwa z dodatkiem azotu w stosunku do żeliwa standardowego potwierdzają skrócenie i zaokrąglenie płatków grafitu oraz różnice w wielkości i kształcie grafitu (rys. 7.3). Jest to zagadnienie, które należałoby kontynuować w dalszych badaniach. W badanych odlewach nie stwierdzono porowatości typu pęcherze, co potwierdzają również wyniki zawarte w pracy [164]: przy zawartości azotu około 150 ppm nie występują żadne widoczne i zmniejszające wytrzymałość pory. W procesie topienia żeliwa korzystano z obiegu materiałów z procesu obróbki mechanicznej na poziomie około 60%. W procesie odlewania jak i w procesie obróbki mechanicznej żeliwo cechowało się dobrymi właściwościami.

Wyniki badań zdolności technologicznej procesu kształtowania odlewów dla poszczególnych żeliw w zakresie parametru wytrzymałości R_m (tabl. 6.3) są zbliżone do wartości $C_{pk} \approx 1,0$ i wynoszą odpowiednio dla:

- żeliwa standardowego $C_{pk} = 1,16$,
- żeliwa z dodatkiem Mo i Cu, $C_{pk} = 0,98$,
- żeliwa z dodatkiem N, $C_{pk} = 1,04$.

Oznacza to, że proces technologiczny kształtowania odlewów w zakresie parametru wytrzymałości R_m w odniesieniu do żeliwa standardowego i żeliwa z udziałem N jest uregulowany statystycznie, ponieważ $C_{pk} \geq 1,0$. Dla żeliwa z dodatkiem Mo i Cu proces nie jest uregulowany statystycznie, ponieważ $C_{pk} < 1,0$. Oznacza to, że w badanych procesach istnieje zróżnicowane prawdopodobieństwo wystąpienia niezgodności parametru R_m ; zatem przy zdolnościach:

- $C_{pk} = 1,16$ dla odlewów z żeliwa standardowego istnieje prawdopodobieństwo wystąpienia niezgodności parametru wytrzymałości R_m na poziomie 570 PPM, co oznacza niezgodność 570 sztuk odlewów na 1 milion sztuk odlanych,
- $C_{pk} = 0,98$ dla odlewów z żeliwa z dodatkami stopowymi Mo i Cu jest prawdopodobieństwo wystąpienia niezgodności parametru wytrzymałości R_m na poziomie 2800 PPM,
- $C_{pk} = 1,04$ dla odlewów z żeliwa z dodatkiem N jest prawdopodobieństwo wystąpienia niezgodności parametru wytrzymałości R_m na poziomie 2000 PPM.



Rys. 7.3. Obraz mikroskopowy grafitu w strukturze żeliwa: a) standardowego, b) żeliwa z dodatkiem azotu

Ponieważ jest to parametr krytyczny dla konstrukcji tulei, dlatego każdy z badanych wytopów poddawano czynnościom kontroli i badaniom na zgodność z wymaganiami według przyjętej metodyki badań (tabl. 4.2).

Wyniki badań wstępnych oraz badań technologicznych z danymi z badań w ramach grupy MAHLE [103, 190] dotyczące modułu sprężystości wzdłużnej (E), rozszerzalności cieplnej (α) i przewodności cieplnej (λ) potwierdzają zasadność wyboru do badań technologicznych żeliw z dodatkiem Mo i Cu oraz z dodatkiem N (tabl. 7.1). Są to żeliwa, które mają zbliżone wartości rozszerzalności cieplnej (α) i przewodności cieplnej (λ) do żeliwa standardowego i mają wyma-

gane wartości parametru wytrzymałości minimalnej $R_m > 320$ MPa. Potwierdza to zasadność ich wyboru do nowych konstrukcji tulei cylindrowych silników typu HDEP (tabl. 7.2).

Tablica 7.1. Właściwości badanych materiałów konstrukcyjnych tulei cylindrowych

Rodzaj materiału i jego właściwości	Wysokojakościowe żeliwo niskostopowe				
Badane żeliwo	standardowe	z dodatkiem			Mg
		Mo i Cu	N		
Postać grafitu		płatkowa		wermikularno-kulkowa	
Mikrostruktura		perlit		bainit	perlit
Twardość [HBW 30]	230–270	240–288	251–309	270–330	240–300
Wytrzymałość na rozciąganie R_m min [MPa]	250	320	354	400–600	50–650
Moduł sprężystości E [GPa] ¹⁾	100–120	> 120	> 120	120–140	130–160
Rozszerzalność cieplna α (20–200 °C) [$10^{-6}K^{-1}$] ¹⁾	11–12	12,5	12,5	11–12	11–14
Przewodność cieplna λ (20 °C) [$W \cdot m^{-1}K^{-1}$] ¹⁾	35	33–44	34–44	32	35
¹⁾ Dane z badań MAHLE [103, 190].					

Tablica 7.2. Zakres zastosowania badanych żelii z dodatkiem Mo i Cu oraz N w nowych konstrukcjach silników HDEP

Badany materiał – zakres zastosowania	Wysokojakościowe żeliwo szare niskostopowe			
	standard	z dodatkiem		N
		Mo i Cu		
Zastosowanie w silnikach	dotychczasowe konstrukcje silników ZS	nowa platforma silników HDEP		
		DAF Paccar	VOLVO HDEP	Daimler AG i Truck
Typ/pojemność silników [dm ³]	4–12	12,9	D12/16 MD 11/13/16	12/14,8/15,6

7.2. Właściwości stali

Z przedstawionych wyników badań w rozdz. 5 tej pracy wynika, że przyjęte do badań gatunki stali 41CrAlMo7 i 42CrMo4 należą do tej samej grupy stali chromowo-molibdenowych z przeznaczeniem do azotowania. Dzięki zawartości pierwiastków azototwórczych typu aluminium (Al), chrom (Cr), molibden (Mo) i wanad (V), stale te pozwalają na uzyskanie w procesie azotowania wyso-

kiej twardości warstwy powierzchniowej. Dla stali 41CrAlMo7 z zawartością Al = 0,94%, Cr = 0,9%, Mo = 0,18% i V = 0,019% w procesie tradycyjnego dwustopniowego azotowania (I stopień w temperaturze 505–515 °C przy dysocjacji amoniaku 20–35% w czasie 20 h, II stopień w temperaturze 535–550 °C przy dysocjacji amoniaku 40–65% w czasie 50–60 h) uzyskano twardość warstwy azotowanej w zakresie 974–1033 HV o grubości 600–700 μm (tabl. 5.5). Próbki stali 42CrMo4 z zawartością Al = 0,8%, Cr = 1,25%, Mo = 0,21% i V = 0,01% poddano obróbce cieplno-chemicznej polegającej na jednoczesnym dyfuzyjnym nasyceniu węglem i azotem według technologii HEF/ Durferit. Jest to technologia kąpielowa w roztopionych solach cyjankowych, które stanowią aktywną część kąpeli. Proces ARCOR V jest procesem azotonawęglania, w którym dominuje dyfuzja węgla w temperaturze 590 °C; w czasie 90 min uzyskano twardość warstwy 630 HV o grubości 15 μm. Natomiast w procesie węglazotowania TENIFER, w którym dominuje dyfuzja azotu w temperaturze 580 °C w czasie 90 min uzyskano grubość warstwy azotowanej 12 μm o twardości 660 HV (tabl. 5.5). Ostateczne właściwości warstw przypowierzchniowych uzyskuje się po hartowaniu. Istotną cechą procesu azotowania, poza wysoką twardością warstwy powierzchniowej, której struktura i strefa faz ε i γ' zależą od temperatury, czasu, składu chemicznego stali oraz atmosfery, jest podwyższenie doraźnej granicy wytrzymałość na rozciąganie o około 20–30% (tabl. 5.4). Jest to tematyka, która wymaga dalszych szczegółowych badań, podobnie jak właściwości tribologiczne warstwy powierzchniowej w zastosowaniu do silników typu HDD. Badaniami należałoby objąć także przemysłową technologię odlewania i kucia tulei stalowych, technologię obróbki mechanicznej oraz dobór technologii procesu azotowania (gazowe, plazmowo-jarzeniowe, w złożach fluidalnych czy w proszkach), głównie ze względu na koszt wytwarzania tego typu tulei z przeznaczeniem do nowych konstrukcji silników typu HDD.

7.3. Właściwości struktury geometrycznej warstwy powierzchniowej

Z analizy wyników badań procesu gładzenia metodą standardową i gładką, według przyjętego modelu technologicznego (rozd. 4.3 oraz rys. 4.4 i 6.4), wynika, że błąd kształtu, niezależnie od metody gładzenia końcowego, w zakresie parametru kołowości wyniósł 9 μm, a dla parametru prostoliniowości 7 μm. Uzyskane wyniki są potwierdzeniem możliwości technologicznego kształtowania tej cechy zgodnie z tendencjami światowymi (tabl. 5.4), które określają, że dla tych parametrów aktualny poziom tolerancji wynosi maksymalnie 10 μm. Cześć firm, jak na przykład DC, MAN czy VOLVO, w najnowszych swoich rozwiązaniach konstrukcyjnych prototypowych tulei cylindrowych zakłada stosowanie parametru walcowości (tabl. 5.4) na poziomie 5 μm (DC i MAN) lub 10 μm (VOLVO), przy czym jak zaznaczono w rozdziale 5, tolerancja parametru

walcowości jest wymaganiem istotniejszym i na pewno teoretycznie bardziej pożądanym z punktu oceny kształtu otworu jako cechy funkcjonalnej cylindra w układzie TPC. Obrazuje kształt otworu w układzie 3D w przeciwieństwie do odchyłek okrągłości i prostoliniowości, które prezentują wyniki w układzie 2D. Wymaga to jednak określenia dodatkowej strategii pomiarowej (metoda punktów, metoda tworzących, przekrojów poprzecznych lub metoda siatki) w celu oceny całej powierzchni otworu tulei, na co zwracają uwagę autorzy pracy [154] oraz co zaznaczono w badaniach własnych [37], a także na rysunku 7.4.

Z tego względu w praktyce producenci tulei cylindrowych nie stosują bez wyrażanej potrzeby tolerancji walcowości, a korzystają raczej z tolerancji okrągłości i prostoliniowości. Zapis w dokumentacji konstrukcyjnej tulei tolerancji okrągłości i prostoliniowości pozwala na zdefiniowanie większych wartości tolerancji kształtu w obszarach końcowych tulei poza strefą współpracy z pierścieniami tłokowymi (rys. 6.2), przy wykorzystaniu zasady maksimum materiału lub warunku minimalnej strefy (kryterium Czebyszewa). Taki zapis jest wynikiem zmiany kształtu otworu w miejscu wyjść technologicznych głowicy gładzącej podczas procesu gładzenia. Jest to zagadnienie na tyle ważne, że powinno być przedmiotem dalszych badań i analiz technologicznych.

