

О. В. Білогуб

ПОРШНІ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

О. В. Білогуб

ПОРШНІ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Навчальний посібник

Харків «ХАІ» 2024

УДК 621.43.001.24:539.4(075.8)

Б41

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. І. В. Парсаданов,
д-р техн. наук, проф. Є. В. Білоусов

Білогуб, О. В.

Б41 Поршні двигунів внутрішнього згоряння [Текст] : навч. посіб. /
О. В. Білогуб. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського
«Харків. авіац. ін-т», 2024. – 56 с.

ISBN 978-966-662-922-0

Розглянуто конструкції поршнів і поршневих комплектів для авіаційних ДВЗ, навантаження, що діють у процесі роботи, розрахунок на міцність поршня методом скінченних елементів.

Для студентів спеціальності 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка» спеціалізацій «Авіаційні двигуни і енергетичні установки», «Проектування, експлуатація, діагностика, технічне обслуговування та ремонт авіаційних двигунів та енергетичних установок». Може бути корисним під час курсового й дипломного проектування.

Іл. 48. Табл. 5. Бібліогр.: 14 назв

УДК 621.43.001.24:539.4(075.8)

© Білогуб О. В., 2024

© Національний аерокосмічний
університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», 2024

ISBN 978-966-662-922-0

1. УМОВИ РОБОТИ ПОРШНІВ І ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО НИХ

Поршень двигуна внутрішнього згоряння призначено для передавання сил від тиску газів через палець і шатун на колінчастий вал, а також для забезпечення герметизації циліндра, об'єм якого змінюється.

На рис. 1, а показано основні означення конструкційних елементів поршня, на рис. 1, б – основні силові й термічні навантаження на поршень. Тепловий потік при згорянні палива діє на поверхні поршня й камери згоряння. Тепло від поршня відводиться по всіх інших поверхнях. На сталих режимах роботи температурне поле поршня є незмінним.

Силові навантаження на поршень складаються з навантажень від тиску газів, прискорення, реакцій від дії поршневого пальця й циліндра.

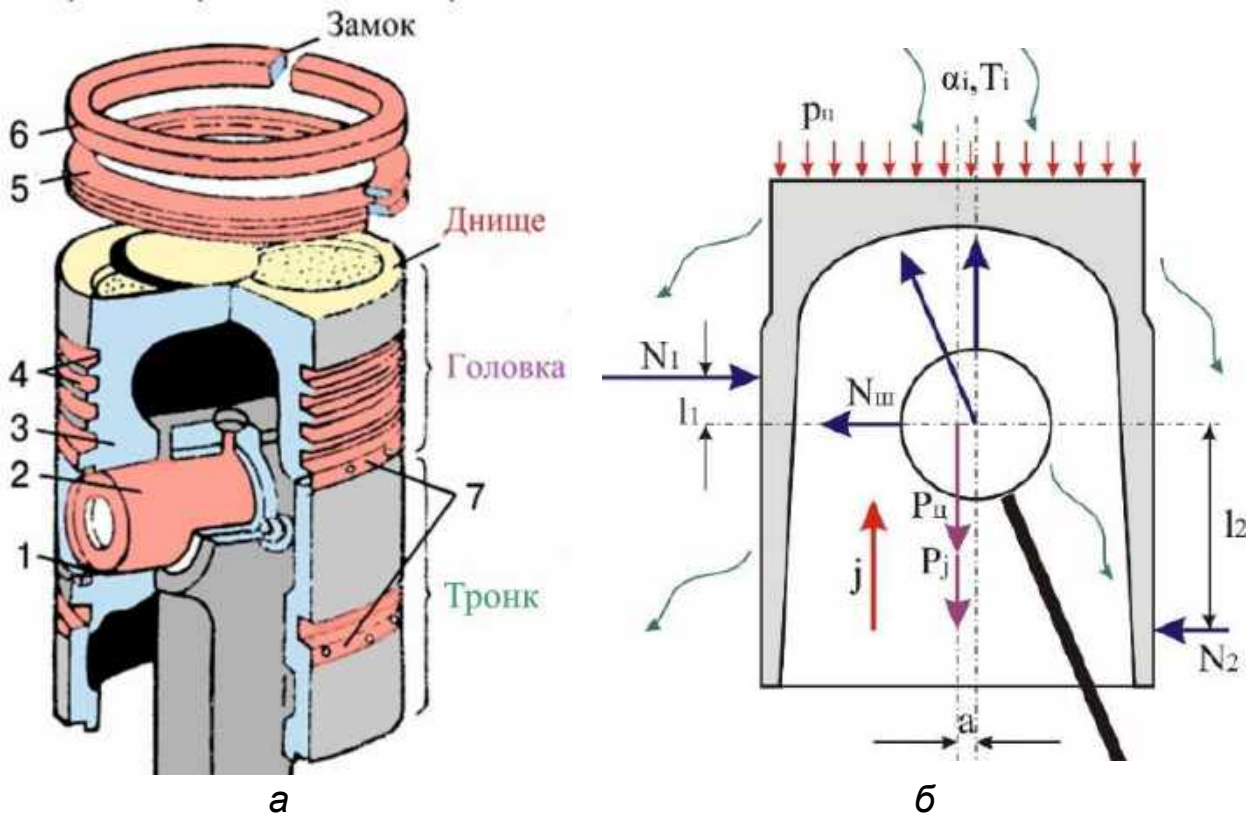


Рис. 1. Основні конструкційні елементи поршня (а) і навантаження на поршень (б): 1 – стопорне кільце; 2 – палець; 3 – бобишка; 4 – канавки для компресійних кілець; 5 – маслоснімальні кільця; 6 – компресійні кільця; 7 – канавки для маслоснімальних кілець; p_u – тиск газів у циліндрі; α_i, T_i – умови теплообміну по поверхнях поршня; j – прискорення поршня; P_u, P_j – сили тиску й інерції, що діють на палець і шатун; $N_1, N_2, N_{ш}$ – реакції на поршень від дії циліндра й пальця відповідно

Герметизація циліндра є необхідною з двох причин:

- витікання газів з циліндра в порожнину картера знижує енергетичну й економічну ефективність двигуна, збільшує нагрівання поршня й температуру в картері, що є абсолютно неприпустимим;
- поршень має запобігати проникненню моторного масла з порожнини картера в камеру згоряння, оскільки масло, що потрапило в циліндр,

не згоряє й викидається разом з відпрацьованими газами (збільшується його витрата); крім того, потрапляння великої кількості моторного масла в камеру згорання спричиняє посилене нагароутворення й ускладнює роботу свічок або форсунок дизельних двигунів.

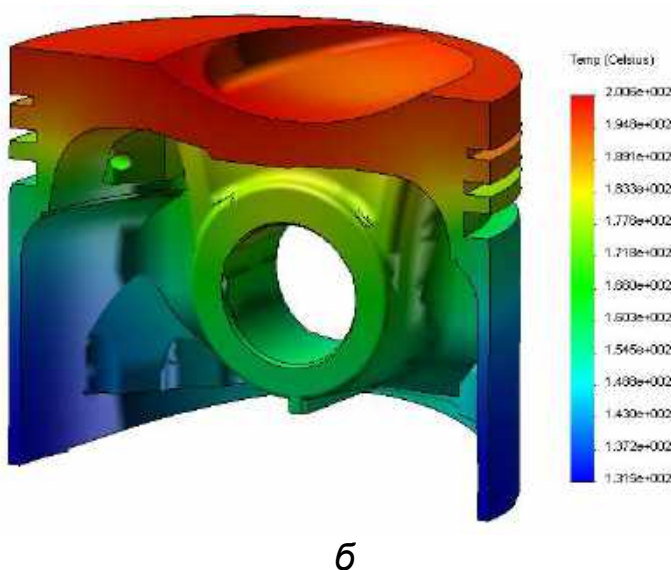
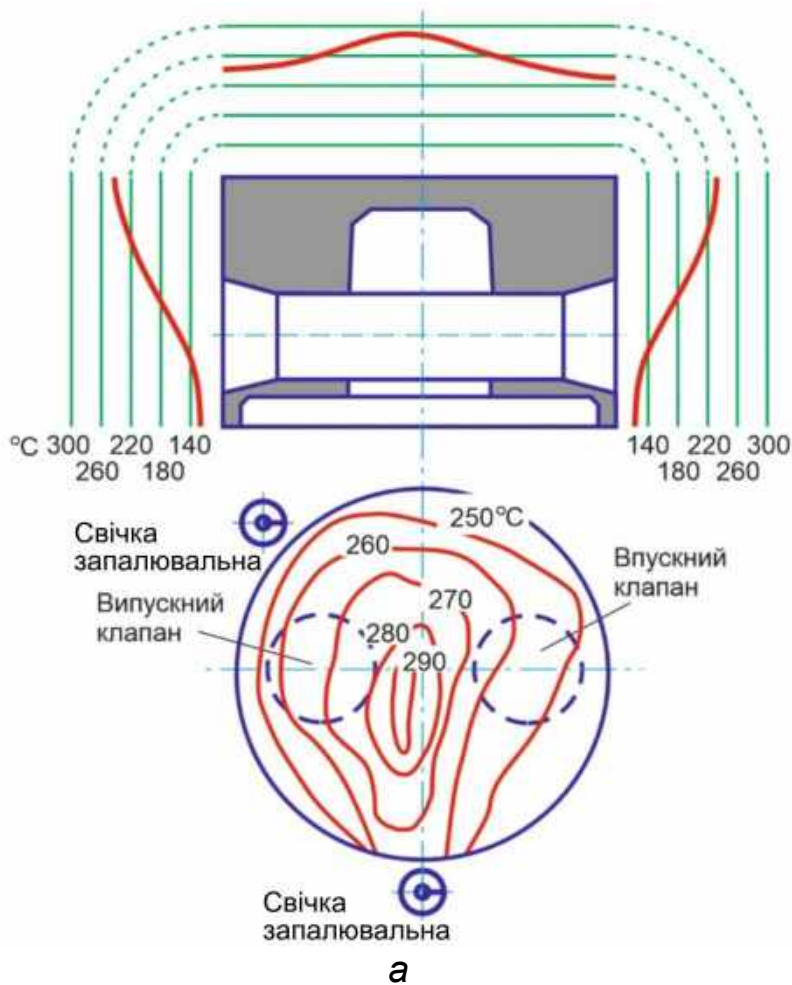


Рис. 2. Розподіл температур по поверхні поршня: а – поршень авіаційного двигуна; б – автомобільний поршень

Під час роботи поршень інтенсивно нагрівається від розігрітих газів, з якими він безпосередньо стикається. Охолодження поршня є утрудненим, оскільки поршень відокремлюється від стінок циліндра шаром моторного масла і внаслідок того, що має менший діаметр, стикається із дзеркалом циліндра лише частиною бічної поверхні. Через труднощі охолодження робоча температура поршня є значно вищою, ніж циліндра, і може становити понад 300 °C. Приклад розподілу температур (результати експерименту) поршня двигуна АШ-62 показано на рис. 2, а. На рис. 2, б показано модельну ідентифікацію результатів дослідження температури автомобільного поршня методом вживлених алмазів. Максимальна температура на поверхні камери згорання становить 270 °C.

Крім теплових навантажень поршень зазнає впливу тиску газів і сил інерції (див. рис. 1). Під час передавання цих сил на шатун виникає додаткова сила N , що діє по нормалі до стінки циліндра і спричиняє зношення бічної

поверхні поршня й збільшення механічних втрат на подолання сил тертя.

До конструкції поршня (поршневого комплекту) ставляться такі вимоги:

- утворення форми камери згоряння;
- надійне ущільнення внутрішньої порожнини циліндра;
- достатня міцність і жорсткість при наявних навантаженнях; належне відведення тепла, що забезпечує допустимі температури поршня;
- відсутність перетікання моторного масла з картера в робочу порожнину циліндра;
- малий знос тертьових поверхонь;
- мінімально можливе тертя поршня об стінки циліндра; мінімальна маса, що зменшує силу інерції поршня, яка залежить від квадрата кутової швидкості і в швидкохідних двигунах може набувати значних величин, порівнянних з навантаженням від газових сил.

Задовольнити всі ці вимоги дуже важко, оскільки деякі з них суперечать одна одній. Тому в багатьох випадках поршень працює на межі допустимих для нього теплових або механічних навантажень, що обмежує термін експлуатації та можливість подальшого форсування двигуна.

Вузол поршня складається з поршня, поршневих кілець і пальця поршня. Поршень являє собою умовно циліндричний стакан з масивним днищем плоскої, увігнутої або опуклої форми. Бокова стінка поршня складається з двох частин, що виконують різні функції й працюють у різних умовах. Верхня частина, або верхній пояс, примикає до днища поршня й має канавки для поршневих кілець. Цю частину бічної поверхні, яка під час роботи двигуна найбільше нагрівається, призначено для відведення тепла від днища поршня в стінки циліндра й передавання сил газів від днища до пальця поршня, розташованого в бобишках, з'єднаних з бічними стінками і безпосередньо з самим днищем.

Нижню частину бічної стінки поршня, тобто нижній пояс (тронк) поршня, призначено головним чином для передавання сили на стінку циліндра, отже, під час руху поршня тронк працює на знос. Робоча температура тронка поршня є значно меншою від температури верхнього пояса.

Для зменшення маси поршня його висоту бажано, якщо можливо, зменшити, проте з її зменшенням питомі навантаження на бічну поверхню поршня збільшуються, унаслідок чого прискорюється зношення поршня. У зв'язку з цим висота поршня змінюється залежно від вимог до двигуна, але існує тенденція до її зменшення. Зменшити масу поршня можна шляхом застосування алюмінієвих сплавів, які, маючи більші коефіцієнти теплопередачі, водночас забезпечують нижчі температури поршня.

Робоча температура та коефіцієнт лінійного розширення матеріалу поршня приблизно вдвічі більші, ніж сталевій або чавунній гільзі циліндра. Величину зазора між поршнем і циліндром вибирають з таким розрахунком, щоб не відбувалося заїдання поршня при роботі двигуна.

Перше компресійне кільце поршня працює у найскладніших умовах. На подолання сил тертя поршневих кілець припадає 40...50 % (іноді до

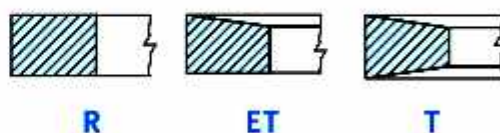
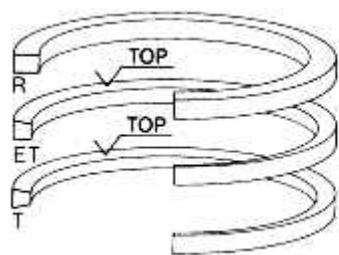
60 %) усіх механічних втрат у двигуні. У разі трикільцевої схеми витрати енергії на тертя першого кільця становлять 60 %, другого – 30 %, третього – 10 %.

Прориву робочих газів у картер можна запобігти шляхом встановлення у верхньому поясі поршня поршневих ущільнювальних або компресійних кілець. Ці кільця в одному місці розрізані (розріз називають замком) та у вільному стані мають діаметральний розмір, більший за внутрішній діаметр циліндра.

Застосовувані форми профілів поршневих кілець показано на рис. 3 (https://www.ms-motorservice.com/MediaAssets/1809302_ks_50003941_web.pdf). Кільце, заведене в кільцеву канавку поршня й поміщене разом з поршнем у циліндр, перебуває в стисненому стані, і його бічна поверхня силами пружності й тиску газів притискається до дзеркала циліндра. Епюра (діаграма розподілу) тисків кільця на стінку циліндра по колу залежить від форми кільця у вільному стані й розмірів його перерізу. Форму кільця у вільному стані розраховують так, щоб епюра тиску була рівномірною.

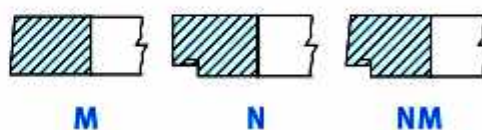
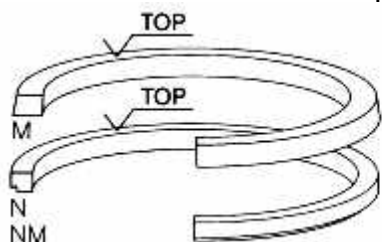
Для того щоб кільце щільно прилягало до циліндра по всьому колу (незважаючи на можливі невеликі відхилення від правильної форми під час виготовлення), застосовується припрацювання кільця в процесі роботи двигуна з невеликим навантаженням, коли прорив газів є менш можливим і небезпечним. Припрацювання триває протягом кількох годин, причому для зменшення тривалості форму робочої (бічної) поверхні ущільнювальних кілець роблять іноді не циліндричною, а конічною (з кутом конуса $0,5^{\circ} \dots 2^{\circ}$). Місцем, у якому можливий прорив газів, – замок кільця. Для усунення або зменшення прориву газів на кожен поршень встановлюється зазвичай не менше двох кілець, замки яких розташовуються в різних місцях по колу поршня. Завдяки щільному приляганню до стінок циліндра кільця є основними провідниками тепла від поршня до циліндра. За відсутності охолодження поршня (моторним маслом) через компресійні кільця проходить до 70 % теплоти, що втрачається поршнем.

Запобігаючи витоку газів з робочої порожнини циліндра, компресійні кільця, однак, погано перешкоджають проникненню в циліндр моторного масла. Причина цього полягає в тому, що моторне масло, яке покриває дзеркало циліндра, при низхідному ході поршня (від ВМТ до НМТ) заповнює торцевий зазор між канавкою для поршневого кільця і поршневим кільцем, а при переміщенні кільця до нижньої кромки канавки масло видавлюється й перетікає в бік камери згоряння (рис. 4). Таким чином, ущільнювальне кільце поршня працює як насос, перекачуючи масло в робочу порожнину циліндра. Крім того, тиск компресійних кілець на стінку циліндра, обумовлений їх силою пружності, є недостатнім для хорошого очищення стінок циліндра від моторного масла. Для зменшення потрапляння моторного масла в робочу порожнину циліндра на поршні встановлюються кільця спеціальної конструкції, які називають маслоснімальними.



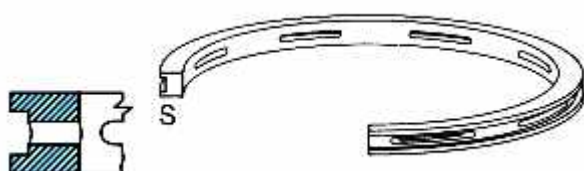
а

R – циліндричне компресійне поршневе кільце, ET – поршневе кільце з поперечним перерізом у формі односторонньої трапеції, Т – поршневе кільце з поперечним перерізом у формі трапеції



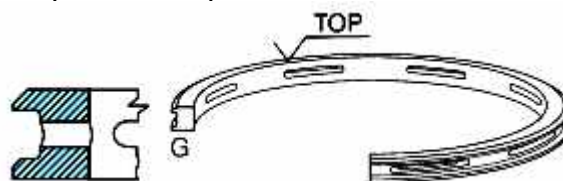
б

М – конічне компресійне поршневе кільце, N – скребкове компресійне поршневе кільце, NM – конічне скребкове компресійне поршневе кільце



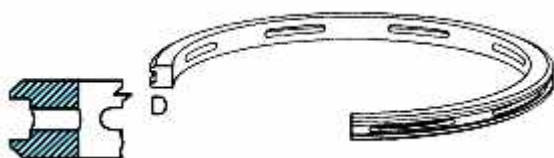
в

S – маслознімальне поршневе коробчасте кільце з прорізами



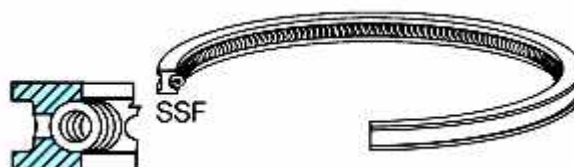
г

G – маслознімальне коробчасте поршневе кільце з паралельними фасками



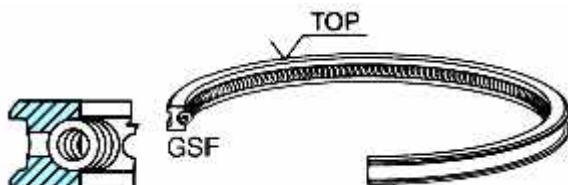
д

D – маслознімальне коробчасте поршневе кільце зі збіжними фасками



е

SSF – маслознімальне кільце з прорізами та зі спіральним крученим пружинним розширювачем



ж

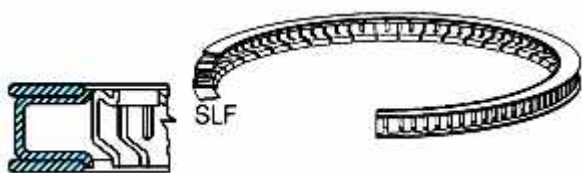
GSF – маслознімальне коробчасте поршневе кільце з паралельними фасками та з пружинним крученим розширювачем



и

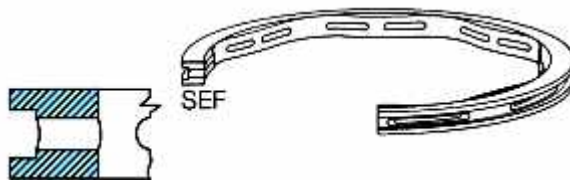
DSF – маслознімальне коробчасте поршневе кільце зі збіжними фасками та зі спіральним крученим пружинним розширювачем

Рис. 3. Форми та перерізи компресійних (а, б) і маслознімальних (в–л) кілець



К

SLF – маслоснімальне пружинне кільце зі сталевими пластинками



Л

SEF – маслоснімальне поршневе коробчасте кільце з прорізами та пружиною-розширювачем

Рис. 3. Закінчення

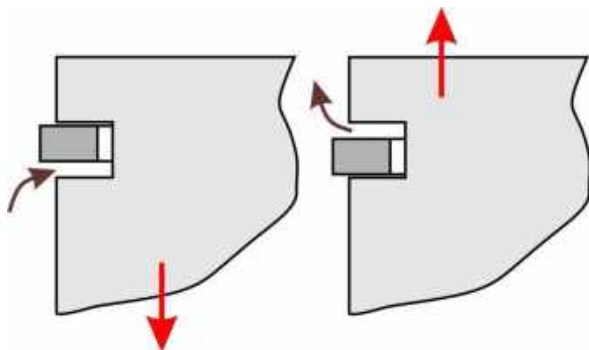


Рис. 4. Схема перетікання моторного масла через ущільнювальні кільця (помпова дія кільця)

Маслоснімальні кільця (див. рис. 3, в–л) мають такі особливості:

1. Кільце притискається до стінки циліндра не по всій його висоті, тобто не по всій поверхні, що відповідає повній висоті кільця. Зменшення опорної поверхні найчастіше здійснюється зняттям кругової фаски або проточуванням кільцевої канавки зовнішньої поверхні кільця. Останнім часом застосовуються сталеві маслоснімальні кі-

льця, що мають незначну власну пружність. Притискання кільця до дзеркала циліндра забезпечується спеціальними пружинами. Зменшення опорної поверхні кільця при незначній зміні пружності збільшує тиск кільця на стінки циліндра, завдяки чому очищення стінок циліндра від моторного масла стає більш досконалим.

