

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ  
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

## Пояснювальна записка

до дипломної роботи

бакалавра

Освітньо-кваліфікаційний рівень

Галузь знань **13 Механічна інженерія**

Шифр і назва галузі знань

Напрямок підготовки (спеціальність): **132 «Матеріалознавство.  
Відновлення та технічний сервіс автомобілів»**

Шифр і назва напрямку підготовки (спеціальності)

на тему: **«Дослідження механізмів руйнування конструкційних та  
інструментальних сталей»**

Шифр **ДРМТВА 24. 20182.000 ПЗ**

Виконав: студент 4-го курсу,  
група МТВА-20-1

  
Підпис

Микола СІРЖАНТ  
Ім'я, прізвище

Керівник к.т.н., доц. каф ТАМ.

  
Підпис

Володимир ГОНЧАР  
Ім'я, прізвище

До захисту допускаю:  
зав. кафедри ТАМ д.т.н., проф.

  
Підпис

Олександр ДИХА  
Ім'я, прізвище

14 06 2024 р.

Хмельницький, 2024

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

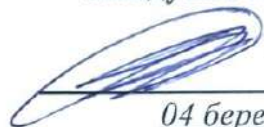
Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 132 «Матеріалознавство».

Спеціалізація «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ТАМ



*Диха О.В.*

04 березня 2024 року

## ЗАВДАННЯ

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

*Сіржанту Миколі Олеговичу*

Прізвище, ім'я, по батькові

**1. Тема роботи:** *Дослідження механізмів руйнування конструкційних та інструментальних сталей.*

**керівник роботи:** *Гончар Володимир Антонович, к.т.н., доц. каф. ТАМ.*

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом університету від 16.02.2024 р. № 8 (Д 16)

**2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру** 12.06.2024 р.

**3. Вихідні дані до проекту (роботи)** *Матеріали переддипломної практики.*

**4. Зміст пояснювальної записки** (перелік питань, які потрібно розробити)

*1) провести літературний огляд із проблеми;*

*2) виконати структурування видів руйнування;*

*3) здійснити аналіз видів зламів на розривних та ударних зразках*

*4) проаналізувати особливості руйнування виробів за різних умов*

*експлуатації.*

**5. Перелік графічного матеріалу (презентація):**

*Розробити презентацію у вигляді слайдів з розкриттям питань відповідно до мети роботи.*

## 6. Консультанти розділів проекту (роботи)


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 04 березня 2024 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	<i>провести літературний огляд із проблеми</i>	4.04.2023	<i>вик</i>
2	<i>виконати структурування видів руйнування; здійснити аналіз видів зламів на розривних та ударних зразках</i>	18.05.2023	<i>вик</i>
3	<i>проаналізувати особливості руйнування виробів за різних умов експлуатації</i>	25.05.2023	<i>вик</i>
4	<i>Оформлення роботи</i>	6.06.2023	<i>вик</i>
5	<i>Захист роботи</i>	21.06.2024	

Студент

  
Підпис

М.О. Сірюк  
Ініціали, прізвище

Керівник роботи

  
Підпис

В.А. Гончар  
Ініціали, прізвище

## РЕФЕРАТ

Студент гр. МТВА-20-1 Сіржант Микола Олегович.

*Структура та обсяг пояснювальної записки.* Дипломна робота на тему **«Дослідження механізмів руйнування конструкційних та інструментальних сталей»** складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 27 найменування, розміщених на 3 сторінках, та 1 додатку розміщеного на 11 сторінках. Роботу викладено на 77 сторінках, з них 62 сторінок основного тексту, на яких розміщено 16 рисунків і 10 таблиць.

Розуміння механіки руйнування конструкційних та інструментальних матеріалів, враховуючи їх умови експлуатації, дозволяє значною мірою підвищити надійність та довговічність виробів на стадії проектування та вибору матеріалів. Досліджувані причини руйнування матеріалів дозволяють запобігти їх повторній появі в процесі експлуатації.

Метою даної роботи є визначення механізмів та причин руйнування конструкційних та інструментальних сталей у конкретних умовах експлуатації.




Завдання роботи:

- провести літературний огляд із проблеми;
- виконати структурування видів руйнування;
- здійснити аналіз видів зламів на розривних та ударних зразках;
- проаналізувати особливості руйнування виробів за різних умов експлуатації..

**Перелік ключових слів:** *сталь, руйнування, злам, напруження, міцність.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 Огляд літератури з проблеми .....	8
1.1 Основні поняття та визначення.....	8
1.2 Загальні відомості про злами .....	12
1.3 Утворення мікротріщин.....	14
1.4 Макробудова зламів.....	16
1.5 Класифікація зламів .....	20
1.6 Опис найпоширеніших зламав .....	22
2 Дослідження .....	24
2.1 Вивчення поверхні руйнувань конструкційних та інструментальних сталей .....	30
3 Аналіз експлуатаційних руйнувань .....	51
3.1 Калібратор КЛС-295,3403.....	51
3.2 Приводний вал гідравлічногонасоса.....	58
Висновок.....	62
Список використаних джерел .....	63
Додатки .....	66

<b>ДРМТВАТАМ 24.20182.000 ПЗ</b>									
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат	Дослідження механізмів руйнування конструкційних та інструментальних сталей	Літ.	Арк.	Акрюшів	
		Сіржант						5	77
		Гончар							
		Реценз.							
		Н. Контр.	Бабак						
		Затверд.	Диха					ХНУ група МТВА 20-1	

## ВСТУП

Руйнування деталей машин, приладів, елементів конструкцій і споруд відбувається з різних причин, причому здебільшого через сукупний вплив кількох факторів, особливо це стосується катастрофічних руйнувань.

Причини руйнування в процесі експлуатації можна класифікувати на кілька груп: порушення умов експлуатації; невідповідність хімічного складу матеріалу; невідповідність структурного стану матеріалу через порушення технології у процесі виробництва або термічної обробки; порушення технології виготовлення виробів чи конструкцій тощо.

Для визначення причин руйнування проводяться комплексні дослідження, що залежать від багатьох факторів та необхідних результатів. Часто для аналізу причин руйнування використовуються такі методи: візуальні дослідження; визначення хімічного складу; макроаналіз; мікроаналіз структури та фрактографічні дослідження; визначення механічних властивостей.

Під руйнуванням розуміють процес зародження та розвитку в металі тріщин, що призводить до його поділу на частини. Руйнування відбувається через розвиток тріщини або злиття поруч розташованих тріщин в одну магістральну тріщину, яка спричиняє повне руйнування [1]. Руйнування може бути тендітним або в'язким. Механізм зародження тріщин однаковий як при тендітному, так і при в'язкому руйнуванні. Виникнення мікротріщин зазвичай відбувається завдяки накопиченню рухомих дислокацій (пластичної деформації) перед перешкодою, такою як кордони зерен або міжфазні кордони.

Найважливішу роль у встановленні причин руйнування матеріалів (з конструкційних та інструментальних сталей) відіграє аналіз експлуатаційних зламів. Візуальний огляд при малому збільшенні (макрофрактографія) є важливим для ідентифікації областей, які потребують подальшого дослідження при більш високому збільшенні (мікрофрактографія).

					ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналіз зламів матеріалів надає цінну інформацію про навантаження зразка чи елемента конструкції. Це дозволяє встановити зворотний зв'язок між фактичними та розрахунковими характеристиками матеріалу, що є необхідним при діагностиці аварійних випадків руйнування конструкцій та визначенні причин поломок.

Для діагностики руйнування потрібно знати структуру та властивості матеріалів, будову зламів, механізми руйнування, методи вивчення зламів, методи механічних випробувань, методи кількісної оцінки параметрів руйнування та методики розрахунків міцності конструкцій із тріщинами. Вивчення механізмів руйнування металевих матеріалів дозволяє використовувати отримані результати для прогнозування поведінки матеріалу в конкретних умовах експлуатації. Зв'язок фізичних та металознавчих аспектів руйнування з критеріями механіки руйнування представляє особливу актуальність і дає уявлення про природу процесів зародження та розповсюдження тріщин за різних умов навантаження, дозволяє коректніше описувати поведінку матеріалу на різних стадіях руйнування.

Реальні випадки поломок наведені нижче.

Аргентина, 1998 рік. У нафтопроводі з'явилася поздовжня тріщина завдовжки 4,8 м після одного з проходів скрепера, що видаляє парафін. Діаметр нафтопроводу становить 356 мм, товщина стінки — 6,35 мм. Термін експлуатації — 20 років.

Літак Boeing 737-200. Авіаційна пригода сталася в четвер, 28 квітня 1988 року, на висоті близько 8000 м через руйнування фюзеляжу в польоті. Згідно зі звітом, причинами аварії були: корозія металу, погана епоксидна зв'язка частин фюзеляжу, втома заклепок і пошкодження металу фюзеляжу через численні цикли "зліт-посадка", оскільки літак здійснював лише короткі рейси.

					<i>ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ</i>	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 Огляд літератури з проблеми

## 1.1 Основні поняття та визначення

Руйнування є надзвичайно складним, багатостадійним процесом, що керується різними факторами. Опис макро- та мікрорельєфів зламів здійснюється із застосуванням стандартної термінології, яка розглядається далі.

Злам – це поверхня руйнування твердого тіла.

Злам технологічної проби (ударного зразка) – це поверхня розділу, отримана шляхом згинання надрізаних зразків.

Будова зламу показано рис. 1.

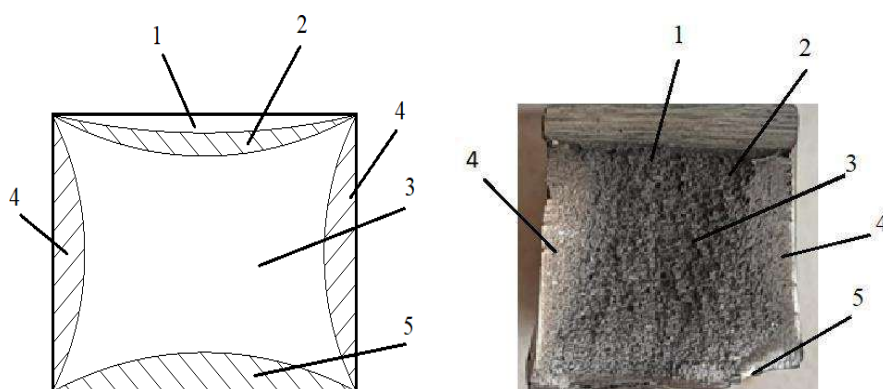


Рис.1 – Зображення зламів, сталь 4Х5МФС: а – схема зламу ударного зразка; б – злам зразка: 1 – вогнище руйнування; 2 – зона зародження тріщини; 3 – зона поширення тріщини; 4 – утяжка зламу; 5 – зона долому

**Макробудова (макрорельєф) зламу** – поверхня руйнування, яка визначає дефекти будови сплаву, хімічну та структурну неоднорідність при візуальному огляді або при малому збільшенні.

					ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

**Зона розлому** – ділянка поверхні руйнування, що характеризується будовою, відмінною від будови інших частин зламу.

**Осередок руйнування** – місце зародження руйнування.

**Шрами** – лінії на зламі, що є слідами злиття окремих, близько розташованих сусідніх тріщин, які поширюються в одному напрямку (зазвичай від осередку руйнування).

**Зона долому** – кінцева стадія руйнування.

**Магістральна тріщина** – тріщина, що веде до остаточного руйнування.

**Сходинка** – слід злиття двох тріщин, що поширюються у різних напрямках, при утворенні магістральної тріщини.

**Розшарування** – несучільності, що утворюються вздовж кордонів структурних елементів, орієнтованих за напрямом деформації.

**Втомні лінії** – лінії на втомному зламі, які являють собою розбіжності від осередку руйнування, позначаючи фронт тріщини на певній стадії її розвитку.

**Мікробудова (мікрорельєф) зламу** – поверхня руйнування, яка використовується для ідентифікації зламу методами світлової, електронної мікроскопії тощо, при збільшенні понад  $\times 50$ .

**Грань** – елемент поверхні руйнування з чіткими межами, що лежить в одній або близьких площинах.

**Фасет** – фасетка внутрішньозеренної крихкої руйнації, що утворюється внаслідок руйнування за певними кристалографічними площинами (площинами сколу), в межах якої руйнування розвивається в одному напрямку.

**Квазішкільна грань** – відносно рівна ділянка руйнування, що розвивається переважно від центральної частини фасетки до периферії; поряд із ознаками тендітного руйнування має ознаки пластичної деформації (гребні).

**Фасетка міжзернова (міжсубзернова)** – фасетка у вигляді багатокутника, що утворюється під час руйнування по одній грані зерна (субзерна).

**Ямки** - Мікропоглиблення на поверхні руйнування, що утворюються в

					<b>ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ</b>	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

процесі пластичного перебігу металу.

**Ямка волокнисто-смугастого зламу** – мікропоглиблення на поверхні руйнування, що виникло внаслідок утворення та злиття мікропорожнин біля витягнутих структурних неоднорідностей (неметалічних включень та зон ліквіації).