Badania ukształtowania powierzchni gładzi w procesie gładzenia plateau metodą gładzenia standardowego i gładzenia gładkiego potwierdzają kierunek zmian parametrów chropowatości powierzchni R_{pk} i R_k według przyjętego modelu technologicznego (rys. 6.4). W odniesieniu do gładzenia standardowego w modelu technologicznym przyjęto zakres parametrów chropowatości:

- $R_{pk} = 0,2\text{--}0,8 \mu\text{m}$,
- $R_k = 0,8\text{--}1,4 \mu\text{m}$,
- $R_{vk} = 1,0\text{--}3,5 \mu\text{m}$.

W wyniku badań uzyskano następujące wartości parametrów:

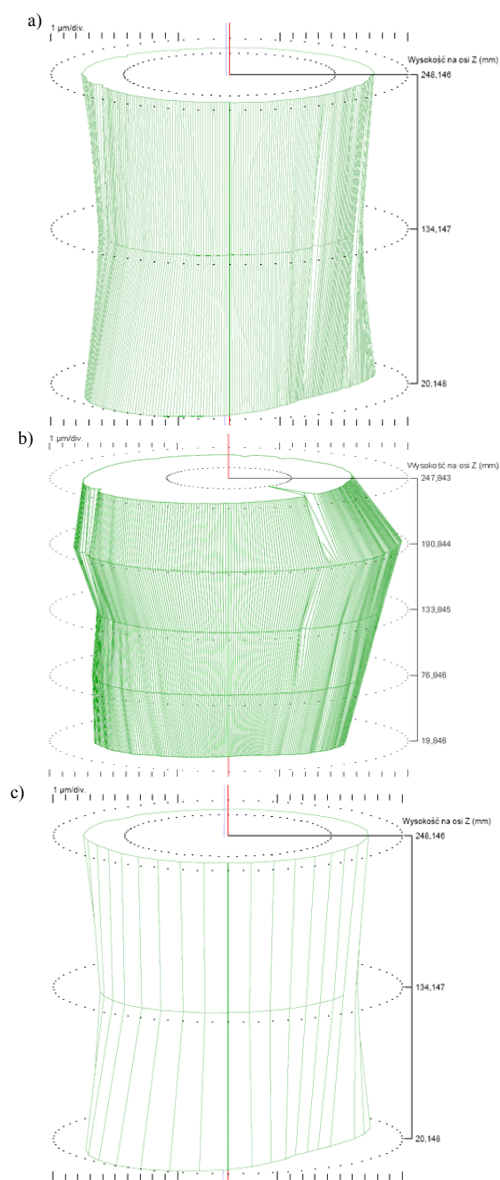
- $R_{pk} = 0,24\text{--}0,39 \mu\text{m}$,
- $R_k = 0,92\text{--}1,29 \mu\text{m}$,
- $R_{vk} = 1,7\text{--}2,57 \mu\text{m}$

przy zdolności procesowej $C_{pk} = 1,33$. Potwierdza to, że proces technologiczny gładzenia standardowego jest uregulowany pod kontrolą statystyczną z prawdopodobieństwem poziomu niezgodności 63 PPM, uznawanego w motoryzacji za poziom minimalnych wymagań.

Dla procesu gładzenia gładkiego w modelu technologicznym przyjęto zakres parametrów chropowatości R_{pk} i $R_k \rightarrow 0 \mu\text{m}$, a parametr R_{vk} według wymagań dla danego typu silnika. W prototypowych silnikach platformy HDEP VOLVO parametr R_{vk} był w zakresie $1,6\text{--}2,2 \mu\text{m}$. W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano:

- parametr $R_{pk} < 0,3 \mu\text{m}$ ($0,05\text{--}0,27 \mu\text{m}$),
- możliwość sterowania parametrem R_k w przedziale:
 - $0,5\text{--}1,2 \mu\text{m}$, przy zdolności technologicznej $C_{pk} = 1,04$ (2000 PPM),
 - $0,4\text{--}1,0 \mu\text{m}$, przy zdolności technologicznej $C_{pk} = 1,21$ (290 PPM),

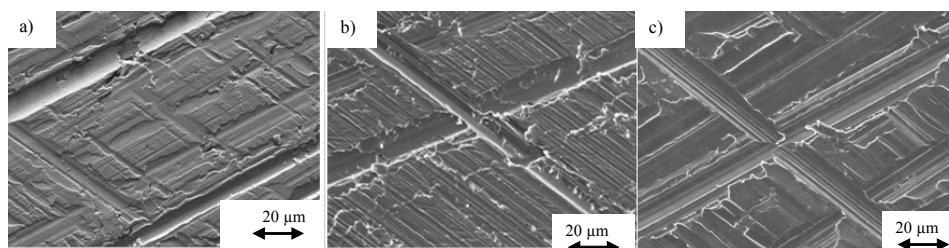
- 0,25–0,75 μm , przy zdolności technologicznej $C_{pk} = 1,09$ (1140 PPM),
- 0,15–0,65 μm , przy zdolności technologicznej $C_{pk} = 1,12$ (900 PPM),
- parametr R_{vk} był zawarty w przedziale 1,6–2,64 μm (tabl. 6.7 i rys. 6.6).



Rys. 7.4. Porównanie graficzne odchyłek walcowości na podstawie pomiaru metodą przekrojów poprzecznych: a) w trzech płaszczyznach 5,91 μm , b) w pięciu płaszczyznach 9,13 μm oraz c) metodą tworzących 5,72 μm

Całość badań technologicznych przeprowadzono przy zdolności procesowej $Cpk > 1,0$ ($Cpk = 1,04-1,21$), co oznacza, że proces gładzenia gładkiego był pod kontrolą statystyczną, ale z prawdopodobieństwem poziomu niezgodności w przedziale 290–2000 PPM, który nie spełnia minimalnego kryterium 63 PPM ($Cpk = 1,33$), jaki ma na przykład proces gładzenia standardowego. Tym samym należy przyjąć, że proces gładzenia gładkiego wymaga optymalizacji w kierunku zdolności $Cpk \geq 1,33$.

Analiza obrazów warstwy topograficznej z mikroskopu skaningowego w zakresie ukształtowania struktury rys wierzchołków, wgłębień, powierzchni pomiędzy rysami oraz odkształceń wskazuje, że zarówno po procesie gładzenia plateau standardowego, jak i gładkiego ukształtowana warstwa powierzchniowa ma jednolity kąt przecięcia się rys ($\alpha = 60^\circ$). Warstwa powierzchniowa jest częściowo odkształcona plastycznie, co wynika z procesu obróbki gładzeniem i zastosowanych narzędzi diamentowych oraz struktury materiału, jakim w tym przypadku był nowy rodzaj żeliwa niskostopowego z dodatkami stopowymi o zwiększonej wytrzymałości. Porównując uzyskane obrazy SEM z badań wstępnych (tabl. 5.5) oraz z badań technologicznych (rys. 6.8 i 6.9), można zauważyć, że obraz ukształtowania warstwy powierzchniowej jest charakterystyczny dla metody gładzenia, zastosowanych narzędzi w procesie gładzenia (oselki ceramiczne, pilniki diamentowe czy laser) oraz materiału tulei cylindrowej (żeliwo, stal azotowana) – rys. 7.5.



Rys. 7.5. Porównanie obrazów z analizy mikroskopowej SEM warstwy powierzchniowej tulei po procesie gładzenia : a) materiał tulei żeliwo, narzędzie gładzące ceramika, b) materiał tulei żeliwo, narzędzie gładzące diament, c) materiał tulei stal azotowana, narzędzie gładzące diament

Wyniki analizy obrazów SEM zostały częściowo opublikowane w pracach [13, 14] i są potwierdzeniem wpływu narzędzi diamentowych na jakość powierzchni gładzonych, co było przedmiotem badań w ramach projektu MAHLE – VOLVO oraz badań własnych, między innymi w ramach niniejszej rozprawy.

Wyniki badań czystości powierzchni w zakresie masy zanieczyszczeń oraz rozmiaru i liczby cząstek zawarte w tabl. 6.8 i na rys. 6.10 potwierdzają możliwości technologiczne procesu mycia, który zapewnia dopuszczalny poziom zanieczyszczeń $< 10 \text{ mg}/1000 \text{ cm}^2$ (max $7,4 \text{ mg}/1000 \text{ cm}^2$). W zakresie liczby cząstek w badaniach uzyskano poziom $747 \text{ cząstek}/\text{mm}^2$ przy dopuszczalnej warto-

ści < 750 cząstek/mm². Określono rozmiar największych cząstek metalowych i miękkich oraz największą długość włókna. Największa metalowa cząstka miała długość 306 μm i szerokość 38 μm . Największa niemetalowa cząstka miała długość 616 μm i szerokość 185 μm . Dla włókna największa długość wynosiła 3195 μm , przy czym są to wielkości, które wymagają dalszych ukierunkowanych badań celem wyjaśnienia źródła pochodzenia, analizy zdolności procesowej używanych myjek w procesie mycia jak również wpływu wielkości cząstek na współpracę tribologiczną elementów układu TPC.

7.4. Zestawienie wyników badań w odniesieniu do silników HDEP VOLVO

Wyniki badań cech funkcjonalnych tulei cylindrowych zestawiono w formie danych do opracowania końcowych specyfikacji konstrukcyjnych tulei cylindrowych z przeznaczeniem do silników platformy HDEP VOLVO (tabl. 7.3).

Zgodnie z zaleceniami międzynarodowej organizacji normalizacyjnej ISO, zawartymi w raporcie technicznym ISO/TR 14638 [141] oraz w wykazie norm z zakresu prac komitetu technicznego nr 123ISO [141], każda konstrukcja powinna mieć zbiór wymagań odnoszący się do jej geometrii w formie specyfikacji geometrycznej GPS (ang. *geometrical product specifications*). Wymagania te powinny obejmować tolerancje wymiarów (wymiary zewnętrzne, wewnętrzne, liniowe i kątowe), tolerancje geometryczne (kształtu, kierunku, położenia i bicia) i tolerancje parametrów powierzchni (chropowatość) wraz z łańcuchem norm dotyczących poszczególnych charakterystyk geometrycznych w formie modelu macierzy. Zaleca się, aby łańcuch norm dla każdej z charakterystyki składał się z 6 ogniw zawierających normy określające:

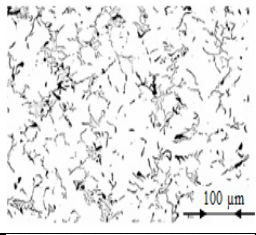
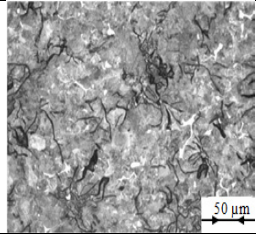
- oznaczanie wymagań dla wyrobu,
- określenie tolerancji,
- określenie charakterystyk elementów rzeczywistych,
- oszacowanie odchyłek wyrobu – porównanie z wartościami granicznymi,
- wymagania dotyczące sprzętu pomiarowego,
- wymagania odnośnie do wzorcowania – wzorce miar.