2. Для зменшення насосної дії кільця зазори між маслоснімальними кільцем і канавкою поршня роблять меншими, ніж для ущільнювальних кілець. Можливість зменшення зазорів пояснюється установленням маслоснімальних кілець у місцях з нижчою температурою, ніж у зоні розташування ущільнювальних кілець.

3. У самому маслоснімальному кільці (див. рис. 3) і в канавці для його встановлення можуть бути отвори. Нижче кільця в стінці поршня проточується інша невелика кільцева канавка, біля якої також є отвори. Усі ці отвори призначено для видалення моторного масла зі стінок циліндра в картер, завдяки чому тиск масла в канавці різко зменшується, а кількість моторного масла, що потрапляє в робочу порожнину циліндра, зменшується.

Широко застосовуються різні покриття поршневих кілець – хромування, фосфатування тощо.

У поршнях сучасної конструкції зазвичай встановлюють два-три компресійні кільця й одне (рідко більше) маслоснімальне. Загальна кількість кілець становить 3–4. У старих конструкціях кількість кілець становила 6 і навіть більше.

Кільця виготовляються із сірого й високоміцного чавуну або легованої сталі типу 4Х5Ф1С.

Палець поршня призначено для зв'язку поршня з шатуном. Кінці пальця опираються на бобишки поршня, а середня його частина знаходиться у втулці, розташованій у верхній головці шатуна. При роботі двигуна сила, що діє по осі циліндра, спричиняє в пальці напруження вигину та зрізу. Крім того, унаслідок обертання головки шатуна відносно пальця або пальця відносно бобишок поршня поверхня пальця зношується.

Застосовуються два способи встановлення пальця в поршні:

а) установлення пальця, що плаває й обертається як у бобишках поршня, так і у верхній головці шатуна;

б) установлення фіксованого пальця, закріпленого в бобишках поршня або у верхній головці шатуна.

Нині застосовується палець, що плаває, оскільки при цьому зношування опорних поверхонь бобишок втулки у верхній головці шатуна й самого пальця відбувається більш рівномірно. Однак палець, що плаває, може вільно переміщатися в осьовому напрямку і, маючи велику твердість, спричинити місцевий знос або задирку дзеркала циліндра. Тому осьові переміщення пальця, що плаває, обмежують або за допомогою спеціальних заглушок з м'якого (алюмінієвого) сплаву (див. рис. 6), або за допомогою стопорних кілець, що вставляються в проточки, зроблені в бобишках поршня в кінці поршневого пальця (див. рис. 8). Для зменшення маси пальців їх виконують порожнистими. При цьому отвір у пальці роблять іноді таким, що зменшується до його середини, унаслідок чого форма пальця наближується до форми балки з таким самим опором згину. Для зменшення зношування пальці зазвичай цементуються або азотуються.

Запитання для самоконтролю

1. З яких частин складається поршень?
2. Які навантаження діють на поршень?
3. Що таке помпова дія кільця?
4. У яких конструкціях установлюються компресійні й маслоснімальні кільця?

2. ЗАЗОРИ Й ПОВЕРХНЯ ПОРШНЯ

Діаметральні зазори між поршнем і гільзою циліндра. Унаслідок великих робочих температур поршня порівняно з гільзою циліндра, а також через більш високий коефіцієнт лінійного розширення матеріалу поршня порівняно з матеріалом гільзи зазор між поршнем і гільзою в гарячому двигуні є значно меншим, ніж в холодному.

Так, для двигуна з діаметром циліндра 150 мм при середньому нагріванні поршня (у верхньому поясі) на 260 °С і гільзи циліндра на 140 °С зміна зазору становитиме близько 0,7 мм. Тому в робочому стані діаметральний зазор між поршнем і циліндром роблять таким, щоб під час роботи двигуна поршень переміщувався в циліндрі без заїдання. Однак цей зазор

не має бути великим, тому що в цьому випадку зменшується поверхня зіткнення тронка поршня з циліндром, що призводить до збільшення питомого тиску на тронку і погіршення умов змащування. Крім того, посилюється ударний характер навантаження на поршень, оскільки удари відбуваються в ті моменти, коли напрямок бічної сили N змінюється. Оскільки верхня частина поршня нагрівається сильніше, ніж нижня, діаметральний зазор для верхнього пояса встановлюється більшим, ніж для нижнього. Діаметральний зазор зазвичай визначається двома граничними значеннями – максимальним і мінімальним. У табл. 1 наведено значення діаметральних зазорів між поршнем і циліндром для деяких двигунів.

Таблиця 1

Зазори «поршень – циліндр»

Діаметральний зазор, мм	Двигуни рідинного охолодження			Двигун повітряно- го охолодження АИ-14
	ВК-105	MAN D0826	ROTAX-582	
У верхньому поясі тронка	0,96...1,05	-	0,06...0,08	0,96...1,05
У нижньому поясі тронка	0,53...0,64	0,130...0,364	0,09...0,12	0,53...0,64

Через зношення третюх поверхонь зазор під час експлуатації двигуна збільшується, тому встановлюються певні норми (індивідуальні для кожного типу двигуна) для максимально допустимих зазорів в експлуатаційних умовах. Зазвичай під час складання двигуна після ремонту або огляду в експлуатації гранично допустима величина діаметральних зазорів між поршнем і циліндром устанавлюється на 0,1...0,2 мм більшою, ніж для нових двигунів.

Зазори в поршневих кільцях і пальці. Монтажний зазор по висоті між канавкою і верхнім компресійним кільцем змінюється в межах від 0,09 до 0,15 мм. Інші компресійні кільця, що працюють при більш низьких температурах, фіксуються з дещо меншим зазором (0,05...0,10 мм). Маслознімальні кільця встановлюються у відносно холодних поясах поршня, тому величина зазору цих кілець береться значно меншою і в середньому дорівнює 0,04...0,08 мм. Зазор між поршнеvim пальцем, що плаває, і верхньою головою шатуна дорівнює 0,04...0,06 мм. При цьому допускається його збільшення в експлуатації (унаслідок зношування третюх поверхонь) приблизно до 0,08 мм. Посадка пальця в бобишки поршня зазвичай проводиться з меншим зазором (0...0,02 мм) при кімнатній температурі (сама посадка здійснюється при штучно нагрітому поршні). У робочих умовах цей зазор унаслідок нагрівання поршня збільшується і стає приблизно таким самим, як і зазор у верхній головці шатуна. Правильний зазор у зчленуваннях регламентується жорсткими допусками на всі основні розміри поршневої групи. На рис. 5 зображено розміри поршня фірми ALKAN для двигуна MAN D0826. Бачимо, що допуск на розмір тронка в найширшому місці становить 19 мкм, діаметр отворів під палець – 6 мкм, відстань від днища до осі пальця – 50 мкм.

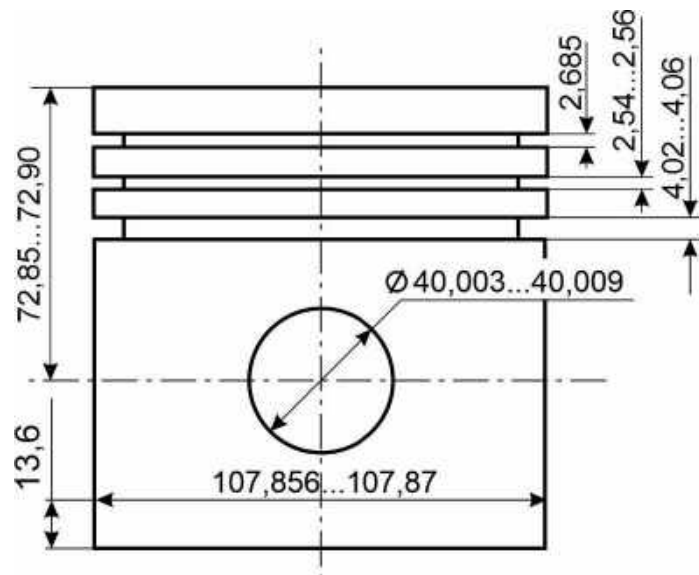


Рис. 5. Розміри поршня фірми ALKAN

На рис. 6 показано профіль (відхилення від циліндра номінального діаметра) сучасного автомобільного поршня $\varnothing 90$, на якому видно, що для компенсації деформацій від теплових і силових навантажень його поверхня не може бути строго циліндричною. Для цього поршня максимальне відхилення – 1300 мкм (по головці), максимальна еліптичність – близько 600 мкм. Зрозуміло, що для кожної конкретної конструкції має бути власний профіль.

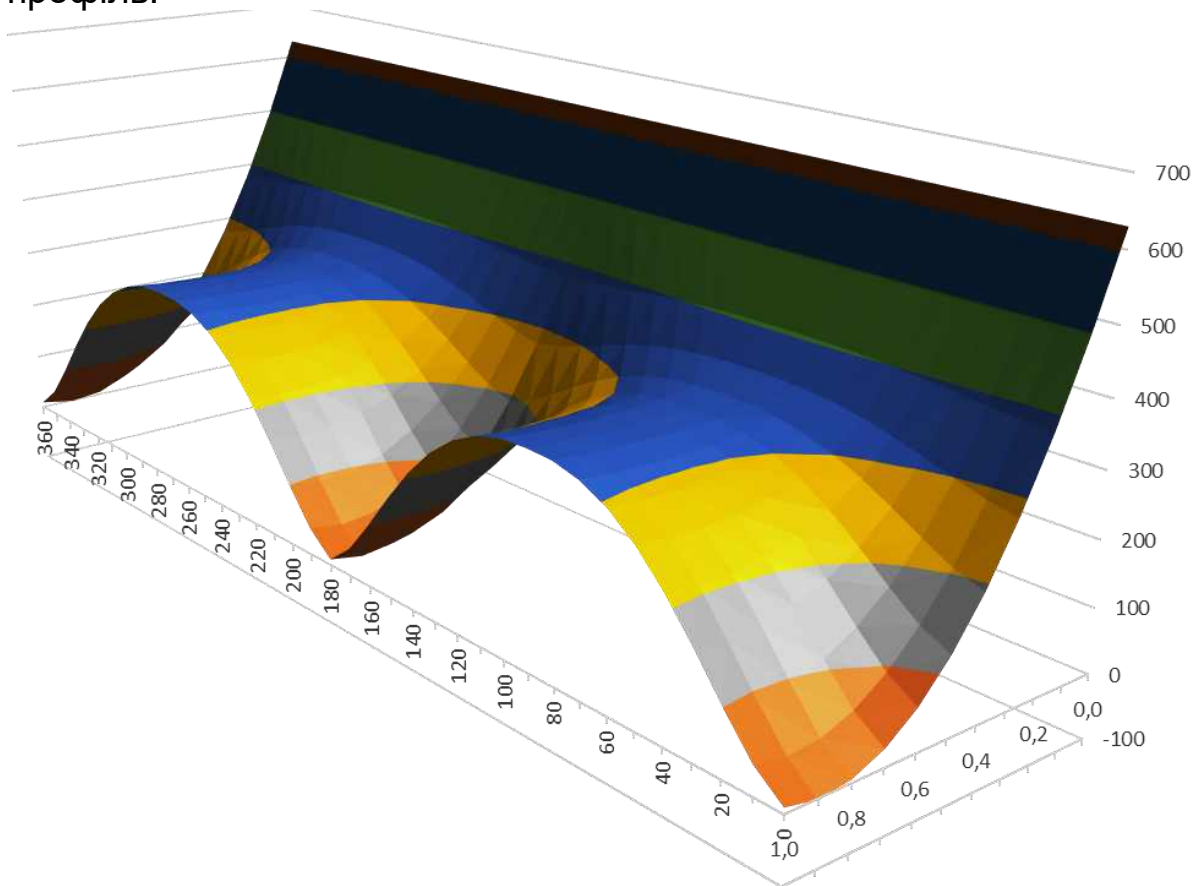


Рис. 6. Профіль бічної поверхні (розгортка) автомобільного поршня (вісь пальця проходить через 0 і 180, висота поршня показана відносно від 0 до 1)

Запитання для самоконтролю

1. Які зазори мають бути у зчленуваннях поршня і кілець?
2. Чому профіль поршня залежить від умов навантаження та конструкції поршня?

3. ПРИКЛАДИ КОНСТРУКЦІЙ ПОРШНІВ

3.1. Поршень двигуна АМ-42

Поршень двигуна АМ-42 (рис. 7) виготовлений із алюмінієвого сплаву АК-4. Днище поршня із зовнішнього боку є плоским, із внутрішнього боку – сферичним, сильно оребренным. Ребра, що перехрещуються, утворюють вафельну поверхню, що збільшує міцність днища. Нижня частина поршня (робоча поверхня) має циліндричну форму, верхня (зайнята компресійними кільцями) – конічну. Проточку верхньої частини поршня на конус передбачено через різне (по висоті поршня) збільшення діаметра поршня під час роботи, оскільки температура поршня по його висоті різко збільшується в міру наближення до камери згоряння. Нижній пояс поршня (нижче маслоснімального кільця) по всьому колу є циліндричним. На неробочих поверхнях поршня біля отворів під поршневі пальці зроблено виїмки для зменшення маси. В одній виїмці ставиться номер двигуна, в іншій – номер циліндра. Над поршневим пальцем проточено п'ять канавок для поршневих кілець. Висота канавок є різною, більшу висоту мають канавки, розташовані ближче до днища поршня. Різна висота канавок дає змогу виготовляти всі кільця однакової товщини, що полегшує виготовлення кілець при постійних зазорах між кільцями і канавками. Три нижні канавки (якщо відлічувати від отвору під палець) мають однакову висоту.

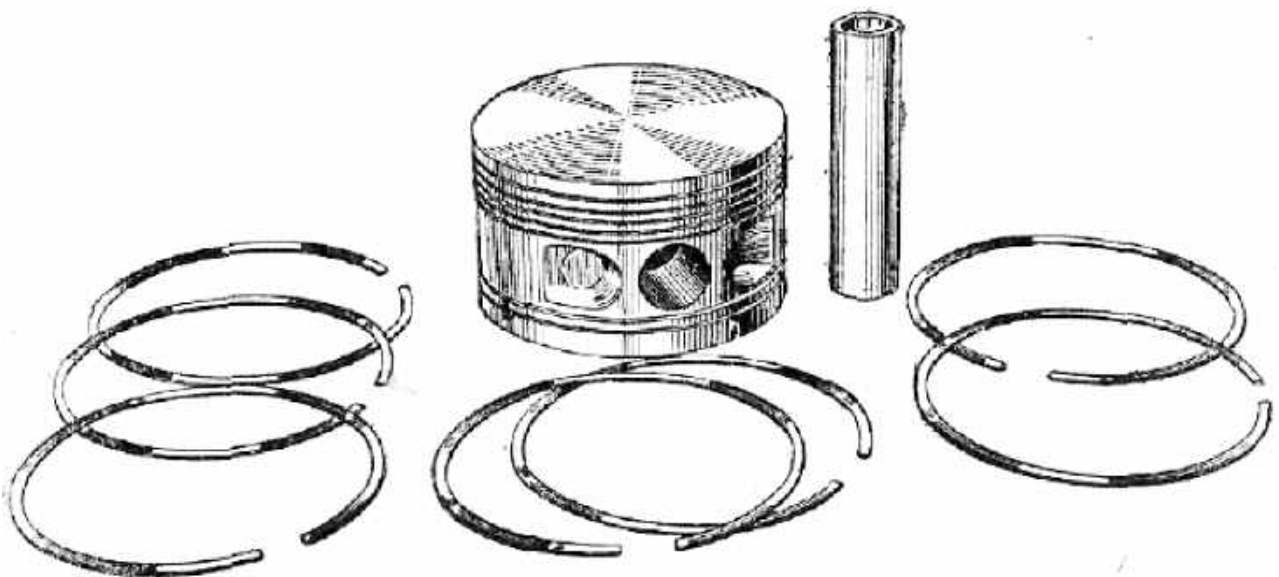


Рис. 7. Деталі вузла поршня АМ-42

Нижче отвору під палець зроблено одну широку канавку для маслоснімачних кілець. У канавці для цих кілець просвердлено 10 радіальних отворів для зливання моторного масла. Неглибоку канавку з 12 радіальними просвердлинами, що розташовується нижче маслоснімачних кілець, призначено для відведення масла, що накопичується перед маслоснімачними кільцями.

У канавці маслоснімачних кілець зроблено отвір для бронзового стопора. Стопор перешкоджає обертанню кілець. При стопорінні маслоснімачні кільця краще припрацьовуються, і видалення масла покращується. Стопор має на кінці розріз, після запресування кінці розрізу розводяться, що запобігає випаданню стопора.

Верхнє ущільнювальне кільце має циліндричну форму (див. рис. 3, тип R) по зовнішньому діаметру, а інші ущільнювальні кільця для полегшення припрацювання обточено по зовнішньому діаметру на конус з кутом 2° і вершиною, поверненою вгору (див. рис. 3, тип M).

Маслоснімачні кільця для кращого очищення стінок циліндра від моторного масла в перерізі мають форму скребка (див. рис. 3, тип N).

Дві бобишки поршня є опорою для пальця, що плаває. Змащування опор пальця забезпечується отворами, що виходять у канавку біля маслоснімачних кілець (по два отвори на кожну опору). З зовнішнього боку палець цементується, шліфується й полірується, з внутрішнього – полірується для видалення рисок, через наявність яких зменшується міцність. Для запобігання поздовжнім переміщенням палець фіксується алюмінієвими заглушками, вставленими в циліндричні виточки на кінцях пальця. Сферичною поверхнею заглушки ковзають по робочій поверхні циліндра.

3.2. Поршень двигуна ВК-105

Поршень двигуна ВК-105 (рис. 8) виготовлено штампуванням з алюмінієвого сплаву. Поршень має плоске днище, його бічну поверхню виконано у верхній частині конічною з діаметром, що зменшується вгору з урахуванням можливого розширення поршня при розігріванні. У середній частині бічна поверхня поршня має овальну форму більшого розміру перпендикулярно до осі пальця, і меншого – уздовж осі пальця. Така форма бічної поверхні поршнів застосовується для того, щоб обмежити тертя тієї частини поверхні поршня, що не сприймає навантажень від бічних сил.

У верхньому поясі поршня зроблено чотири канавки для шести поршневих кілець: у двох верхніх канавках розташовуються два ущільнювальні кільця, а в двох нижніх – чотири маслоснімачні (по два в кожній канавці). Робоча поверхня верхнього ущільнювального кільця має циліндричну форму, а нижнього – конічну (див. рис. 3, типи R і M відповідно). Маслоснімачні кільця (див. рис. 3, типи N і NM) у нижньому торці мають фрезеровані лунки. У кожній із двох канавок для маслоснімачних кілець зроблено просвердлини для відведення моторного масла всередину поршня. Поздовжні переміщення поршневого пальця обмежуються двома заглушками. Для змащення поршневого пальця на робочих поверхнях бобишок поршня передбачено спеціальні масляні канавки.

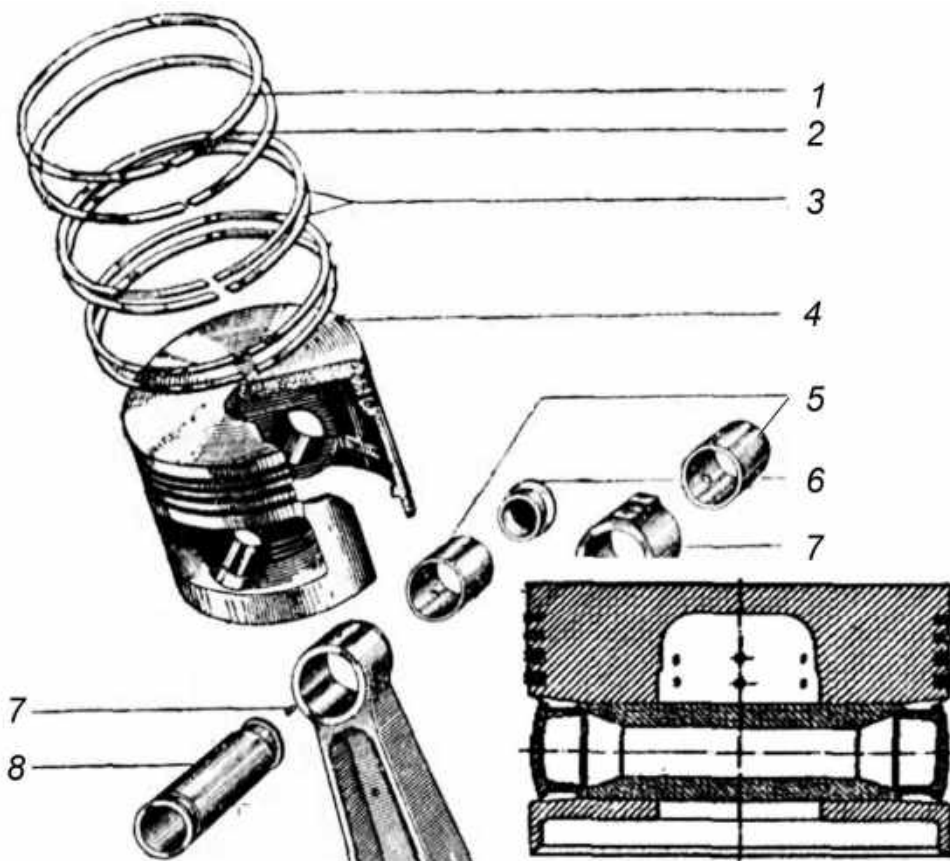


Рис. 8. Поршнева група двигуна ВК-105: 1, 2 – компресійні кільця; 3 – маслоснімальні кільця; 4 – поршень; 5 – вкладиші верхніх головок шатунів; 6 – заглушка пальця; 7 – верхні головки шатуна; 8 – поршковий палець

3.3. Поршень двигуна АШ-82

Поршень двигуна АШ-82 (рис. 9), виготовлений штампуванням з алюмінієвого сплаву, має плоске днище, сильно оребрене з внутрішнього боку. Бобишки поршня безпосередньо з'єднані з днищем. У верхній частині поршня проточено чотири канавки, а в нижній – одна. У трьох верхніх канавках розташовуються три ущільнювальні кільця (рис. 3, типи R, M і M), у четвертій канавці – два маслоснімальні (рис. 3, тип NM), у нижній канавці (під пальцем) – ще одне маслоснімальне кільце (див. рис. 3, тип NM). Маслоснімальні кільця в перерізі мають форму скребка. При цьому верхні маслоснімальні кільця повернуті скребками вниз, а нижнє кільце – уверх (див. рис. 8). Таке положення нижнього маслоснімального кільця забезпечує постійну циркуляцію моторного масла в тронку поршня на ділянці між маслоснімальними кільцями, унаслідок чого зменшуються тертя та зношення поршня й гільзи циліндра. Для запобігання поздовжньому переміщенню пальця поршня призначено два стопорні пружні кільця прямокутного перерізу, які встановлюються у відповідні проточки на кінцях бобишок. На днищі поршня з боку камери згоряння вифрезеровано западини («кармани»), щоб поршень не ударявся об грибки клапанів під час їх відкриття.