**Стільниковий рельєф** – мікрорельєф поверхні руйнування у вигляді дрібних плоских ямок, що свідчить про малу частку локальної пластичної деформації під час руйнування.

**Гребінець** – витягнута ділянка, що височіє над поверхнею руйнування, утворена внаслідок пластичної деформації та руйнування перемичок між іншими елементами зламу.

**Сходинка** – елемент зламу прямолінійної або вигнутої форми, що утворюється в результаті сколу вздовж меж двійників та при з'єднанні двох мікроповерхонь руйнування, розташованих на різних рівнях.

**Руччастий візерунок** – це елемент будови поверхні фасеток сколу, який представляє собою систему сходів, що сходяться. Він утворюється в площині сколу внаслідок руйнування перемичок між крихкими мікротріщинами, які розповсюджуються по паралельних кристалографічних площинах. Напрямок злиття сходів сколу в струменевому візерунку відповідає напрямку розповсюдження тріщини.

**Окремий випадок струменевого візерунка** – це віялоподібний візерунок. Він виникає, якщо сходи сколу збігаються в одній точці в межах фасетки.

**Язичок** – це елемент будови поверхні фасетки сколу та квазисколу, який має трикутну або трапецієподібну форму. Він утворюється внаслідок локального руйнування вздовж поверхні розділу. Язичку, який знаходиться на одній половині зламу, відповідає поглиблення на іншій половині зламу.

**Втомні борозенки** – це елемент мікрорельєфу втомного зламу, що представляє собою подовжені западини і виступи, які повторюються, не

					<i>ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ</i>	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перетинаються між собою і орієнтовані перпендикулярно до локального напрямку розвитку тріщини на даній мікроділянці.

**Плато** – це плоскі ділянки, витягнуті в основному в напрямку локального розповсюдження тріщини. На них розташовуються втомні борозни.

**Тракові сліди** – це сліди, які утворюються при зіткненні протилежних поверхонь руйнування, можливо, внаслідок впливу включень, виділень або твердих складових.

**Зона витягування** – це згладжена ділянка мікрорельєфу, яка відповідає зоні стягування тріщини за наявності пластичного затуплення її вершини при будь-яких видів навантаження.

**Механізм руйнування** – це механізм поширення тріщини, що оцінюється на мікрорівні.

**Скол** – це механізм тендітного руйнування, що виникає внаслідок поділу (розколювання) металу за певними кристалографічними площинами (внутрішньозеренним сколом) або межами зерен (міжзеренними скілами), а також за межами субструктурних елементів, міжфазними кордонами, з утворенням мікрорельєфу.

**Квазішкола** – це механізм внутрішньозеренного квазіхрупкого руйнування, що характеризується поширенням тріщини переважно шляхом поділу металу по площинах, що не збігаються з кристалографічними площинами зерен.

**Злиття мікропустот** – це механізм внутрішньозеренної або міжзеренної в'язкої руйнації, що виникає внаслідок поділу металу під час злиття мікропустот. Ці пустоти формуються та зростають під час пластичного деформування металу.

**Розшарування** – це механізм руйнування металу, який виникає внаслідок утворення несучільностей уздовж меж структурних елементів.

**Втомний механізм** – це механізм руйнування, спричинений циклічним навантаженням, часто пов'язаний із формуванням втомних борозенок через

					<i>ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ</i>	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мікросув та мікровідрив тріщин.

**Втомне руйнування** може відбуватися за участю фасеток міжзеренного та внутрішньозеренного руйнування.

Змішаний злам – це поверхня руйнування, яка складається з двох або більше видів зламів з різними механізмами.

**Внутрішньозеренний злам** – це злам, що виникає внаслідок руйнування в межах одного зерна.

**Міжзеренний (зернистий) злам** – це злам, що утворюється за межами зерен (міжсубзеренний – між субзерними зонами).

**Дефект в переломі** – це дефект будови металу, який проявляється на поверхні руйнування.

## 1.2 Загальні відомості про злами

Характер руйнування після розтягування деталі можна класифікувати за типом зламу:

- **Тендітний (Світлий) злам:** на поверхні руйнування спостерігаються блискучі плоскі ділянки.
- **В'язкий (Матовий) злам:** поверхня руйнування містить дрібні уступи, волокна, які утворюються при пластичній деформації зерен під час руйнування.
- **Змішаний злам:** на поверхні зламу можуть спостерігатися як ділянки металу крихкої, так і в'язкої руйнації.

Зазвичай злами мають змішаний характер, що означає, що на поверхні руйнування можуть бути присутні різні типи зламу.

У таблиці 1 подано відмінні характеристики зламів.

Тип руйнування визначається численними чинниками, включаючи склад металу, його структуру, умови навантаження та температуру. Оцінку в'язкого

					<i>ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ</i>	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

або крихкого руйнування проводять шляхом дослідження зламів.

Таблиця 1 – Відмінні характеристики зламів

Відмінні ознаки	Крихке тіло	Пластичне тіло
Кристаліграфічний характер руйнування	Скол	Скибочка
Зовнішній вигляд зламу	Кристалічний	Волокнистий
Швидкість розповсюдження тріщини	Висока (нестійка тріщина)	Низька (стійка тріщина)

**Крихке руйнування** настає раптово при одноразовому навантаженні або за дії повторних ударних сил при невеликій мірі місцевої пластичної деформації. Його характеризує стрімкий розвиток тріщини, який не вимагає подальшого збільшення напруження. Для цього вистачає запасеної пружної енергії.

У недеформованих матеріалах злам має виразну кристалічну структуру, а у м'яких матеріалів його поверхня гладка від зсуву. Краї зламів рівні, без ознак розірвання або з невеликими припосадками. Злам на тендітній поверхні вказує на місце розриву, тобто кінець процесу руйнування. Ділянка без розірвань (або з невеликим розірвом) зазвичай прилягає до точки розриву.

Крихкі руйнування в більшості випадків починають розвиватися в зонах концентрації напруг, у місцях приварювання елементів жорсткості, перетину зварних швів, отворів і жолобників, в зонах різкої зміни товщини. На відміну від в'язкого руйнування крихке руйнування поширюється всередині окремих зерен вздовж площини з найбільш щільною упаковкою атомів, званою площиною сколу.

**В'язке руйнування** характеризується як попередньою великою пластичною деформацією, а й повільним розвитком тріщини, причому для зростання тріщини необхідний підведення енергії ззовні.

					<i>ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ</i>	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Злам має волокнисту будову і, внаслідок сильної деформації зерен, не має кристалічного блиску. Нерівні ділянки розсіюють світло і поверхню зламу здається матовою. Причиною освіти є вплив значних короткочасних сил, що виникають при заклинюванні механізму чи порушення технологічного режиму. В'язке руйнування має місце і при тривалій дії сил, що викликають напруги, що перевершують межу плинності матеріалу деталі. Ознакою в'язкого зламу є наявність бокових скосів по краю.

**Змішане руйнування** відбувається в умовах плоскої деформації за низьких температур, високих швидкостях навантаження. Такий вид руйнування характерний для матеріалів із ГЦК ґратами.

Отримані злами характеризуються матовою та "оксамитовою" поверхнею; вони рівні, без видимих різів або мають невеликі різви та незначну шорсткість; металевий блиск відсутній. При мікрофрактографічних дослідженнях таких зламів можна виявити практично всі види мікрорельєфу, включаючи ямковий, квазіскол та міжзеренну крихку руйнацію.

### 1.3 Утворення мікротріщин. Повільне докритичне підростання

Процес утворення та поширення тріщин на початкових етапах руйнування розглядається з урахуванням руху дислокаційних петель, вакансій та дислокацій.

Під впливом напруг і термічних коливань атоми в вершині тріщини переходять у міжвузлове положення, утворюючи дислокаційні петлі, тоді як атоми у вершині залишають порожнечі, що призводить до подальшого зростання тріщини. Швидкість руху дислокаційних атомів становить 1 км/год, а вакансій – 10 км/год.

Майже так само розвиваються тріщини за участю вакансійного механізму,

					<i>ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ</i>	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

однак для руху вакансій потрібно менше енергії. Критичне збільшення тріщини нерозривно пов'язане з пластичною деформацією за рахунок зростання щільності дислокацій, що становить близько  $10^{10}\text{см}^{-2}$ .

**Докритичний етап.** Під час зростання тріщини до критичного розміру в навколишньому металі відбувається активна пластична деформація, що призводить до зміцнення металу. Особливо інтенсивна деформація спостерігається в області вершини тріщини, де процеси деформації протікають повільно.

Енергія, що поступає з напруженого масиву конструкції, направляється до тріщини та перетворюється на незворотні деформаційні процеси. Завдяки пластичній деформації об'єм металу навколо тріщини посилюється до самого краю.

У цей період рух тріщини контролюється обмеженою кількістю дислокацій одного знака. Кристаліти (зерна) матеріалу починають перерозподілятися. Вони поступово нахилиються до вершини тріщини, демонструючи свої вразливі кристалографічні орієнтації. Кількість мікротріщин починає зростати, а головна тріщина збільшується за рахунок їх з'єднання. З цього моменту всю пружну енергію, що надходить з напруженої конструкції, спрямовується на розрив міжатомних зв'язків у вершині тріщини.

Тепер процес набуває характер або справжньої тендітності, або квазіхрупкості. Прискорення тріщини досягає  $10^8 \text{ м/с}^2$ , і за тисячну частку секунди тріщина може розвивати швидкість - 3 км/с.

На останньому етапі докритичного руйнування вирішальним у механіці руйнування є надструктурний характер. Швидка тріщина перетинає всі структурні компоненти (ферит, цементит, перліт) безперешкодно. Подальше збільшення швидкості тріщини призводить до зростання крихкості матеріалів.

Отже, у механіці в цей момент структура матеріалу втрачає свою первинну важливість. Найзначущими стають механічні характеристики матеріалу -

					<i>ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ</i>	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

міцність, в'язкість, модуль пружності та інші.

Тріщина може протягом необмеженого часу підтримувати швидкість  $V$ . Дослідження показали, що при  $V=0,6$  швидкості поперечних пружних хвиль відбувається розгалуження тріщини, та її швидкість поширення становить 1600-2000 м/с, при цьому тріщина розділяється на дві або три окремі. Кожна з цих тріщин може продовжувати свій розвиток, а також розгалужуватися далі. Проте після кожного розгалуження тріщина втрачає швидкість, іноді навіть доходючи до нуля. Розгалуження може відбуватися під кутом  $90^\circ$  або навіть в протилежному напрямку. Це явище часто спостерігається при вибуховому навантаженні.

Під час докритичного зростання, зазвичай, головною є найбільша за розмірами тріщина, яка знаходиться перпендикулярно до напрямку навантаження.

Руйнування є результатом як пружної, так і пластичної деформації.

#### 1.4 Макробудова зламів

За орієнтуванням мікроскопічної поверхні вирізняють руйнування відривом і зрізом: при відриві ця поверхня перпендикулярна до напрямку найбільшої розтягуючої напруги, а при зрізі нахилена до нього під кутом приблизно  $45^\circ$ . Відрив відбувається під дією нормальних напруг і зазвичай спостерігається при крихкому руйнуванні, а зріз відбувається під дією дотичних напруг і характерний для в'язкого руйнування. Проте крихке руйнування також може відбуватися під дією дотичних напруг.

Обидва ці види руйнувань – в'язке і крихке – включають дві стадії: зародження зародкової тріщини та її поширення. За механізмом зародження тріщин вони не відрізняються. Якісна різниця між ними пов'язана з енергією та швидкістю поширення тріщин. При крихкому руйнуванні ця швидкість дуже велика і досягає 0.4–0.5 від швидкості звуку. Енергія, потрібна для розширення

					<b>ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ</b>	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

в'язкої тріщини, значно більша, оскільки при її розвитку пластична деформація відбувається не лише біля її вершини, але і на значній площі деталі (зразка). В результаті, робота, потрібна для просування тріщини, тут значно вища, ніж при розвитку крихкої тріщини.

Друга стадія руйнування є найважливішою, оскільки саме вона переважно визначає опір матеріалу руйнації.

За Я. Б. Фрідманом, процес руйнування на стадії розвитку тріщини складається з чотирьох етапів: інкубаційного, на якому швидкість поширення тріщини поступово зростає; періоду гальмування, що характеризується уповільненням зростання тріщини; стаціонарного, коли швидкість розвитку тріщини залишається постійною; прискореного, іноді лавиноподібного, періоду, коли тріщина розростається з такою швидкістю, що все повертає, аж до повного руйнування тіла.

Перші три періоди відповідають так званій докритичній стадії розвитку тріщини, коли процес руйнування ще можна контролювати, а четвертий – закритична стадія розповсюдження тріщини, коли остаточне руйнування стає вже важко керованим і часто необоротним. Дослідження поверхні руйнування зазвичай починають із візуального огляду будови зламу або при невеликих (до 30 разів) збільшеннях. У цьому випадку рельєф зламів, що спостерігається, називають макрорельєфом, а його будову - макробудуванням. Це дослідження дозволяє виявити загальний характер будови зламу, досить великі дефекти матеріалу тощо.

