

УДК 620.178

Г.В. Кречковська, Р.Я. Ярема, О.З. Студент, В.Р. Бас, Л.О. Бабій, І.Я. Долінська  
Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна

### ФРАКТОГРАФІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ РУЙНУВАННЯ ВИСОКОМІЩНОГО ЧАВУННОГО ЛИТВА ЗА ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

*Проаналізовано фрактографічні ознаки зламу головки циліндрів двигуна. Показано, що руйнування розпочиналося від поверхні внутрішньої технологічної порожнини, біля якої виявили прямі ознаки окрихнення. Тоді як в околі поверхні плити головки циліндрів домінували елементи в'язкого руйнування перетинок між включеннями графіту. Зв'язали це з вищою температурою поверхні головки циліндрів, яка спричиняє термічні напруження розтягу на внутрішній поверхні з боку технологічної порожнини. Металлографічні дослідження виявили характерну для високоміщного чавуна структуру у вигляді кулястого графіту на фоні ферит-перлітної матриці. Відзначили великі розміри графітових включень та їх градієнт по товщині перетинки між поверхнею плити головки циліндрів та внутрішньою технологічною порожниною.*

*Ключові слова:* головка циліндрів двигуна, чавун, фрактографічні особливості, механізми руйнування.

### Г.В. Кречковская, Р.Я. Ярема, А.З. Студент, В.Р. Бас, Л.О. Бабий, И.Я. Долинская ФРАКТОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ВИСОПРОЧНОГО ЧУГУННОГО ЛИТЪЯ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

*Проанализировано фрактографические особенности излома головки цилиндров двигателя. Показано, что разрушение начиналось от поверхности внутренней технологической полости, у которой обнаружили прямые признаки охрупчивания. Тогда как в окрестности поверхности плиты головки цилиндров доминировали элементы вязкого разрушения перегородок между включениями графита. Объяснили это с более высокой температурой поверхности головки цилиндров, что вызывает термические напряжения растяжения на внутренней поверхности со стороны технологической полости. Металлографические исследования выявили характерную для высокопрочного чугуна структуру в виде шарообразного графита на фоне феррит-перлитной матрицы. Отметили большие размеры графитовых включений и их градиент по толщине перегородки между поверхностью плиты головки цилиндров и внутренней технологической полости.*

*Ключевые слова:* головка цилиндров двигателя, чугун, фрактографические особенности, механизмы разрушения.

### H.V. Krechkovska, R.Ya. Yarema, O.Z. Student, V.R. Bas, L.O. Babi, I.Ya. Dolinska FRAGTOGRAFY FEATURES OF THE HIGH-DUTY CAST IRON FRACTURE AT HIGH-TEMPERATURE OPERATION

*The fractographic features of fracture surface of the engine cylinders head were analyzed. The fracture of element was initiated from surface of the inner technological cavity, where a direct signs of embrittlement was founded. While in the vicinity of the surface of the plate cylinders head dominated the elements of ductile fracture of bridges between graphite inclusions. This was explained by the higher surface temperature of the cylinders head, which caused thermal tensile stresses on the inner surface of the technological cavity. Metallographic studies were revealed the specific structure of high-duty cast iron with the spherical graphite particles on the background for ferrite-perlite matrix. The large size of graphite inclusions and gradient its dimensions in wall thickness between the plate cylinder head surface and internal technological cavity were shown.*

*Keywords:* cylinders head of the engine, cast iron, fractographic features, fracture mechanisms.