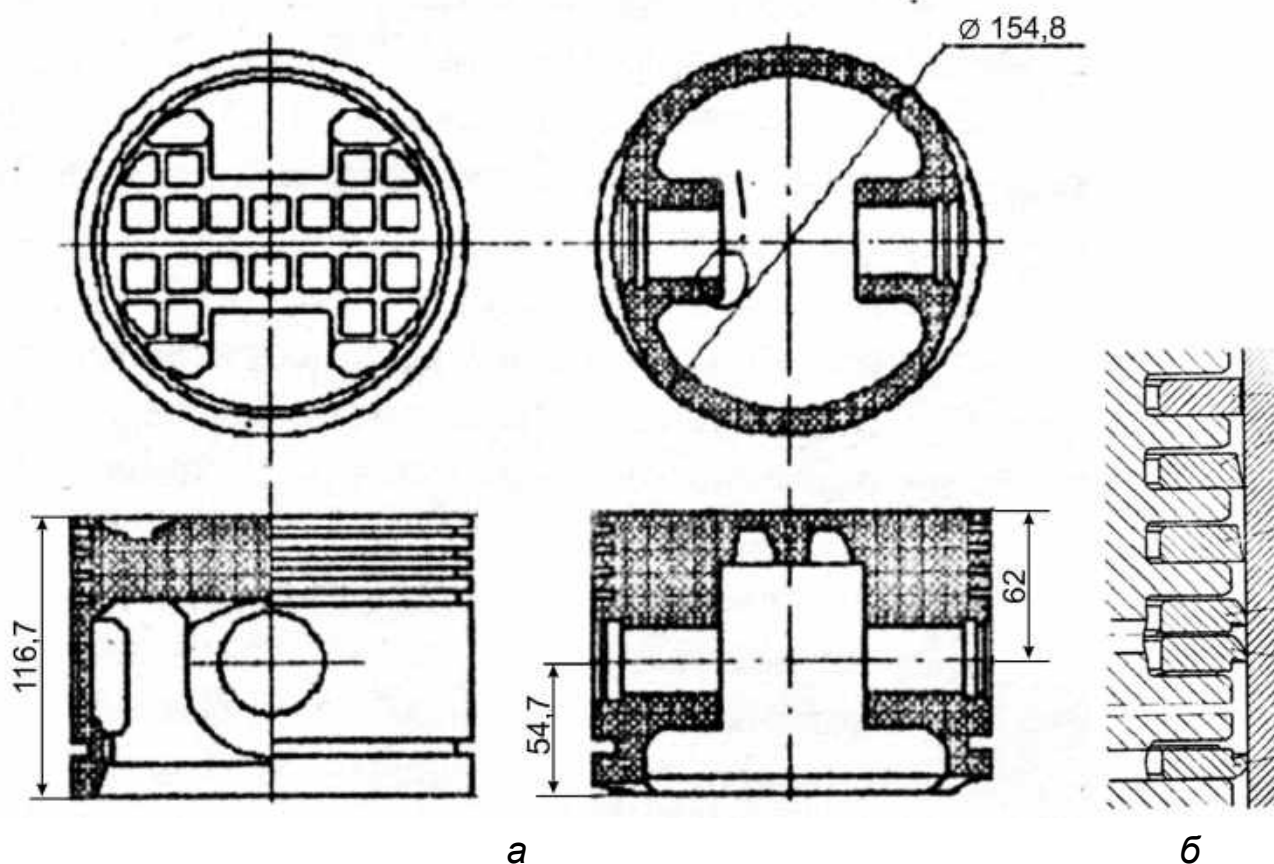


Рис. 9. Поршень двигуна АШ-82:
а – поршень; б – схема встановлення кілець

3.4. Поршень двигуна 6ТД

Поршень двигуна 6ТД (рис. 10–13) розглядається в цьому навчальному посібнику, тому що двигун 6ТД відповідає більшості вимог, що ставляться до авіаційних силових установок. У 30-ті роки в Німеччині успішно експлуатувався авіаційний двигун фірми «Юнкерс» УМО-207 з поршнем аналогічної конструкції. Двигуни цього типу є двотактними і мають середню температуру циклу, значно вищу, ніж чотиритактні.

Для забезпечення більшої надійності цей поршень виконано складеним. Корпус 2 виготовлено штампуванням із алюмінієвого сплаву АК4-1. Бічна поверхня корпусу поршня – бочкоподібної форми по висоті й овальної форми в поперечному перерізі. У процесі роботи під дією температури корпус поршня набуває циліндричної форми. На бічних поверхнях впускних і випускних поршнів (див. рис. 10) виконано мікрорельєфи: на впускних поршнях – у вигляді сітки 1 для збільшення маслостійкості; на випускних поршнях як більш теплонапружених – у вигляді проточок 2 для більш значного збільшення маслостійкості та зниження внаслідок цього температури поршня.

Опорами пальця в корпусі поршня є запресовані сталеві азотовані втулки 7 (див. рис. 12), які фіксуються від провороту штифтами 13. На корпусі поршня напресовано сталевий кільцетримач 30 для двох ущільнювальних кілець 28 і 29 і вставку 3, що центрує накладку 1 і проставку 5. Нижче від отвору для пальця поршня виконано три канавки: верхня – для встановлення додаткового ущільнювального кільця 28, дві інші – для встановлення маслоснімального кільця 14.

Накладка 1 є тепловим бар'єром, що запобігає перегріванню алюмінієвого корпусу поршня. Накладку виготовлено зі сталі 20Х25Н20С2 (ЕІ283) із термодифузійним хромуванням поверхні камери згоряння. Заглибини в накладці поршнів, що рухаються в протилежних напрямках, утворюють камеру згоряння. Для вільного проходження струменів палива від форсунок на верхніх торцях накладок є чотири заглибини. У накладку запресовано стяжні болти 25. Для компенсації температурних деформацій накладки й корпусу поршня болти попарно стягуються через пружини 24 типу ресори гайками 22, які стопоряться обтисненням їх циліндричних поясів на квадратних хвостовиках болтів. Порожнини отворів під болти в корпусі поршня ущільнюються з допомогою фторопластових кілець, що підтискаються при затягуванні болтів шайбами 26, а перекося болтів, що виникають при деформаціях накладки й корпусу поршня, усуваються сферичними шайбами 23. Проставку, що є опорою для полиці жарового кільця 6, призначено для зменшення теплового потоку від накладки до корпусу поршня. Проставки виготовляють зі сталі 40Х10С2М (ЕІ107). Жарове кільце у поєднанні з двома верхніми ущільнювальними кільцями забезпечує герметичність камери згоряння. Тонкостінне жарове кільце, виконане нерозрізним, забезпечує чітке відкриття й закриття впускних і випускних вікон циліндра. Усі поршневі кільця виготовляються зі сталі 4Х5МФ1С. Робочі поверхні ущільнювальних кілець і жарового кільця впускного поршня мають зносостійке хромовольфрамове або дисульфідмолібденове покриття, що припрацьовується. Хромовольфрамове покриття – пористе. На робочій поверхні жарового кільця випускного поршня по хромовольфрамовому покриттю для збільшення маслостійкості виконано маслоспоживальний мікрорельєф у вигляді гвинтової канавки (див. рис. 13). Маслоснімальні кільця мають зносостійке хромове покриття. Палець поршня 9 (див. рис. 11), що є внутрішньою обоймою роликів 27, виготовляється зі сталі 20Х2Н4А-Ш, його робоча поверхня цементується. Внутрішня порожнина пальця герметизована сталевими заглушками 10. Для осьової фіксації пальця в поршні в канавках поршня встановлено стопорні кільця 8. Поршень передає зусилля на шатун через палець і голчастий підшипник. Голчастий підшипник складається з двох рядів голчастих роликів, розділених кільцями 11 та обмежувальними кільцями 12.

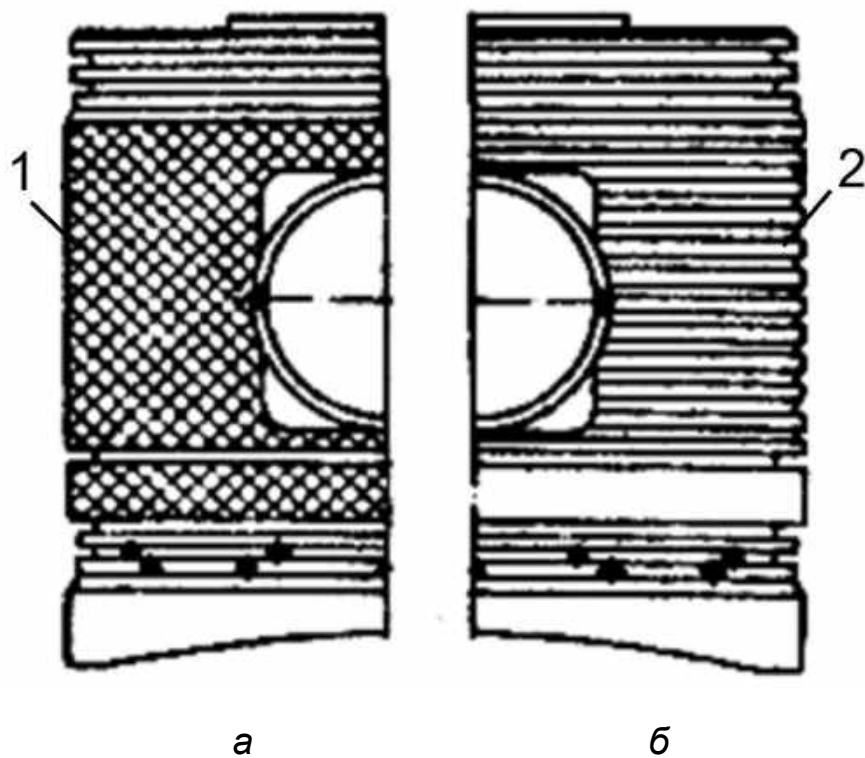


Рис. 10. Корпуси поршнів:
 а – впускний поршень; б – выпускний поршень;
 1 – сітка на впускному поршні; 2 – кільцева нарізка
 на выпускному поршні

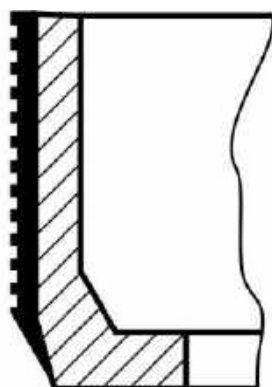


Рис. 11. Жарове кільце выпускного поршня

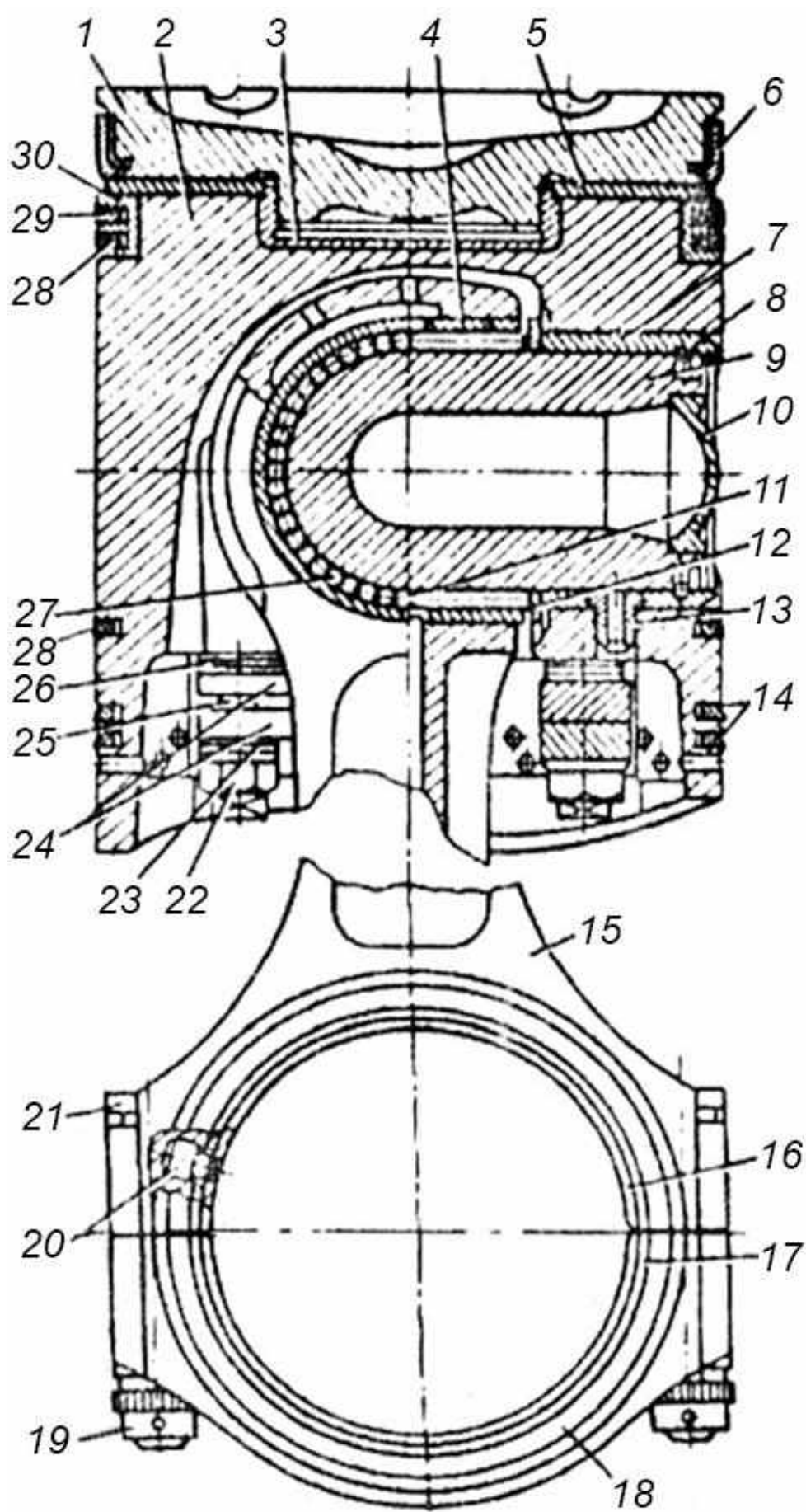


Рис. 12. Поршень двигателя 6ТД

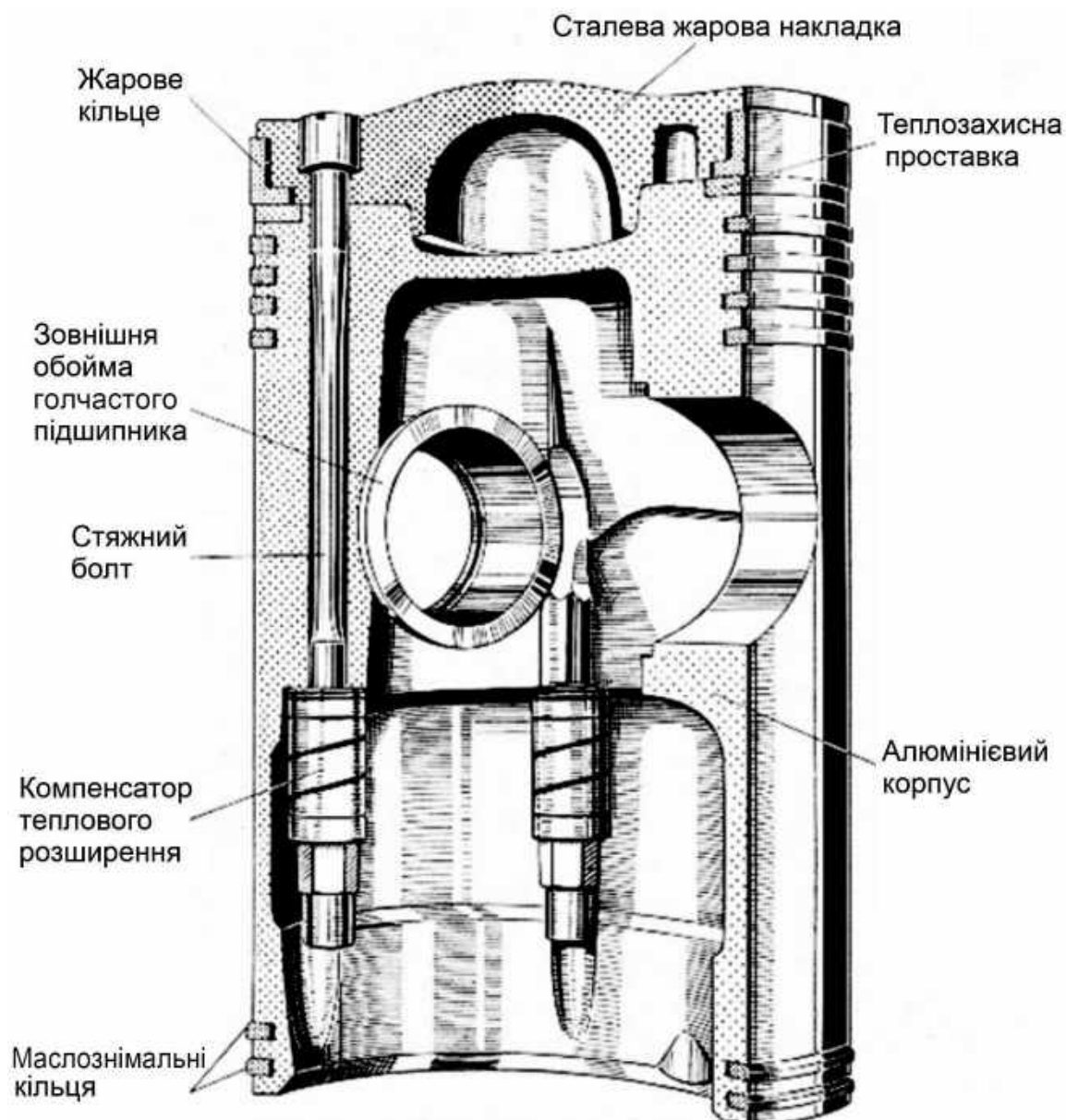


Рис. 13. Поршень UMO-207

3.5. Поршень двигуна ROTAX-582

Поршень двигуна ROTAX-582 відлитий з алюмінієвого сплаву, механічно оброблений зовні й частково зсередини (рис. 14). Днище поршня має опуклу сферичну форму. У головці поршня проточено дві канавки для встановлення кілець. У канавки впресовано штифти для фіксації кілець, що утримують їх від кутового переміщення. Самоушільнюване верхнє кільце 2 має трапецієподібну основу й вертикальний прямокутний буртик. Нижнє кільце 3 – прямокутне. У середній частині тронка є дві діаметрально протилежні бобишки 4 з отворами для встановлення поршневого пальця 5. Порожнистий палець, що плаває, з'єднує поршень з шатуном 6 через голчастий безсепараторний підшипник 7. Від осевого переміщення палець фіксується двома стопорними кільцями. Бустерний отвір 10 призначено для часткового перетікання з кривошипної камери паливоповітряної суміші, яка забезпечує охолодження днища й головки поршня та змащування підшипника поршневого пальця.

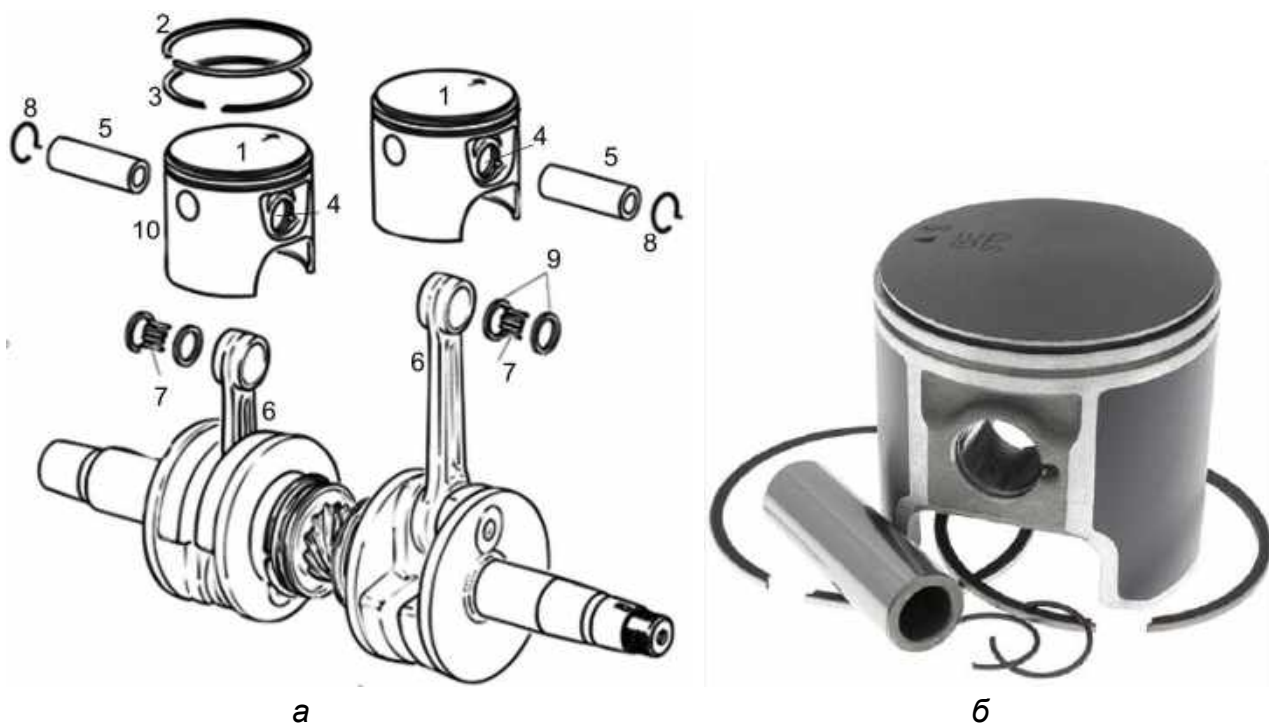


Рис. 14. Поршнева група (а) і поршень двигуна ROTAX-582 (б)

3.6. Поршень дизельного двигуна SCANIA

Поршень дизельного двигуна SCANIA (рис. 15) може бути складеним або суцільним. Поршень, зображений на рис. 15, а, складається з чавунної або сталевий головки поршня 1 та тронка 2 з алюмінієвого сплаву, що утворює з головкою порожнину 3 для охолодження моторного масла. Головка й тронк укріплені на поршневому пальці. У такому поршні силу тиску газів сприймає палець безпосередньо від головки поршня, а бічну силу – від тронка. Порівняно із суцільним поршнем умови змащування такого поршня є більш сприятливими. Суцільний поршень (рис. 15, б) для підвищення ресурсу першої канавки для компресійного кільця має вставку, вилиту зі спеціального чавуну з великим вмістом нікелю – нірезисту. Обидва поршні мають бронзові підшипники.