Вивчення макробудови зламу дозволяє виділити вогнище руйнування, зони зародження та розвитку тріщин. Аналіз розмірів зон та ділянок на поверхні зламів дає інформацію про поведінку матеріалу в умовах навантаження. Спостереження орієнтації зламу відносно напрямку навантаження дозволяє визначити характер силового впливу (зсув, відрив тощо).

У більшості зламів основна площина перпендикулярна максимальним

					<i>ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ</i>	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розтягуючим напругам. Напруги можуть бути нормальними (призводять до крихких зламів) і дотичними (викликають в'язкі злами). На рис. 2 схематично зображено напрямки дії нормальних та дотичних напруг у будь-якій точці на поверхні або всередині циліндра під час одновісного розтягування.

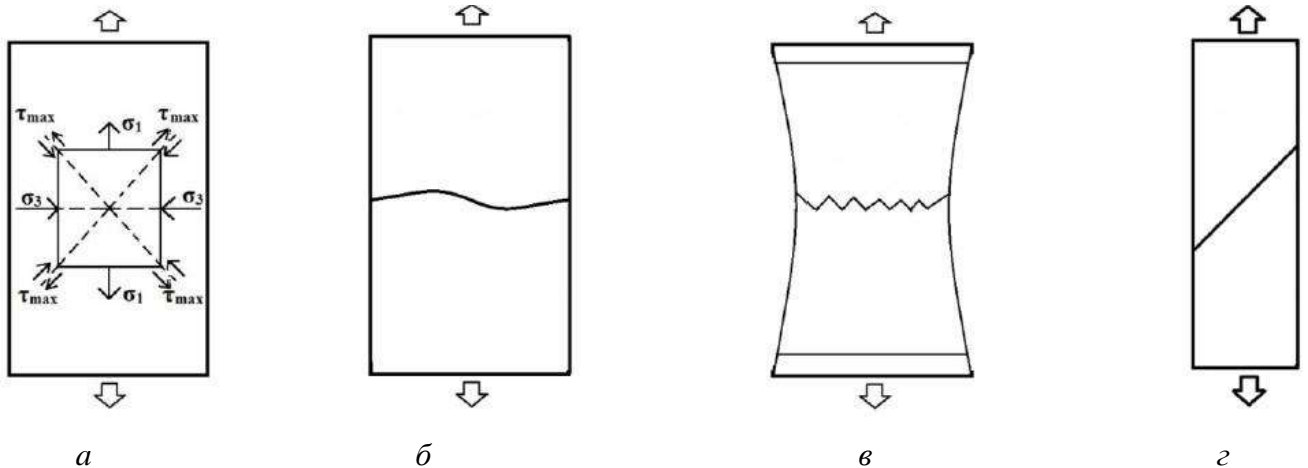


Рис. 2 – Напрямок дії напруги при одновісному розтягуванні:

а- розподіл напруг всередині зразка; б – тендітний зразок; в – в'язкий зразок чашоподібного типу; г – в'язкий зразок косоного зламу

Розтягуючі напруги  $\sigma_1$  – діють у поздовжньому напрямку, а стискаючі напруги  $\sigma_3$  – у поперечному. Дотичні напруги  $\tau_{\max}$  спрямовані під кутом  $45^\circ$  до осі зразка (рис. 2, а).

У крихких матеріалах злам при одноразовому навантаженні відбувається перпендикулярно до напрямку розтягування, при цьому руйнування відбувається з малою пластичною деформацією. Розподіл пружних напруг при одновісному розтягуванні без концентраторів рівномірно за перерізом, тому руйнування може початися в будь-якій точці всередині обсягу зразка з високими напругами (рис. 2, б).

У в'язких матеріалах дотичні напруги викликають значну пластичну деформацію, таку як подовження та утворення шийки, що передує руйнуванню.

Руйнування при розтягуванні починається поблизу осі зразка і поширюється у напрямку до поверхні, завершуючись кінчною зоною зрізу, зазвичай під кутом  $45^\circ$  до осі (рис. 2, в, г).

На малюнку 3 схематично зображені напрямки дії нормальних та дотичних напружень при одновісному стисканні. Під час стискання циліндра вздовжно діють стискаючі напруги  $\sigma_3$ , а в поперечному напрямку – розтягуючі напруги  $\rho_1$ . Дотичні напруги  $\tau_{max}$  діють під кутом  $45^\circ$  до осі зразка, подібно до одновісного розтягування.

У крихкому матеріалі при одновісному стисканні без вигину ламатиметься перпендикулярно напрямку дії максимальних напружень, що розтягують. Оскільки напруги, що розтягують, діють у поперечному напрямку, крихке руйнування відбувається вздовж напрямку стискання, тобто паралельно осі зразка.

У в'язкому матеріалі дотичні напруження викликають значну пластичну деформацію і зазвичай не призводять до руйнування. Зразок укорочується і стає бочкоподібним під спільним впливом дотичних напруг і сил тертя, що виникають при стисканні на торцях зразка.

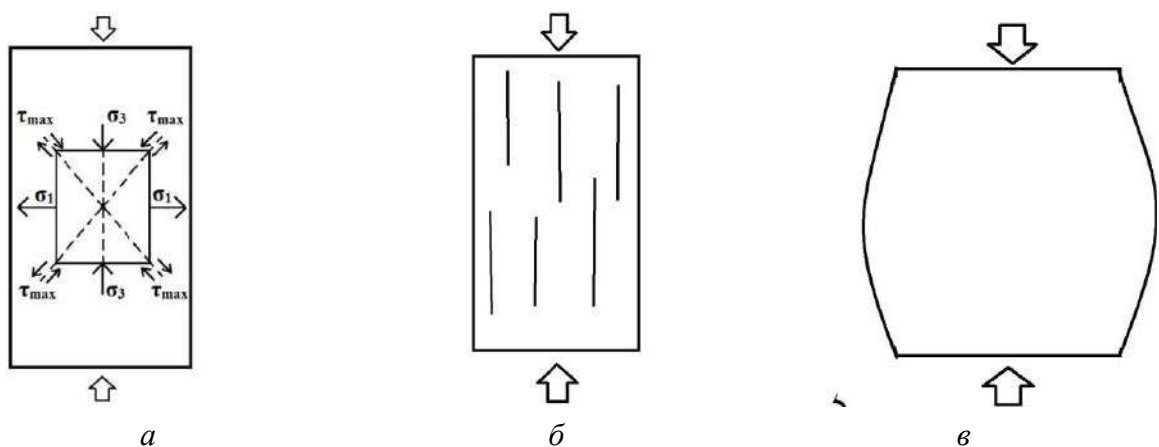


Рис. 3 – Напрямок дії напруги при стисканні: а – розподіл напруги всередині зразка; б - тендітний зразок; в – в'язкий зразок бочкоподібного типу

На рис. 4 схематично зображені напрямки дії напружень під час кручення.

При цьому випробуванні розтягувальні та стискаючі напруги діють під кутом  $45^\circ$  до осі зразка та взаємно перпендикулярні, а дотичні напруги діють у поздовжньому та поперечному напрямках.

Крихкий матеріал при чистому крученні руйнується по площині, перпендикулярній до напруг, що розтягують. Характерним для руйнування такого матеріалу при цьому типі навантаження є спіральний злам.

Злами, що утворилися при крученні у разі в'язкого матеріалу, зазвичай перетинають циліндр по поперечній площині дії максимальних дотичних напруг і мають явно виражений лійкоподібний вигляд. При цьому дотичні напруги також викликають значну пластичну деформацію, але часто не так наочно.

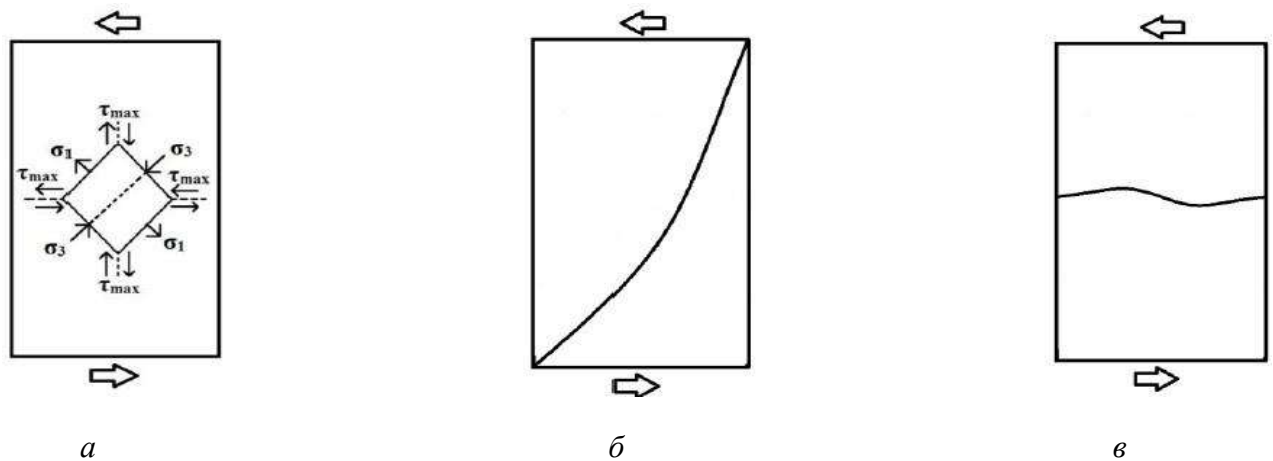


Рис. 4 – Напрямок ді напруги при крученні: а – розподіл напруги всередині зразка; б – тендітний зразок; в – в'язкий зразок

### 1.5 Класифікація руйнування

У таблиці 2 наведено класифікацію основних видів зламів їх характерні ознаки та особливості будови [4].

					<i>ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ</i>	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2 - Класифікація зламів за основними ознаками

Механізм руйнування		Руйнування мікромеханізму	
Крихий В'язкий	Змішаний	Скол Квазіскол	Злиття мікропустот
Макрогеометрія		Енергія руйнування	
Однорідний	Неоднорідний: – злам зірочкою – чашковий злам – шевронний злам	Крихий злам: – мала робота руйнування В'язкий: – висока робота руйнування	Змішаний: – середня робота руйнування
Морфологія поверхні руйнування		Мікрорельєф	
Кристалічний: – фарфороподібний – оксамитовий Дендридний Кам'яноподібний й Нафталінистий	Волокнистий: – волокнисто- лускатий – волокнисто- смугастий	Крихий: – фасетки всередині міжзеренного сколу – сходинки сколу – струменевий візерунок – язички	В'язкий: – ямки Змішаний: – ямки та фасетки скола
Характер силового впливу		Колір	Блиск
Тривалого статичного навантаження: – злами уповільненої руйнації – злами повзучості – злами корозійного розтріскування Злами короткочасного одноразового статичного та динамічного навантаження	Злами циклічного навантаження (утомлені): – багатоцикловів томні – малоциклові – термоутомлювальні – корозійно- втомні	Світлий Сріблястий Сірий Світло-сірий Темно-сірий Чорний	Блискучий Матовий Матово- оксамитовий

## 1.6 Опис найчастіше зустрічаються зламів

Злами циклічного навантаження (втомні злами) виникають в результаті дії навантаження, яке періодично і багаторазово змінюється в процесі навантаження та руйнування (у широкому діапазоні частот та коефіцієнтів асиметрії циклу). Розрізняють багатоциклові та малоциклові втомні злами.

**Багатоциклові втомні злами** характеризуються в основному пружним деформуванням при втомному пошкодженні або руйнуванні.

Типово для втомних зламів є наявність декількох зон на поверхні руйнування:

- Зона з більш рівною і блискучою («притертою») поверхнею, що містить осередок руйнування і зону стабільного розвитку тріщини.
- Зона долому, яка зазвичай має значну шорсткість порівняно з «притертою» зоною.
- Перехідна зона, що відзначається прискореним порівняно з «притертою» зоною розвитком тріщини, іноді важко виділити.

При розгляді на мікрорівні втомних зламів можна виявити втомні борозенки, плато, сліди тріщин міжзеренного сколу, а також всі елементи мікрорельєфу, характерні для руйнування за умов статичного навантаження.

**Малоциклові втомні злами** відбуваються при пружнопластичному деформуванні. Структура злomu характеризується:

- більш шорсткою поверхнею руйнування;
- відсутністю чіткої межі між зонами;
- зміною співвідношення розмірів зон.

Зокрема, на зламі збільшується частка рельєфу, що має ознаки статичної руйнації.

**Корозійно-втомні злами** виникають при дії корозійного середовища. До особливостей будови злomu належать:

					<i>ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ</i>	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- велика кількість вогнищ руйнування;
- наявність продуктів корозії на поверхні руйнування;
- значна кількість тріщин.

При розгляді на мікрорівні можна виявити втомні борозни, що лежать на фасетках сколу і міжзеренних фасетках.

**Термоутомлювальні злами виникають** під дією змінної напруги, що виникають при температурних змінах тіла. Основні ознаки таких зламів:

- відсутність чітко окреслених меж між зонами;
- наявність багатьох вогнищ руйнування;
- інтенсивне окиснення поверхні руйнування.