**Постановка проблеми.** Блоки і головки циліндрів двигунів – це геометрично складні виливки з різною товщиною стінок і перетинок між відсіками. Блоки циліндрів повинні бути жорсткими і герметичними, а їх головки – ще й термотривкими. Зазвичай ці елементи виготовляють із низьколегованих модифікованих перлітних чавунів марок СЧ20 чи СЧ25 шляхом виливання у сирі піщані форми [1], що забезпечує матеріалу рівень міцності 200...250 МПа за товщини стінки виливки 15...25 мм, а в тонших перерізах - навіть до 270 МПа. Головка блоку циліндрів експлуатується за високих теплових і механічних навантажень. Тому, з часом, в ній можуть утворюватися тріщини. Одна з ознак порушення герметичності головки блока — поява запаху відпрацьованого газу під капотом автомашини або слідів моторної оливи в охолоджувальній рідині. Виникнення в плиті головки тріщин призводить до втрати компресії, а це, в свою чергу, знижує здатність до займання паливної суміші, з'являються пропуски в роботі циліндрів, двигун перегрівається. Про появу тріщин у головці циліндрів побічно можна судити за виглядом вихлопних газів. Білий густий дим (а насправді, пара) часто є ознакою потрапляння антифризу в камеру згорання через тріщину в головці [2].

Елементи виготовлені з високолегованого чавуну витримують високу степінь форсування та мало чутливі до перегрівання. Зокрема, теплоємність чавуну вдвічі нижча, ніж алюмінію, отже елементи чавунного литва швидше прогриваються до робочої температури. Разом з тим чавун в 2,7 рази важчий за алюміній, схильний до корозії, а його теплопровідність в 4 рази нижча, ніж

алюмінію. Тому двигуни з чавунним картером системи охолодження експлуатуються в жорсткішому режимі [2].

Найчастіше тріщини в головках блока циліндрів розташовуються в перетинках між сідлами клапанів, між сідлом клапана і форкамерою (у дизелів), а також по сідлу випускного клапану (рис.1). За перегрівання двигуна або перетягування головки під час зборки її нижня площина скривлюється, з'являється несувісність направляючих втулок і сідел клапанів. В більшості випадків деформація має місцевий характер. Причому зовнішні краї площини піднімаються над її центральною частиною (зазвичай не більше 0,1 мм) [3].

В даній роботі поставлено мету встановити причину виникнення тріщин в головці циліндрів двигуна та з'ясувати механізм їх зародження та поширення. Для встановлення причини руйнування зруйнованих в експлуатаційних умовах об'єктів успішно використано мікрофрактографічні дослідження [4-6]. Оскільки поверхня зламу відзеркалює вплив сукупності експлуатаційних чинників (механічного, структурного, температурного чи корозійного) на процес руйнування, то аналіз характерних елементів мікрорельєфу зламу дає змогу виділити найхарактерніші ознаки і пов'язати їх з дією того чи іншого чинника.

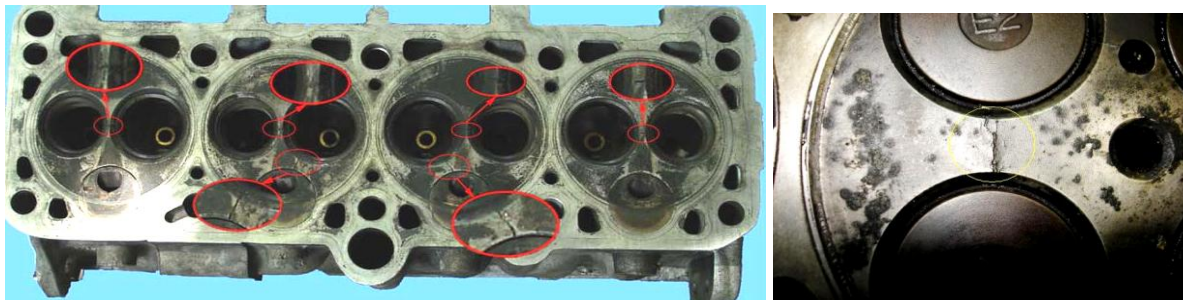


Рис.1. Розташування тріщин в головці циліндрів двигуна

**Об'єкт досліджень та використані методики.** Дослідили головку циліндрів двигуна, яка виготовлена шляхом литва з наступним механічним обробленням гнізд під клапани, проточування місця під фланцеве з'єднання, свердління отворів для охолоджувальної рідини тощо. Загалом геометрія головки циліндрів складна з розвиненою системою внутрішніх порожнин. В перетинці між гніздами під клапани чітко ідентифікували макротріщину, яка виходила на твірні поверхні отворів головки циліндрів двигуна, але не поширилася на всю її товщину. Після руйнування залишків перетинки між двома гніздами клапанів отримали дві половинки спряжених поверхонь зламів.