Рис. 15. Поршень двигуна SCANIA: а – складений (1 – сталевая головка с камерой згоряння; 2 – алюмінієвий тронк; 3 – палець); б – суцільний

Запитання для самоконтролю

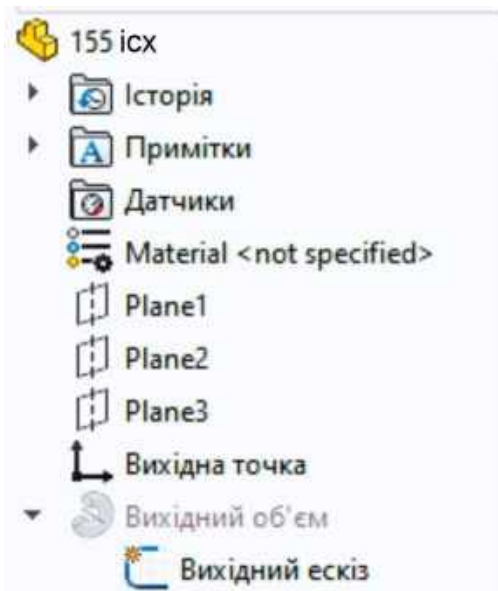
1. Які матеріали використовуються для виготовлення поршнів?
2. Як здійснюється фіксація пальця поршня в конструкціях поршневих груп?
3. З якою метою застосовуються конструкції складених поршнів?
4. Для чого в складених поршнях для двигунів типу 6ТД і УМО 207 застосовуються жарова накладка й жарове кільце?
5. Які підшипники застосовуються в зчленуваннях «поршень – палець»?

4. ПОБУДОВА ТРИВИМІРНОЇ МОДЕЛІ ПОРШНЯ

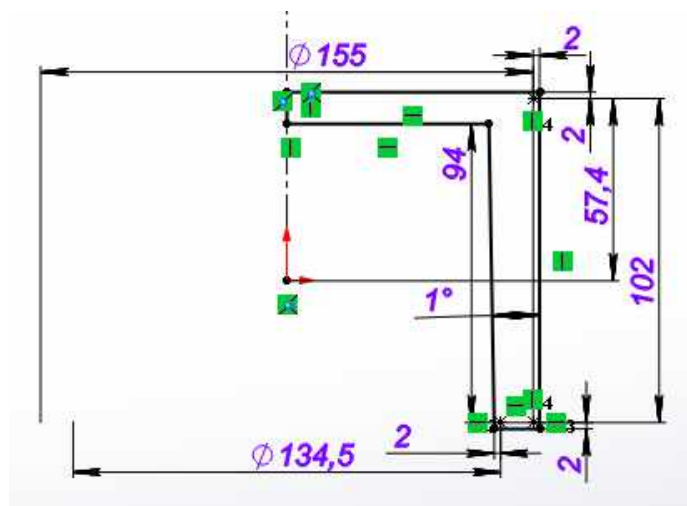
Модель поршня АШ 62 ІР останньої генерації. Поршень є симетричним відносно двох перпендикулярних площин, створених: перша – віссю циліндра й віссю отвору в пальці; друга – віссю циліндра й площиною, перпендикулярною до осі отвору в пальці. Отже, достатньо створити модель чверті поршня з подальшим віддзеркаленням. Для термічного аналізу й аналізу міцності зручно застосовувати чверть. Скористаємося програмою SolidWorks (не має принципового значення, який пакет буде використано).

Покрокове створення геометричної моделі

Перший ескіз і перший об'єм (рис. 16) побудуємо з урахуванням припусків на подальше оброблення, знаючи, що поршень буде отримано штампуванням з алюмінієвого сплаву АК 4-1. Під час створення об'ємів має бути ввімкнена опція «Об'єднання результатів».

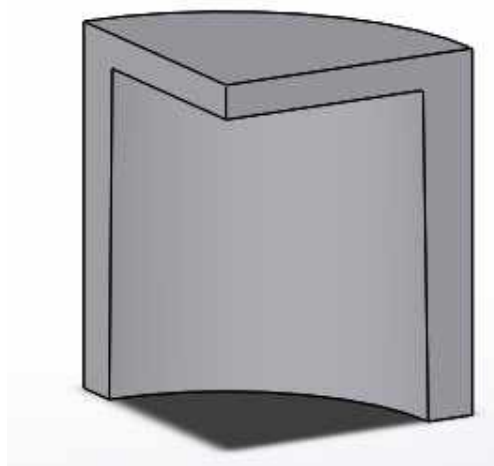


а



б

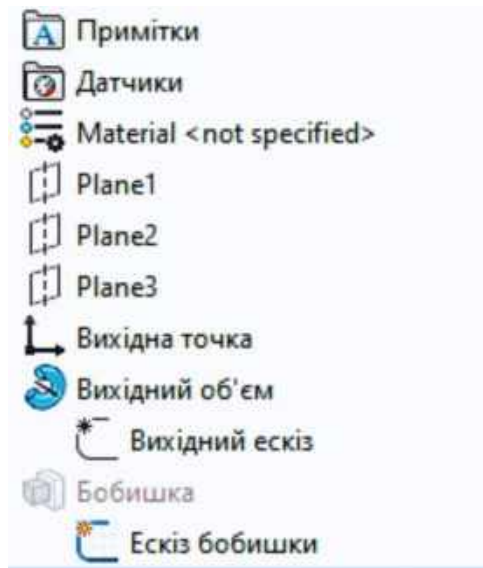
Рис. 16. Основна форма заготовки:
а – дерево побудови; б – ескіз; в – об'єм



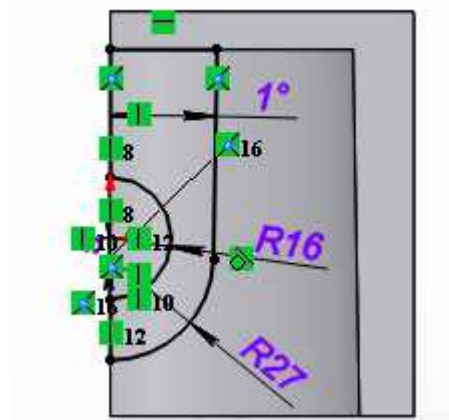
в

Рис. 16. Закінчення

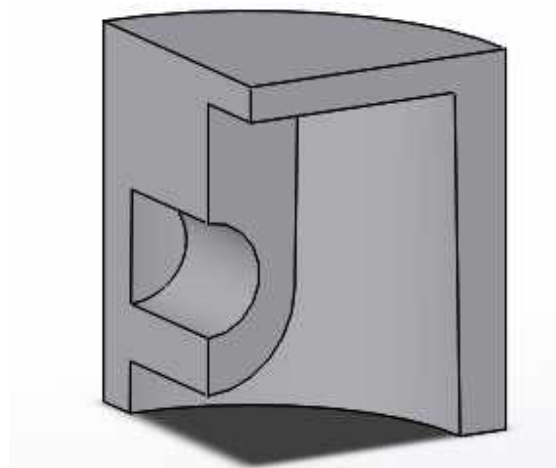
Наступна операція – побудова бобишки з черновим отвором під палець (рис. 17, 18).



а

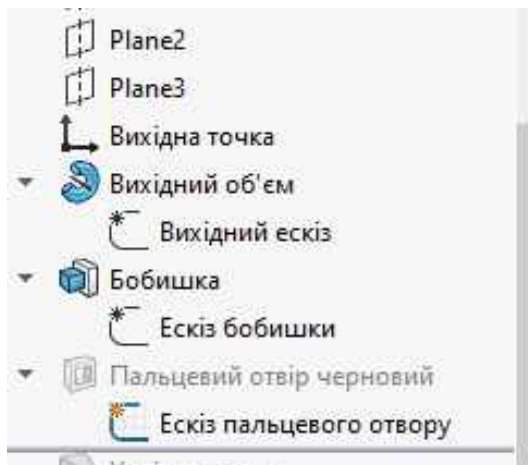


б

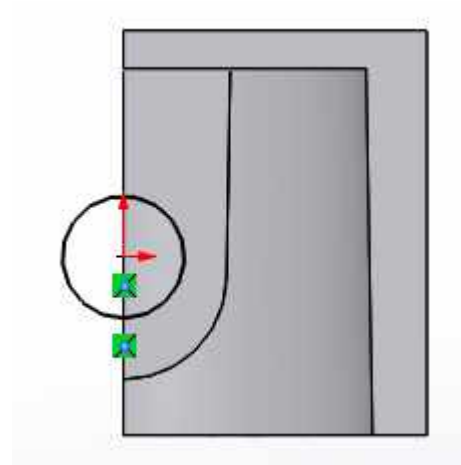


в

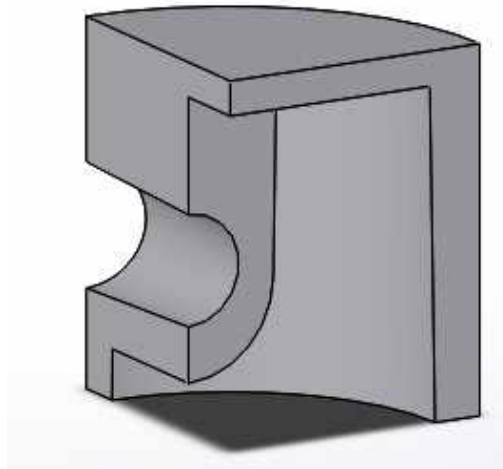
Рис. 17. Бобишка: а – дерево побудови; б – ескіз; в – об'єм



а



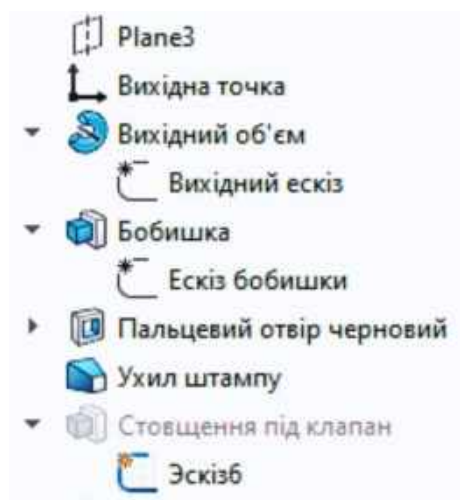
б



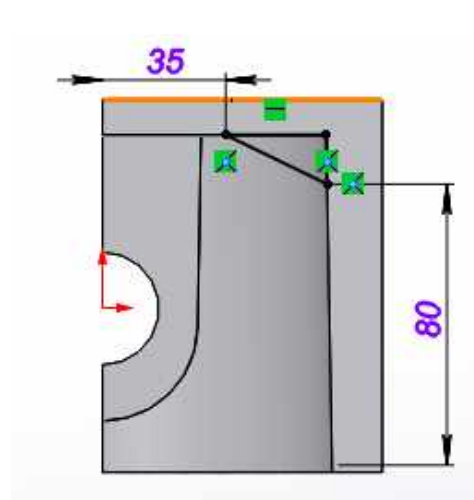
в

Рис. 18. Отвір у пальці черновий:
а – дерево побудови; б – ескіз; в – об'єм

Додавання об'єму на днищі поршня під клапанну виїмку (рис. 19).

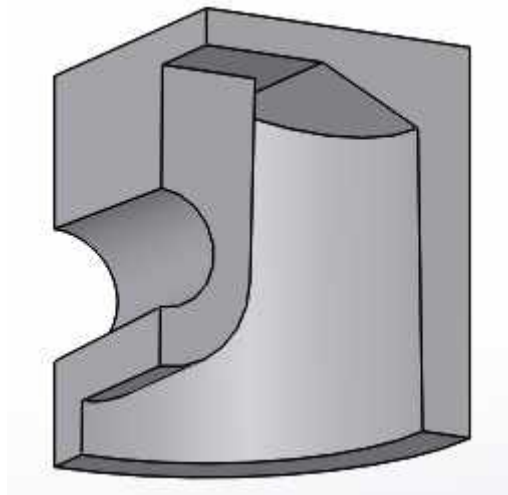


а



б

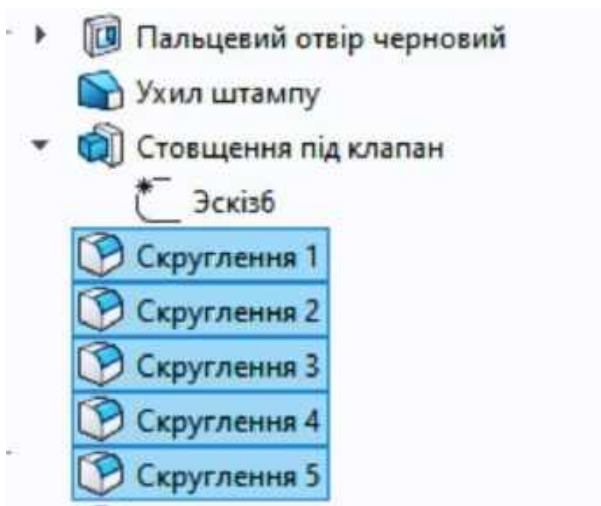
Рис. 19. Стівщення на днищі під клапан:
а – дерево побудови; б – ескіз; в – об'єм



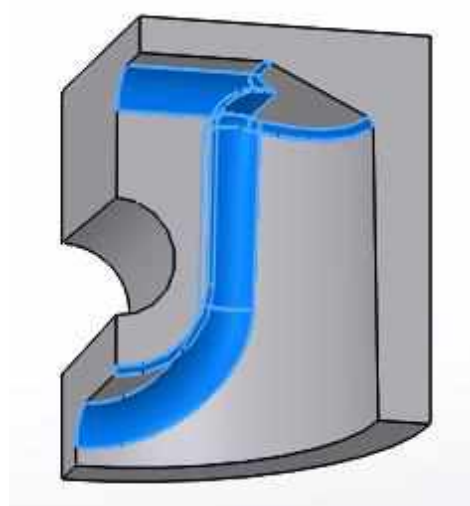
в

Рис. 19. Закінчення

Скруглення внутрішніх кромки (рис. 20).



а



б

Рис. 20. Внутрішні скруглення: а – дерево побудови; б – об'єм

Побудова внутрішнього піднутрення для полегшення поршня (рис. 21, 22). Ескіз для другої частини виїмки (рис. 22) побудовано на площині, якою закінчується перша її частина.

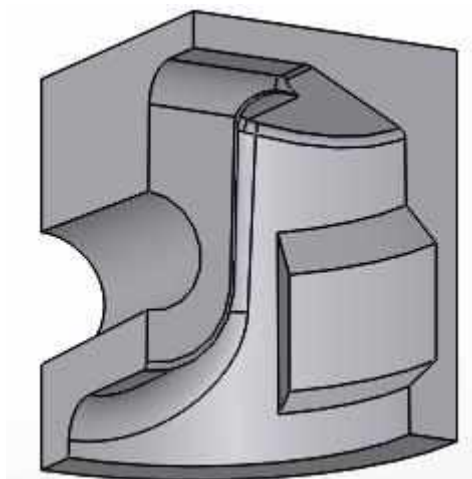
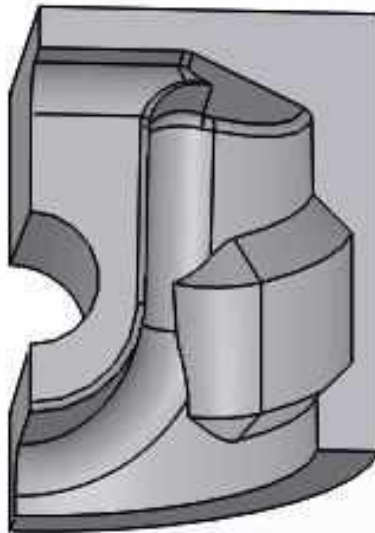


Рис. 21. Піднутрення 1 на корпусі для полегшення поршня:
а – дерево побудови; б – ескіз; в – об'єм



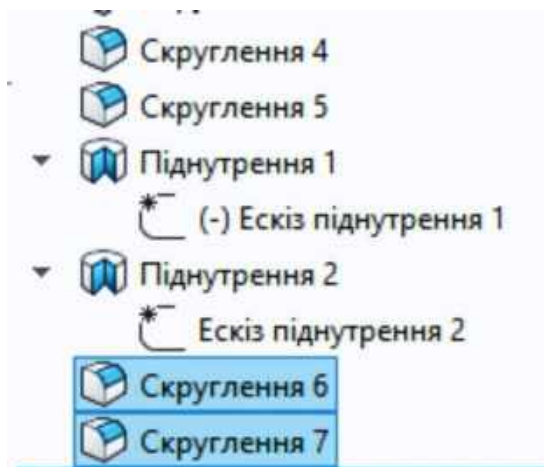
Рис. 22. Піднутрення 2 на корпусі для полегшення поршня:
а – дерево побудови; б – ескіз; в – об'єм



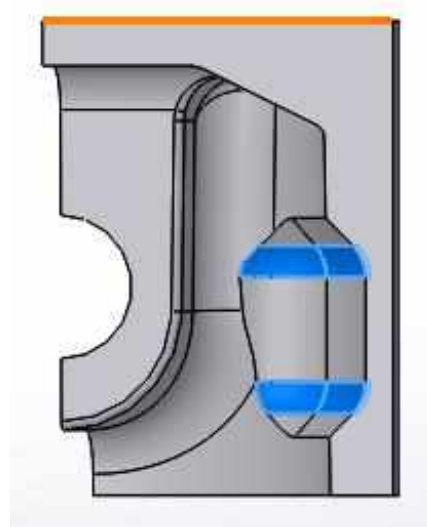
в

Рис. 22. Закінчення

Побудова скруглень на виїмці (рис. 23).



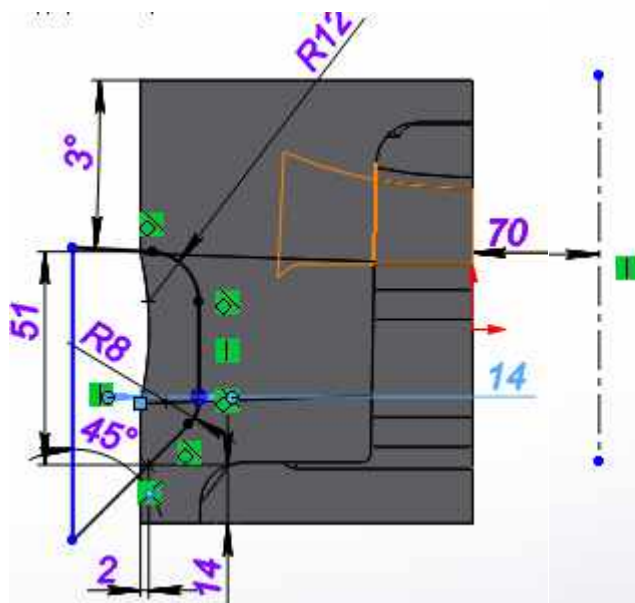
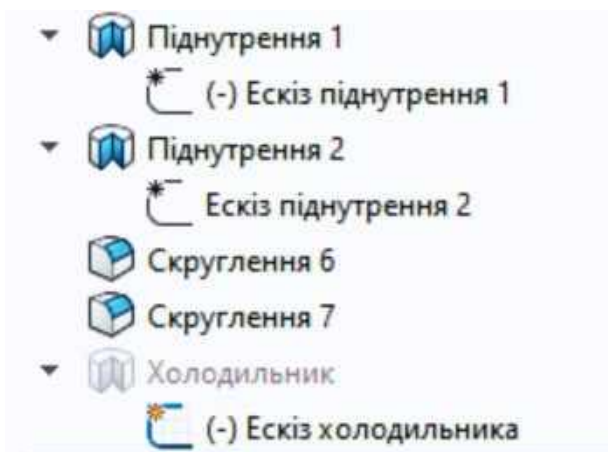
а



б

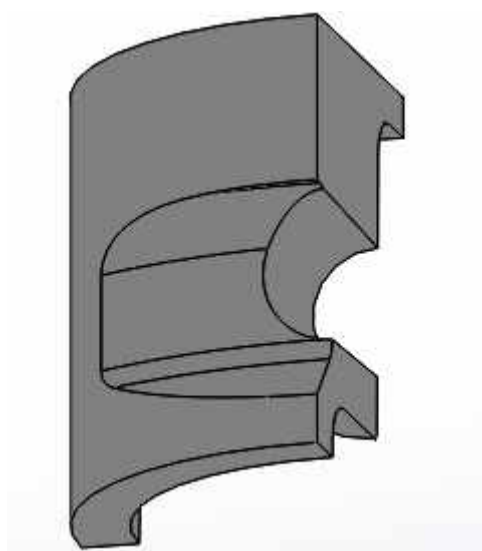
Рис. 23. Скруглення внутрішньої виточки: а – дерево побудови; б – об'єм

Побудова холодильника (рис. 24).