Tak więc każdy łańcuch norm powinien dotyczyć pełnego procesu:

- konstruowania wyrobu z ustaleniem jednoznacznych specyfikacji,
- produkcji, w tym i interpretacji specyfikacji,
- weryfikacji na drodze pomiarów.

Przy aktualnym poziomie wydawanych norm ISO w odniesieniu do tulei cylindrowych było to niemożliwe do spełnienia, ponieważ dla wielu charakterystyk brak jest jeszcze właściwych norm. Dla powierzchni otworu w zakresie chropowatości powierzchni i czystości powierzchni częściowo istnieje taki zbiór norm [63–72, 145–158], z którego skorzystano, co zostało zaznaczone w tej pracy (rozdz. 4). Brak jest podobnych zaleceń w zakresie specyfikacji materiału

Tablica 7.3. Dane do opracowania końcowych specyfikacji tulei cylindrowych

Typy silników		D 12D		MD 11 MD16	MD 13	DH 12 BUS	
		D 16	MD 13			MD 16	
Standard emisji		EU 3		EU 4	EU 5i	EU 5	
		US04		US 07			
Materiał odlewny	Skład chemiczny [%]	C	2,80–3,20		Grafit kształt I typu A i/lub B dozwolony typ D i E na zew., wielkość 4–7		
		Si	1,60–2,10				
		Mn	0,40–0,67				
		P	0,29–0,80				
		S	max 0,08				
		Cr	0,20–0,50				
		Mo	0,20–0,60				
		Ni	0,60–1,00				
	Cu	0,40–0,80		Osnowa perlityczna, max 1% ferrytu, sieć eutektyki równomiernie rozłożonej			
Wytrzymałość doraźna [MPa]	R _m min 320						
Twardość [HBW30]	240–10						
Powierzchnia otworu	Tolerancje kształtu	W zależności od strefy współpracy z pierścieniami parametr okrągłości i prostoliniowości 0,010 mm w strefie współpracy, 0,015 mm poza strefą					
	Metoda gładzenia	Gładzenie plateau gładkie, kąt $\alpha = 55^\circ \pm 10^\circ$					
	Chropowatość	Rpk [µm]	Rk [µm]	Rvk [µm]	Mr1 [%]	Mr2 [%]	
	EU 3	US 04	< 0,3	0,8–1,4	1,7–3,2	< 10	65–85
	EU 4	US 07		0,5–1,2	1,4–2,8		
	EU 5i			0,25–0,75			
	EU 5	(EU 6)		0,15–0,65			
Obraz ukształtowania powierzchni po procesie gładzenia	Według uzgodnionego katalogu obrazów z mikroskopii skaninowej – rys. 6.10						
Czystość	< 10 mg/1000 cm ²		< 750 cząstek/mm ²				

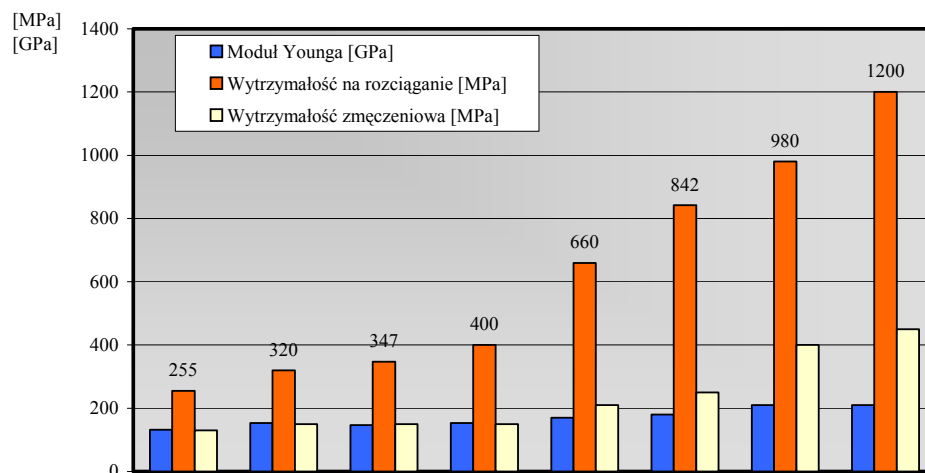
MPS (ang. *material product specifications*), która jest niezbędnym elementem, aby mogła powstać nowa konstrukcja tulei cylindrowej. W niniejszej pracy, kierując się zasadami GPS w stosunku do materiałów przyjętych do badań i metodyki badań, skorzystano z tej zasady. Należy zwrócić uwagę, że przez specyfikacje (GPS/MPS) są wyrażane lub nie, w języku inżynierii materiałowej, geometrii czy metrologii i systemów pomiarowych, różne wymagania, które są

niezbędne do realizacji wyrobu/technologii w łańcuchu jego cyklu życia PDP (*Product Development Process* – rozwój produktu/proces – faza koncepcji/prototyp/wzorce/seria przedprodukcyjna/produkcja seryjna/produkcja części zamiennych/recykling).

Stąd wynika między innymi złożona procedura postępowania na drodze od MPS do GPS w ramach projektów prototypów, wzorców, serii przedprodukcyjnej, która nie zawsze potwierdza uzyskanie pożądanych parametrów tulei w układzie TPC silnika na etapie produkcji seryjnej i następnie w okresie jego eksploatacji.

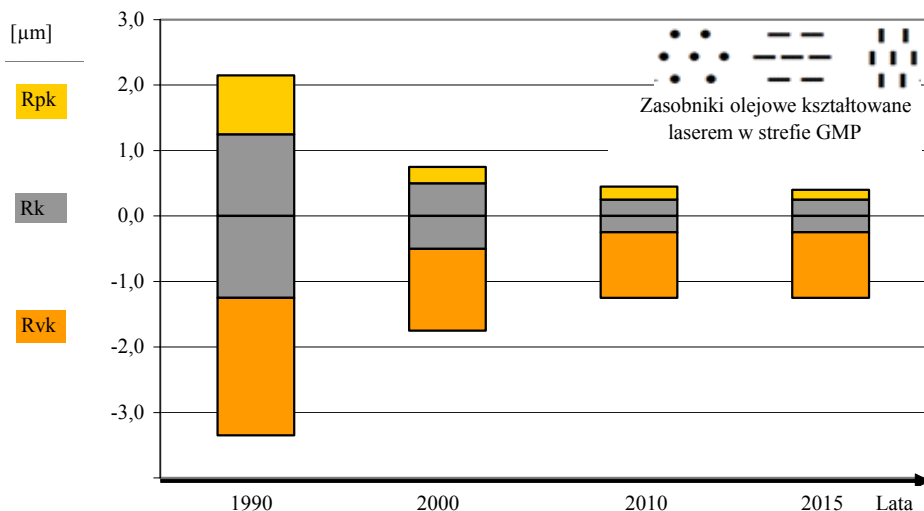
7.5. Kierunki rozwoju technologicznego tulei cylindrowych

Wyniki badań wstępnych oraz badań technologicznych pozwalają na określenie kierunków rozwoju technologicznego materiałów stosowanych w konstrukcji tulei cylindrowych (rys. 7.6) oraz struktury geometrycznej warstwy powierzchniowej kształtowanej metodą gładzenia (rys. 7.7).



Badany materiał	Żeliwo szare niskostopowe wysokojaściowe				Stal	
	Standard	z modyfikacją				
		Mo, Cu	N	Ni + Mo	Mg	Stal azotowana
Postać grafitu		Płatkowy		Wermikularno-kulkowy		
Osnowa		Perlityczna		Bainit	Perlityczna	Martenityczna
Dostępność materiału	Produkcja seryjna	Materiały rozwojowe częściowo w produkcji seryjnej				
		Produkcja seryjna		Rozwój technologii		

Rys. 7.6. Kierunki rozwoju materiałów stosowanych w konstrukcji tulei cylindrowych



Rys. 7.7. Kierunki rozwoju technologicznego struktury geometrycznej warstwy powierzchniowej gładzi w zakresie parametrów chropowatości [39]

Dla materiałów jako kryterium kwalifikacji przyjęto podstawowe parametry oceny mechanicznej materiału, jakimi są minimalna doraźna wytrzymałość na rozciąganie i z tym związane parametry wytrzymałości zmęczeniowej oraz modułu sprężystości Younga. Są to podstawowe parametry, jakich wymagają konstruktorzy silników spalinowych ZS w nowych rozwiązaniach konstrukcyjnych silników, przede wszystkim z powodu obciążeń, jakie obecnie (230–250 MPa) i w najbliższej przyszłości będą występować w cylindrze (≥ 300 MPa, rys. 2.15).

Dla struktury geometrycznej warstwy powierzchniowej otworu tulei cylindrowej jako kryterium kwalifikacji przyjęto parametry tolerancji kształtu (okrągłości i prostoliniowości $> 10 \mu\text{m}$) oraz parametry chropowatości określone metodą profilową na podstawie krzywej udziału materiałowego (Abbotta).

8. Podsumowanie i wnioski

8.1. Wprowadzenie

Podstawowym zadaniem warstwy powierzchniowej gładzi tulei cylindrowej w układzie TPC (tłok–pierścienie tłokowe–cylinder) silnika spalinowego jest stworzenie wspólnie z tłokiem i pierścieniami tłokowymi a także z olejem smarującym skutecznego uszczelnienia labiryntowego przestrzeni roboczej ponad denkiem tłoka oraz zminimalizowanie strat tarcia i zużycia oleju powstającego podczas suwu tłoka z pierścieniami po powierzchni gładzi cylindra, pomiędzy górnym martwym punktem (GMP) a dolnym martwym punktem (DMP).

W niniejszej pracy przedstawiono syntezę problemów technologicznych dotyczących cech funkcjonalnych warstwy powierzchniowej gładzi tulei cylindrowych, które spełniają wymagania nowej konstrukcji silników platformy HDEP (*Heavy Duty Engine Platform*) VOLVO oraz wymagania środowiskowe. Przyjęte zakresy rozwiązań technologicznych tulei cylindrowych, podobnie jak nowe konstrukcje silników VOLVO w ramach platformy HDEP, wyznaczają przyszłościowe kierunki rozwoju silników typu HDD (*Heavy Duty Diesel* – silniki ZS do ciężkich pojazdów) i elementu typu tuleja cylindrowa w układzie TPC.