Хімічний склад металу оцінювали на оптичному іскровому атомно-емісійному спектрометрі SPECTROMAX LMF 0,5. Вміст елементів у металі розраховували як усереднене значення трьох замірів. Аналізували фрактографічні особливості реального зламу головки циліндрів двигуна з використанням сканівного електронного мікроскопа EVO-40XVP. Металографічні дослідження провели на оптичному мікроскопі Neofot-21.

**Результати досліджень.** В головці циліндрів двигуна візуально виявили макротріщину між отворами для клапанів, яка проходила по поверхні плити і виходила на твірні поверхні отворів для клапанів, на яких зафіксували сліди іржавих підтьоків. Це ознака просочування води з системи охолодження і не виключає її потрапляння до камери згорання з утворенням пари. В таблиці 1 подано хімічний склад чавуна головки циліндрів та середнє значення його твердості.

Таблиця 1

Хімічний склад чавуна головки циліндрів двигуна

Вміст елемента, мас. %										HB
C	Mn	Si	P	S	Cr	Mg	Ni	Sn	As	
>5,22	0,88	3,28	0,188	0,199	0,04	0,09	1,73	0,162	1,162	280

Структура аналізованого литва відповідає структурі високоміцного чавуну, якому властива куляста форма графіту на фоні ферит-перлітної матриці (рис. 2). Утворення такої структури спричинене тим, що кристалізація чавуну розпочинається з виділення певної кількості графіту.

Проте, щоби графіт виділявся постійно, необхідно забезпечити дуже повільне охолодження. Причому, чим нижча температура, тим менша повинна бути швидкість охолодження. Якщо ж вона вища за швидкість, що забезпечує виділення графіту, то його виділення припиняється. Стосовно умов кристалізації графіту сплав стає переохолодженим, що сприяє виділенню цементиту. Тому, кристалізація з графітного типу переходить на цементитний. При цьому забезпечується структура литва з кулястою формою графіту на фоні ферит-перлітної матриці (рис. 1а). Перлітні зерна при цьому мають неправильну витягнену вздовж меж феритних зерен форму (рис. 1б). Середній розмір феритних зерен становив 20 мкм. Відзначили також наявність розтріскування вздовж меж зерен або міжфазних меж в перліті в околі включень графіту (рис. 2г).