**Злами короткочасного одноразового статичного та динамічного навантаження** виникають без стрибків при дії навантаження. Період постійного навантаження в цьому випадку абсент або дуже малий порівняно з періодом навантаження.

					<b>ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ</b>	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2 Методи дослідження

На сьогоднішній день для аналізу зламів використовуються як традиційні методи макро- та мікроаналізу, так і методи фізичного металургійного дослідження з використанням електронно-вакуумного обладнання. Особливо активно використовуються методи кількісного автоматизованого аналізу зламів за допомогою комп'ютерів. Ці дослідження дозволяють отримати порівняльну оцінку типу руйнування та характеру зламу, виявити причини та природу відхилення типу зламу від оптимального, а також з'ясувати методи запобігання цим відхиленням.

Для вивчення поверхні руйнування та зон матеріалу, що межують із зламом, застосовуються різноманітні методи.

Для підготовки зразків до мікроскопічного аналізу необхідно виконати процедуру шліфування. Цей процес включає обробку площини зразка на шліфувальному колі та подальше шліфування на наждачному папері з різним розміром абразиву (від 800 до 2500). Останньою операцією є полірування, яке виконується за допомогою алмазної пасту високої дисперсності. Для виявлення структури зразка необхідне його травлення. Для цього використовують травлення шліфу, за допомогою травника, який містить 3% розчин азотної кислоти ( $\text{HNO}_3$ ) у спирті ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ). Для нержавіючої сталі використовується травник, що містить 8% сірчаної кислоти ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) та 4% соляної кислоти ( $\text{HCl}$ ).

Макроструктура зразків досліджувалась на оптичному бінокулярному мікроскопі МБС з використанням візуального аналізу.

Для аналізу мікроструктури використовувався цифровий оптичний мікроскоп Carl Zeiss з метою визначення відповідності матеріалу зруйнованої деталі при різних збільшеннях. Для більш детального дослідження поверхні руйнування проводилися фрактографічні дослідження за допомогою

					<i>ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ</i>	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електронного сканувального мікроскопа Hitachi TM 1000.

Вимірювання твердості здійснювалися за допомогою твердоміра Брінелля моделі ТБ50-04 та методом Роквелла моделі ТР5014. Мікротвердість вимірювалася на ПМТ-3.

Для визначення ударної в'язкості використовувався маятниковий копер КМ-300.

Хімічний аналіз проводився за допомогою спектрального аналізатора Олімп Дельта Елемент в Електронно-вакуумному рентгенівському зонді.

Різноманітність завдань, які можуть бути поставлені при вивченні зламів, виключає можливість застосування єдиної методики їхнього дослідження. Вибір методу дослідження повинен враховувати поставлене завдання та характер об'єкта, який вивчається.

					<i>ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ</i>	Арк.
						25
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## 2.1. Вивчення поверхні руйнувань конструкційних та інструментальних сталей

Для дослідження механізмів руйнування, що відбуваються в реальних умовах, було обрано конструкційні матеріали та інструментальні сталі (табл. 3).

Таблиця 3 - Матеріали для дослідження

Конструкційні	Чавун	Інструментальні
30X13	ВЧ45	4X5B2
38ХГМ		4X5M
40ХН		

Для дослідження було обрано зразок конструкційної сталі 40ХН для визначення ударної в'язкості. Після стандартної термічної обробки, включаючи загартування та відпустку, твердість складала НВ 302. Коефіцієнт в'язкості на розрив (КСV) становив 0,5 МДж/м.<sup>2</sup>. Після руйнування зразка на маятниковому копрі були проведені комплексні дослідження поверхні руйнування.

Для визначення марки сталі був виконаний хімічний аналіз. Матеріал зразка, виготовлений зі сталі, відповідав марці 40ХН згідно зі стандартом. (табл. 4).

Таблиця 4 – Хімічний аналіз

Позначення	C	Mn	Si	O	S	Cr	Mo	Ni
Вміст, %	0,416	0,588	0,257	0,012	0,006	0,707	0,044	1,40

Механічні характеристики сталі суттєво впливають на циклічну міцність та довговічність виробів. Низькі показники пластичності та ударної в'язкості перш за все впливають на швидкість поширення втомних тріщин, а наявність зон підвищених напруг, таких як різьбові канавки або дефекти технології та

металургії, сприяє утворенню втомних тріщин.

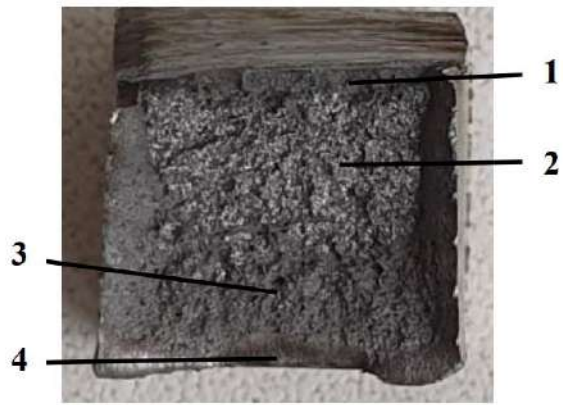
Механічні характеристики фрагмента перекладача наведено в таблиці 5.

Таблиця 5 – Механічні властивості

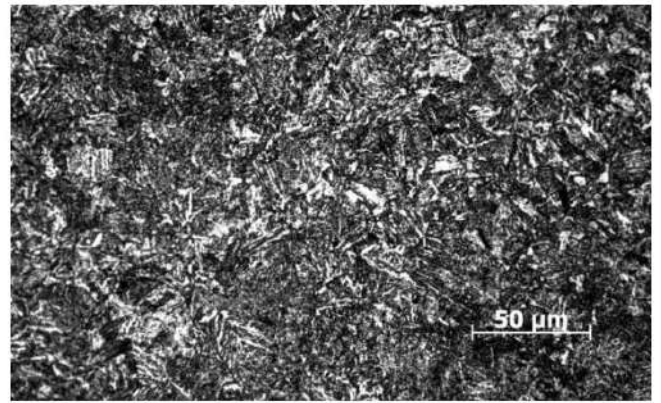
характеристики	Тимчасовий опір, МПа	Межа текучості, $\sigma_t$ , МПа	Відносне подовження, $\delta$ , %	Твердість, НВ	Ударна в'язкість, КСV, МДж/м <sup>2</sup> при 20°C
Зразок	938	844	4,4	302	0,5

Візуальний аналіз зразка (див. рис. 5, а) свідчить про в'язко-тендітний характер руйнування. Чітко видно наступне: центр руйнування під надрізом (позначено 1); область стабільного росту тріщини (яка займає 50% площі зламу, позначено 2); область прискореного росту тріщини (яка займає 45% площі зламу, позначено 3); зона розлому (яка займає 5% площі зламу, позначено 4). Також на цьому зображенні видно фасетки з дзеркальним блиском під номером два. У периферійній частині спостерігається утворення губ зрізу.

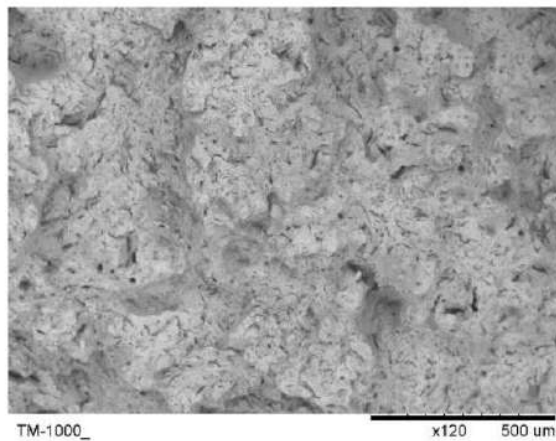
Мікроструктура має неоднорідну будову, що відповідає сорбіту (див. рис. 5, б). Така структура сформувалася під час охолодження від температур вище критичних. Ця термічна обробка відповідає процесу нормалізації сталі. В мікроструктурі спостерігається значна неоднорідність у темних і світлих ділянках смугастої структури. Це пов'язано з хімічною неоднорідністю, яка виникла під час процесу кристалізації та наступної пластичної деформації сталі.



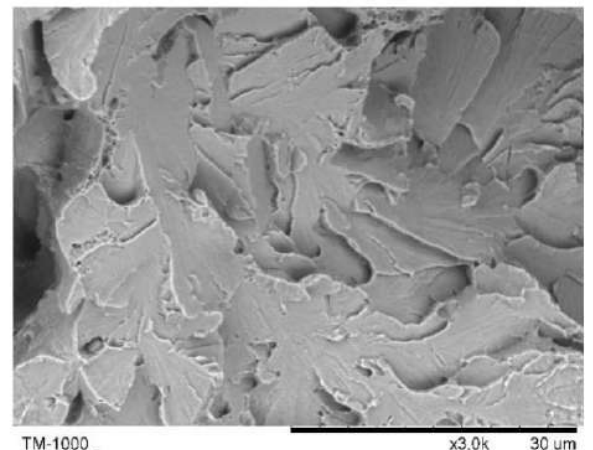
*a*



*б*



*в*



*г*

Рис. 5 – Поверхня руйнування сталі 40ХН: *a*- макробудування,  $\times 4,5$  (1 - вогнище руйнування; 2 - стабільне зростання тріщини; 3 - прискорений розвиток тріщини; 4 - зона долому); *б*- сорбітна структура з наявністю неоднорідності; *в-г*– фрактограма

Фрактографічні дослідження на електронному скануючому мікроскопі підтверджують, що окремі ділянки руйнування мають тендітний вигляд (див. рис. 5, в-г).

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

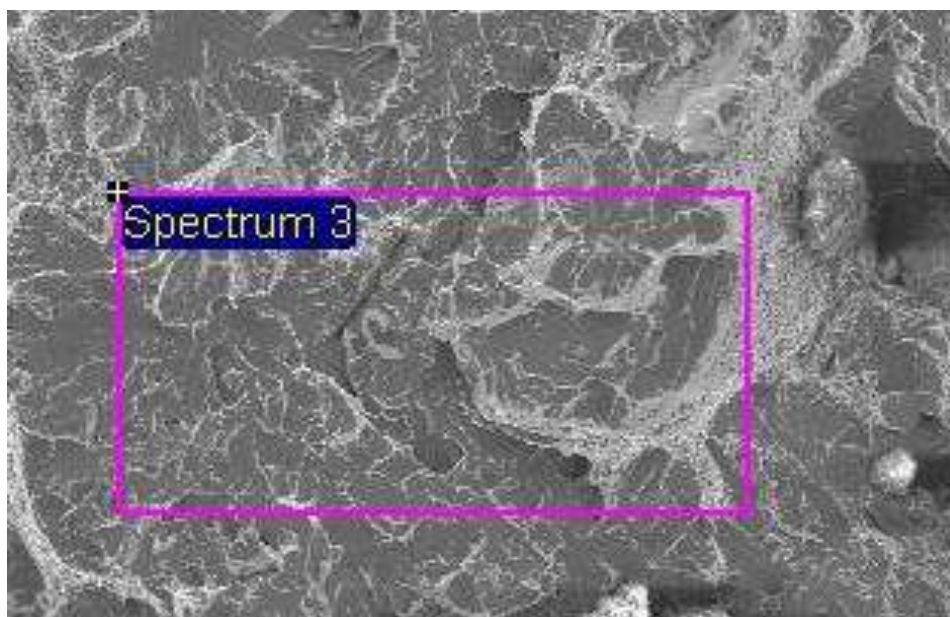


Рис. 6 - Електронно-мікроскопічне зображення поверхні зразка сталі  
40ХН, ×400

Мікрорентгеноспектральний аналіз підтверджує відповідність хімічного складу досліджуваного зразка даним, отриманим на спектральному аналізаторі (див. рис. 6) (табл. 6).

Таблиця 6 - елементний склад поверхні зразка сталі 40ХН, мас. %

Спектр	С	Fe	Cr	Ni	Всього
Спектр 3	1,48	95,68	1,3	1,54	100

Для наступного дослідження було обрано зразок для визначення ударної в'язкості, виготовлений зі сталі 40ХНМА. Характер руйнування має змішаний прояв (див. рис. 7, а). Це підтверджується наявністю утяжок з обох боків зламу, що є характерним для в'язкого руйнування (позначені цифрою 2 та займають 30% від загальної площі зламу), а також зоною поширення тріщини, яка є типовою для тендітного руйнування (позначена цифрою 3 та займає 65% від загальної площі). Площа зони долому становить лише 5% від загальної площі зламу (позначена цифрою 4).