8.2. Wnioski poznawcze

Na podstawie rezultatów badań można stwierdzić, że:

1. Układ TPC stanowi najbardziej obciążony i złożony tribologiczny układ w silniku spalinowym. Poszczególne jego elementy, tłok, pierścienie tłokowe i tuleja cylindrowa stanowią pod względem tribologicznym odrębne układy. Dominujące znaczenie funkcjonalne i tribologiczne ma układ pierścienie tłokowe–tuleja cylindrowa. Analiza tribologiczna tego układu pozwoliła na określenie zespołu cech funkcjonalnych warstwy powierzchniowej gładzi tulei cylindrowej oraz wskazanie wpływu zależności parametrów opisujących poszczególne cechy na pracę silnika spalinowego. Zbiór parametrów opisujących cechy funkcjonalne stanowił podstawę wyboru modelu procesów technologicznych kształtujących poszczególne cechy oraz metodyki ich badań.
2. Przyjęte modele procesów technologicznych kształtujących poszczególne cechy funkcjonalne potwierdziły, że w warunkach przemysłowych można:
 - kształtować odlewy tulei cylindrowych metodą wirującej formy w procesie odlewania odśrodkowego o wytrzymałościach > 300 MPa, z wysokojakościowych niskostopowych żeliw. Odlewy z żeliwa z dodatkami molibdenu $Mo = 0,25\text{--}0,42\%$ i miedzi $Cu = 0,68\text{--}0,80\%$ miały wytrzymałość

minimalną $R_m = 320$ MPa, odlewy tulei z żeliwa z dodatkiem azotu $N = 140\text{--}160$ ppm przy zmniejszonym udziale $Mo = 0,001\text{--}0,14\%$, a zwiększonym udziale $Cu = 0,78\text{--}0,84\%$ miały wytrzymałość minimalną $R_m = 327$ MPa. Wspólną charakterystyczną cechą dla badanych odlewów była ich strefa rdzenia. Strefa rdzenia miała jednorodne właściwości dla parametrów wytrzymałości, twardości oraz obrazu mikrostruktury. Strefa ta stanowiła jednocześnie miejsce końcowego położenia tulei cylindrowej w procesie obróbki mechanicznej, co dla pozostałych cech funkcjonalnych warstwy powierzchniowej w zakresie makrokształtu otworu i mikrogeometrii powierzchni gładzi tulei było bardzo ważne,

- kształtować strukturę warstwy powierzchniowej gładzi tulei z żeliwa o wytrzymałości ≥ 320 MPa metodą gładzenia wielozabiegowego plateau gładkiego, w zakresie błędów kształtu otworu tulei < 10 μm , przy parametrze okrągłości 4 μm i prostoliniowości 5 μm z możliwością sterowania zakresem parametru głębokości rdzenia chropowatości R_k w przedziale od 0,15 μm do 1,2 μm , w zależności od wymagań standardu emisji spalin dla danego typu silnika w ramach platformy HDEP VOLVO.
3. Przyjęty zbiór parametrów chropowatości R_{pk} , R_k i R_{vk} potwierdził, że:
- pozwala na opis warstwowego modelu powierzchni i z tym związanych właściwości funkcjonalnych powierzchni,
 - ma ścisły związek z rozwijającymi się w świecie standardami dotyczącymi zmniejszenia zużycia oleju i emisji cząstek stałych (określony zakres parametrów związany z typem silnika HDEP VOLVO i zakresem zużycia oleju oraz emisji cząstek stałych).
4. Przyszłościowymi kierunkami rozwoju w odniesieniu do technologicznego kształtowania warstwy powierzchniowej gładzi tulei cylindrowych powinny być:
- wysokojakościowe niskostopowe żeliwa z grafitem wermikularnym i kulkowym, które przy parametrach wytrzymałości minimalnej R_m rzędu 400–650 MPa mają właściwości rozszerzalności cieplnej $\alpha = 11\text{--}14$ [10^{-6}K^{-1}] i przewodności cieplnej $\lambda = 32\text{--}35$ [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$], zbliżone do żeliwa standardowego $\alpha = 11\text{--}12$ [10^{-6}K^{-1}], $\lambda = 35$ [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$] z grafitem płatkowym,
 - procesy gładzenia wielofazowego plateau gładkiego z wykorzystaniem lasera kształtującego zasobniki olejowe w strefie GMP tulei oraz laserowego hartowania warstwy powierzchniowej, z powodu kształtującej się tendencji wzrostu obciążeń (≥ 300 MPa) w tulejach cylindrowych oraz rozwijających się standardów emisji spalin, jak na przykład norma Euro VI i następne.

8.3. Wnioski utylitarne

Podstawowym celem utylitarным tej pracy było przeprowadzenie badań zdolności procesów technologicznych w warunkach przemysłowych, dla przyjętych cech funkcjonalnych na etapie kształtowania odlewów i gładzenia tulei cylindrowych przeznaczonych do nowych konstrukcji silników platformy HDEP VOLVO. Stopień spełnienia przez procesy technologiczne wymagań jakościowych określono, opierając się na wskaźnikach zdolności procesu C_p i C_{pk} . Wskaźnik zdolności jakościowej C_p określał zdolność procesu do wytwarzania określonej cechy w niezmienny sposób wewnątrz zadanych granic specyfikacji, a wskaźnik C_{pk} był miarą wycentrowania procesu, czyli położenia wartości średniej w stosunku do granic tolerancji.

W rezultacie badań określono, że:

1. Formowanie odlewów z nowych materiałów konstrukcyjnych (żeliwo z dodatkiem Mo i Cu oraz żeliwo z dodatkiem N) miało zdolność procesową $C_p = 1,20-1,29$ i $C_{pk} = 0,98-1,04$. Wskaźniki te były niższe w stosunku do wskaźników zdolności procesowej żeliwa standardowego $C_p = 1,38$ i $C_{pk} = 1,16$, pomimo kształtowania odlewów w tym samym procesie odlewania odśrodkowego metodą wirującej formy. Uzyskany poziom zdolności procesowej odlewów z nowych materiałów konstrukcyjnych o wytrzymałości minimalnej ≥ 320 MPa cechował się prawdopodobieństwem wystąpienia niezgodnych odlewów (< 320 MPa) na poziomie 2000–2700 PPM. Odlewy z żeliwa standardowego o wytrzymałości minimalnej $R_m \geq 250$ MPa cechowały się poziomem prawdopodobieństwa 570 PPM.
2. Kształtowanie struktury geometrycznej warstwy powierzchniowej gładzi tulei z żeliwa stopowego z udziałem Mo i Cu nową metodą gładzenia wielozabiegowego plateau gładkiego miało zdolność procesową na poziomie $C_p = 1,28-1,42$ i $C_{pk} = 1,04-1,21$. Uzyskany zakres wartości C_p i C_{pk} był związany z zakresem badanego parametru $R_k = 0,15-1,2 \mu\text{m}$ w ramach specyfikacji dla danego typu silnika HDEP VOLVO, w zależności od wymagań standardu emisji spalin.

Gładzenie wielozabiegowe plateau tulei cylindrowych z żeliwa standardowego dotychczas stosowanego w silnikach MD 13 dla spełnienia standardu EU 3 i US 04 wykazało zdolność $C_p = 1,5$ i $C_{pk} = 1,33$ w zakresie parametru chropowatości $R_k = 0,8-1,4 \mu\text{m}$. Poziom zdolności procesowej nową metodą gładzenia wielozabiegowego plateau gładkiego dla parametru R_k cechował się poziomem prawdopodobieństwa niezgodności parametru R_k w zakresie od 290 PPM (dla $C_{pk} = 1,21$) do 2000 PPM (dla $C_{pk} = 1,04$). W odniesieniu do metody standardowego gładzenia wielozabiegowego plateau przy zdolności procesowej $C_{pk} = 1,33$ poziom prawdopodobieństwa wystąpienia niezgodności parametru R_k wynosił 63 PPM.

Poziom minimalnych wymagań dla wskaźnika Cpk określającego wycen-trowania procesu, czyli położenia wartości średniej w stosunku do granic to-lerancji, obecnie wynosi $Cpk = 1,33$, co oznacza prawdopodobieństwo wy-stąpienia niezgodności badanej cechy w wyrobie na poziomie 63 PPM. Wiele firm, jak na przykład VOLVO, DAF czy FORD, oczekuje zdolności proces-owych na poziomie $Cpk = 1,67-2,0$. Wtedy prawdopodobieństwo wystąpie-nia niezgodności badanej cechy jest zminimalizowane do poziomu poniżej liczby 1 na milion wyrobów, czyli dla $Cpk = 1,67$ poziom prawdopodobień-stwa wystąpienia niezgodności badanej cechy wynosi 0,57 PPM, a dla $Cpk = 2,0$ wynosi 0,0018 PPM. Uzyskane wyniki badań zdolności procesów tech-nologicznych są na tyle cenne, że odnoszą się do warunków przemysłowych i nie są z zasady podawane w literaturze. Tym samym należy przyjąć, że ba-dane procesy technologiczne powinny być poddane procesom optymalizacyj-nym w ramach dalszych prac, co jest ważne z punktu sterowania jakością procesów technologicznych o wysokim poziomie technologii.

3. Istotnym wynikiem tej pracy w aspekcie praktycznym był przegląd i porów-nanie stosowanych w świecie tulei cylindrowych pod względem parametrów opisujących cechy materiału tulei oraz parametrów struktury geometrycznej warstwy powierzchniowej gładzi tulei. Wyniki badań porównawczych wraz z wynikami badań wstępnych w zakresie:
 - podstawowych właściwości nowych materiałów konstrukcyjnych o wy-trzymałości na rozciąganie $R_m > 300$ MPa,
 - struktury geometrycznej powierzchni otworu wykonanej według nowych rozwiązań technologicznych w procesie gładzenia
 pozwoliły na określenie kierunków rozwoju technologicznego materiałów stosowanych w konstrukcji tulei cylindrowych (wysokojakościowe żeliwa niskostopowe z grafitem wermikularnym i kulkowym oraz staliwo/stal), a także parametrów struktury geometrycznej warstwy powierzchniowej tulei w zakre-sie błędów kształtu ($< 10 \mu\text{m}$) i parametrów chropowatości określonych meto-dą profilową na podstawie krzywej udziału materiałowego ($Rpk < 0,3 \mu\text{m}$, $Rk \leq 0,15 \mu\text{m}$, $Rvk \leq 1,4$).
4. Opracowane modele technologiczne procesów kształtujących cechy funkcjo-nalne tulei cylindrowych oraz metodyka badań powinny być elementami pro-cesu rozwoju wyrobu – PDP (*Product Development Process*) i mogą stano-wić źródło obniżenia kosztów tego procesu dla konkretnego silnika spalino-wego typu HDD w ramach nowych programów ich rozwoju.

Badania wykonane przez autora tej pracy oraz badania zdolności technolo-gicznej procesów w warunkach przemysłowych w pełni potwierdziły postawio-ną tezę, że w konstrukcji tulei cylindrowej występuje zespół cech funkcjonal-nych, których parametry pozwalają na wybór określonej technologii ich wytwa-rzania zarówno w zakresie odlewu, jak i w zakresie postaci geometrycznej war-stwy powierzchniowej, a jednocześnie mają znaczący wpływ na pracę silnika spalinowego.