а

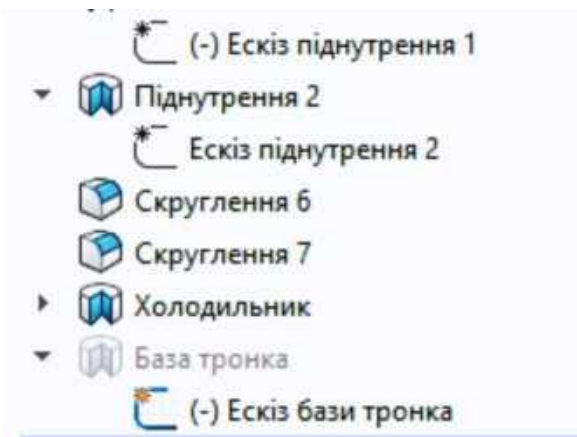
б



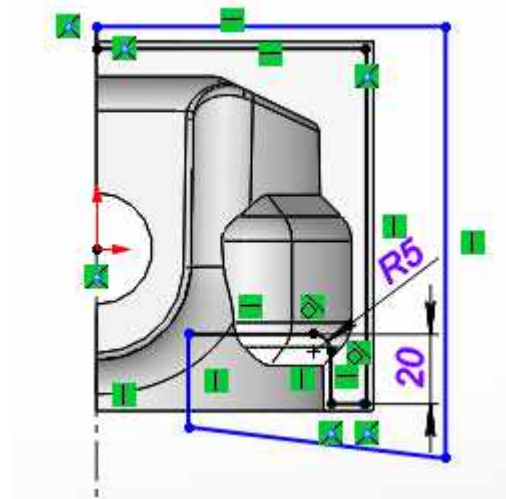
в

Рис. 24. Холодильник: а – дерево побудови; б – ескіз; в – об'єм

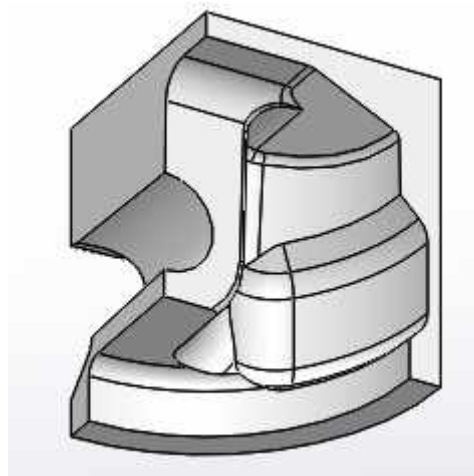
Обрізання припусків (отримання зовнішньої поверхні й бази для подальшого оброблення) (рис. 25).



а



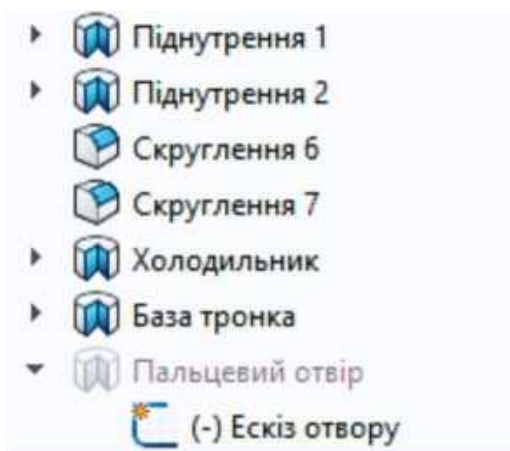
б



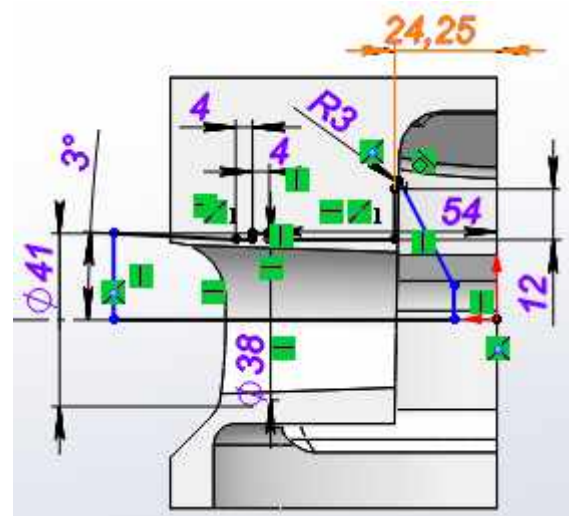
в

Рис. 25. База на тронку й оброблення зовнішньої поверхні:
а – дерево побудови; б – ескіз; в – об'єм

Оброблення пальцевого отвору (рис. 26).

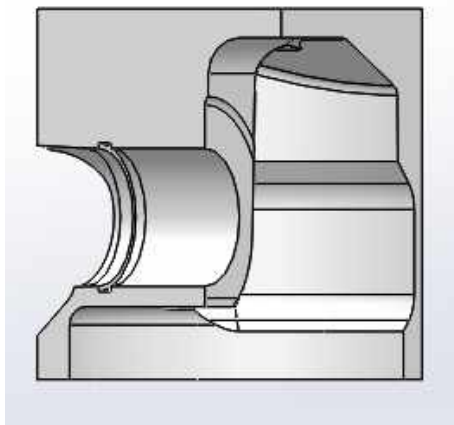


а



б

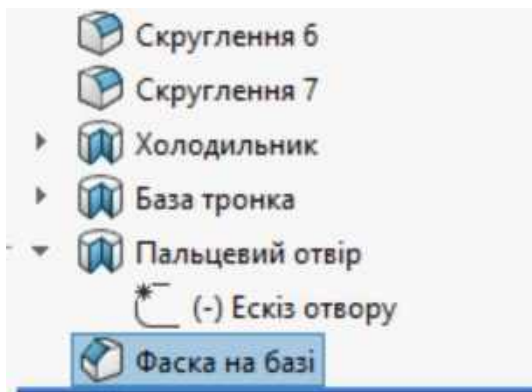
Рис. 26. Пальцевий отвір і площина під верхню головку шатуна:
а – дерево побудови; б – ескіз; в – об'єм



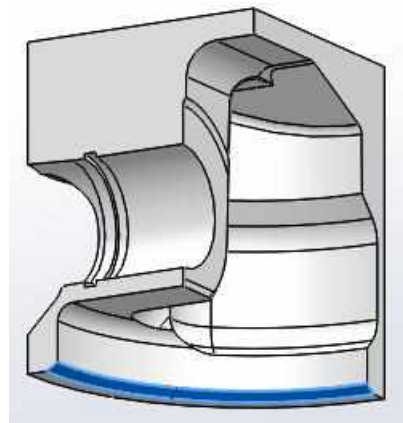
в

Рис. 26. Закінчення

Отримання фаски на краю тронка й проточки для противаги (рис. 27, 28).

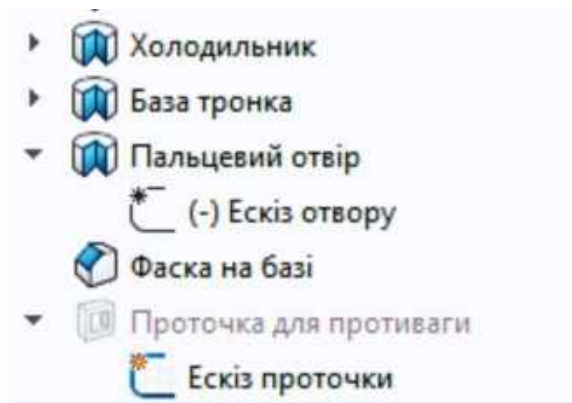


а

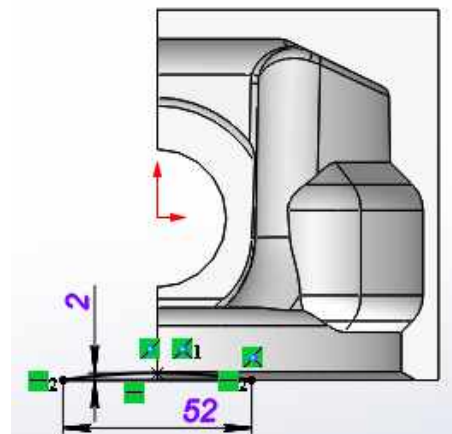


б

Рис. 27. Фаска на базі: а – дерево побудови; б – об'єм

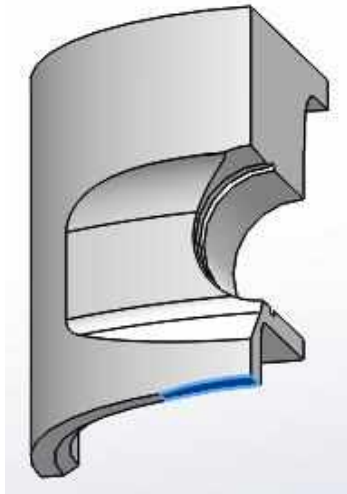


а



б

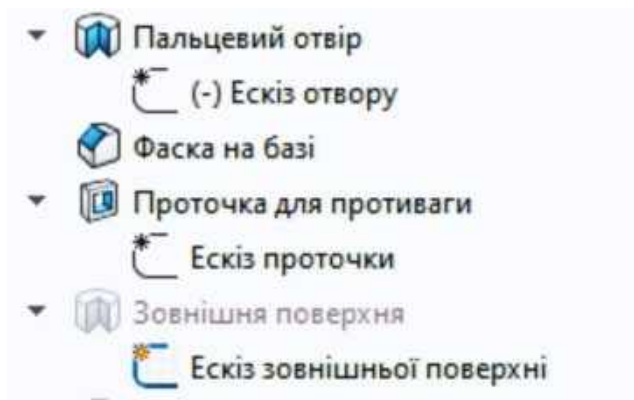
Рис. 28. Проточка для противаги:
а – дерево побудови; б – ескіз; в – об'єм



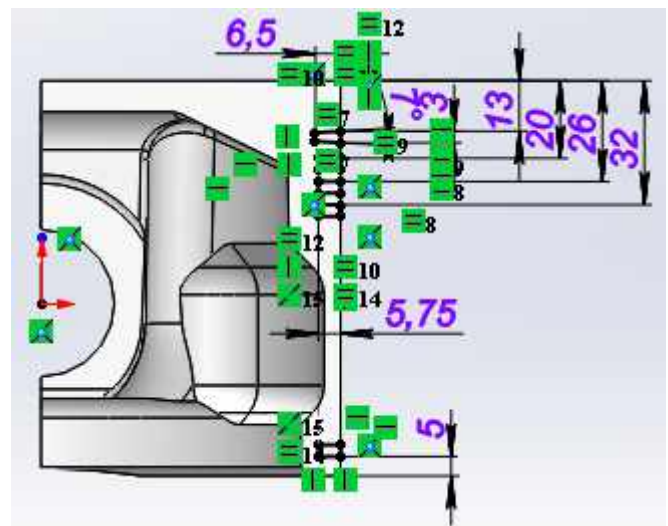
б

Рис. 28. Закінчення

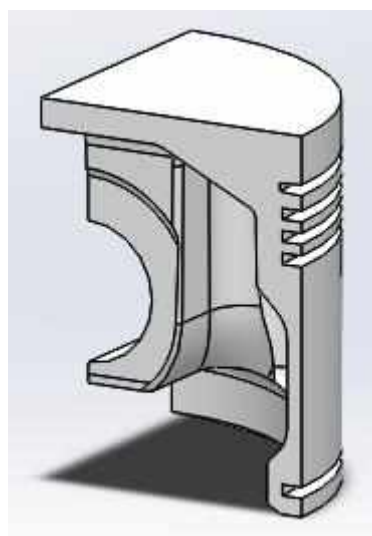
Прорізання канавок під поршневі кільця (рис. 29).



а



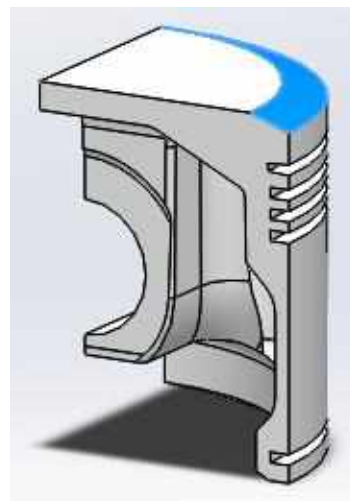
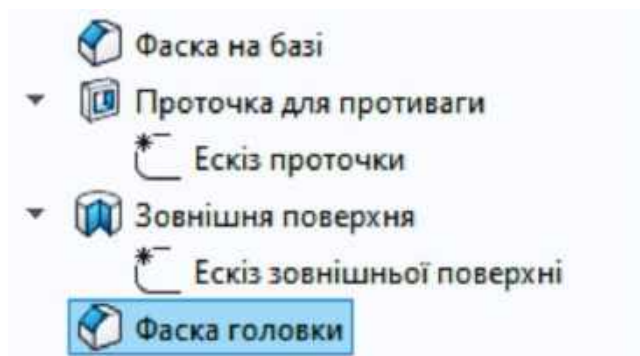
б



в

Рис. 29. Проточки під кільця:
а – дерево побудови; б – ескіз; в – об'єм

Знімання фаски головки циліндра (рис. 30).

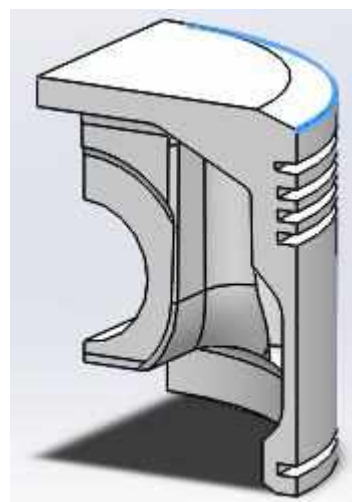
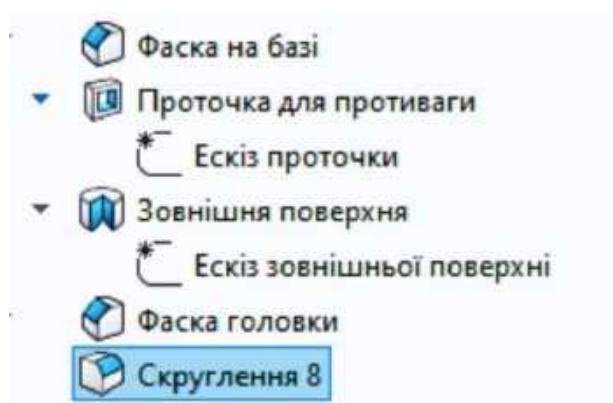


а

б

Рис. 30. Фаска головки: а – дерево побудови; б – об'єм

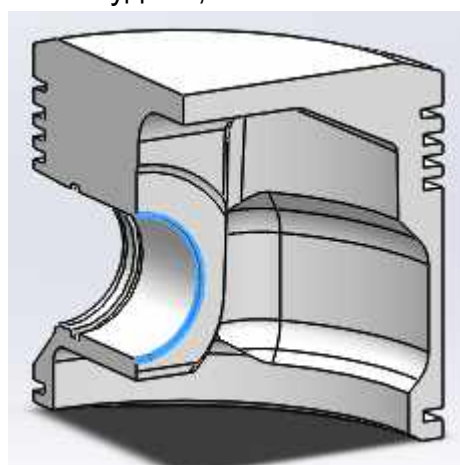
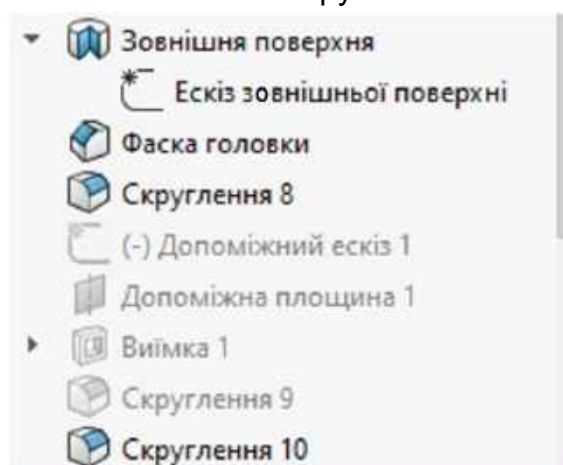
На рис. 31, 32 зображено скруглення на головці й пальцевому отворі.



а

б

Рис. 31. Скруглення головки: а – дерево побудови; б – об'єм



а

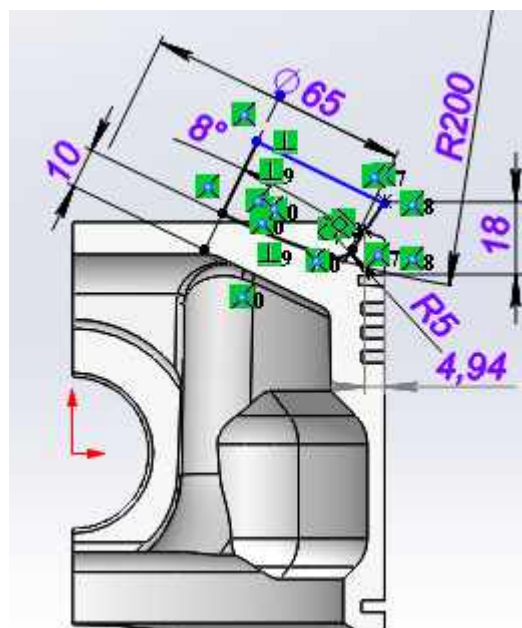
б

Рис. 32. Скруглення виходу пальцевого отвору:
а – дерево побудови; б – об'єм

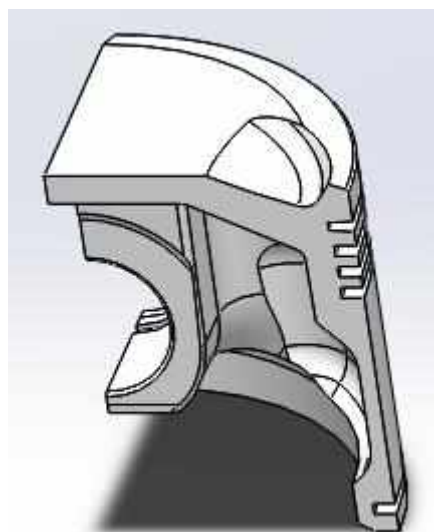
На рис. 33 показано утворення виїмки під клапан. Ескіз створено в площині симетрії.



а



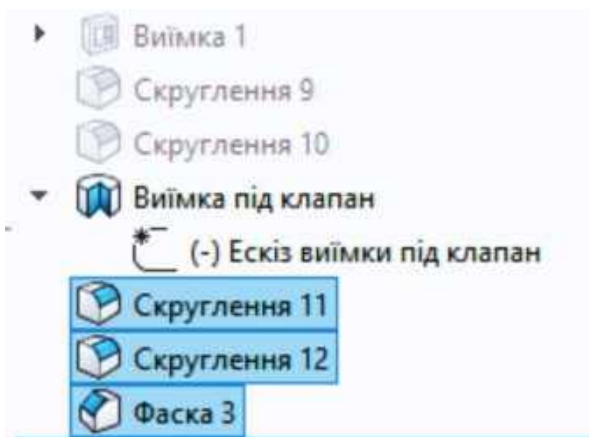
б



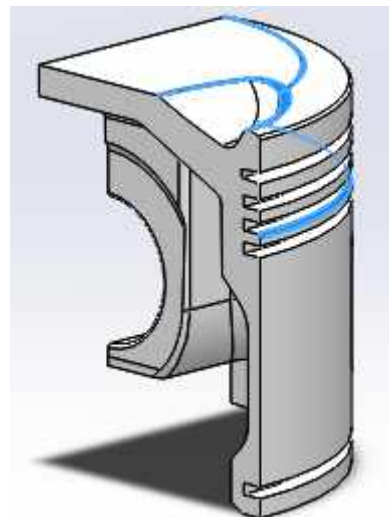
в

Рис. 33. Виїмка під клапан: а – дерево побудови; б – ескіз; в – об'єм

Створення скруглень 11, 12 по камері згоряння і фаски 3 на третій кільцевій канавці (рис. 34).



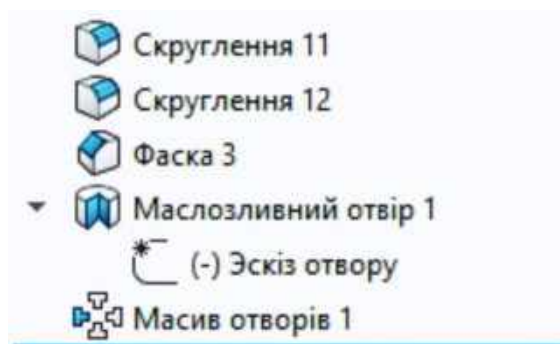
а



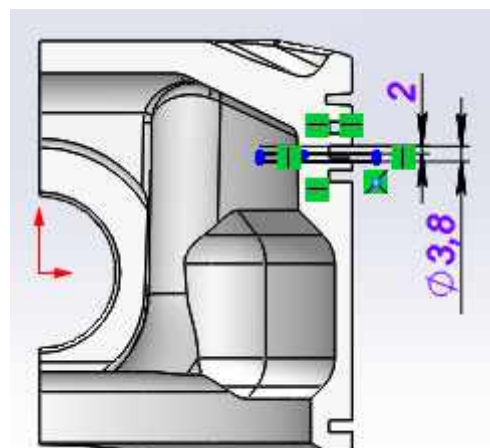
б

Рис. 34. Скруглення в камері згоряння і фаска на канавці маслоснімального кільця:
а – дерево побудови; б – об'єм

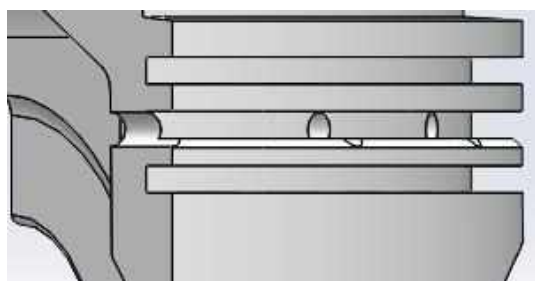
На рис. 35 показано побудову отворів для зливання моторного масла з третьої канавки. Перша операція – створення одного отвору, друга – створення масиву отворів за допомогою команди «Масив». Усього отворів – по п'ять на кожну сторону.