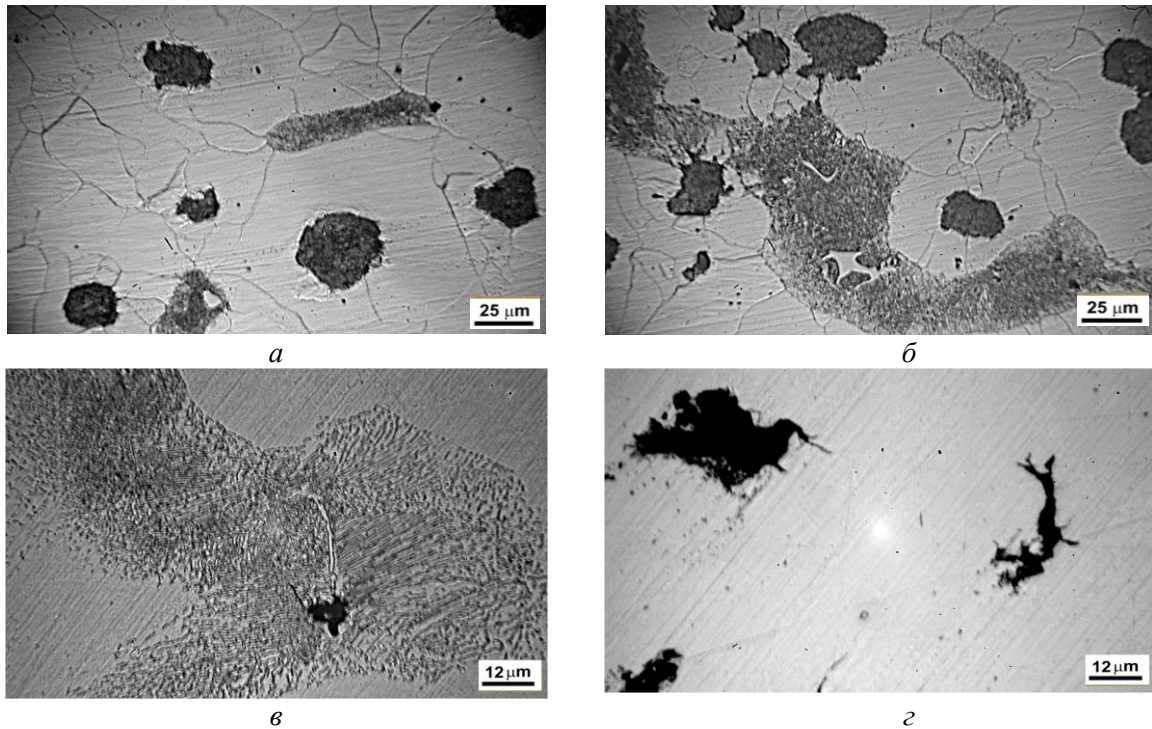


Рис. 2. Мікроструктура чавуна (а-в) та розтріскування (г) металу головки циліндрів.

В околі твірної поверхні отвору під клапан та вздовж меж розділу перліт-ферит спостерігали мережу тріщиноподібних пошкоджень, що дає підстави стверджувати, що наявність перліту в структурі литва не є позитивним з точки зору забезпечення роботоздатності головки циліндрів за таких температурно-силових умов експлуатації. Відзначили також нестабільність розмірів кулястого графіту в напрямі від твірної поверхні отвору під клапан до поверхні внутрішньої порожнини в плиті головки циліндрів (рис. 3). Лише на глибині приблизно 5...7 мм від поверхні отвору діаметр кулястого графіту стабілізується, це практично в центрі перерізу перетинки між внутрішньою порожниною в головці циліндрів та отвором під клапан.