8.4. Kierunki dalszych prac

Na podstawie przeprowadzonych badań kierunkami dalszych prac w zakresie technologicznego kształtowania cech funkcjonalnych warstwy powierzchniowej tulei cylindrowych powinny być :

- badania nad technologicznymi możliwościami kształtowania tulei w warunkach produkcyjnych z wysokojakościowego żeliwa niskostopowego z grafitem wermikularnym i kulkowym. Kierunki tych badań obserwuje się w ostatnich latach głównie w zastosowaniu do bloków cylindrowych; są podejmowane próby zastosowania do tulei cylindrowych. Przykładem mogą tu być opisane badania wstępne tych materiałów, których źródłem były próby odlewania tego typu żeliw z przeznaczeniem na tuleje cylindrowe,
- optymalizacja procesów technologicznych dotyczących kształtowania odlewów z żeliwa z dodatkami Mo i Cu, żeliwa z dodatkiem N oraz procesu gładzenia tulei z nowych żeliw w kierunku zwiększenia zdolności procesowych $Cpk > 1,33$,
- dalsze badania czystości powierzchni w odniesieniu do masy zanieczyszczeń oraz rozmiaru i liczby cząstek, celem wyjaśnienia źródła ich pochodzenia, analizy zdolności procesowej procesu mycia oraz wpływu poziomu zanieczyszczeń na współpracę tribologiczną elementów układu TPC, przede wszystkim z powodu braku danych w literaturze.

Na potrzeby realizacji nowych projektów wyrobów i nowych procesów technologicznych PDP (*Product Development Process*) przedmiotem dalszych prac powinno być opracowanie i stosowanie jednolitego systemu specyfikacji materiałowych MPS (*Material Produkt Specyfikations*) i specyfikacji geometrycznych GPS (*Geometrical Produkt Specyfikations*) według międzynarodowego standardu ISO. Rozwiązanie tego tematu mogłoby zapewnić:

- redukcję kosztów procesu PDP przez wyeliminowanie z procesu wyrobów niezgodnych ze względu na niepełny i niejednoznaczny zapis wymagań zawartych w specyfikacjach,
- wzrost jakości wyrobu i skrócenie czasu jego dostarczenia dla poszczególnych faz projektu PDP,
- optymalny ekonomiczny podział dostępnych środków finansowych i zasobów materialno-ludzkich w całym procesie PDP, który dla nowych konstrukcji w motoryzacji jest bardzo kosztowny i coraz częściej skracany ze względu na czas opracowań i związane z tym koszty.

8.5. Wnioski końcowe

8.5.1. Stan dotychczasowy

Dotychczasowe modele technologiczne warstwy powierzchniowej gładzi tulei cylindrowej nie były w pełni udokumentowane, a przedstawione dane były mało precyzyjne – ogólne. Wynikało to z dominacji ogólnych modeli warstwy wierzchniej i braku metod pomiaru niektórych parametrów w procesie technologicznym i ze stosowania różnych wzorców odniesienia.

8.5.2. Wkład do stanu wiedzy o technologicznym kształtowaniu cech funkcjonalnych warstwy powierzchniowej tulei

Przeprowadzone badania poszerzyły wiedzę o technologicznym kształtowaniu cech funkcjonalnych warstwy powierzchniowej tulei przez:

- Określenie zespołu cech funkcjonalnych w konstrukcji tulei cylindrowej, które można opisać parametrami stanowiącymi podstawę wyboru technologii wytwarzania tulei i mającymi znaczący wpływ na zastosowanie tulei w układzie TPC dla nowych konstrukcji silników spalinowych typu HDD.
- Udokumentowanie modelu technologicznego tulei oraz metodyki badań, na podstawie której przeprowadzono badania cech funkcjonalnych w procesie kształtowania odlewu i gładzenia warstwy powierzchniowej otworu tulei.
- Przegląd i porównanie stosowanych w świecie tulei cylindrowych w zakresie parametrów opisujących cechy funkcjonalne materiału i struktury geometrycznej powierzchni otworu tulei cylindrowych silników spalinowych typu HDD.
- Określenie nowych kierunków rozwoju technologicznego materiałów stosowanych w konstrukcji tulei cylindrowych oraz struktury geometrycznej powierzchni gładzi dla nowych konstrukcji silników spalinowych typu HDD, w związku z rozwojem wymagań środowiskowych dotyczących zmniejszenia zużycia oleju i emisji cząstek stałych.

8.5.3. Stan aktualny

Wyniki z przeprowadzonych badań cech funkcjonalnych w procesie odlewania i dalej w procesie obróbki mechanicznej mogą być wykorzystane w badaniach innych konstrukcji tulei cylindrowych z przeznaczeniem do silników spalinowych typu HDD. Wskazano też kierunki dalszych prac w zakresie technologicznego kształtowania cech funkcjonalnych warstwy powierzchniowej tulei wraz z metodyką ich badań.

Literatura

- [1] Abein T., Flores G., Klink U.: Laser Structuring Improvement of Tribological Properties of Surfaces, VDI-Z, 7–8, 2002.
- [2] Abel T.: Reibungsminderung durch Laseroberflächenstrukturierung in Verbrennungsmotoren. Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. 62. A. <http://dnb.ddb.de>
- [3] Brzeżański M., Śliwiński K.: Downsizing – nowy kierunek rozwoju silników samochodowych, Silniki Spalinowe nr 2, 2004 (119), s. 3-11.
- [4] Buffet G., Sallamand P., Cannes A.B.: Improvement In friction by cw Nd: YAG laser surfach treatment on cast iron cylinder bore. Applied Surfach Science 205, 2003, s. 289-296.
- [5] Burakowski T., Kubicki J., Marczak J., Napadłek W.: Technologiczne możliwości zastosowania ablacyjnego oczyszczania laserowego materiałów. Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 228, 2006, s. 138-146.
- [6] Burakowski T., Wierzchoń T.: Inżynieria powierzchni metali. WNT, Warszawa 1995, s. 47-164.
- [7] Busch A., Fischer E.: Contamination Management In der Praxis von der Bearbeitung bis zur Auslieferung. Hydac Filtrertechnik GmbH 2000.
- [8] Carras S., Gruszka J., Mathia T.G., Mazuyer D., Ninove F-P., Pawlus P.: Multi scale morphological metrology of piston-ring-textured cylinder liners assembly in relation to their tribological properties. ISMQC-2010 10th International Symposium on Measurement and Quality Control 2010, 5–9.09.2010, Osaka, Japan.
- [9] Carras S., Gapinski B., Gruszka J., Mathia T.G., Ninove F-P., Pawlus P., Wieczorowski M.: Multiscale-multiphysics manufacturing and multisensor of cylinder liner-from roundness to nano- rougdness. 3rd International Conference Manufacturing 2010 Contemporary problems of manufacturing and production management, 24–26.11.2010, Poznan, Poland, s. 30.
- [10] Caspers K.H.: Gute Prozesssicherheit beim Guss ermöglicht indirekte Bestimmung der Zugfestigkeit, MTZ 62, 2001, 2, s. 190-195.
- [11] Caspers K.H.: Prozess-Sicherheit am Beispiele einer Zylinderlaufbüchsen-Produktion, MTZ 61, 2000, 1, s. 49-53.
- [12] Casellato R., Avezou J.C., Gazzard S.T.: Recent Developments in Cylinder Bore and Liner Technology. Technical Paper. The Foundrym March 1991, p. 100-108.
- [13] Cieślak T.: Wpływ wybranych parametrów procesu gładzenia na strukturę geometryczną powierzchni cylindrów. Rozprawa doktorska. Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 2009.

- [14] Cieślak T., Gruszka J.: The effect of stones on quality of cylinder liners surface topography. Proceedings of 12th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces. 8–10.07.2009, Rzeszów, Poland, s. 353-359.
- [15] Cipolla G.: Silniki o zapłonie samoczynnym w perspektywie rynku globalnego, Silniki Spalinowe nr 2/2007 (129), s. 33-37.
- [16] Dawson S.: Compacted Graphite Iron-A Material Solution for Modern Diesel Engine Cylinder Blocks and Heads. 68th WFC. World Foundry Congress, 7–10.02.2008, p. 93-99.
- [17] Dobrzański L.A.: Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwie, WNT, Warszawa 2008, s. 200-209, 653-675.
- [18] Dietrich E., Schulze A.: Metody statystyczne w kwalifikacji środków pomiarowych maszyn i procesów produkcyjnych. Notika System, Warszawa 2000.
- [19] Dopp R., Schwenkel S.: Untersuchung zur Bestimmung des eutektischen Erstarrungsintervalls bei Eisen-Güßlegierungen. Abschlussbericht des Projekts der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) DO 565, Institut für Metallurgie, TU Clausthal 2004.
- [20] Dontamsetti S.K., Fischer G.W.: Factors affecting surface roughness in finish turning of gray iron, Advanced Materials and Manufacturing Processes, 3.04.1988, p. 689-725.
- [21] Ellermann J., Röhrle M.D., Schelling H.: Oil Consumption and Blowby of Truck Diesel Engines-Test Bench Results, 810937 MAHLE.
- [22] EU-Projekt Oil-Free Powertrain: Projekt-Nr. IPS-2001-80006, Final Report 7, 2005, s. 38-41.
- [23] Ferrarese A., Tomanik E.: Low Friction Ring Pack for Gasoline Engines, ASME ICEF2006-1566 Fall 2006, 5–8.11.2006, Sacramento, USA.
- [24] Ferrarese A., Banfield R.R., Tomanik E.: High Value PVD Top Ring for High Speed Diesel Engines.SAE International 2008-01-0793.
- [25] Flores G.: Bursthonen-Verfahrensvariante des Honens. Werkstatt und Betrieb 121, 1988, 9/10/12, s. 9-12.
- [26] Flores G.: Grundlagen und Anwendungen des Honens. Vulkan-Verlag, Essen 1992.
- [27] Fuaoco R., Cabezas C.S.: Einfluss der Grenzfläche Graphit-Austenit auf die Bildung von Ferrit oder Perlit in Gusseisen, Giesserei – Praxis 6, 2005, s. 217-222.
- [28] Fraidl G., Herzog P.: Wielostronne korzyści rozwoju technologii hybrydowych silników o zapłonie iskrowym i samoczynnym, Silniki Spalinowe nr 1, 2007 (128), s. 3-19.
- [29] Golloch R., Brinkmann S., Bodschwinn H., Merker G.P.: Schmierungs- und Verschleissverhalten laserstrukturierter Zylinderlaufbuchsen, Tribologie + Schmierungstechnik 49, Jahrgang, 5/2002.