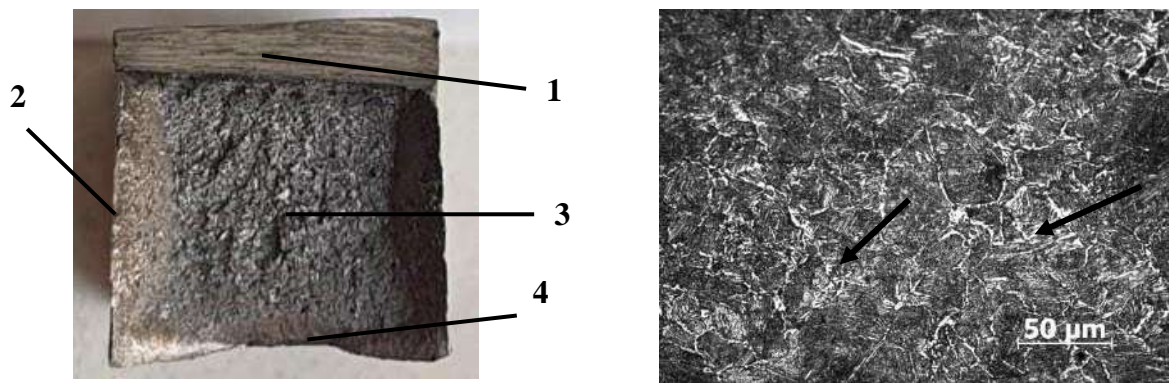


Рис. 7 – Поверхня руйнування та мікроструктура сталі 40ХНМА:

*a* – макроструктура іслома,  $\times 4,5$ ; *b* – мікроструктура: 1 - зародження тріщини; 2 – утяжки; 3 – зона поширення тріщини; 4 – зона долому

Таблиця 7 – Хімічний склад сталі

Позначення	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni
УБТС	0,372	0,682	0,285	0,012	0,008	0,873	0,157	1,320

Основні механічні властивості сталі згідно ДСТУ та отримані дослідженнями представлені в (табл. 8).

Таблиця 8 – Механічні властивості

Характеристика	Межа текучості, $\sigma_{тощо}$ , МПа	Віднош видовження $\delta$ , %	Твердість, НВ	Ударна в'язкість, КСВ, МДж/м <sup>2</sup> при 20 о С
Данні паспорту	820	15	285-321	0,7-0,758
Зразок	812,5	6	277	0,82

Проаналізувавши дані таблиці 8, виявлено, що механічні властивості мають менші значення порівняно з вимогами. Низькі показники межі міцності (тимчасового опору), межі текучості та твердості сприяють швидшому утворенню тріщин втоми. Невеликі значення пластичності (відносного подовження та ударної в'язкості) знижують опір розповсюдженню тріщини.

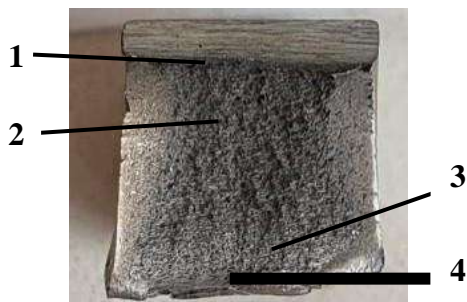
Для більш детального аналізу були проведені металографічні дослідження. Слід відзначити, що на зразку присутня видманшеттова структура, яка знижує пластичність металу (позначено стрілкою на рисунку 7, б).

Наступний зразок для дослідження виготовлений з конструкційної сталі 38ХГМ. Візуальний огляд зламу показує наступне: осередок руйнування під надрізом (позначено 1); зона стабільного зростання тріщини (яка займає 70% площі зламу, позначено 2); зона прискороного розвитку тріщини (яка займає 25% від площі зламу, позначено 3); зона долому (яка займає 5 % площі зламу, позначено 4) (див. рисунок 8, а).

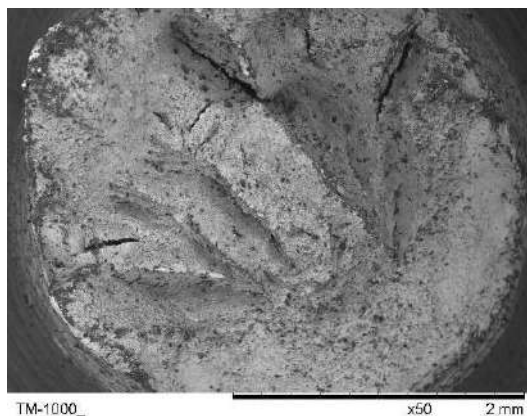
При невеликому збільшенні чітко помітні радіальні рубці (рис. 8, б). При більших збільшеннях зображення стає більш деталізованим (рис. 8, в). Такі рубці утворюються під час переходу тріщини від повільного зростання до швидкого або нестабільного її поширення. Також можна спостерігати поздовжні розщеплення, які можуть бути наслідком високих нормальних розтягуючих напруг внаслідок поділу радіальних поверхонь уздовж площини максимального зсуву.

Для вивчення властивостей виливки зі сталі 30Х13, одержаної методом ЕКЛ, були виготовлені зразки, які піддалися стандартній термічній обробці до досягнення твердості НРС 45. Поверхня зразка свідчить про переважно крихкий характер руйнування (див. рис. 9). Візуально злам має дендритну структуру, що представляє собою неоднорідну поверхню руйнування, що складається зі стовпчастих кристалів з чітко вираженим рельєфом елементів дендритної будови металу.

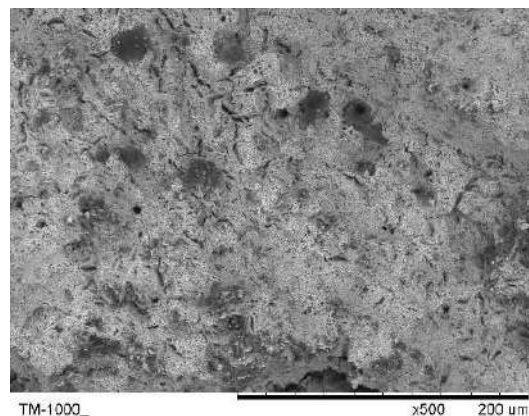
					<i>ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ</i>	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



*a*



*b*



*в*

Рис. 8 – Досліджувана поверхня сталі 38ХГМ:

*a*- макроструктура,  $\times 3,5$ ; *б-в* - фрактограми (розривний зразок). Є радіальні рубці

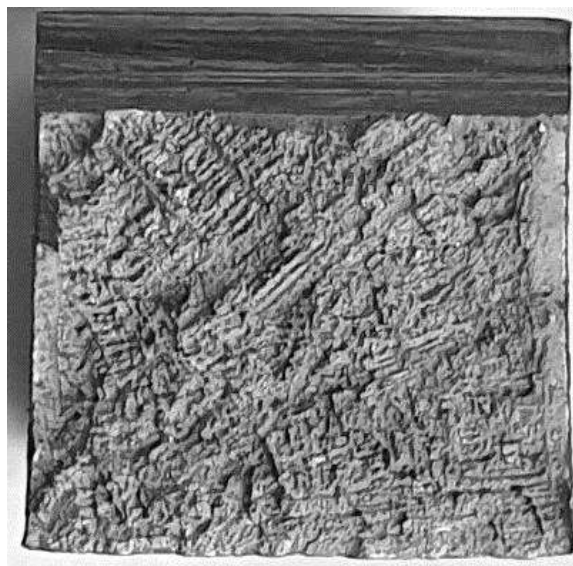


Рис. 9 – Поверхня руйнування ударного зразка (з яскраво вираженою дендридною будовою),  $\times 4,5$

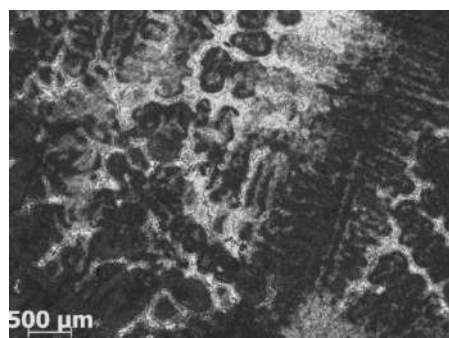
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ

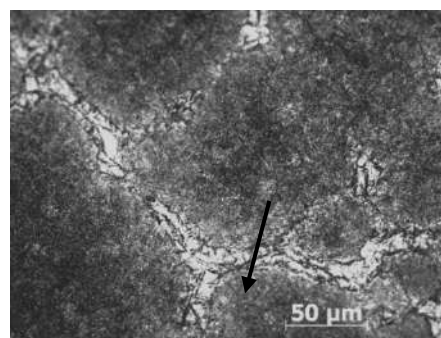
Арк.

36

Можна помітити, що виливок має характерну дендритну структуру. Дослідження при більшому збільшенні вказує на наявність міждендритних ділянок, що характеризуються меншою травимістю, спричиненою ліквідацією легуючих елементів (див. рис. 10, а – б). Це свідчить про неоднорідність хімічного складу.



*a*



*б*

Малюнок 10 – Мікроструктура виливки із сталі 30X13: а – дендритна структура; б – міждендритні ділянки (зазначено стрілкою)

Дендритний злам утворюється внаслідок ліквідації, спричиненої присутністю легуючих елементів з невеликим коефіцієнтом розподілу [9].

Для подальшого дослідження був обраний зразок для визначення ударної в'язкості з інструментальної сталі 4X5М, який був виготовлений з деформованої заготовки. Після стандартної термічної обробки, включаючи загартування та відпуск, твердість становила HRC 46. Значення KCU складає 0,25 МДж/м<sup>2</sup>. Після руйнування зразка на маятниковому копрі були проведені комплексні дослідження поверхні руйнування.

Візуальний аналіз поверхні руйнування показує, що злам має вигляд деревоподібної структури (див. рис. 11 а). Поверхня руйнування має грубоволокнисту шарувату структуру, спричинену численними

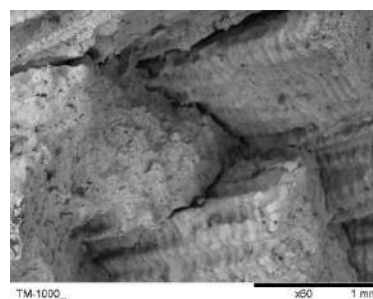
мікророзшаруваннями у металі, що є характерним для деформованої сталі при порушенні технології гарячої пластичної деформації. Цей ефект найбільш помітний на поперечних зрізах і, як правило, охоплює більшу площу поверхні руйнування.

При деревоподібному зламі спостерігається значне зниження пластичності та ударної в'язкості, особливо в поперечному напрямку деформованого металу.

Утворення рельєфних ділянок пов'язане з неоднорідністю структури металів та сплавів (див. рис. 11, б) [7].



*a*

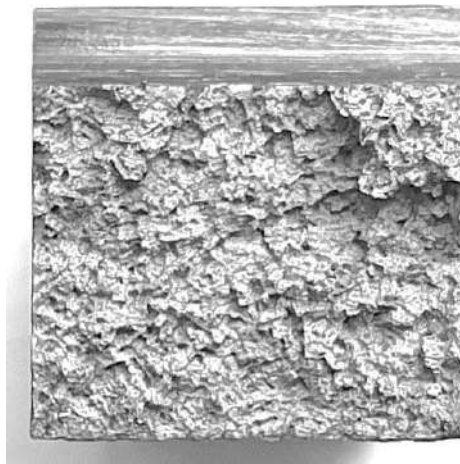


*b*

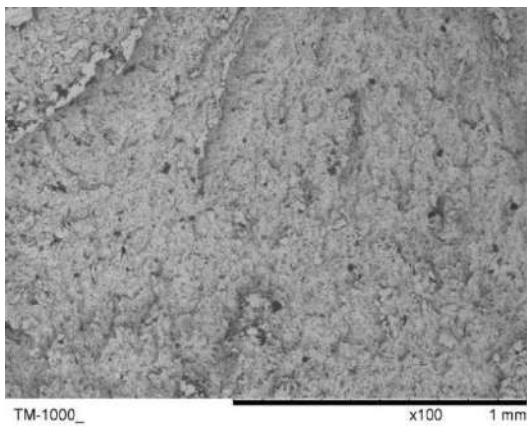
Рис. 11 – Досліджувана поверхня сталі 4Х5М: *a* – макроструктура  $\times 4$ ;  
*b* - фрактограма (мікророзшарування)

Наступний зразок виготовлено з інструментальної сталі 4Х5В2 за допомогою методу електроконтактного лиття (ЕКЛ). Після руйнування зразка на маятниковому копрі були проведені комплексні дослідження поверхні руйнування.

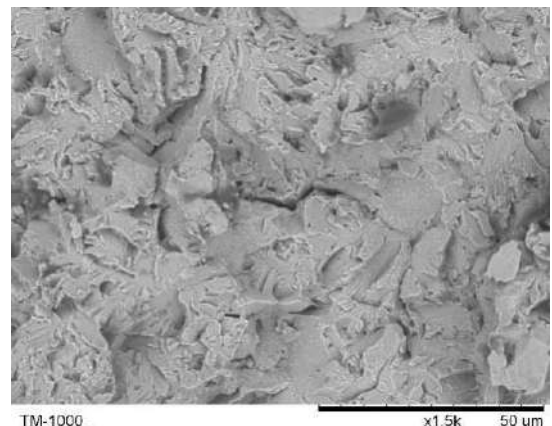
Візуальний аналіз поверхні руйнування свідчить про кристалічну будову (див. рис. 12, а). Поверхня руйнування має досить рівну структуру. Також спостерігаються фасетки квазисколу та гребені, що є ознаками пластичної деформації (див. рис. 12, в).