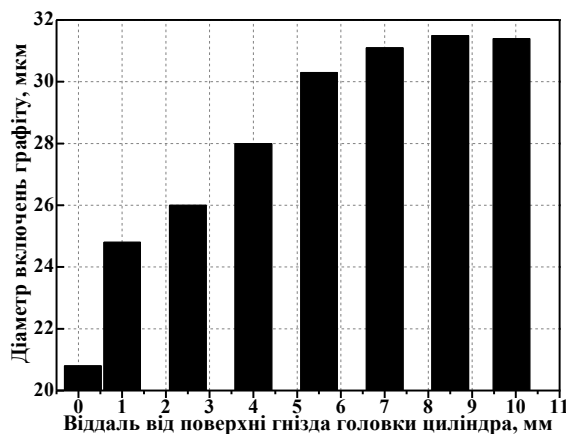
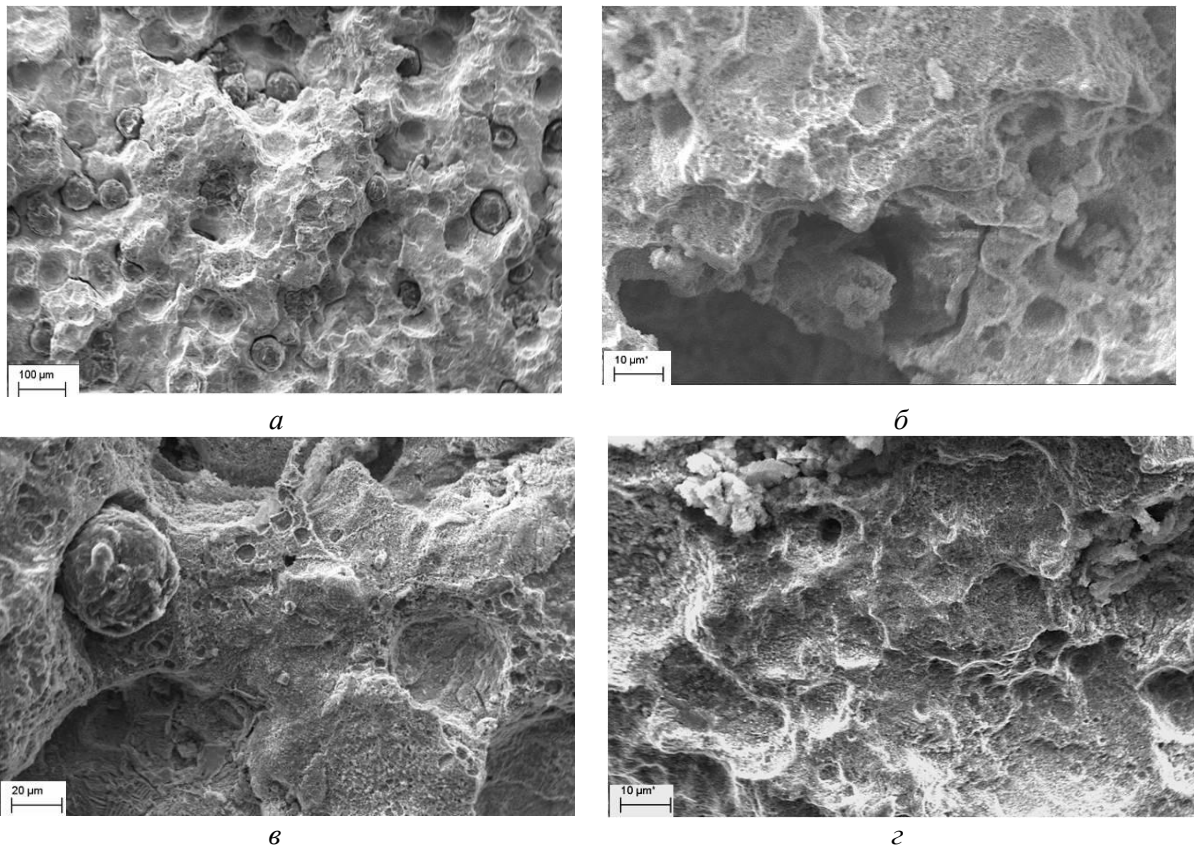


Рис. 3. Зміна розміру включень графіту від поверхні отвору під клапан в глибину перетинки між отвором і внутрішньою порожниною в головці циліндрів.

Зробили висновок, що твердження про те, що високоміцний чавун нечутливий до циклічних навантажень (бо графітні включення, порушуючи суцільність металеві основи, ослаблюють його чутливість до зовнішніх концентраторів напружень таких як дефекти поверхні, надрізи, виточки тощо) у нашому випадку не справдилося. Адже зафіксовано розтріскування і вздовж меж різнорідних зерен та ініційоване графітовими включеннями.