а



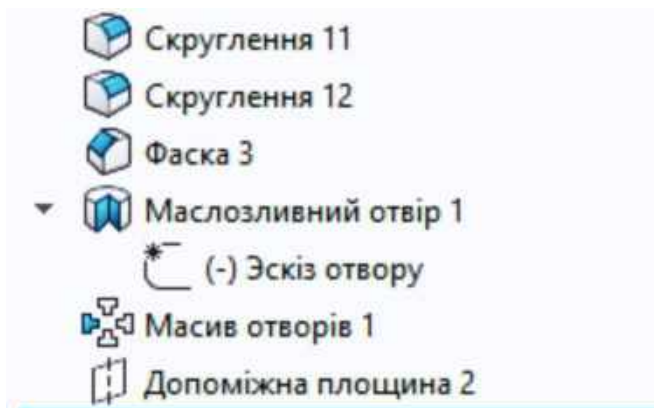
б



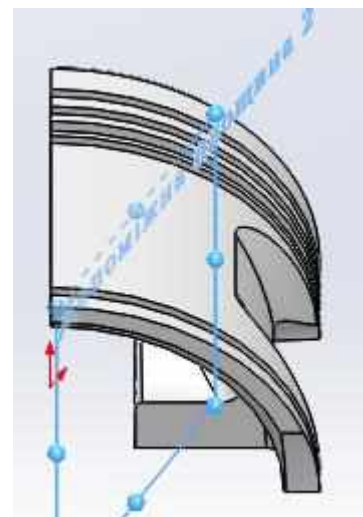
в

Рис. 35. Отвори для зливання моторного масла:
а – дерево побудови; б – ескіз; в – об'єм

Побудова допоміжної площини 2 для ескізу та отворів для зливання моторного масла з четвертої канавки (рис. 36, 37).

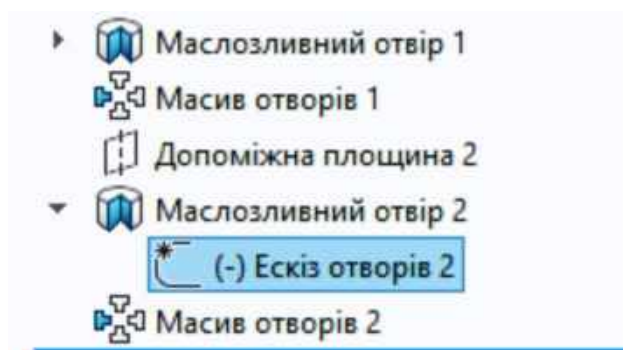


а

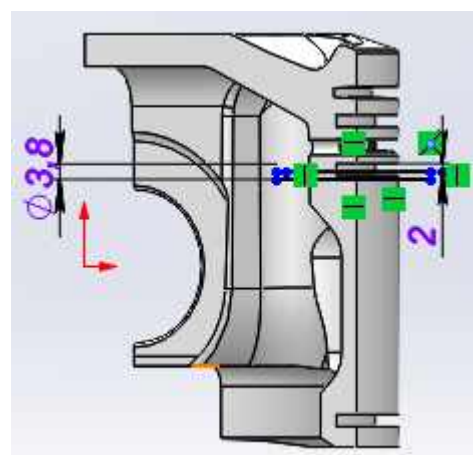


б

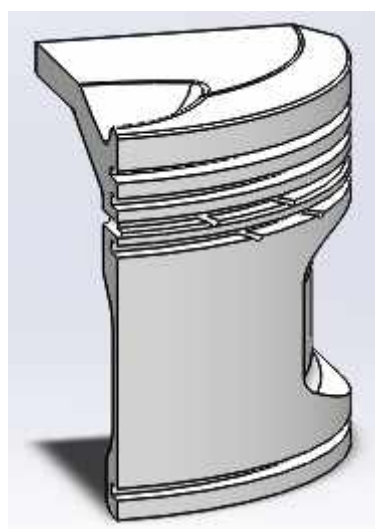
Рис. 36. Допоміжна площина для ескізу отвору маслознімального кільця:
а – дерево побудови; б – об'єм



а



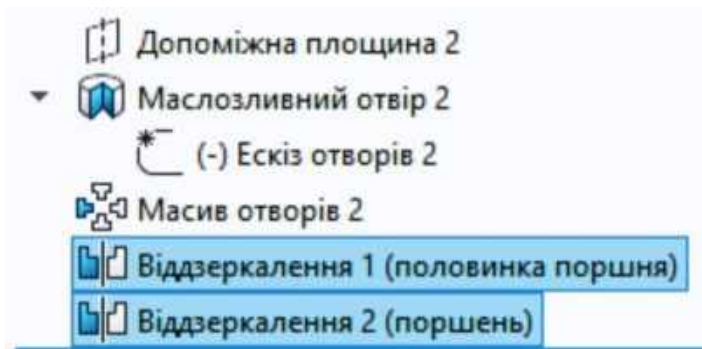
б



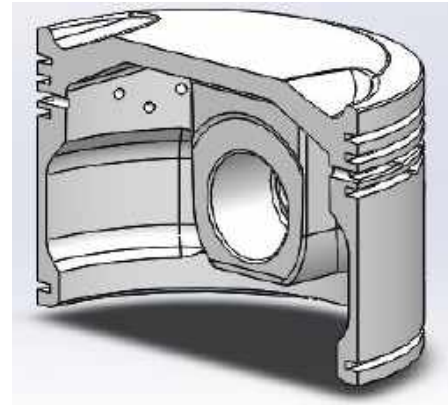
в

Рис. 37. Отвори для зливання моторного масла:
а – дерево побудови; б – ескіз; в – об'єм

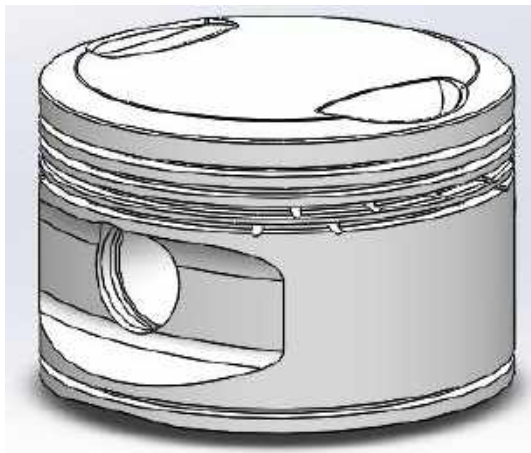
На рис. 38 зображено отримання моделі половинки та повного поршня.



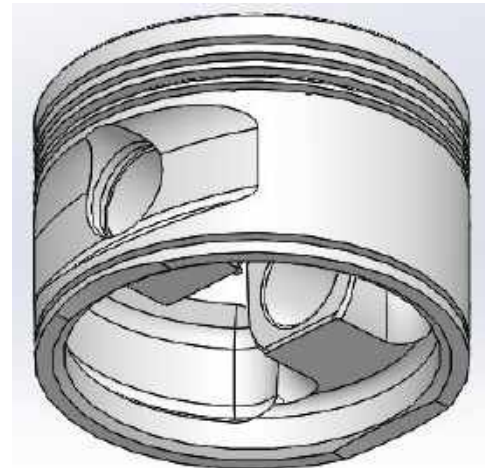
а



б



в

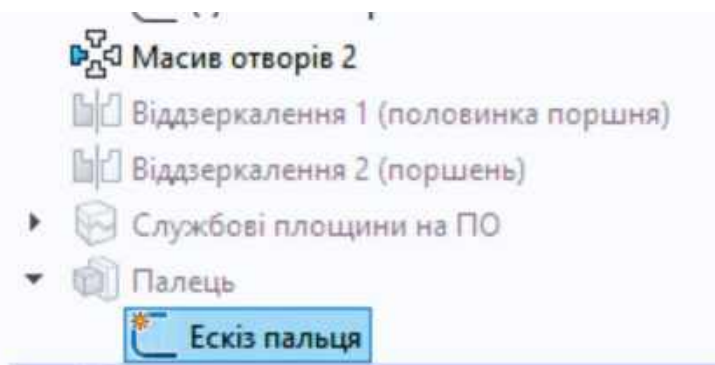


г

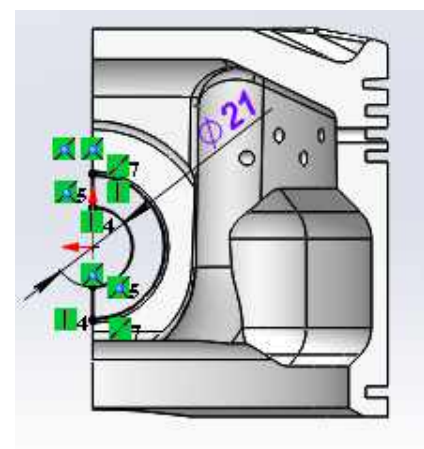
Рис. 38. Два послідовних віддзеркалення – твердотільна модель поршня:

а – дерево побудови; б–г – об'єми

Підготовка до аналізу полягає у створенні чверті пальця і чверті верхньої частини шатуна. Відомо, що ці деталі не є одним цілим з поршнем, тому під час створення їх моделей потрібно вимкнути опцію «Об'єднання результатів». На рис. 39–42 показано побудову частин пальця, шатуна й поверхонь на поршні та пальці, необхідних для аналізу.



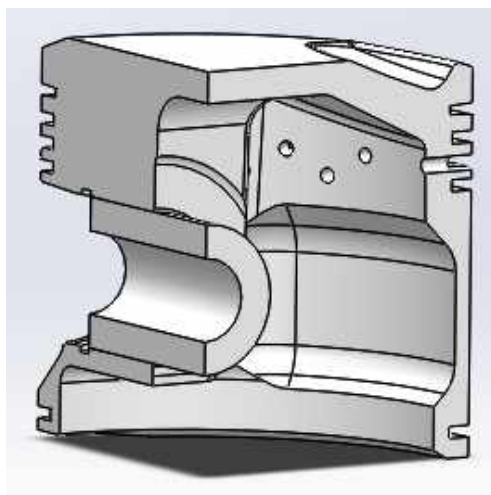
а



б

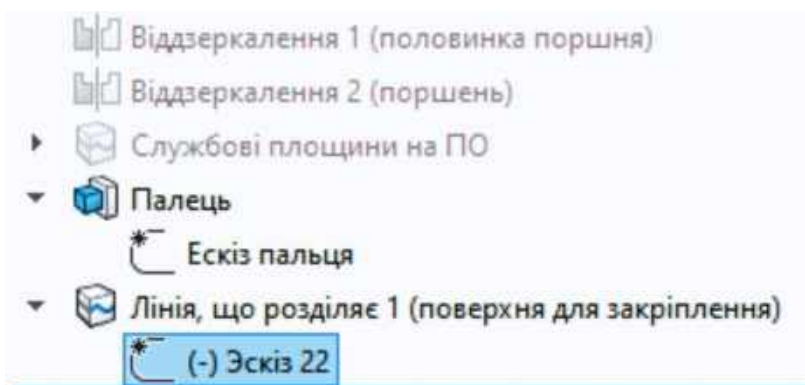
Рис. 39. Створення пальця (чверті):

а – дерево побудови, б – ескіз, в – об'єм

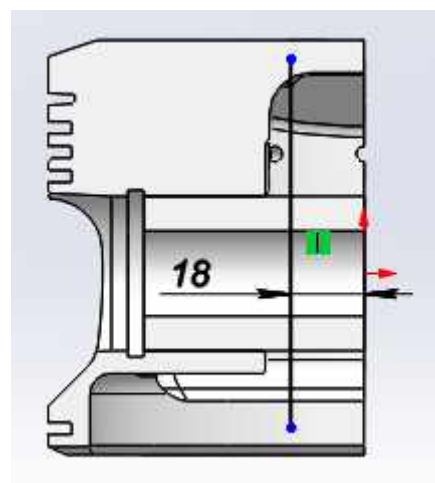


в

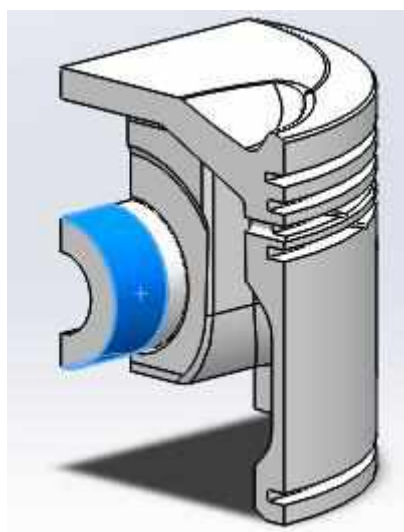
Рис. 39. Закінчення



а

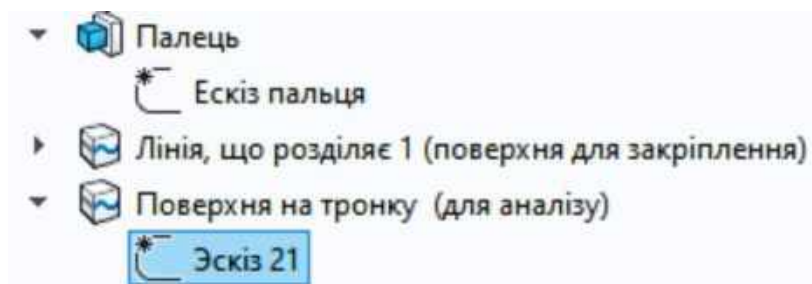


б

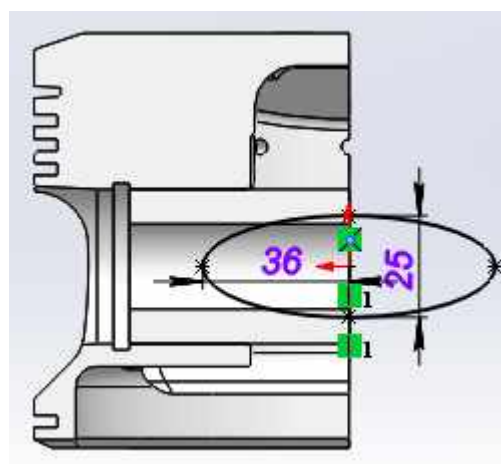


в

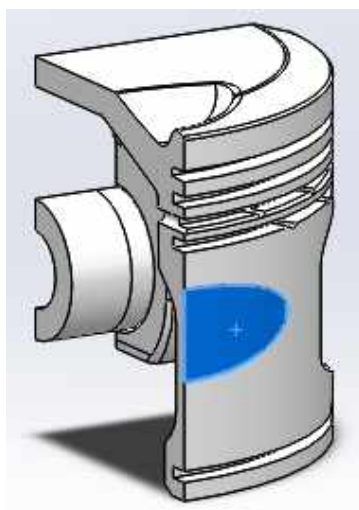
Рис. 40. Поверхня для закріплення при аналізі:
а – дерево побудови; б – ескіз; в – об'єм



а

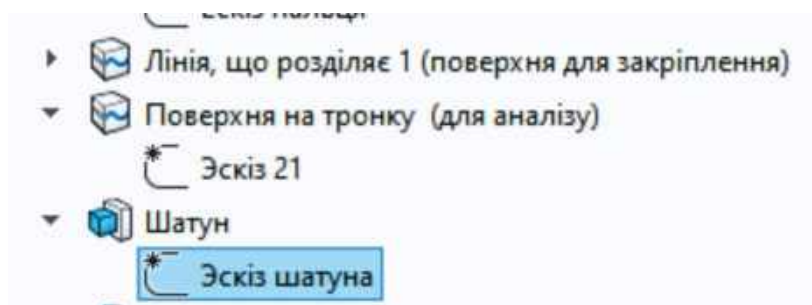


б

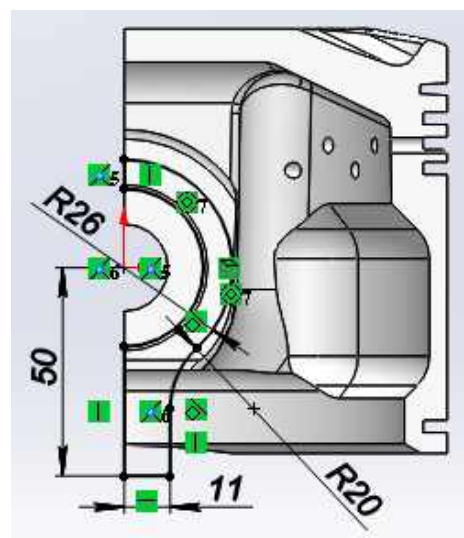


в

Рис. 41. Поверхня на тронку для аналізу:
а – дерево побудови; б – ескіз; в – об'єм

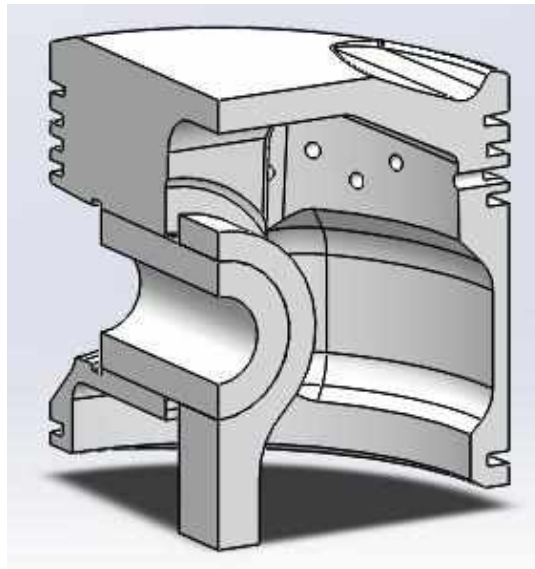


а



б

Рис. 42. Частина шатуна для аналізу:
а – дерево побудови; б – ескіз; в – об'єм



б

Рис. 42. Закінчення

Запитання для самоконтролю

1. Чому достатньо побудувати чверть поршня і при яких його конструктивних особливостях?
2. Як зробити моделі пальця і шатуна окремими деталями баз побудови з метою подальшого складання?

5. АНАЛІЗ ТЕПЛОВОГО СТАНУ Й МІЦНОСТІ

Відомо, що поршень навантажується тепловим потоком від розігрітих продуктів згоряння, силами тиску й інерції (див. рис. 1, б). Слід зазначити, що першопричини навантаження (тиск у циліндрі, прискорення й температура поршня) є змінними в часі і змінюються не тільки внаслідок зміни режиму роботи, а й протягом циклу. Уважається, що на сталому режимі температура поршня є незмінною, її зміни на поверхні камери згоряння не перевищують 0,5...1,5 К на фоні температур близько 570 К (див. рис. 2), на відстані 1 мм від поверхні зміни температури вже є невідчутними.

Що стосується навантажень силами тиску й інерції, то сила тиску є максимальною поблизу ВМТ при згорянні, а сила інерції при цьому діє в протилежний бік і розвантажує поршень від сил тиску. Максимальний тиск у циліндрі можна виміряти або розраховувати.

Сила інерції визначається такою формулою:

$$P_j = mr\omega^2(\cos\varphi + \lambda\cos 2\varphi),$$

де m – маса поршня; r – радіус кривошипа; ω – кутова швидкість обертання КВ; φ – кут повороту КВ (0° – ВМТ); λ – відношення радіуса кривошипа до довжини шатуна (0,25...0,40).

Для аналізу міцності й теплового стану скористаємося пакетом SolidWorks Simulation. Як об'єкт для аналізу виберемо поршень для двигу-

на АШ 62ІР (Ø 155 мм), алгоритм побудови моделі якого було запропоновано в розд. 4.

Вихідні дані для аналізу навантаження наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Граничні умови для моделювання навантаженого стану поршня

Параметр	Величина	Примітки
Тиск, МПа	6,7	
Частота обертання КВ, хв ⁻¹	2000	
Радіус кривошипа, м	0,155	
λ	0,26	
Кутова швидкість, м·с ⁻²	8565	
Коефіцієнт теплообміну α , Вт/(м ² ·К)		
Камера згоряння	300/1350	
1-ша канавка	40000/450	До нижньої грані канавки
2-га канавка	20000/430	
3-тя канавка	10000/410	
4-та канавка	7000/390	
5-та канавка	700/370	
Внутрішня поверхня КЗ	200/370	
Внутрішні поверхні й холодильник	250/370	
Матеріал поршня	Алюмінієвий сплав 2024 Т3	
Матеріал пальця	Сталь 4340	
Матеріал шатуна	Сталь 1045	

Поршень, запропонований до розрахунку, є симетричним відносно двох площин, а у ВМТ шатун займає положення, при якому (для аксіально-го кривошипно-шатунного механізму) бічної сили, що діє на тронк, немає. Тому, щоб спростити моделювання, для розрахунку вибираємо підготовлену в попередньому розділі конфігурацію. Для розрахунку інших конфігурацій, де поршень не в ВМТ, обов'язково слід урахувувати нахил шатуна, тому й система закріплень і навантажень буде іншою. Система закріплень і навантажень буде іншою і для несиметричного й дезаксіального поршнів, що для авіаційних двигунів не є типовим.

Для отримання напружень і деформацій від силового навантаження в SolidWorks Simulation вибираємо «статичне» дослідження й виконуємо такі дії:

- задаємо матеріал, з якого буде виготовлено кожну з деталей – поршень, шатун і палець;
- визначаємо тип контакту поверхонь: «палець – поршень» і «палець – шатун»;
- закріплюємо модель від шести переміщень, ураховуючи симетрію й можливі деформації;

- задаємо зовнішні навантаження;
- генеруємо скінченно-елементну сітку;
- запускаємо розрахунок та аналізуємо результат.

Для аналізу загального термосилового навантаження необхідно на результати розрахунку силового навантаження накласти температурне поле, яке буде розраховано під час термічного розрахунку.

Матеріал для цього прикладу (зі стандартного набору SolidWorks Simulation) наведено в табл. 2.

Контакти подаємо як контакти компонентів «без проникнення», отже, під час моделювання тіла можуть «відриватися» одне від одного і створювати зазори внаслідок силових і теплових деформацій (рис. 43, а). Закріплюємо модель по площинах симетрії (п'ять ступенів свободи) і шатун від переміщення (шість ступенів свободи) (рис. 43, б–г). Така послідовність є необхідною для застосування термічного розрахунку під час статичного аналізу.