*a*



*b*



*v*

Малюнок 12 – Поверхня руйнування сталі 4Х5В2: а – макроструктура  $\times 5$ ;

*b* і *v* – фрактограми

Мікрорентгеноспектральний аналіз ділянки (рис. 13) вказує на відповідність хімічного складу, визначеного за стандартною методикою.

У таблиці 9 показаний елементний склад поверхні, обмеженої прямокутником на малюнку 13.

					<i>ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ</i>	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

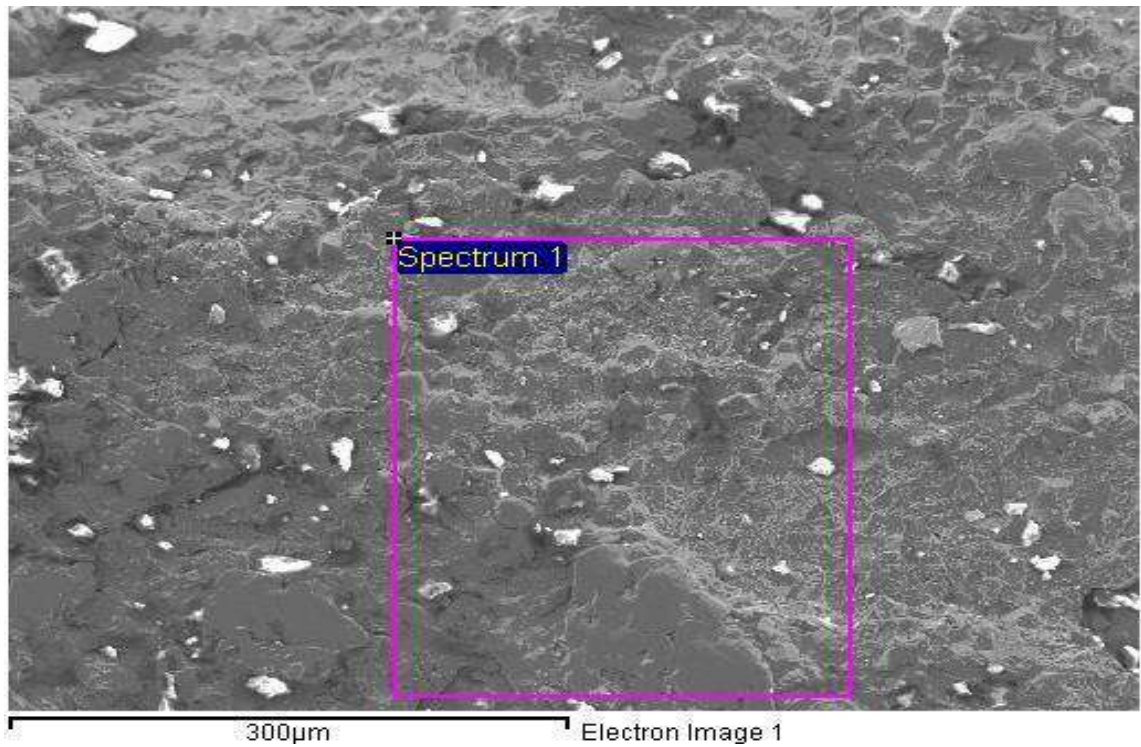


Рис. 13 – Електронно-мікроскопічне зображення поверхні зразка сталі 4X5B2, x200

Таблиця 9 - Елементний склад поверхні зразка сталі 4X5B2, мас. %

Спектр	C	O	Si	Cr	Fe	W	Всього
Спектр 1	13,68	2,86	0,68	5,36	73,12	4,31	100

Дослідження поверхні руйнування з наявністю неметалічного включення (рис. 14) вказує на великий вміст у ньому кисню, що є підтвердженням наявності великого оксидного включення, яке, мабуть, сформувалося у процесі лиття.

Елементний склад великого включення показано у таблиці 10.

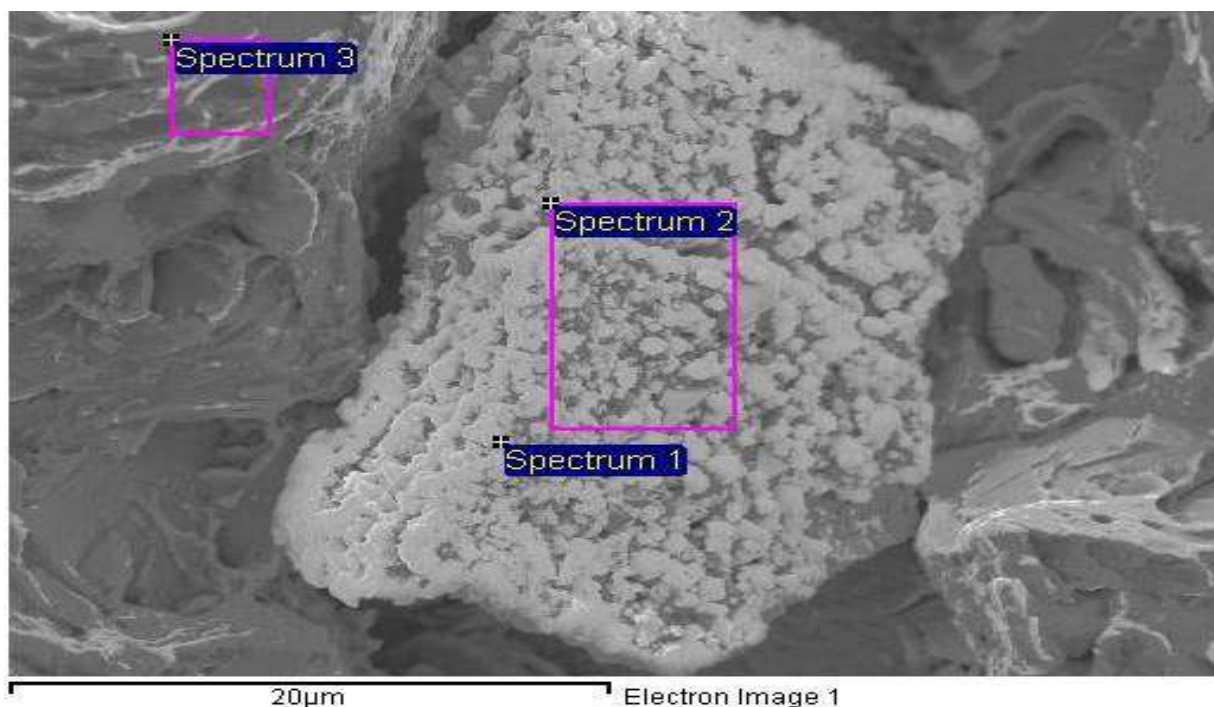


Рис. 14 – Електронно-мікроскопічне зображення поверхні Зразка з великим включенням сталі 4X5B2, x3000

Таблиця 10 - Елементний склад поверхні зразка сталі 4X5M, мас. %

Спектр	C	O	Ti	V	Cr	Fe	Mo	W	Всього
Спектр 1	2,81	27,33		0,63	3,60	63,14		2,50	100
Спектр 2	3,38	25,73	1,08		4,19	62,03		3,59	100
Спектр 3	16,61	3,77			5,21	65,32	2,23	6,85	100

Дослідження механізму руйнування проводили на зразку чавуну ВЧ45 після випробування на опір (див. рис. 15, а). Відповідно до ДСТУ, твердість цього чавуну становила НВ 250.

Маркування чавуну для виливок, де структура містить графіт у вермікулярній формі, із кількістю кулястого графіту не більше 40%, складається

з наступних елементів. Літера "Ч" вказує на матеріал - чавун, літери "В" - на високоміцний, форму графіту (вермікулярний графіт), а цифрове позначення представляє мінімальне значення тимчасового опору розриву при розтягуванні 10-1 МПа [8].

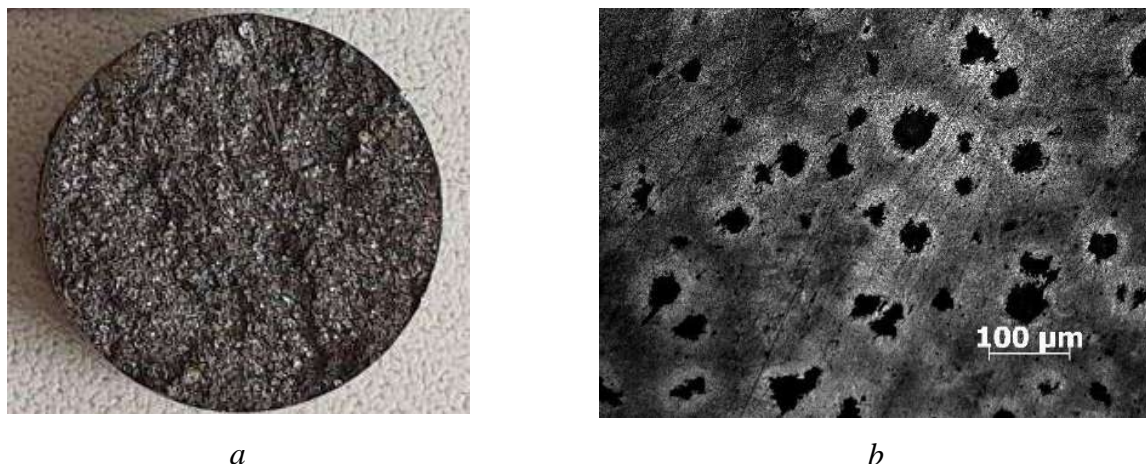


Рисунок 15 – Поверхня руйнування та структура чавуну ВЧ45: а – макроструктура,  $\times 4$ ; б – мікроструктура (вермікулярний графіт на перлітній основі).

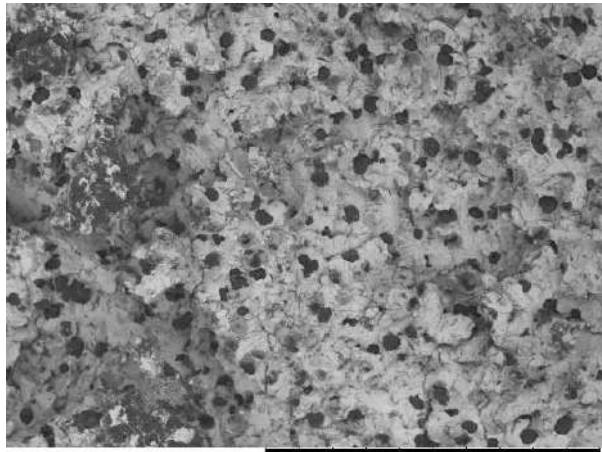
Феррит за межами графіту)

Цей тип чавуну застосовують для виготовлення деталей, які експлуатуються в умовах великих механічних навантажень, тертя, зношування, а також в умовах високих термоциклічних навантажень.

Пластичні властивості чавуну мають низькі показники, тому руйнування переважно має крихкий характер. Це добре відображається на макроструктурі (див. рис. 15, а) та фрактограмі (див. рис. 16).

Під час дослідження поверхні чавуну за допомогою оптичного мікроскопа було виявлено перлітоферитну структуру з вермікулярним графітом (див. рис. 16, в). Такий тип графіту сприяє підвищенню напруги для появи та розповсюдження тріщини. Вермікулярний графіт сприяє підвищенню механічних властивостей та забезпечує високу теплопровідність.

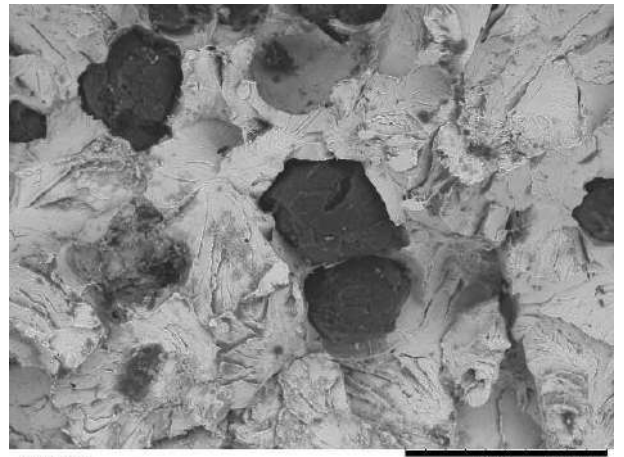
					<i>ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ</i>	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



TM-1000\_

x100 1 mm

*a*



TM-1000\_

x600 100 um

*b*

Малюнок 16 – Електронно-мікроскопічне зображення поверхні руйнування чавуну

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ

Арк.

43

### 3 Аналіз експлуатаційних руйнувань

Для аналізу експлуатаційних руйнувань розглянуто два випадки: руйнування калібратора та вал гідравлічного насоса

#### 3.1 Калібратор КЛС-295,3

Калібратор призначений для калібрування стовбура свердловини, центрування та покращення роботи долота (породоруйнівного інструменту) та забійного двигуна, а також для управління параметрами викривлення стовбура свердловини. Для коректної роботи калібратора необхідно забезпечити тиск 450 атм.