- [30] Gruszka J. (kier. zespołu), Bielecki E., Nowak E.: Analiza światowych tendencji w rozwoju tulei cylindrowych z uwzględnieniem niezbędnych wymagań dla pierścieni tłokowych. Praca zrealizowana w Zespole Ośrodków Rzeczoznawstwa i Postępu Technicznego. Ośrodek w Warszawie dla Instytutu Lotnictwa w Warszawie, znak BT-123-85, Warszawa 1985.
- [31] Gruszka J.: Badania wybranych cech warstwy wierzchniej żeliwnych tulei cylindrowych w oparciu próby zużyciowe. Rozprawa doktorska. Politechnika Poznańska, Poznań 1983.
- [32] Gruszka J., Mende W.: Analiza rozwoju wymagań w zakresie warunków technicznych materiału tulei cylindrowych oraz parametrów chropowatości powierzchni gładzi. Materiały wewnętrzne MAHLE Krotoszyn–Stuttgart 2000.
- [33] Gruszka J.: Raport techniczny QM/01/2004. Measurement and analysis cylinder liners 2C46-6055-AAA produced at MAHLE Krotoszyn SA which was after 27000 km and assessment of too high consumption of oil-2l/1000 km-visit of MAHLE in FORD Otosan Turkey on 19–21.01.2004.
- [34] Gruszka J., Suchecki A.: Nowe metody kształtowania powierzchni cylindrów silników spalinowych. Silniki Spalinowe nr 3, 2007, PTNSS-2007-SS3-216), s. 16-26.
- [35] Gruszka J.: Badania czystości elementów układu tłokowo-cylindrowego. Silniki Spalinowe 2009 SC1, s. 357-362 (PTNSS-2009-SC-157).
- [36] Gruszka J.: Topografia powierzchni tulei cylindrowych kształtowanych techniką laserową. X Międzynarodowa Konferencja EM 09, Bydgoszcz 2009. Inżynieria Maszyn. Rok 12, zeszyt 4 Obróbka laserowa i hybrydowa, 2009, s. 42-53.
- [37] Gruszka J.: Topografia powierzchni gładzi cylindrowej. Materiały konferencyjne Proceedings of the 13th National & 4th International Conference „Metrology in Production Engineering”. 23–25.09.2009, Poznań–Żerków, s. 133-138, Opublikowano w Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji. Komisja Budowy Maszyn PAN Oddział w Poznaniu, Vol. 30, nr 2, Poznań 2010, s. 73-78.
- [38] Gruszka J., Wieczorowski M.: Wykorzystanie technik optycznych do kontroli produkcji tulei cylindrowych. Materiały konferencyjne: Proceedings of the 13th National & 4th International Conference „Metrology in Production Engineering”. 23–25.09.2009 Poznań–Żerków, s. 139-149, Pomiary, Automatyka i Kontrola nr 1, 2010.
- [39] Gruszka J.: Światowe tendencje w technologii produkcji tulei cylindrowych. Silniki Spalinowe nr 3, 2011 (146-PTNSS-2011-SC-198).
- [40] Guzik E.: Procesy uszlachetniania żeliwa. Wybrane zagadnienia. Monografia nr 1M, Archiwum Odlewnictwa, Katowice 2001.
- [41] Guzik E., Kleingartner T.: Badanie struktury i właściwości mechaniczne żeliwa wermikularnego w perlitycznej osnowie ferrytycznej. Materiał przekazany do publikacji w Archiwum Odlewnictwa, Katowice 2010.

- [42] Guzik E.: Żeliwo ausferytyczne i jego odmiany. Struktura i wybrane właściwości. Materiał przekazany do publikacji w Archiwum Odlewnictwa Katowice 2010.
- [43] Haasis G., Weigmann U.P.: Neues Honverfahren für umweltfreundliche Verbrennungsmotoren. Werkstatt und Betrieb 132, 1999, 3, p. 29-35.
- [44] Haasis G., Weigmann U.P.: New honing technique reduces oil consumption, Industrial Diamond Review 3, 1999, p. 205-211.
- [45] Herbst L., Lindner H., Hoult T.: An Important Novel Application for Excimer lasers in the Automotive industry, The International Congress on Applications of Lasers&Electro-Optics ICALEO 04, Laser Institute of America, 7.10.2004.
- [46] Haś Z., Kula P., Łojko W., Habrajski T., Kaska J., Sadłowski A.: Zastosowanie technologii azotonasiarczenia gazowego w podzespołach pojazdów. Materiały I konferencji naukowej nt.: Nowoczesne technologie w inżynierii powierzchni. Łódź–Spała 1994, s. 33-37.
- [47] Hebda M.: Procesy tarcia, smarowania i zużywania maszyn. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB. Warszawa–Radom 2007.
- [48] Hebda M., Wachal A.: Trybologia. WNT, Warszawa 1980.
- [49] Hill S.H., Kantola T.C., Brown J.R., Hamelink J.C.: An Experimental Study of the Effect of Cylinder Bore Finish on Engine Oil Consumption, SAE Paper 950938, p. 1568-1578.
- [50] Hill S.H.: Cylinder Bore Finishes and Their Effect on Oil Consumption. 2001-01-3550, Society of Automotive Engineers, Inc.
- [51] Hiraoka Shigenori: Japans Effort to reduce Tailpipe NOx/PM Emissions. Japan International Transport Institute, 17.03.2006.
- [52] Honsymposium Nagel, 13–14.06.2005, 25–26.11.2005.
- [53] Honatlas–Beurteilungskriterien für die Honung von Zylinderlaufflächen, Teil 1–3, AE Goetze GmbH, Ausgabe Januar 1993.
- [54] Hoppe S., Fritsche E.: Hochfeste Zylinderlaufbuchsen für Dieselmotoren, MTZ Nr. 2, 2006, p. 124-127.
- [55] Idzior M.: Rozwój samochodowych silników spalinowych w aspekcie metod ich wytwarzania. Silniki Spalinowe, nr 1, 2006 (124), s. 60-70.
- [56] Idzior M.: Studium optymalizacji parametrów rozpylaczy silników o zapłonie samoczynnym w aspekcie kształtowania ich właściwości użytkowych. Seria Rozprawy nr 384. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2004.
- [57] Informacja techniczna. Osełki gładzące i osełki do dogładzania oscylacyjnego. Atlantic Grinding Wheels+Honing Stones, info@atlanttic-Bonn.de
- [58] Informacja techniczna. Program produkcji narzędzi diamentowych. Fabryka Tarcz Ściernych Grodzisk Mazowiecki, narzedzia@ftsgrodzisk-maz.pl
- [59] Informacja techniczna VOLVO. Spotkania projektowe MAHLE VOLVO. Materiały niepublikowane, Krotoszyn 2005-2008.

- [60] International Honing 2003 Technical Conference, 8–9.04.2003 Itasca, Illinois.
- [61] Iskra A.: Studium konstrukcji i funkcjonalności pierścieni w grupie tłokowo-cylindrowej. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej Poznań 1996, s. 19-21.
- [62] Informacja techniczna, zeszyt 1 firmy PALL. Znaczenie filtracji zabezpieczającej przed zużyciem,
- [63] ISO 16232-1 – Pojazdy drogowe – Czystość komponentów układów hydraulicznych. Część 1: Słownictwo.
- [64] ISO 16232-2 – Pojazdy drogowe – Czystość komponentów układów hydraulicznych. Część 2: Metoda ekstrakcji zanieczyszczeń poprzez wstrząsanie.
- [65] ISO 16232-3 – Pojazdy drogowe – Czystość komponentów układów hydraulicznych. Część 3: Metoda ekstrakcji zanieczyszczeń poprzez płukanie ciśnieniowe.
- [66] ISO 16232-4 – Pojazdy drogowe – Czystość komponentów układów hydraulicznych. Część 4: Metoda ekstrakcji zanieczyszczeń technikami ultradźwiękowymi.
- [67] ISO 16232-5 – Pojazdy drogowe – Czystość komponentów układów hydraulicznych. Część 5: Metoda ekstrakcji zanieczyszczeń na funkcjonalnym stoisku do prób.
- [68] ISO 16232-6 – Pojazdy drogowe – Czystość komponentów układów hydraulicznych. Część 6: Wyznaczanie masy cząstek poprzez analizę gravimetryczną.
- [69] ISO 16232-7 – Pojazdy drogowe – Czystość komponentów układów hydraulicznych. Część 7: Oznaczanie wielkości i liczności cząstek poprzez analizę mikroskopową.
- [70] ISO 16232-8 – Pojazdy drogowe – Czystość komponentów układów hydraulicznych. Część 8: Oznaczanie własności fizycznych cząstek poprzez analizę mikroskopową.
- [71] ISO 16232-9 – Pojazdy drogowe – Czystość komponentów układów hydraulicznych. Część 9: Oznaczanie wielkości i liczności cząstek poprzez automatyczny licznik cząstek z ekstynkcją światła.
- [72] ISO 16232-1-10: 2007 Road vehicles-Cleanliness of components of fluid circuits.
- [73] Jocsak J., Tomanik E., Wong V.W.: The characterization and simulation of cylinder liner surface finishes. Proceedings of ICES2005 ASME Internal Combustion Engine Division 2005 Spring Technical Conference, 5–7.04.2005, Chicago, IL, USA.
- [74] Johansson S., Nilsson P.H., Ohlsson R., Anderberg C., Rosen B.G.: New cylinder liner surfaces for low oil consumption. Tribology International 41, 2008, p. 854-859.

- [75] Johanson B.D., Heine R.W.: Nitrogen in Molten Iron Processing and Its Effects, AFS Transactions 108 (2000), nr 81, s. 163-169.
- [76] Kaczmarek J.: Nowy sposób diagnozowania chropowatości powierzchni elementów maszynowych, IMP, Warszawa 1995.
- [77] Kaczmarek J., Wojciechowicz B.: Zmiany w strategii badań eksploatacyjnych warstwy wierzchniej. Tribologia, nr 6, 1995.
- [78] Katalog HAHN-KOLB 2008. Rozdział 6. Narzędzia diamentowe, ceramiczne materiały ściernicze, narzędzia do honowania, produkty chemiczno-techniczne.
- [79] Katalog produktów Elf Lubficiaants Polska 2000.
- [80] Kaźmierczak A.: Wpływ zastosowania powłoki ceramicznej na procesy tribologiczne w uszczelnieniu pierścieniowym silników spalinowych. Monografia, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002, s. 17-50, 135-153.
- [81] Kaźmierczak A.: Tarcie i zużycie zespołu tłok–pierścienie cylinder. Monografia. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005, s. 32-50, 94-145.
- [82] Kierunki współczesnych źródeł napędu w świetle dyskusji panelowej na II Międzynarodowym Kongresie PTNSS, Silniki Spalinowe nr 2, 2007 (129), s. 38-53.
- [83] Klink U.: Laserhonen für Zylinderlaufbahnen. MTZ Nr. 58, 1997, 9, s. 554-556.
- [84] Kolev B.V.: Effects of Pressure and Nitrogen on Structure formation of some Fe-C based casting Alloys. Theoretical Analysis, Metallurgy and New Materials Researches, Vol. VII, No. 4, 1999, p. 34-49.
- [85] Knoll G., Lagemann V., Lechtape-Grüter R., Robota A, Schlerege F.: Beeinflussung des Ölverbrauchs von Verbrennungsmotoren durch die Mikrohydrodynamik strukturierter Zylinderoberflächen, VDI-BERICHT Nr 1764, 2003, s. 63-71, 2. Nürtinger Honsymposium 13–14.06.2005.
- [86] Kozaczewski W.: Konstrukcja grupy tłokowo-cylindrycznej silników spalinowych, WKŁ, Warszawa 2004, s. 233-260.
- [87] Kozaczewski W.: Nowe metody obróbki gładzi cylindrów, Czasopismo Techniczne z. 6-M/2004 (Rok 101) ISSN 0011-4561, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.
- [88] Kwiatkowska J., Rajchel B., Świątkowska Z., Nowak T.: Raport nr 2011/AP. Pierwsze diamenty CVD w IFJ PAN, Kraków 2008.
- [89] Kress D.: Die Produktivität steigern beim Fertigen von Bohrungen in Bauteile aus Gusseisen mit Vermiculargraphit (GJV). In: Konstruieren+ Gie en 27, 2002, Nr. 1, s. 35-38.
- [90] Krupa K., Kinal G., Waligóra W.: Badania nad laserową obróbką cieplną żeliwnych pierścieni tłokowych. Inżynieria Materiałowa nr 1, 2010, s. 34-37.