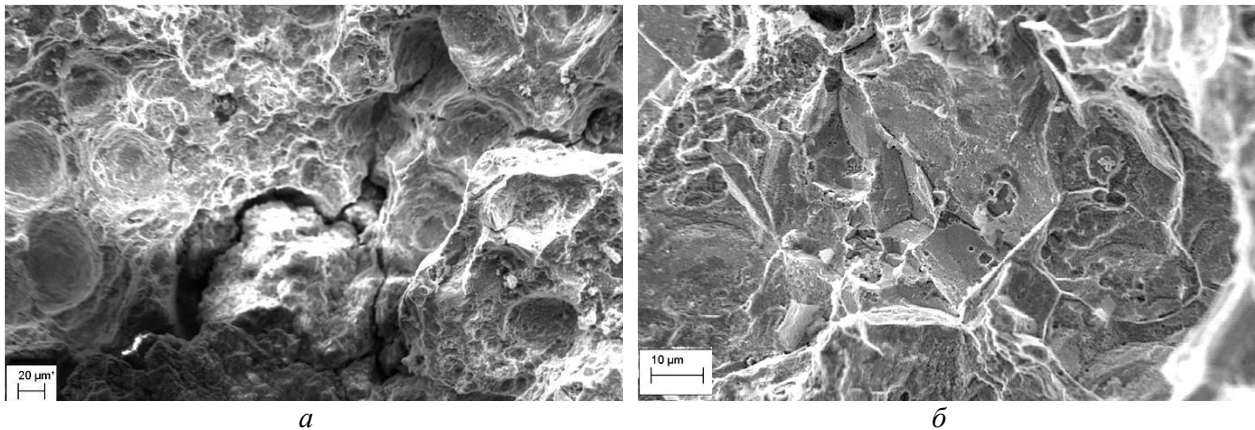
**Мікрофрактографічні особливості руйнування.** За невисокої роздільної здатності в зоні високотемпературного росту тріщини виявили чіткий зв'язок характеру руйнування з мікроструктурою чавуну. На зламі переважає велика кількість включень графіту (рис. 4а). Ці включення відіграють визначальну роль і на етапі росту тріщини в перетинці між поверхнею головки циліндрів та технологічною внутрішньою порожниною в ній, так і на етапі її зародження, яке на зламі виглядає як півеліптичні відповерхневі тріщини. У вершині таких поверхневих тріщин як правило спостерігали крихке міжзеренне руйнування (рис. 4б). Відшарування графітових включень від матриці внаслідок теплових змін ініціює зародження від них мережі дрібних мікротріщин за механізмом квазівідколів або міжзеренного руйнування (рис. 4в). Таке розтріскування часто спостерігали на дні ямок, графітове включення з яких було втрачено під час руйнування. Ці тріщинки сприяють в'язкому руйнуванню перетинок з найближчими включеннями графіту з об'єднанням фронтів мікротріщин навколо них та утворенням вже більших за розміром дископодібних мікротріщин, сформованих конгломератами графітових включень, що втратили зв'язок з матрицею. В подальшому руйнування відбувається шляхом об'єднання таких дископодібних тріщин з формуванням фронту макротріщини. При цьому на зламі з'являються довгі хвилеподібні гребені, які звичайно відповідають зупинкам фронту тріщини на локальних його ділянках та свідчать про високі рівні напружень, що спричиняють ріст тріщини (рис. 4г).



**Рис. 4. Мікрофрактограми, отримані в зоні високотемпературного росту тріщини від поверхні плити головки циліндрів в перетинці між нею та внутрішньою технологічною порожниною.**

З наближенням до поверхні внутрішнього технологічного отвору під поверхнею плити головки циліндрів на зламі з'являються вторинні міжзеренні тріщини, які звичайно пов'язують з окрихченням (рис. 5а). В'язке руйнування перетинок між графітовими включеннями, яке переважало в околі поверхні плити головки циліндрів, змінюється на низькорельєфне, а значить відбувалося крихке руйнування. І найголовніше, що в околі поверхні внутрішньої технологічної