На аналіз було представлено фрагмент калібратора зі спіральними лопатями діаметром 295,3 мм після руйнування труби в муфтовій частині (рис. 17).



Рис. 17 – Фрагмент калібратора після руйнування,  $\times 0,13$

Руйнування сталося в муфтовій частині калібратора по передостанній западині різьбової канавки по площині, перпендикулярній осі обертання.

					ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Поверхня руйнування зазнала значної пластичної деформації через механічний вплив, що призвело до повної втрати рельєфу (рис. 18). Механізм руйнування можна охарактеризувати за кількома ознаками. Однією з ознак втомного руйнування є орієнтація поверхні руйнування, яка лежить у площині, перпендикулярній осі обертання (рис. 18, поверхня руйнування, позначена цифрою 1).



Рис. 18 – Вид калібратора руйнування,  $\times 4,6$ . Поверхня руйнування зі слідами значної пластичної деформації: 1 – поверхня руйнування валу; 2 – внутрішня поверхня корпусу калібратора

Для визначення марки сталі було проведено хімічний аналіз. Сталь, з якої виготовлений калібратор, відповідає марці 40ХН ДСТУ (табл. 11).

					<b>ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ</b>	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 11 - Хімічний аналіз сталі

Позначення	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni
Вміст	0,431	0,565	0,268	0,009	0,031	0,526	0,023	1,046

Механічні властивості валу калібратора наведені у таблиці 12.

Таблиця 12 - Механічні властивості

Характеристика	Тимчасовий опір, $\sigma_b$ , МПа	Межа текучості, $\sigma_t$ , МПа	Відносне подовження, $\delta$ , %	Твердість, НВ	Ударна в'язкість, КСV, МДж/м <sup>2</sup> 20°C
ДСТУ	950	830	15	285-321	0,7-0,758
Калібратор	761,5	477	6,25	241	0,54

Циклічна міцність і довговічність виробів безпосередньо залежать від механічних властивостей сталі. Наявність концентраторів напруги, таких як різьбові канавки та переходи перерізу, полегшує процес утворення тріщин втоми. У цьому випадку механічні властивості сталі мають значно нижчі значення, ніж необхідно. Так, показники твердості, межі міцності та межі плинності (табл. 12) сприяють прискореному утворенню тріщин втоми. Невисокі значення пластичності (відносного подовження та ударної в'язкості) знижують опір поширенню тріщин втоми, що утворилися (табл. 12) [11].

Для більш детального аналізу було проведено металографічні дослідження за допомогою оптичного мікроскопа. На зразку при невеликому збільшенні чітко спостерігається смугаста структура (рис. 19).

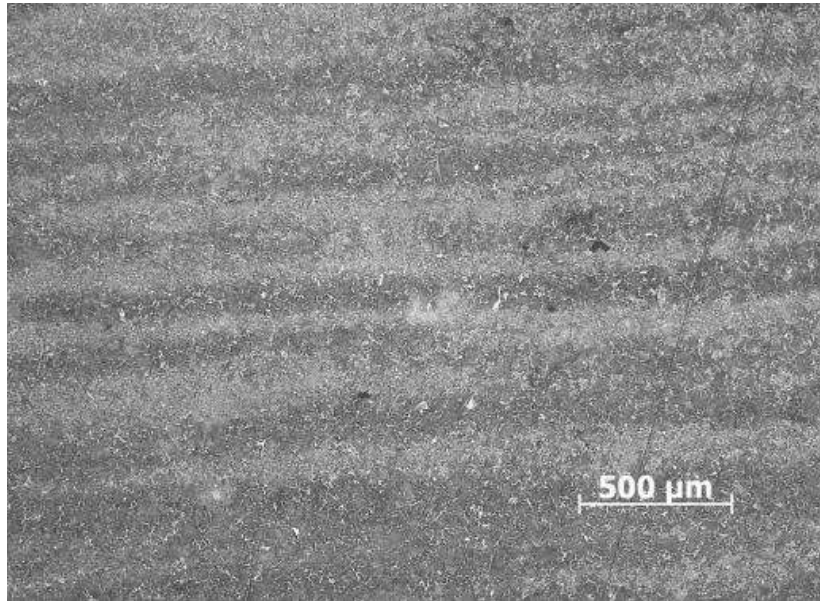


Рисунок 19 – Смугаста мікроструктура валу калібратора

Первинна смугаста структура є результатом ліквідації, що виникає в процесі кристалізації легованої сталі та подальшої гарячої пластичної деформації. Смугаста структура є анізотропною, тому властивості сталі вздовж та поперек волокон можуть значно відрізнятися.

У процесі експлуатації калібратор перебуває у складно напруженому стані. В основі різьбової канавки діють розтягувальні та стискаючі напруги, спрямовані перпендикулярно до поверхні різьбового виступу, а дотичні напруги, спрямовані по радіусу. Внаслідок такого силового впливу накопичуються дефекти, спровоковані смугастою структурою.

Наявність смугастої структури знижує втомну витривалість і сприяє утворенню осередків втомного руйнування.

Смугаста мікроструктура може бути викликана кількома причинами: режимами прокатки, коли прокатка виконується при знижених температурах і не встигають пройти процеси рекристалізації, що призводить до переважної орієнтації зерен; значною ліквідацією легуючих елементів, яка після прокатки також створює волокнисту структуру .

					<i>ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ</i>	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При дослідженні структури при великих збільшеннях чітко спостерігається значна неоднорідність у різних ділянках. Існують області значної протяжності з явно вираженою різнозернистістю (рис. 20). Така структура сформувалася в результаті охолодження від температур вище критичних зі швидкістю, при якій спочатку утворився ферит переважно за межами зерен, а при подальшому охолодженні — сорбіт.

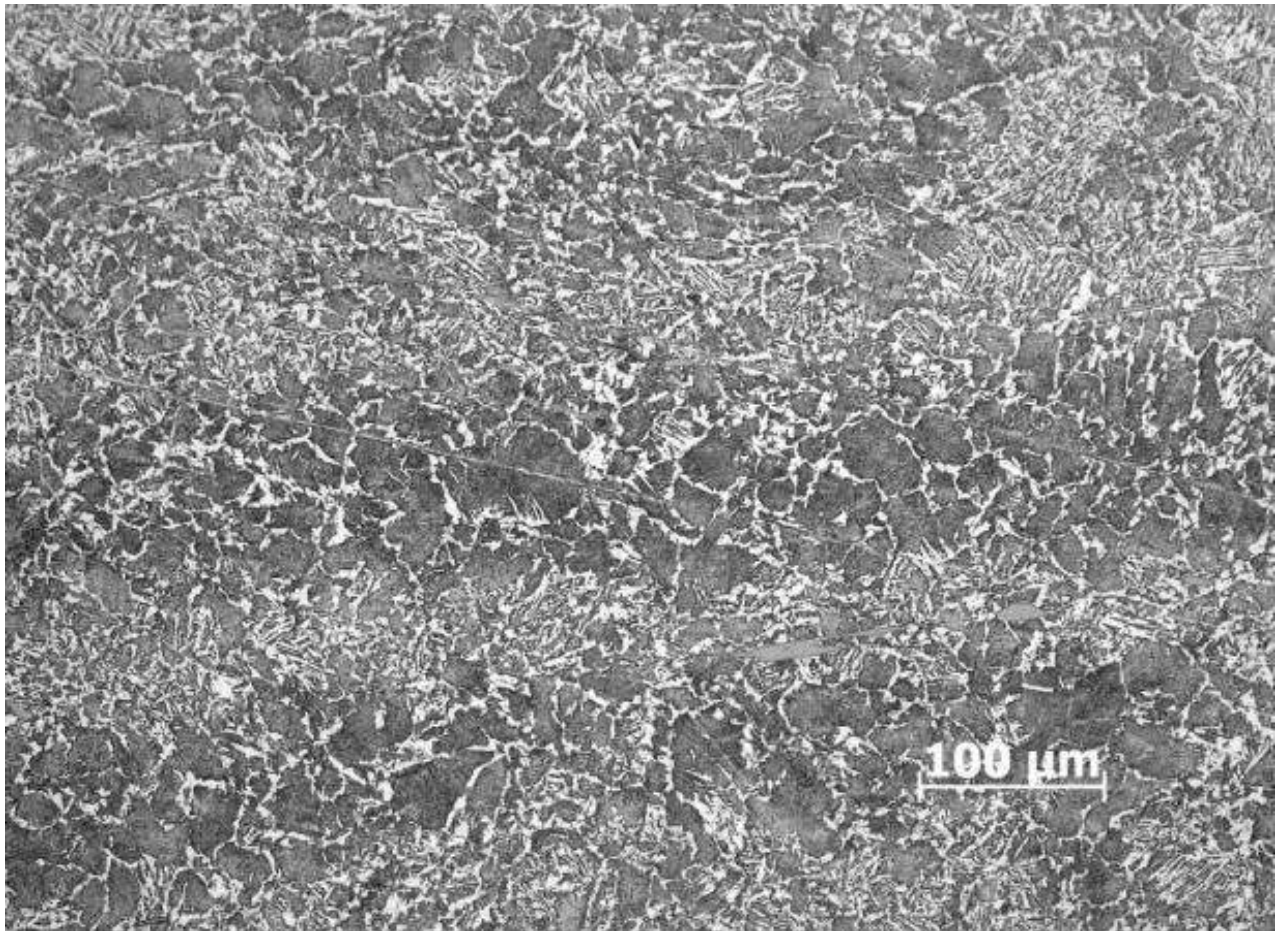


Рис. 20 – Різнозерниста структура сталі, з виділеннями фериту за межами зерен

При великих збільшеннях спостерігаються ділянки з відманштеттовою структурою чітко, де ферит має орієнтовану голчасту будову. (рис. 21).

					ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

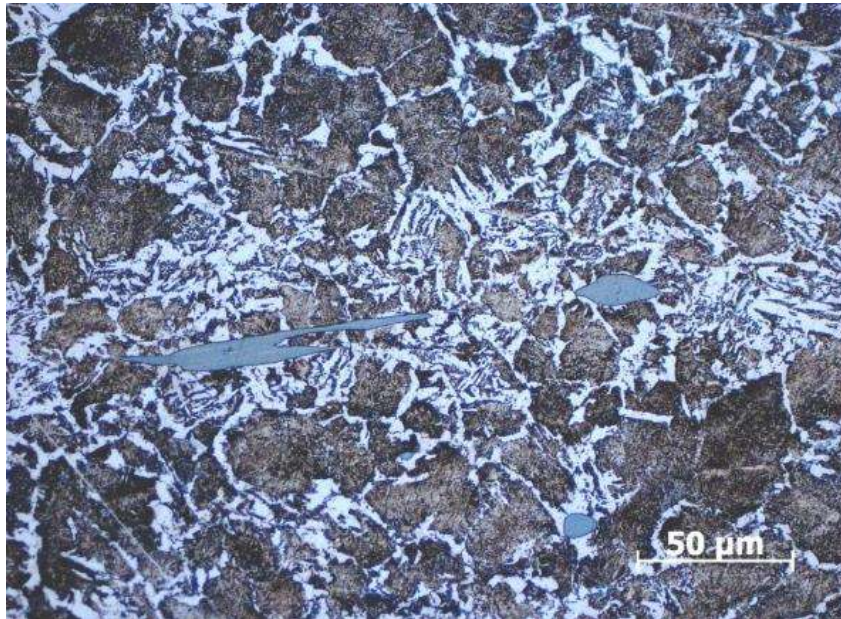
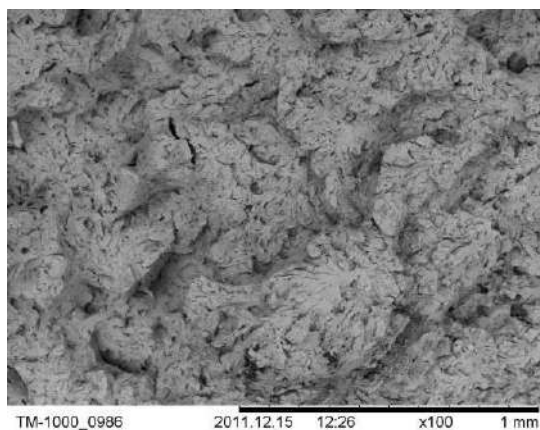


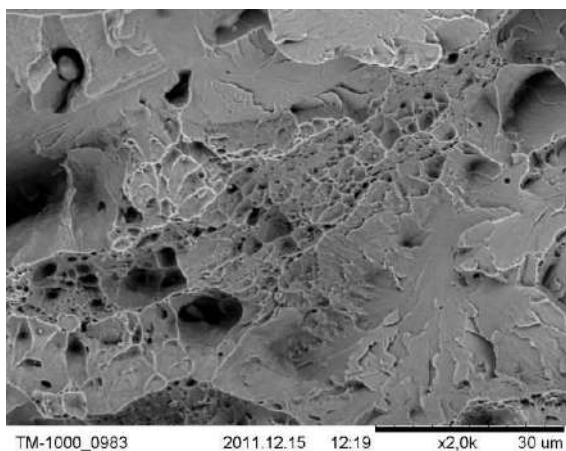
Рис. 21 – Видманштеттова структура валу калібратора

Неоднорідність та наявність відманштеттової структури негативно позначаються на механічних властивостях сталі, що узгоджується з результатами механічних випробувань (табл. 12).