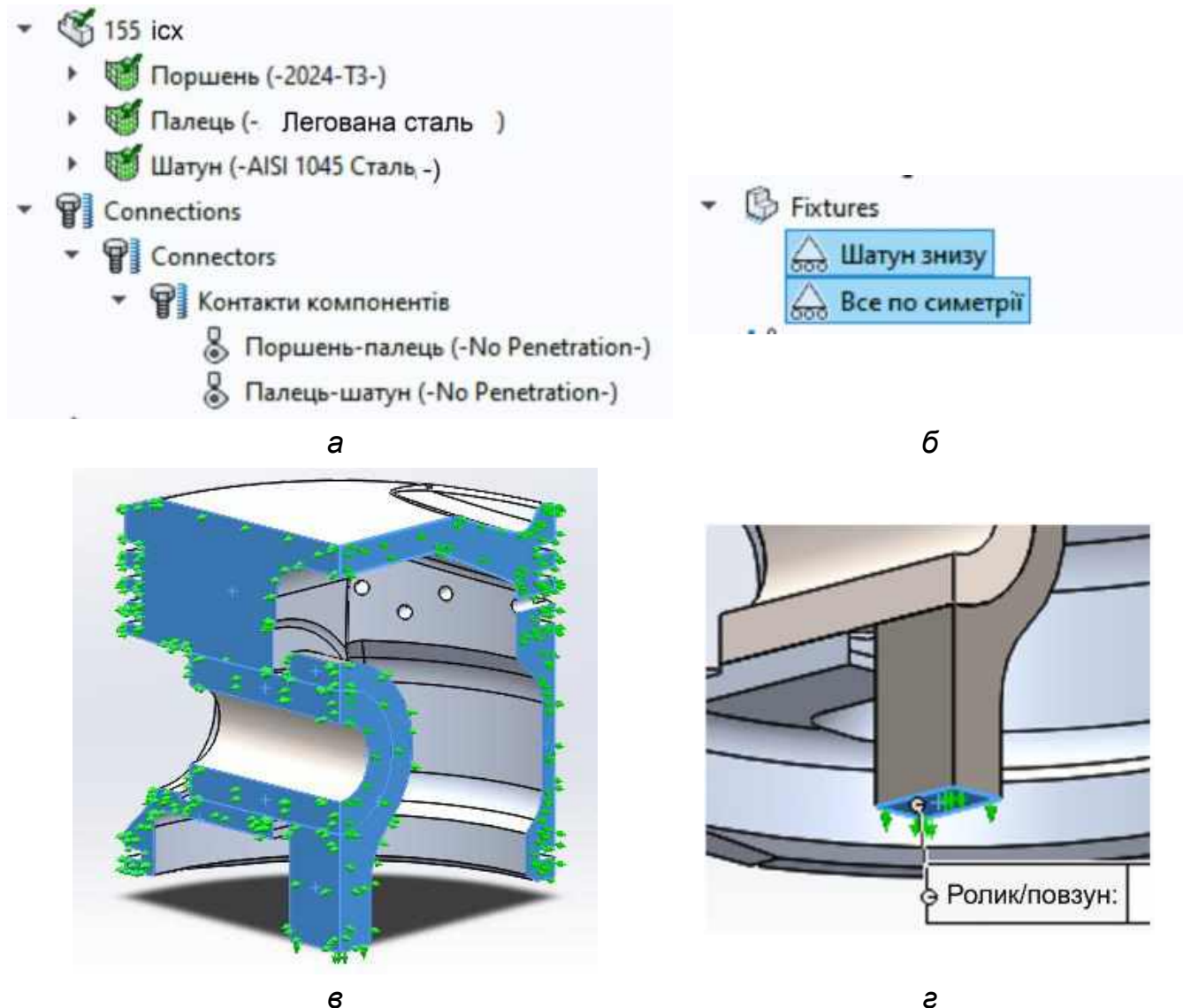


Рис. 43. Визначення контактів і закріплення: а – матеріал і контакти; б – закріплення в дереві побудови; в, г – закріплення на моделі

Задаємо навантаження – тиск і прискорення (рис. 44). Стрілка на рис. 44, в показує *напрямок сили інерції*, яку спричинило прискорення, а не напрямок самого прискорення. Значення взято з табл. 1.

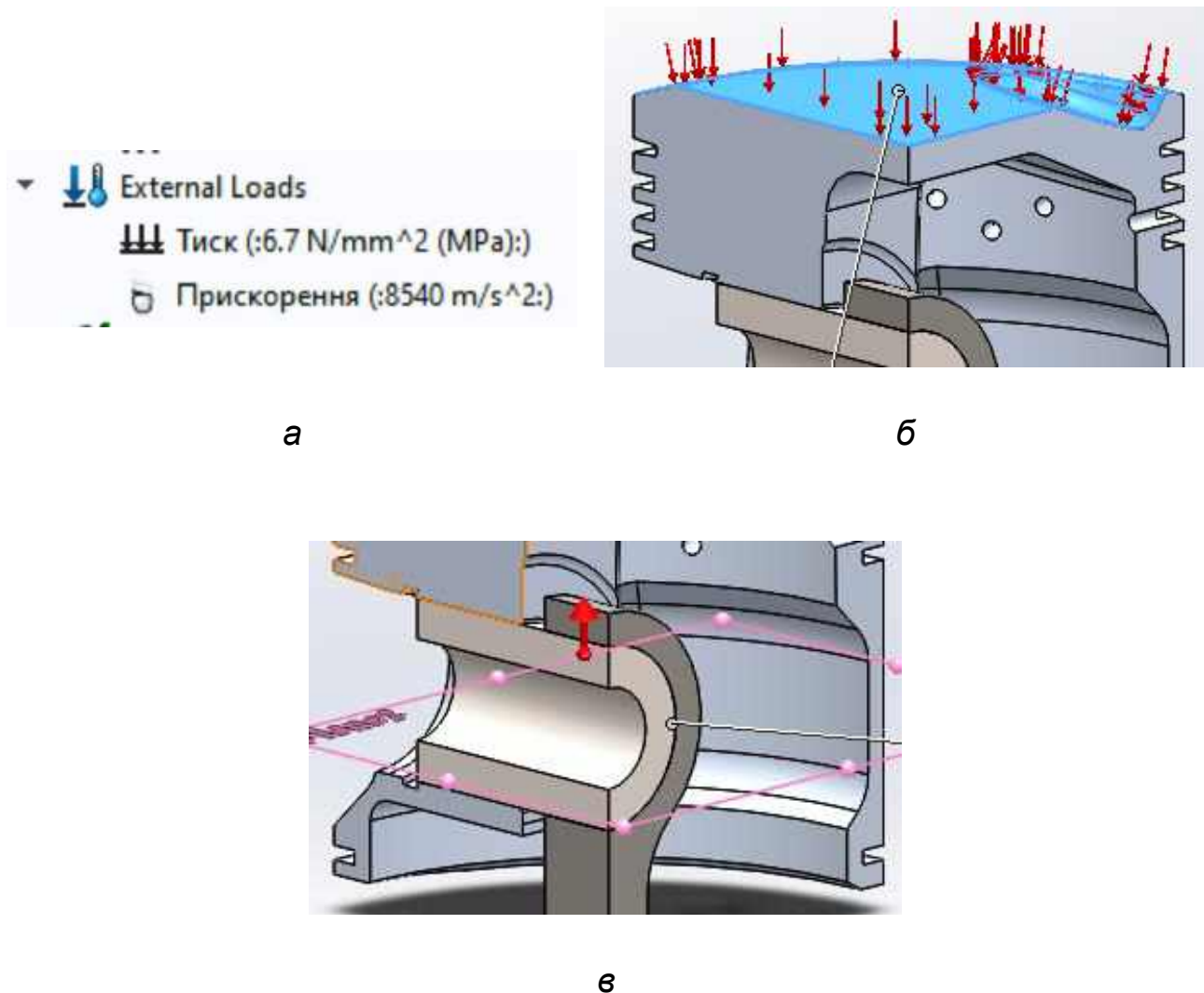
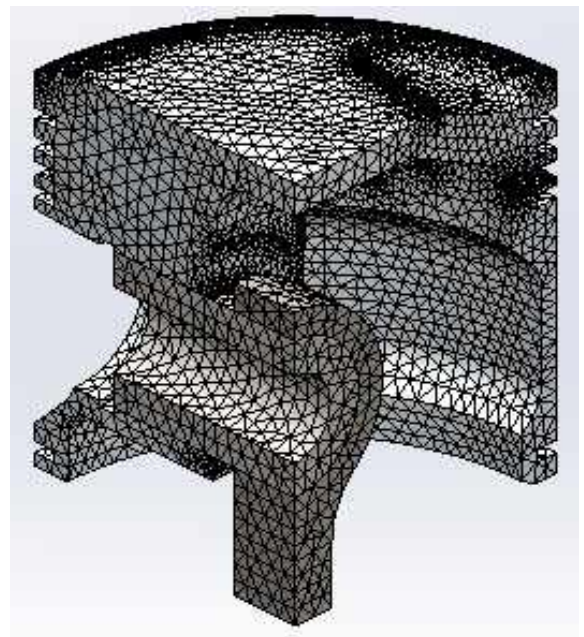
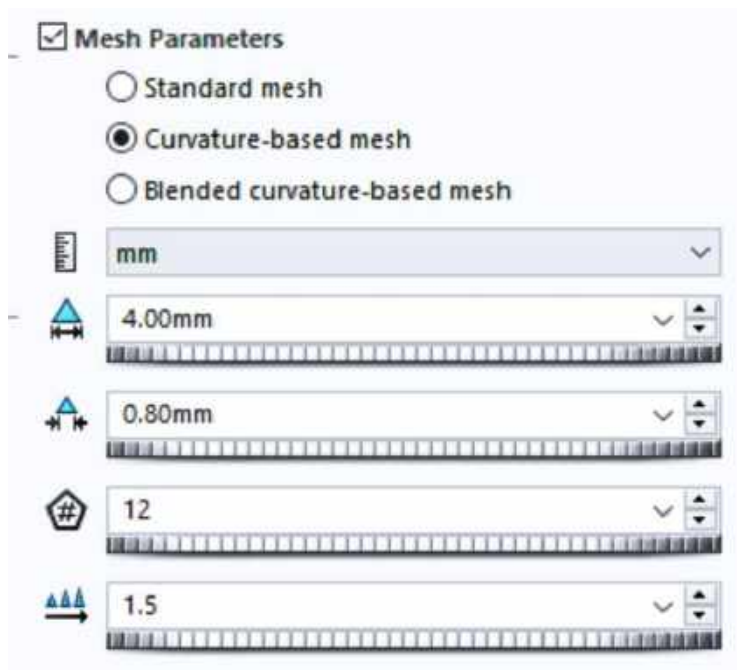


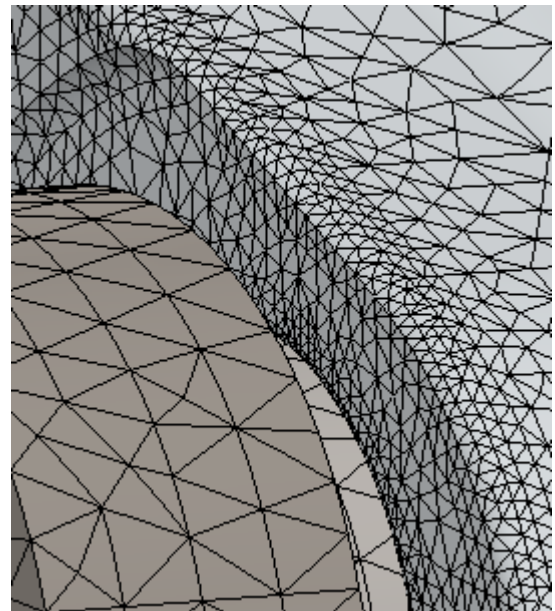
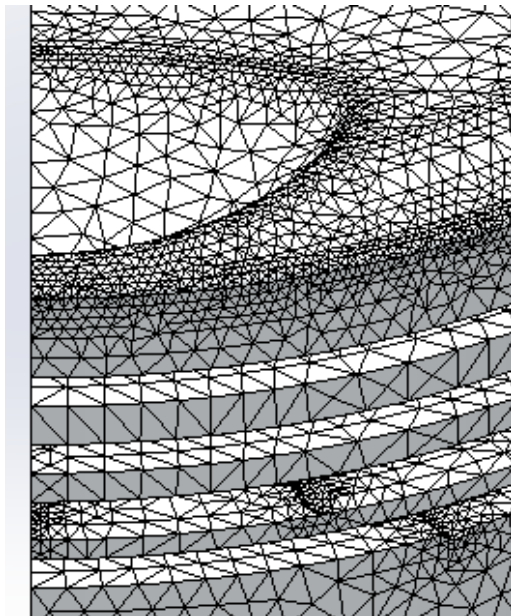
Рис. 44. Визначення навантажень:
а – у дереві побудови; б – тиск; в – прискорення

Генерація сітки скінченних елементів (рис. 45). Деталі мають багато непласких елементів, тому вибираємо опцію «Сітка на основі кривизни» і задаємо параметри сітки. Модель для статичного аналізу підготовлено, але без даних щодо температурного стану.



a

б



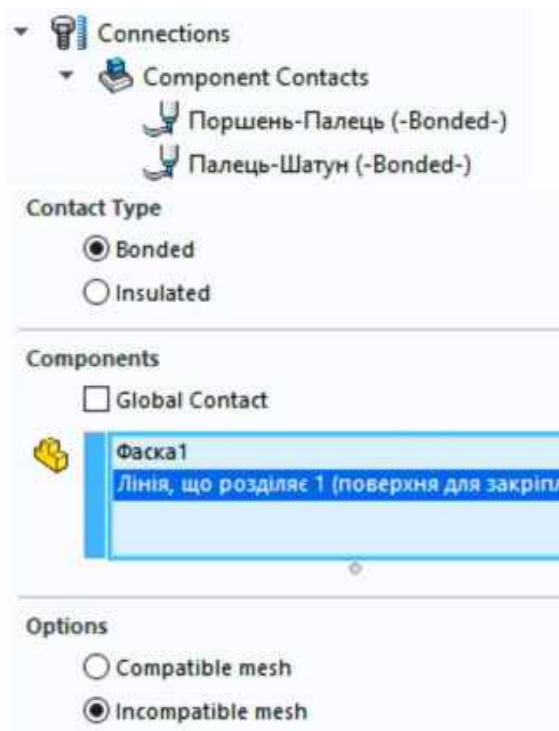
в

г

Рис. 45. Побудова сітки: *a* – параметри; *б* – загальний вигляд;
в – у зоні виїмок під клапани; *г* – у зоні пальцевого отвору

Термічний аналіз

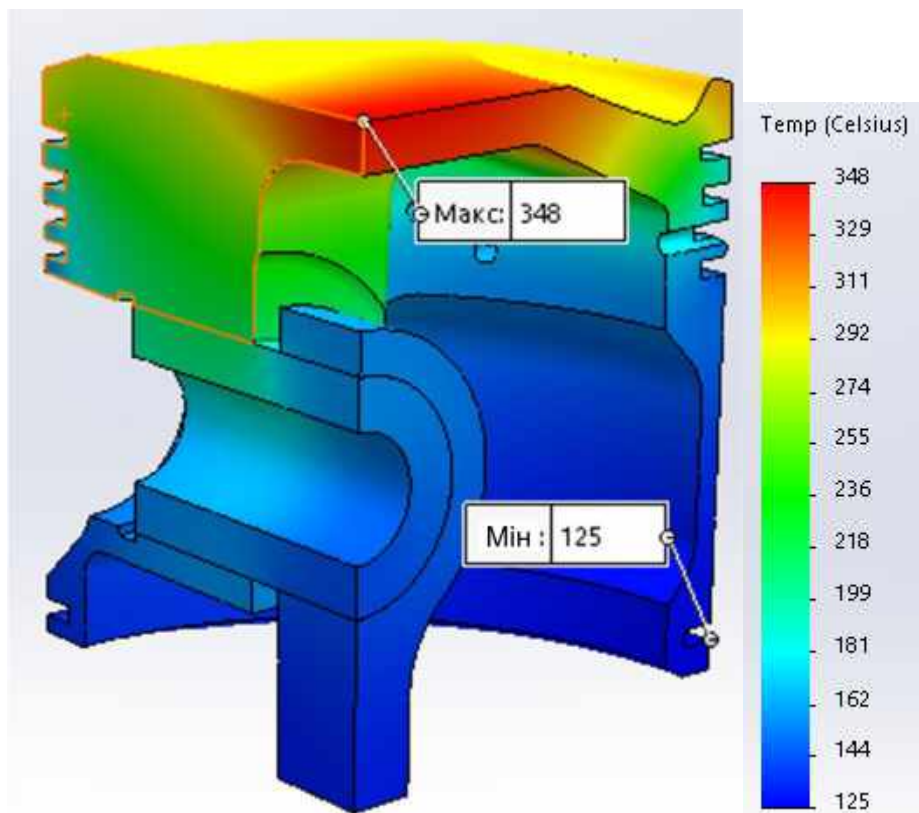
Відкриваємо вкладку «Термічне дослідження». Є сітка скінченних елементів для аналізу силового навантаження, яку треба застосувати для термічного аналізу, якщо потім буде проводитися аналіз загального навантаження – силового й термічного. Копіюємо сітку зі статичного дослідження. Робимо припущення, що в контакті поверхонь немає зазорів і термічного опору. У такому випадку потрібно визначити зв'язані контактні пари з несумісною сіткою, що й вибираємо під час визначення такого контакту. Умови конвективного теплоперенесення беремо з табл. 1 (рис. 46, *a*, *б*) і виконуємо розрахунок. Результат показано на рис. 46, *в*.



а



б



в

Рис. 46. Термічний аналіз: а – визначення контактів; б – умови теплонавантаження; в – температурне поле складання

Повертаємось до статичного розрахунку і в полі «навантаження» (рис. 47, а, б) додаємо термічне навантаження з попереднього розрахунку.

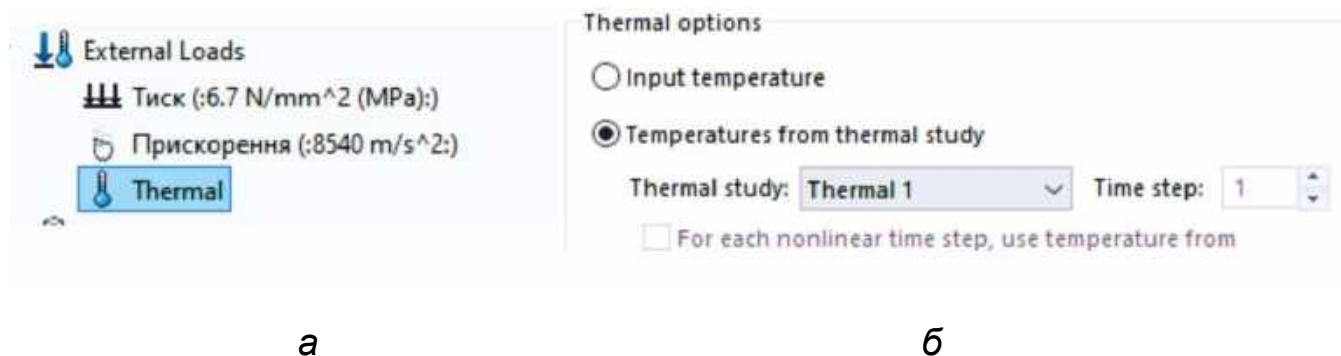
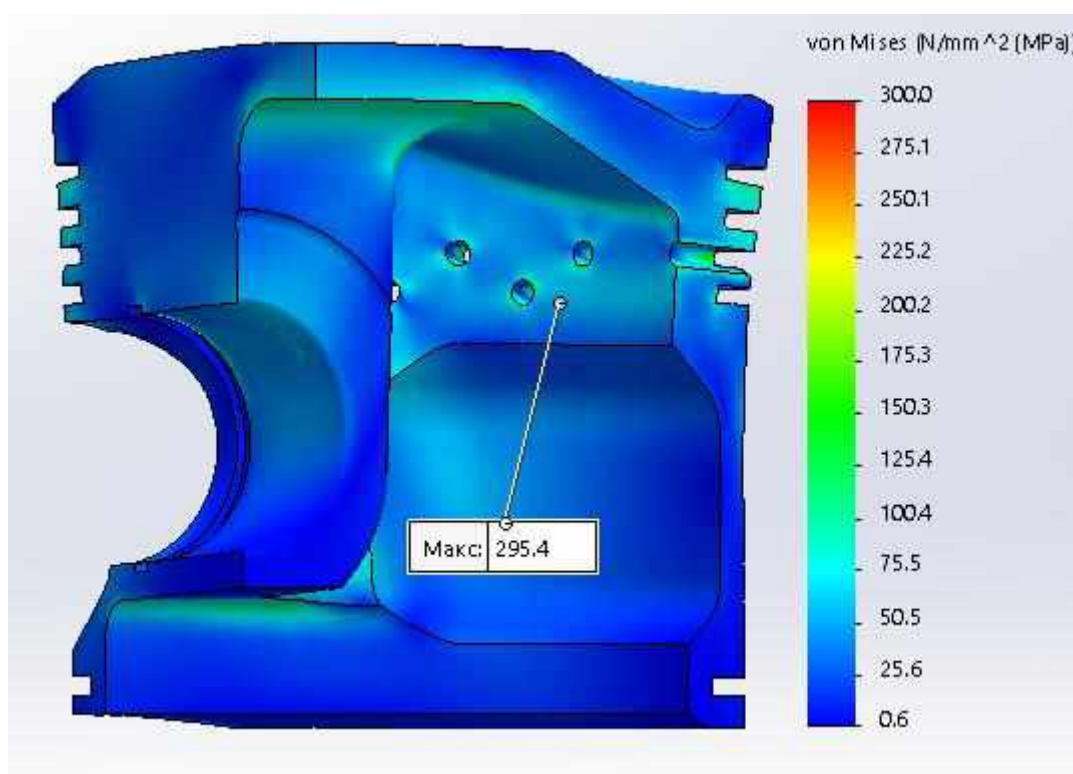


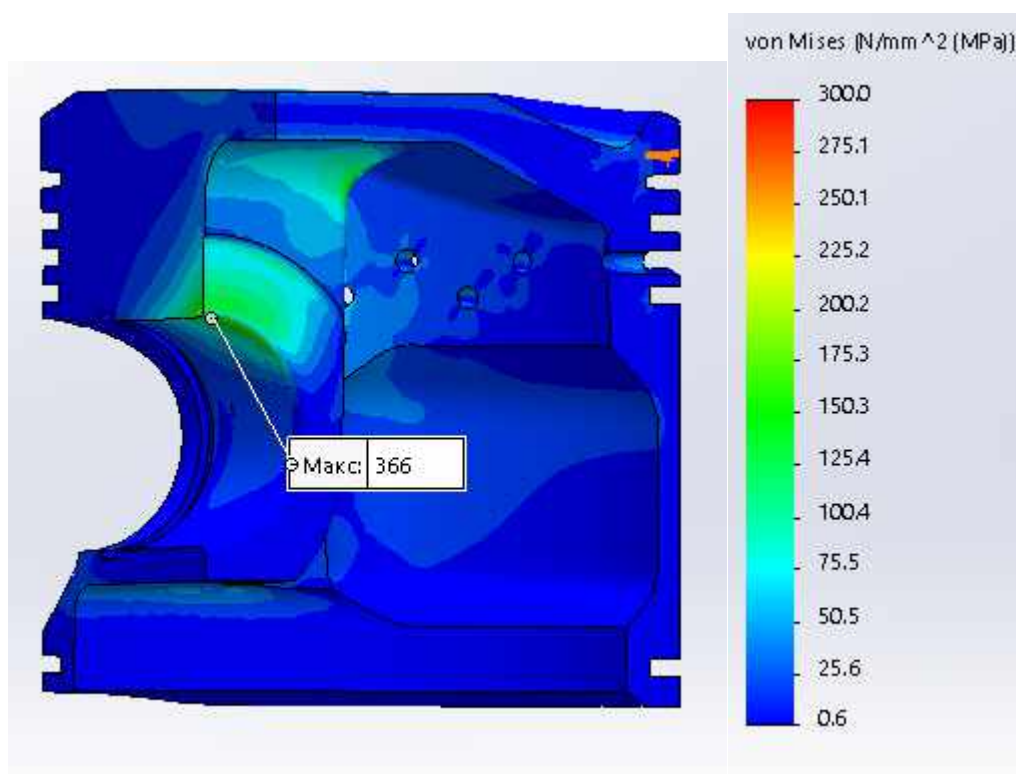
Рис. 47. Додавання до статичного аналізу результату розрахунку температур:
a – у дереві побудови; *б* – у вкладці «Термічний»

Запускаємо розрахунок та отримуємо модельний навантажений стан поршня (рис. 48).