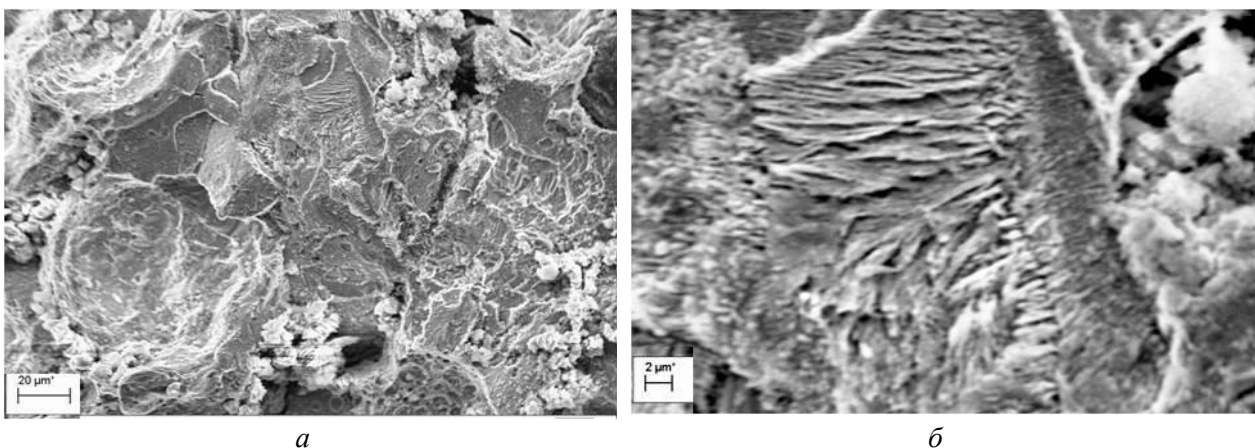
порожнини спостерігали вторинне макроротріскування та істотне окрихчення зламу. Зародження тріщини від цієї поверхні відбувалося за міжзеренним механізмом (рис. 5б). В межах перлітних зерен чітко ідентифікували міжфазні межі між феритом та цементитом.



**Рис.5. Мікрофрактограми, отримані в зоні високотемпературного росту тріщини біля поверхні внутрішньої технологічної порожнини під поверхнею плити головки циліндрів.**

Отже в околі поверхні внутрішньої технологічної порожнини злам має чіткі ознаки окрихчення (порівняно зі спостереженнями в околі поверхні плити головки циліндрів), що дає підстави припустити, що саме звідси відбувалося зародження руйнування. Адже температура в циліндрі завжди вища, ніж в технологічній порожнині, а це значить, що тут завжди будуть термічні напруження розтягу, які сприятимуть відшаруванню графітових включень від матриці і провокуватимуть розтріскування вздовж меж зерен. Звідси стає зрозумілим в'язкіший характер руйнування в околі поверхні плити головки циліндрів. Адже це вже високотемпературний ріст тріщини, що зародилася на поверхні внутрішньої технологічної порожнини.

Подібні тенденції руйнування спостерігали і в перетинці між поверхнями контактування головки циліндрів з клапаном та внутрішньою технологічною порожниною. Це дає підстави говорити про певну закономірність. А саме - зародження руйнування відбувається не від поверхні плити головки циліндрів, а зсередини від внутрішньої технологічної порожнини. Тому дуже важливо під час виготовлення головки циліндрів витримати вимогу, щодо точності розташування технологічних каналів в плиті, недопущення перекосів, виступів, невідповідності товщини перетинок в місцях з ослабленим перерізом.



**Рис. 6. Мікрофрактограми, отримані в зоні корозійного росту тріщини в перетинці між поверхнею внутрішньої технологічної порожнини та поверхнею отвору під клапан в головці циліндрів.**

В зоні поверхні зламу з характерними рудими відкладами іржі, зародження руйнування від поверхні відбувалося за міжзеренним механізмом (рис. 6а). Причому на зламі чітко ідентифікували гладкі феритні і перлітні зерна зі смугастим рельєфом. Така сама тенденція зберігається і в серцевині перетинки між отвором для клапана та внутрішньою технологічною

порожниною. Корозійне розтріскування відбувається не лише вздовж меж зерен, але і вздовж міжфазних меж фериту і цементиту в рамках перлітних зерен (рис. 6б).

В межах конгломератів графітових включень руйнування має ознаки в'язкого руйнування з характерними хвилястими гребенями відриву. Це означає, що руйнування за участі охолоджувального середовища відбувається не суцільним фронтом, а у вигляді локальних ділянок міжзеренного розтріскування, які об'єднуються між собою шляхом в'язкого руйнування перетинок між ними, ослаблених порожнинами навколо великих графітових включень.