- [91] Kula P.: Inżynieria warstwy wierzchniej. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2000, s. 79-246.
- [92] Kudliński Z.: Technologie odlewania stali. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006, s. 258-267.
- [93] Lampic-Opländer M.: Gußeisen mit Vermiculargrafit GJV – Teil 1: Metallurgische Grundlagen. W: Gießerei-Praxis 1, 2001, Fachverlag Schiele i Schön, Berlin.
- [94] Lampic-Opländer M.: Gußeisen mit Vermiculargrafit GJV – Teil 4.1: Zerspanen – Einflußgrößen. W: Gießerei-Praxis 8, 2001, Fachverlag Schiele i Schön, Berlin.
- [95] Laser-Honen. Pleuco GmbH. UB 020, 1995, s. 1-15.
- [96] Lawrowski Z.: Tribologia – tarcie, zużywanie i smarowanie. PWN, Warszawa 1993.
- [97] Lenhof U., Robota A.: Beurteilung von Gehonten Zylinderlaufflächen für Verbrennungsmotoren, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik Technische Universität Braunschweig Qualität in der Fertigung HONEN in Forschung und industrieller Anwendung 3. Fachtagung am 27–28.09.1995, s. 10-1–10-17.
- [98] Lenhof U., Robota A.: Fuzzy Bibliothek/Technische Anwendungen/Beurteilung von Zylinderlaufflächen, AE Goetze GmbH.
- [99] Lenthal J.S.: Cylinder Bore Surface Finish, its Evolution and Specification. The Tribology of Internal Combustion Engines, University of Birmingham, 1996.
- [100] Lenz H.P.: Przyszłość silników spalinowych w świetle międzynarodowego sympozjum silnikowego w Wiedniu. Silniki Spalinowe nr 2, 2007 (129), s. 21-32.
- [101] Lindner H., Bergmann H., Brandenstein C., Lang A., Queitsch R., Reichstein S., Stengel E.: UV-Laserbelichtung von Grauguss-Zylinderlaufbahnen von Verbrennungskraftmaschinen. VDI-Berichte Nr 1764, 2003, s. 73-96.
- [102] Marczak R.: Warstwa wierzchnia. Współczesny stan wiedzy i kierunki przyszłych badań. Tribologia 3, 2002, s. 939-955.
- [103] MAHLE Diesel Sympozjum, Stuttgart 2005.
- [104] Materiały z forum dyskusyjnego: Przyszłość samochodowych silników spalinowych: tendencje, czynniki rozwoju rynku, współzawodnictwo technologii. Silniki Spalinowe nr 3, 2005.
- [105] Melnikowa L.: Bestimmung der Wirkung von Spurenelementen im Einsatz material bei der Herstellung von Gusseisen mit Vermiculargrafit, Dissertation, Technischen Universität Bergakademie Freiberg 2004.
- [106] Mercedes-Benz Specification Determination of the technical cleanliness of components DBL 6515, March 2004.
- [107] Merkisz J.: Zużycie oleju w szybkoobrotowych silnikach spalinowych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1994.

- [108] Merkisz J.: Emisja cząstek stałych przez silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1997.
- [109] Merkisz J.: Ekologiczne problemy silników spalinowych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, tom I, Poznań 1998.
- [110] Merkisz J.: Ekologiczne problemy silników spalinowych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, tom II, Poznań 1999.
- [111] Merkisz J., Mazurek S.: Pokładowe systemy diagnostyczne pojazdów samochodowych. WKŁ, Warszawa 2004, s. 49-120.
- [112] Merkisz J.: Tendencje rozwojowe silników spalinowych. Silniki Spalinowe nr 1, 2004 (118).
- [113] Merkisz J.: Przemysł silnikowy w Polsce. Silniki Spalinowe nr 3, 2005 (122), s. 12-21.
- [114] Merkisz J.: Uwarunkowania rozwoju przemysłu silnikowego w Polsce. Silniki Spalinowe nr 2, 2007 (129), s. 3-20.
- [115] Merkisz J.: Badania emisji pojazdów w rzeczywistych warunkach ruchu. Silniki Spalinowe nr 3, 2011 (146).
- [116] Mouquet O., Condent F., Roucou D., Vega E.: Performance of nitrogen – enriched lamellar graphite cast iron. Fonderie Fondeur d aujourd hul, n°246 Juni Juli 2005, p. 14-26.
- [117] Napadłek W., Bogdanowicz Z., Kowalczyk S.: Kształtowanie technologicznej warstwy wierzchniej tulei cylindrowych stosowanych w silnikach spalinowych. Czasopismo Techniczne. Wydawnictw Politechniki Krakowskiej, z. 6-M/2004 (Rok 101), ISSN 0011-4561, s. 583-592.
- [118] 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, 2004, s. 353-362.
- [119] Napadłek W.: Kształtowanie właściwości tribologicznych warstwy powierzchniowej tulei cylindrowych silnika spalinowego z wykorzystaniem mikroobróbki laserowej. Tarcie, Zużycie, Smarowanie. Tribologia. Teoria i Praktyka, nr 3, 2008, s. 126-137.
- [120] Napadłek W., Burakowski T.: Modyfikacja laserowa warstwy wierzchniej żeliwa poprawiająca właściwości tribologiczne. Tarcie, Zużycie, Smarowanie. Tribologia. Teoria i Praktyka, nr 3, 2008, s. 151-164.
- [121] Napadłek W.: Modele tribologiczne współpracy skojarzenia tłok–pierścienie tłokowe–tuleja cylindrowa silnika spalinowego. Tribologia v. 40, nr 5, 2009, s. 135-145.
- [122] Napadłek W., Burakowski T.: Laserowa mikroobróbka elementów maszyn. Inżynieria Maszyn R. 12, z. 4, 2009, Wydawnictwo Wrocławskiej Rady FSNT NOT, Wrocław 2009.

- [123] Napadłek W.: Ablacyjne oczyszczanie laserowe – nowa perspektywa technologiczna w inżynierii powierzchni. *Inżynieria Maszyn R.* 12, z. 4, 2009, Wydawnictwo Wrocławskiej Rady FSNT NOT, Wrocław 2009.
- [124] Napadłek W.: Zwiększenie odporności tribologicznej warstwy wierzchniej żeliwnych tulei cylindrowych z wykorzystaniem ablacji laserowej. *Tribologia v.* 40, nr 5, 2009, s. 147-160.
- [125] Napadłek W.: Modele tribologiczne współpracy skojarzenia tłok–pierścienie tłokowe–tuleja cylindrowa silnika spalinowego. *Tribologia v.* 40, nr 5, 2009, s. 135-145.
- [126] Nicolaidis L., Mandelis A., Beingessner C.J., Depth profilometry of hardened steels by Gaussian elimination of roughness, *Analytical Sciences*, 17.4.2001, p. 383-386.
- [127] Niewczas A.: Trwałość zespołu tłok–pierścienie tłokowe–cylinder silnika spalinowego. *WNT*, Warszawa 1998, s. 11-30, 33-53, 93-103.
- [128] Niewiarowski K.: Tłokowe silniki spalinowe, WKŁ, Warszawa 1983, tom II, s. 13-59.
- [129] Ninove F-P., Mathia T.G., Pawlus P., Carras S., Gruszka J.: Multi scale morphological metrology of piston-ring-textured cylinder liners assembly in relation to their tribological properties. *ISMQC-2010 10th International Symposium on Measurement and Quality Control 2010*, 5–9.09.2010, Osaka, Japan.
- [130] Norma Fiat Auto Zanieczyszczenia, pomiar w produkcji ilości i wymiarów w silnikach i skrzyniach biegów 1.00040 wydanie z 27.05.2002.
- [131] Norma Volkswagen AG PV 3347 v. Februar 2001. Sauberkeit von Motorenbauteilen.
- [132] Norma B320400. Czystość układów w silnikach PSA.
- [133] Pawlus P.: Struktura geometryczna powierzchni cylindrów podczas eksploatacji silnika spalinowego. Monografia. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1999, s. 10-48, 54-195.
- [134] Pawlus P.: Topografia powierzchni – pomiar, analiza, oddziaływanie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2005, s. 357-417.
- [135] Pawlus P., Cieślak T., Mathia T.: The study of cylinder liner plateau honing process. *Journal of Materials Processing Technology* 209, 2009, p. 6078-6086.
- [136] Pośniak M., Makhniashvili I., Kowalska J.: Spaliny silników Diesla – zagrożenie dla zdrowia pracowników. *Bezpieczeństwo Pracy* nr 9, 2001, s. 11-14.
- [137] Pietrowski S.: Żeliwo sferoidalne bainityczno-martensytyczne. Międzynarodowa Konferencja Silnikowa KONES 92, Wrocław–Szklarska Poręba 1992.
- [138] Pietrowski St., Pisarek B., Gładysiak R.: Żeliwo stopowe z grafitem wermikularnym. *Solidification of Metals and Alloys*, No. 37, 1998, PAN – Katowice PL ISSN 0208-9386 (14/37).

- [139] Pietrowski S.: Kompendium wiedzy o żeliwie wermikularnym. Solidification of Metals and Alloys Year 2000, Vol. 2, Book No. 44 , PAN – Katowice PL ISSN 0208-9386 (38/44).
- [140] Pischinger S., Maassen F., Dohmen J., Karrar E.: Potenziale zur Reibleistungsreduktion der Kolbengruppe, 3. Nürtinger Honsymposium, 25–26.11.2010.
- [141] Podręcznik europejski pod redakcją Humiennego Z.: Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS), WNT, Warszawa 2004.
- [142] Podrzącki C.: Żeliwo. Struktura, właściwości, zastosowanie. Wydawnictwo ZG STOP, Kraków 1991.
- [143] Proceedings of ICES2005 ASME Internal Combustion Engine Division 2005 Spring Technical Conference, 5–7.04.2005, Chicago, IL, USA.
- [144] Przyszłość samochodowych silników spalinowych – Forum dyskusyjne w czasie I Międzynarodowego Kongresu Silników Spalinowych, Szczyrk, 25-28.09.2005, Silniki Spalinowe nr 3, 2005 (122), s. 6-11.
- [145] PN-EN ISO 1302. Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Oznaczanie struktury geometrycznej powierzchni w dokumentacjach technicznych wyrobów.
- [146] PN-EN 4287. Specyfikacje geometrii wyrobów. Struktura – geometryczna powierzchni: metoda profilowa – terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
- [147] PN-EN ISO 4288. Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa – zasady i procedury oceny struktury geometrycznej powierzchni.
- [148] PN-EN ISO 5436-2:2003. Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Struktura geometryczna powierzchni – metoda profilowa – wzorce.
- [149] PN-EN ISO 6506. Metale – Pomiar twardości sposobem Brinella. Część 1. Metoda badań. Część 2. Sprawdzanie i kalibracja twardościomierzy.
- [150] PN-EN ISO 7500-1. Metale – Sprawdzanie statycznych jednoosiowych maszyn wytrzymałościowych. Część 1: Maszyny wytrzymałościowe rozciągające/ściskające – sprawdzanie i wzorcowanie układu pomiarowego siły.
- [151] PN-EN ISO 11562 SGW. Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa. Charakterystyka metrologiczna filtrów z korekcją fazy.
- [152] PN-EN ISO 12179 SGW (GPS). Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa. Wzorcowanie przyrządów stykowych.
- [153] PN-EN ISO 13565-1 SGW. Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa, powierzchnie o warstwowych właściwościach funkcjonalnych. Filtrowanie i ogólne warunki pomiaru.
- [154] PN-EN ISO 13565-2 SGW. Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa, powierzchnie o warstwowych właściwościach funkcjonalnych. Opis wysokości za pomocą linearyzacji krzywej udziału materiałowego.