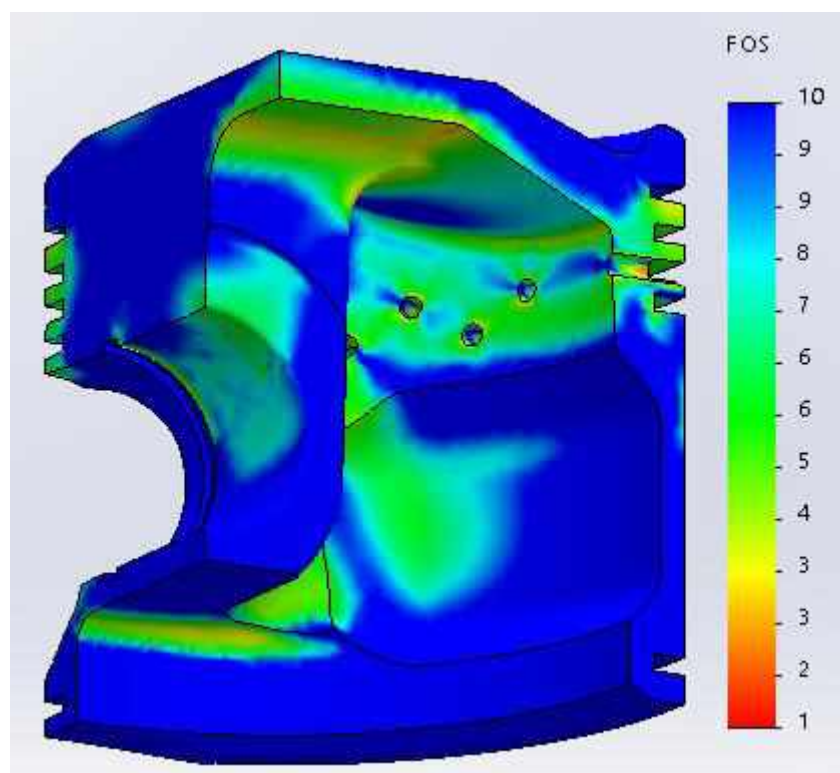


a

Рис. 48. Результати моделювання термосилового навантаження (тільки поршень):
a – силове й термічне; *б* – тільки силове; *в* – запаси міцності поршня при термосиловому навантаженні



б



б

Рис. 48. Закінчення

Запитання для самоконтролю

1. Які ступені свободи мають тіла в просторі?
2. Як закріплювати моделі, що мають площини симетрії?
3. Як робити сумісні сітки скінченних елементів для різних розрахунків?

6. МАТЕРІАЛИ Й ЕЛЕМЕНТИ ТЕХНОЛОГІЇ

Основні вимоги до матеріалів, що застосовуються для виготовлення поршнів:

- висока механічна міцність, що забезпечує надійність поршня під час роботи в умовах ударних навантажень;
- висока границя витривалості й опірності циклічним навантаженням;
- достатня пружність, що забезпечує здатність тронка поршня набувати форми циліндра без пластичного деформування;
- достатня жароміцність і жаростійкість, коли допускається нагрівання до 300...400 °C без різкого зниження механічних властивостей;
- мінімальний коефіцієнт температурного розширення;
- хороша теплопровідність, що забезпечує інтенсивне відведення тепла від розігрітої газами головки поршня;
- досить висока стійкість до корозійного впливу агресивних газів і кислот, що утворюються в циліндрі;
- досить хороші антифрикційні властивості, завдяки чому не утворюються задирки під час роботи поршня.

Найбільш прийнятними для виготовлення поршнів є сірий чавун і сплави на основі алюмінію. З підвищенням швидкохідності двигунів підвищуються інерційні навантаження, тому перелічені вище характеристики поршнів набули переважного значення. У зв'язку з цим надалі будемо розглядати лише матеріали на основі алюмінієвих сплавів.

Найбільшого поширення набув метод виготовлення алюмінієвих поршнів литтям у кокіль, при якому зовнішня поверхня поршня формується стінками рознімної чавунної матриці, внутрішня порожнина – сталевими стрижнями. Склад і властивості деяких ливарних сплавів наведено в табл. 2.

Кількість стрижнів (3–5) залежить від конфігурації внутрішньої поверхні поршня. Застосовуються також кокілі з алюмінієвих сплавів з анодovаною внутрішньою поверхнею для виготовлення поршнів з рівномірною дрібнозернистою структурою. Границя втомної міцності σ_v при цьому підвищується приблизно на 30 %. Необхідну твердість алюмінієвих поршнів (не нижче 90...100 HB) доцільно одержувати регулюванням швидкості охолодження виливка в кокіль. Якщо в литому стані поршень має знижену твердість, то його піддають гартуванню з подальшим старінням. Для алюмінієво-кремнієвих сплавів, склад яких близький до евтектичного, температура загартовування становить 510...530 °С. Якщо можливо, слід уникати процесу загартовування через можливість появи мікротріщин у найбільш напружених місцях поршня. Поршні з алюмінієвих сплавів схильні до старіння, що супроводжується збільшенням розмірів поршня. Щоб уникнути задирок, поршні попередньо піддають обов'язковому штучному старінню при температурі 190...200 °С протягом 8...18 год з подальшим охолодженням зі швидкістю 50 °С/год. Після такої термообробки поршень надійно працює при температурі 350...360 °С.

Для високофорсованих двигунів (авіаційних і наземних спортивних) застосовуються штамповані поршні з деформованих сплавів алюмінію з міддю (табл. 3). Ці сплави мають хороші механічні властивості як при кімнатній температурі, так і при підвищених температурах. Властивості їх можна значно підвищити загартовуванням (табл. 4).

Алюмінієво-мідні сплави мають занадто високий коефіцієнт лінійного розширення, і для запобігання заїданням поршнів під час роботи їх доводиться робити з великими зазорами відносно циліндра, що призводить до стукотіння й підвищених динамічних навантажень у початковий період роботи холодного двигуна. Конфігурація внутрішньої порожнини штампованих поршнів визначається як конструктивними міркуваннями, так і технологією їх виготовлення: вертикальні стінки слід проектувати з ухилом $5...10^\circ$ для зручності виймання пуансона; необхідно уникати складних форм й переходів, незручних при штампуванні. До механічної обробки поршнів ставляться суворі вимоги. Зокрема, необхідно точно дотримати потрібну відстань від осі пальця поршня до днища (див. рис. 1), оскільки ця відстань визначає ступінь стиснення циліндра. Вісь пальця поршня й торцеві поверхні канавок для поршневих кілець мають бути перпендикулярними до осі поршня. Для зменшення тертя й зношування поршнів їх зовнішню поверхню обробляють особливо ретельно. На зовнішню поверхню поршня наносять спеціальні покриття для запобігання її зношенню в період обкатування при холодних запусках або надмірних тимчасових навантаженнях. Найбільш широко застосовуються гальванічне й контактне лудіння поршнів чистим оловом, а також графітизація й фосфатування тронка поршня.

В алюмінієвих поршнях високофорсованих дизельних двигунів часто спостерігаються зминання й передчасне зношення канавки, у якій розміщується верхнє поршневе кільце. Для усунення цього дефекту встановлюють зміцнювальну вставку зі спеціального чавуну – нірезисту, або застосовують плазмову переплавку зони верхнього компресійного кільця з унесенням легувальних домішок у процесі переплавлення. Процес установа підготовленої нірезистової вставки в кокіль і заливання його сплавом має тривати не більше 30 с. В іншому випадку не відбудеться спаювання матеріалів вставки й поршня.

Таблиця 3

Марки, склад і властивості сплавів для виготовлення поршнів

Країна	Марка сплаву	Уміст додаткових елементів в алюмінієвому сплаві, %								σ _в , МПа	Твердість, НВ
		Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti		
								Не більше			
Литі поршні											
США	SAE332	2...4	8,5...10,5	≤ 1,5	≤ 0,8	0,2...0,6	≤ 0,5	1	0,25	310	105
США	SAE334	1,8...2,8	11...13	≤ 1,5	≤ 0,5	0,7...1,3	1	1	0,25	310	110
Англія	ZM-13WP	0,5...1,3	11...13	0,8	0,5	0,8...1,5	0,7...2,5	0,1	0,2	280	100...150
Німеччина	AlSi12	≤ 0,05	11...13,5	0,6	≤ 0,5	-	≤ 0,2	0,5	0,15	200...260	55...70
Німеччина	AlSi10MgCu	≤ 0,2	9...11	≤ 0,6	0,2...0,5	≤ 0,5	≤ 0,1	0,2	0,1	200...260	65...85
Німеччина	K1275	0,8...1,5	11...13	0,7	0,2	0,8...1,3	0,8...1,3	0,2	0,2	200...250	90...125
Німеччина	KS282	0,8...1,5	23...26	0,7	≤ 0,2	0,8...1,3	0,8...1,3	0,2	0,2	180...220	90...125
Японія	AC8B	2...4	8,5...10,5	1,2	0,5	0,5...1,5	0,5...1,5	0,5	0,2	220	90
Україна	АЛ25	1,5...3	11...13	0,8	0,3...0,6	0,8...1,3	0,8...1,3	0,5	0,2	190	90
Україна	АЛ26	1,5...2,5	20...22	0,7	0,4...0,8	0,4...0,7	1...2	0,3	0,2	160	90
Україна	АЛ30	0,8...1,3	11...13	0,7	≤ 0,2	0,8...1,3	0,8...1,3	0,2	0,2	200	90
Ковані поршні											
США	SAE34	9,5...10,8	≤ 2	≤ 0,5	≤ 0,5	0,25	≤ 0,05	0,8	0,25	300	115
США	SAE39	3,5...4,5	≤ 0,7	≤ 1	≤ 0,35	1,2...1,8	1,7...2,3	0,35	0,25	340	105
Англія	LM-14	3,5...4,5	≤ 0,6	≤ 0,6	0,65	1,2...1,7	1,8...2,3	0,1	0,2	240	65...85
Японія	AC5A	3,5...4,5	≤ 0,6	≤ 0,8	0,1	1,2...1,8	1,7	0,1	0,2	305	90
Україна	AK2	4	0,75	0,75	-	0,6	2	-	-	370	95
Україна	AK4-1	2	≤ 0,35	1,3	-	1,6	1,2	-	-	390 (450)	130

Таблиця 4

Залежність механічних властивостей матеріалу від температури

Температура, °C	Механічні властивості			
	Границя міцності σ_b , МПа	Границя тривалої міцності σ_{-1} , МПа	Модуль пружності E, МПа	Коефіцієнт лінійного розширення α , $\times 10^6$ °C ⁻¹
150	400	290	-	19,6
200	340	170	63000	-
250	280	100	-	-
300	170	40	51000	24,8

Вимоги до матеріалів для виготовлення поршневих кілець:

- висока втомна міцність;
- висока статична міцність на згин;
- висока зносостійкість і хороші антифрикційні якості;
- хороша опірність газовій та електрохімічній корозії;
- здатність до швидкого припрацювання;
- здатність утримувати моторне масло на поверхні;
- високі теплопровідність і теплостійкість;
- хороша оброблюваність різанням;
- відсутність схильності до спаювання з матеріалами поршня та циліндра.

Поршневі кільця найчастіше відливаються з легованого сірого чавуну перлітової структури з дрібнопластинчастим графітом, що мають високі антифрикційні якості й хорошу жаростійкість. Маслоснімальні кільця виготовляються зі сталі й чавуну або литтям в індивідуальні стаціонарні форми, або відцентровим способом. Складені маслоснімальні кільця виготовляють зі сталі.

На якості поршневих кілець сильно позначається розподіл у сплаві вуглецю. У технічних умовах зазвичай наводяться межі вмісту в сплаві зв'язаного вуглецю (0,45...0,80 %), оскільки збільшення його вмісту спричиняє різке підвищення крихкості кілець, а зменшення його вмісту призводить до зменшення їх твердості й пружності, а також до посиленого зношення. Не

менше значення має й розподіл по перерізу кільця вільного вуглецю (графіту). Нерівномірний його розподіл є однією з основних причин швидкої втрати пружності кілець.

На умови роботи кілець також значно впливає технологія отримання заготовки й оброблення кілець. Хімічний склад і механічні властивості матеріалів для виготовлення поршневих кілець наведено в табл. 5.

Для підвищення стійкості поршневих кілець на робочі поверхні наносять покриття. Найбільш поширеним є хромування. Найчастіше хромують верхнє поршневе кільце, товщина покриття становить 0,12...0,18 мм. Шар хрому добре працює в парі з чавунним або сталевим циліндром. Для утримання моторного масла на поверхні кільця шар хрому роблять пористим. Твердість хрому значно перевищує твердість структурних складових чавуну, що застосовується для циліндрів. Тому в парі з хромованими кільцями доцільно використовувати циліндри з твердіших матеріалів. Шар твердого хрому важко допрацьовується, тому до точності виготовлення таких кілець ставляться підвищені вимоги.

При фосфатуванні у водних розчинах фосфорно-кислих солей марганцю та заліза на поверхні кілець утворюється плівка з вторинних і третинних фосфатів металів завтовшки 8...15 мкм. Фосфатована поверхня є пористою, завдяки чому добре вбирає моторне масло. Застосовують й інші покриття – лудіння, залізнення, оксидування тощо – для припрацювання кільця до поверхні дзеркала циліндра й зниження коефіцієнта тертя.

Таблиця 5

Склад і властивості чавуну для виготовлення поршневих кілець

Уміст легувальних елементів, %						E, МПа	σ_B , МПа	σ_z , МПа	Твер- дість, НВ
C	Si	Mn	P	Cr	Інші				
3,7...3,9	2,7...2,9	0,6...0,8	0,3...0,5	0,25...0,35	(0,3...0,5) Mo	70000...90000	-	-	-
2,9...3,3	1,2...1,8	0,6...1,0	0,2...0,5	-	-	105000...125000	250...350	-	197...230
3,6...4,0	2,5...3,0	0,5...0,8	0,4...0,6	0,3	0,3Cu	85000...115000	-	350...450	-
3,5...4,0	2,3...2,9	0,2...0,5	0,3	0,2	0,3Cu, 0,4V, 1,0Ni	150000...170000	-	1300	-

Поршневі пальці виготовляються з цементованих або азотованих сталей з високими механічними властивостями (наприклад, зі сталей 15ХМ, 38ХА, 12ХН3А і 18Х2Н4ВА). Механічні властивості матеріалів пальців: $\sigma_b = 480 \dots 1200$ МПа, $\delta = 10 \dots 25$ %, HB = 130–220. Твердість цементованої сталі HRC = 59...61 (глибина цементації 0,8...2,0 мм).

Для зменшення зносу і збільшення втомної міцності вся поверхня пальця обробляється дуже ретельно – шліфується й полірується. Зовнішній діаметр пальця обробляється за п'ятим або шостим квалітетом. Унаслідок різних посадок пальців у втулках і бобишках поршня допуски на обробку деталей зчленування встановлюються за системою вала (у системі отвору палець був би ступінчастим, що невігідно конструктивно й технологічно).

Вимоги до матеріалів поршневих пальців – такі самі, як і вимоги до поршневих кілець.

Запитання для самоконтролю

1. Які основні вимоги ставляться до матеріалів, що використовуються для виготовлення поршня, поршневих пальців і кілець?
2. Особливості технології виготовлення деталей комплексу поршня.
3. Які та для чого застосовуються покриття деталей поршневої групи?

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

Белогуб, А. В. Механизм газораспределения 4-тактных поршневых двигателей : учеб. пособие / А. В. Белогуб. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьков. авиац. ин-т», 2013. – 23 с.

Белогуб, А. В. Цилиндро-поршневая группа. Техника и технология : учеб. пособие / А. В. Белогуб. – Харьков : Автрамат, 2012. – 39 с.

Белогуб, А. В. Цилиндры и блоки авиационных поршневых двигателей : учеб. пособие / А. В. Белогуб, Ю. А. Гусев, А. И. Гаркуша. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьков. авиац. ин-т», 2016. – 31 с.

Белогуб, А. В. Шатуны авиационных поршневых двигателей : учеб. пособие / А. В. Белогуб, Ю. С. Шошин, Ю. А. Гусев. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьков. авиац. ин-т», 2015. – 32 с.

Білогуб, О. В. Профілювання зовнішньої поверхні поршня / О. В. Білогуб // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2023. – № 2. – С. 20–25. – DOI: 10.20998/0419-8719.2023.2.03.

Білогуб, О. В. Як впевнити студента, що досконале знання пакета прикладних програм не є залогом успіху. Моделювання напруженого стану поршня двотактного двигуна / О. В. Білогуб, Є. В. Марценюк, М. О. Максимова // MPP&O'2022 : матеріали IV Міжнар. наук.-практ. мор. конф. каф. СЕУ і ТЕ Навч.-наук. ін-ту мор. флоту Одес. нац. мор. ун-ту, Одеса, квіт. 2022 р. – С. 208–215. – DOI: 10.13140/RG.2.2.15422.36166.

Гусев, Ю. А. Коленчатые валы : учеб. пособие / Ю. А. Гусев, А. В. Белогуб, Ю. А. Воробьев. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьков. авиац. ин-т», 2016. – 28 с.

Гусев, Ю. А. Поршни двигателей внутреннего сгорания / Ю. А. Гусев, С. В. Епифанов. – Харьков : Гос. аэрокосм. ун-т «Харьков. авиац. ин-т», 1998. – 28 с.

Д'яченко, В. Г. Теорія двигунів внутрішнього згоряння : підручник / В. Г. Д'яченко. – Харків : ХНАДУ, 2009. – 500 с.

Кириченко, В. И. Динамический расчет поршневого звездообразного двигателя : учеб. пособие / В. И. Кириченко. – Харьков : Харьков. авиац. ин-т, 1973. – 67 с.

Кормилов, Н. И. Расчет на прочность деталей поршневого двигателя / Н. И. Кормилов. – Харьков : Харьков. авиац. ин-т, 1974. – 76 с.

Стеркенбург, Р. Довідник із стандартних авіаційних двигунів [Електронний ресурс] / Р. Стеркенбург, Пен Хао Ван. – Нью-Йорк : McGraw Hill, 2022. – Режим доступу: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781264259144>.

Хейвуд, Дж. Б. Основи двигуна внутрішнього згоряння [Електронний ресурс] / Дж. Б. Хейвуд. – Нью-Йорк : McGraw-Hill Education, 2018. – Режим доступу: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781260116106>.

Ganesan, V. IC Engines / V. Ganesan, Fourth Edition. Tata McGraw Hill Education Private Limited, New Delhi. 2012. – 719 p.

ЗМІСТ

1. УМОВИ РОБОТИ ПОРШНІВ І ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО НИХ	3
Запитання для самоконтролю.....	9
2. ЗАЗОРИ Й ПОВЕРХНЯ ПОРШНЯ.....	9
Запитання для самоконтролю.....	12
3. ПРИКЛАДИ КОНСТРУКЦІЙ ПОРШНІВ.....	12
3.1. Поршень двигуна АМ-42	12
3.2. Поршень двигуна ВК-105	13
3.3. Поршень двигуна АШ-82	14
3.4. Поршень двигуна 6ТД	15
3.5. Поршень двигуна ROTAX-582.....	19
3.6. Поршень дизельного двигуна SCANIA	20
Запитання для самоконтролю.....	21
4. ПОБУДОВА ТРИВИМІРНОЇ МОДЕЛІ ПОРШНЯ	21
Запитання для самоконтролю.....	38
5. АНАЛІЗ ТЕПЛОВОГО СТАНУ Й МІЦНОСТІ	38
Запитання для самоконтролю.....	46
6. МАТЕРІАЛИ Й ЕЛЕМЕНТИ ТЕХНОЛОГІЇ.....	46
Запитання для самоконтролю.....	52
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	53

Навчальне видання

Білогуб Олександр Віталійович

ПОРШНІ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Редактор Т. О. Іващенко

Зв. план, 2024

Підписано до друку 24.04.2024

Формат 60x84 1/16. Папір офс. Офс. друк

Ум. друк. арк. 3,1. Обл.-вид. арк. 3,5. Наклад 50 пр.

Замовлення 71-24. Ціна вільна

Видавець і виготовлювач

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського

«Харківський авіаційний інститут»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

<http://www.khai.edu>

Видавничий центр «ХАІ»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

izdat@khai.edu

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001