**Висновки.** На твірній поверхні отворів для клапанів зафіксували сліди іржавих підтьоків, що є ознакою просочування води з системи охолодження і не виключає її потрапляння до камери згорання з утворенням пари. На поверхні отворів водяного охолодження головки циліндрів виявили сліди накипу, який, безумовно, ускладнює процес охолодження. Отже аналізований об'єкт міг експлуатуватися за недостатнього охолодження.

На зламі елемента чітко ідентифікували дві зони руйнування – високотемпературну і зону корозійного росту тріщини. Їх розрізняли за кольором окисних плівок – чорна плівка відповідала високотемпературному росту, а руда іржава – корозійному. Високотемпературний ріст тріщини відбувався в перетинці між поверхнею плити головки циліндрів та внутрішньою технологічною порожниною, а корозійний – в перетинках між отворами для клапанів та внутрішньою технологічною порожниною. Відзначили неоднакову товщини перетинок між отворами та внутрішньою технологічною порожниною в місці виникнення тріщини, що є ознакою неточності технології виливки.

Металографічні дослідження виявили характерну для високоміцного чавуна структуру у вигляді кулястого графіту на фоні ферит-перлітної структури. Відзначили великі розміри графітових включень (до 32 мкм) та їх розмірну нестабільність поперек перетинки між поверхнею плити головки циліндрів та внутрішньою технологічною порожниною. Якщо біля поверхні плити діаметр кулястого графіту становив 21 мкм, то на глибині до 5...7 мм він досягав 32 мкм. Перлітні зерна мали неправильну витягнену вздовж меж феритних зерен форму. Середній розмір феритних зерен становив 20 мкм.

За результатами мікрофрактографічних досліджень виявили, що утворення тріщини в перетинці між отворами для клапанів відбулося внаслідок сумісного впливу термічної втоми та корозивного охолоджувального середовища. Причому руйнування розпочиналося від поверхні внутрішньої технологічної порожнини, біля якої виявили прямі ознаки крихкого руйнування (міжзеренне руйнування, квазівідкольне руйнування перетинок між суміжними включеннями графіту). Тоді як в околі поверхні плити головки циліндрів домінували елементи в'язкого руйнування перетинок між включеннями графіту. Пояснили це завжди вищою температурою поверхні головки циліндрів, що спричиняло термічні напруження розтягу на поверхні внутрішньої технологічної порожнини і сприяло корозійному розтріскуванню чавуну за міжзеренним механізмом.

#### Список використаних джерел:

1. Чугун: Справ. изд. / Под ред. А. Д. Шермана и А. А. Жукова. – М.: Металургия, 1991. – 576с.
2. Електронний ресурс. – Режим доступу : [https://ru.wikipedia.org/wiki/блок\\_цилиндров](https://ru.wikipedia.org/wiki/блок_цилиндров).
3. Електронний ресурс. – Режим доступу : <http://www.argon.lviv.ua/pages/gol.htm>.
4. Романів О. М., Зима Ю. В., Карпенко Г. В. Електронна фрактографія зміцнених сталей. – К.: Наук. думка, 1974. – 207 с.
5. Кречковська Г. В. Фрактографічні ознаки механізмів транспортування впливу водню в конструкційних сталях / Г. В. Кречковська // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – 51, № 4. – С. 67 – 70. (Krechkovs'ka H. V. Fractographic signs of the mechanisms of hydrogen transportation in structural steels / H. V. Krechkovs'ka // Materials Science. – 2015. – 51, 4).
6. Фрактографічні ознаки експлуатаційної деградації зварних з'єднань магістральних нафтогонів / Г. В. Кречковська, С. Р. Яновський, О. З. Студент, Г. М. Никифорчин // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – 51, № 2. – С. 21–27. (Fractographic Signs of the In-Service Degradation of Welded Joints of Oil Mains / H. V. Krechkovs'ka, S. R. Yanovs'ky, O. Z. Student, H. M. Nykyforchyn // Materials Science. – 2015. – 50, 2. – P. 165–171).

Стаття надійшла до редакції 25.04.2016.