- [155] PN-EN ISO 14644-1. Pomieszczenia czyste i związane z nimi środowiska kontrolowane. Część 1. Klasyfikacja czystości powietrza.
- [156] PN-EN ISO 14284. Stal i żelazo. Pobieranie i przygotowanie próbek do oznaczania składu chemicznego.
- [157] PN-EN ISO IEC 17025. Wymagania dotyczące laboratoriów badawczych i wzorcujących.
- [158] PN-EN 24935. Analiza chemiczna surówki, żeliwa i stali. Oznaczanie zawartości siarki metodą absorpcji w podczerwieni po spaleniu w piecu indukcyjnym.
- [159] Product specifications Renault Engines all types-Renault 34-07-012.
- [160] Profíto F., Tomanik E., Zachariadis D.: An improved surface characterization of textured surfaces on mixed lubrication regimes. SAE International 20XX-01-XXXX, p. 1-12.
- [161] Tomanik E.: Friction and wear bench tests of different engine liner surface finishes. Tribology International 2008, s 1032-1038.
- [162] Rauscher H.: Aktuelle Werkzeugentwicklungen. 2. Honsymposium Nagel, 13-14 Juni 2005, und Nagel Tagungsband 3. Nürtinger Honsymposium, 25-26.11.2009.
- [163] Robota A, Zwein F.: Einfluss der Zylinderlaufflächentopografie auf den Ölverbrauch und die Partikelemissionen eines DI-Dieselmotors. MTZ 60 (1999) 4.
- [164] Rongde L., Jingxiang Y., Haipeng.: The Effects of Nitrogen on Solidification Process of Gray Iron, AFS Transactions 96, 1988, Nr 52, s. 423-430.
- [165] Roth G.: Flexible Maschinen-und Vorrichtungskonzepte. 2. Honsymposium Nagel, 13-14.06.2005.
- [166] Roth G., Schaible S.: Modular honing machine concepts. Nagel Tagungsband 3. Nürtinger Honsymposium, 25-26.11.2009.
- [167] Rust U.: Der Sinner'sche Kreis. Getränkeindustrie 11, 2004.
- [168] Rundman K.B., Parolini J.R., Moore D.J.: Relationship Between Tensile Properties and Matrix Microstructure in Austempered Gray Iron. AFS Transactions 2005, American Foundry Society, Schaumburg, IL USA. Paper 05-145(05).pdf, p. 723-736.
- [169] Sauerwein U.: Einfluss der Honung auf Reibung, Ölverbrauch und Verschleiss – Ergebnisse aus Prüfstandslaufen. 2. Nürtinger Honsymposium, Nagel, 13-14.06.2005.
- [170] Schaaf M., Rack P., Janus R.: Der Einfluss von Stickstoff und die mechanischen Eigenschaften von Gusseisen mit Lamellengraphit. Gessereitechnik. 29. Jahrgang-Heft 1, 1983, s. 11-17.
- [171] Schmid J.: Übersicht zu Honverfahren an GG-Zylinderlaufflächen. 2. Honsymposium, NAGEL, 13-14.06.2005.
- [172] Schmid J.: Optimized honing process for cast iron running surfaces. 2. Honsymposium Nagel, 13-14.06.2005.

- [173] Schmid J.: Optimized honing process for cast iron running surfaces. VDI-Berichte Nr. 1906, 2006.
- [174] Schmid J.: Grundlagen des Honens. Nagel Tagungsband 3. Nürtinger Honsymposium, 25–26.11.2009.
- [175] Schmid J.: Werkstoffspezifische Bearbeitungsverfahren Specific material machining processes. Nagel Tagungsband 3. Nürtinger Honsymposium, 25–26.11.2009.
- [176] Schwenkel S., Döpp R.: Einfluss von Si, Mn, S, P, Cu, Ni, Cr, Mo und Al auf das eutektische Erstarrungsintervall von Fe-C-Gusslegierungen, Gießerei forschung 56, 2004, Nr. 3, s. 110-115.
- [177] Seck E., Strobel J.: Diamant-Fluidstrahl-Glätthonung-Ein neues Verfahren zur Bearbeitung der Zylinderlaufbahnen von Kurbelgehäusen aus Grauguss, MTZ Motortechnische Zeitschrift 62, 2001, 2, s. 184-169.
- [178] Serdecki W.: Badania współpracy elementów układu tłokowo-cylindrowego silnika spalinowego. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2002, s. 11-12.
- [179] Specyfikacja Mercedes-Benz MBN 10 135. Wydanie 10/1995 – Szczotkowanie powierzchni roboczych cylindrów.
- [180] Sprawozdanie z badań tulei DC PWT/VWO 20805.MAHLE 2007.
- [181] Standard DAF TKB 00804-102 v. 8 October 2006.
- [182] Standard Volvo Grup STD 107-0002 v. 6 March 2008.
- [183] Staniek J., Kobusinski W.: Debiut staliwa na odlewni żeliwa. MAHLE Global, wydanie PL 21-2010.
- [184] Stets W., Lötschert A., Wolf G.: Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von GJL durch legieren mit Stickstoff, Giesserei 95, 11, 2008.
- [185] Szymaniak J.: Budowa i właściwości warstwy wierzchniej. Tribologia i Trybotechnika. Wydawnictwo Zakładu Poligrafii ITE, Radom 2000.
- [186] Suchecki A.: Wpływ obróbki powierzchniowej tulei cylindrowej na parametry eksploatacyjne i ekologiczne doładowania silnika o zapłonie samoczynnym. Rozprawa doktorska. Politechnika Poznańska, Poznań 2009.
- [187] Technical Information. Recommendation for the specification of cast iron cylinder bore surfaces. MAHLE 7346 E m. XI.00.
- [188] Technical Information. Honing Machines and Honing Tools. Technical Data. Gehring Technologies GmbH, Ostfildern-info@gehring.de
- [189] Technical Information GKN Parts Division EPD 8278.
- [190] Technical Information MAHLE-Bore Coating Technologies Overview of Technologies and Trends .PCU Meeting, 16.12.2010.
- [191] Tomanik E.: Modelling of the Asperity Contact Area on Actual 3D Surfaces, SAE International 2005-01-1864.
- [192] Tomanik E.: Friction and wear bench tests of different engine liner surface finishes. Tribology International 41, 2008, p. 1032-1038.

- [193] Tricard M., Golini D.: High precision photomask polishing with magnetorheological finishing (MRF), Proceedings of the XVII ASPE Annual Meeting, 2002, p. 120-125.
- [194] Vickerstaff T.J.: Diamond dressing – its effect on work surface roughness. *Ind. Diamond Rev.*, 30, 1970, p. 260-267.
- [195] Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA) 19 Prüfung der Technischen Sauberkeit-Partikelverunreinigung funktions-relevanter Automobilteile – 1 Auflage 2004.
- [196] VDG-Merkblatt W50E: Gusseisen mit Vermiculargraphit.
- [197] Weigmann U.P.: Grundlagen des Honens und aktuelle Entwicklungen. 2. Honsymposium Nagel, 13–14.06.2005.
- [198] Weigmann U.P.: Neue Hontechniken in der Serienfertigung und in der Prototypenbearbeitung. 2. Honsymposium Nagel, 13–14.06.2005.
- [199] Weigmann U.P.: Rauchs- und Formmessung Normen, Messbedingungen, Auswertung. 2. Honsymposium Nagel, 13–14.06.2005.
- [200] Wieczorowski M.: Wykorzystanie analizy topograficznej w pomiarach nierówności powierzchni. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2009, s. 119-170, 227-229.
- [201] Wieczorowski M., Cellary A., Chajda J.: Przewodnik po pomiarach nierówności powierzchni, czyli o chropowatości i nie tylko. Politechnika Poznańska ZMiSP, Poznań 2003.
- [202] Westkämper E.: Entwicklungspotentiale des Honens, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik Technische Universität Braunschweig Qualität in der Fertigung HONEN in Forschung und industrieller Anwendung am 4–5.12.1989, s. 1-10.
- [203] Zhong M., Liu W., Zhang H.: Corrosion and wear resistance characteristics of NiCr coating by laser alloying with powder feeding on grey iron liner. *Wear* 260, 2006, p. 1349-1355.
- [204] Zylinderkomponenten, Eigenschaften, Anwendungen, Werkstoffe MAHLE GmbH (Hreg.), Stuttgart 2009, s. 97-127.

Abstract

The paper presents a synthesis of problems concerning the functional features of the surface layer structure of cylinder liner bearing surface which have an impact on reducing of oil consumption and solid particle emissions basing on an example of a diesel engine.

Based on analysis of current knowledge and personal research in the field of functional features of the surface layer structure of the cylinder liner bearing surface, it was found that the new environmental requirements for the solid particle emissions and oil consumptions determine some new directions of development not only for internal combustion engines but for cylinder liners as well. Therefore, it was found that in construction of cylinder liners there was a set of functional features which can be described with some well-defined parameters forming the basis for selection of specific technology for their production, and simultaneously, having a significant impact on the work of the internal combustion engine and oil consumption.

In order to solve this problem, a technological model for cylinder liner was elaborated on which the functional features were formed during the casting and machining process along with the methodology of research.

Based on the sizes and parameters describing the functional features, the personal studies were carried out for technical development trends of some new materials used in the construction of the cylinder liners and the development of processes that shape the geometrical structures of the cylinder liner bearing surfaces. Preliminary tests results allowed the testing of process capabilities in the industrial applications for some new grades of cast irons in the processes of their casting and machining. The results obtained from these studies formed the bases of verification of the assumptions for the model of technology and qualification of the cylinder liner for assembly of the new platform HDEP VOLVO engines.

These test results indicate the trends of technological development of new materials used in construction of the cylinder liners and some technological possibilities of shaping the geometrical structure of cylinder liner bearing surface layer in connection with the development of environmental requirements and related to the new designs of the internal combustion HDD/HDEP engines.