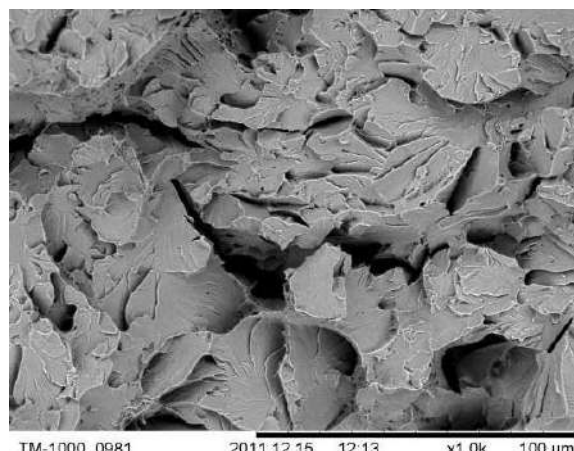
Фрактографічні дослідження поверхонь руйнування ударних зразків, виконані на сканувальному електронному мікроскопі, вказують на переважно крихкий характер руйнування (рис. 22). При невеликих збільшеннях (рис. 22, а) чітко видно візерунок, характерний для крихкого руйнування. При більших збільшеннях (рис. 22, б) спостерігаються ділянки з гладкою поверхнею, характерні для крихкого руйнування, та ділянки з ямковою будовою, характерні для в'язкої руйнації [13].



*a*



*b*



*в*

Рис. 22 – Поверхня руйнування ударних зразків

Більша частина поверхні руйнування має будову, характерну для тендітного руйнування. Руйнування відбувається транскристалітним механізмом сколу (рис. 22, в). Спостерігається велика кількість вторинних тріщин.

В результаті дослідження було зроблено такі висновки:

1. Руйнування труби муфтової частини калібратора відбулося за втомним механізмом.

2. У зоні, що прилягає до поверхні руйнування, спостерігається відманшеттова структура, яка сформувалася в умовах охолодження від температур, що значно перевищують АЗ, що є наслідком порушення технології термічної обробки.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ

Арк.

57

3. Низькі механічні властивості сталі у поєднанні з грубою відманштеттовою структурою призвели до зниження циклічної міцності та циклічної довговічності калібратора.

### 3.2 Привідний вал гідравлічного насоса

Буровий насос використовується на бурових установках для забезпечення циркуляції бурових розчинів під час свердління свердловин. Для досягнення цієї мети необхідно підтримувати високий тиск, що складає 450 атмосфер.

На валу чітко спостерігається тріщина, яка розповсюдилася на значну глибину перпендикулярно до осі валу (рис. 23, б).



*а*

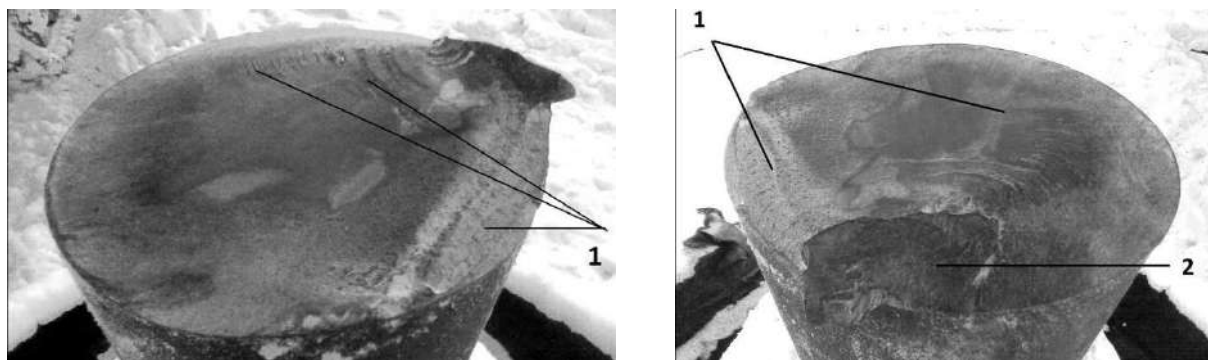


*б*

Рис. 23 – Привідний вал гідравлічного насоса: *а* – загальний вигляд;  
*б* – Тріщина на валу

Поверхня руйнування валу демонструє типову будову, характерну для руйнування втоми (рис. 24). Більшість областей руйнування мають гладку текстуру з чітко вираженими лініями зупинки тріщини (на рис. 24, вони позначені цифрою – 1). Втомна тріщина простягнулася практично по всьому перерізу валу, про що

свідчить наявність невеликої зони долому (на малюнку 24 б вона позначена цифрою - 2). Мінімальна площа долому, що виникла штучно під час демонтажу валу, свідчить про невеликі діючі навантаження під час експлуатації гідравлічного насоса.



*а*

*б*

Рис. 24 – Поверхня втомного руйнування валу: 1 - втомна тріщина з лініями зупинки тріщини, 2 - зона долому, яка сформувалася в результаті руйнування валу після його демонтажу

Для широкого спектру важливих виробів, які діють у умовах циклічного навантаження, встановлюється певний термін (кількість циклів навантаження), протягом якого ці вироби зберігатимуть свою працездатність під час експлуатації. Зі збільшенням часу експлуатації можливе виникнення руйнування через втомний механізм.

Після демонтажу валу було виявлено відокремлену частину зуба, через який пролягала тріщина (рис. 25).

Фрактографічні дослідження тріщини, що пролягла через зуб до руйнування, підтверджують, що руйнування відбулося через втомний механізм. Поверхня руйнування має дві характерні зони з відмінною будовою. Перша зона - це місце появи початкових тріщин втоми, а друга зона - це зона подальшого розповсюдження тріщини втоми, яка має типову будову з лініями зупинки тріщини. Спостерігається багатоцентричний характер зародження тріщин, що

підтверджується наявністю кількох ініціюючих центрів (позначених на малюнку як 1), які об'єдналися, утворивши основну тріщину (позначену як 2).

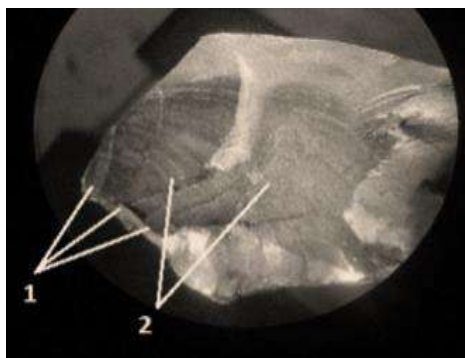


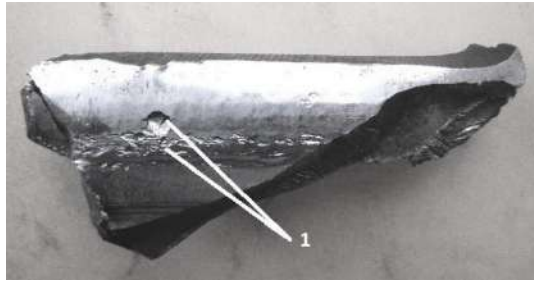
Рис. 25 – Поверхня втомного руйнування зуба з характерним рельєфом: 1 – осередки зародження тріщини; 2 – втомні тріщини

Важливо відзначити, що дана тріщина є продовженням тріщини, яка майже пролягає через всю довжину тіла валу. Утворення кількох центрів пошкодження у основі зуба пов'язане зі зміною напруженого стану в цій області, оскільки тут виникають значні напруження при контакті зубів у зубчастій передачі.

На головній поверхні зуба можна помітити піттинги (рис. 26). Цей тип зношування, який супроводжується утворенням піттингів на поверхнях зубців у зубчастих колесах, відноситься до втомного виду, що виникає під впливом циклічних навантажень.

При експлуатації деталі з часом збільшується схильність до утворення піттингу, особливо якщо ресурс деталі перевищує. Це стається через збільшення кількості неметалевих включень та наявність несплошностей у поверхневій зоні, низькою якістю поверхонь зубів тощо. У випадках, коли порушується технологія поверхневої обробки, можуть утворюватися зародки втомного руйнування в перехідній зоні, що сприяє появі піттингу. Також піттинги можуть утворюватися при експлуатації виробу протягом часу, який значно перевищує ресурс даної

деталі.



*a*



*б*

Рис. 26 – Фрагменти зуба зубчастого колеса: а – вид з боку робочої поверхні зуба (1 – півтинги на основній контактній поверхні); б – вид з зворотнього боку зуба

**Висновки:**

- Вихід з ладу валу обумовлений практично повним поширенням втомної тріщини по всьому перерізу (приблизно 90 %).
- Вал під час експлуатації був підданий низьким навантаженням.
- Виникнення та поширення втомної тріщини спричинені впливом циклічних навантажень, що мали характер обертання з вигином.

					<i>ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ</i>	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВОК

- Проведено дослідження, яке підтверджує, що руйнування виробів, що працюють у умовах циклічного навантаження, переважно відбувається за механізмом втоми.

- Виявлено, що локальні зони, що найбільше піддаються напрузі під час експлуатації, слугують вогнищами зародження тріщин.

- Встановлено, що довжина зони долому залежить від рівня діючих напружень та властивостей матеріалу.

- Отримані дані про взаємозв'язок між макро- та мікроструктурою матеріалу з характером руйнування та видом зламів.

- Встановлено, що наявність неоднорідної мікроструктури сприяє прискореному поширенню тріщини втоми та остаточному руйнуванню.

- Проведено аналіз поверхні руйнування зразків із конструкційної та інструментальної сталі після випробування на ударну в'язкість.

					<i>ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ</i>	Арк.
						62
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бобровицький, В. І., Сидоров, В. А. Механічне обладнання: технічне обслуговування та ремонт. - Донецьк: Південний Схід, 2011. - 238 с.
2. Методи поверхневого зміцнення у процесі виготовлення деталей машин: навчальний посібник / [А.Г. Фесенкота ін.]; Дніпропетровський національний університет ім. Олесья Гончара. – Дніпропетровськ: РВВ ДНУ, 2015. – 103 с.
3. В.І. Пожуєв, В.І. Іващенко, І.Ф. Червоний, В.П. Грицай. Металургія кольорових металів. Підручник. 4.1 / Під ред.. докт. техн.. наук, професора Червоного.
4. Деркач Ф. А. Хімія. — Л. 1968.
5. Зюзькевич С.А. Очищення деталей від жирових забруднень перед нанесенням гальванічних покриттів // Світ гальваніки. № 1, 2007, с. 34.
6. Мохорт А. В. Термічна обробка металів. / А. В. Мохорт, М. Г. Чумак // К. : Либідь, 2002. – 512 с.
7. Грліхес С.Я. Знежирення, травлення та полірування металів. Л.: Машинобудування. 1983, 101с.
8. Вансовская К.М. Металеві покриття, нанесені хімічним способом. Л.: Машинобудування, 1985, 103с.
9. В.В. Скорчеллетті. Теоретичні основи корозії металів. Л.:Хімія, 1973, 264 с.
10. Antony K. C. Wear resistant cobalt-base alloys // J. Metals. – 1983. – V. 35. – №2. – P. 52–60.
11. А.А. Герасименко, В.І. Микитюк. Визначення параметрів електрохімічних процесів осадження покриттів. 1980, 111 с.

					<i>ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ</i>	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

12. Ю.Д. Гамбург. Гальванічні покриття. Довідник по застосуванню. М.: Техносфера. 2006, 216 с.
13. А.М. Ямпільський, В.А. Ільїн. Короткий довідник гальванотехніка. Л.: Машинобудування. 1972, 269 с.
14. Патент США N 3822146, кл. В 05 В 13/06, 1974.
15. А.М. Ямпільський, В.А. Ільїн. Короткий довідник гальванотехніка. Л.: Машинобудування. 1972, 269 с.
16. А.М. Ямпільський. Міднення та нікелювання. Л.: Машинобудування. 1971, 136с.
17. Choong-Nyeon Park, Min-Ho Chang. Діяльність нікелевих тверджень на властивості металів hydride electrodes // J. of Alloys and compounds. 1995. № 231, pp. 846-851.
18. A. Turonova, M. Galova, L. Lux, M. Gal. Електрохімічні процеси під час пофарбування статей за Ni і Ni / Cu coating в fluidized bed // J. Solid State Elektrochem. 2001 №5, pp. 502-506.
19. Розовський Г І, Вяшкаліс А. І. Хімічне міднення. Вільнюс, РІНТІП, 1966. 60 с.
20. Yu Xingwen, Cao Chunan etc. Study double layer rare earth metal conversion coating on aluminum alloy LY12 // Corrosion Science. 2001 №43, pp. 1283-1294.
21. Zum Gahr K.-H. Microstructure and wear of materials. – Amsterdam : Elsevier, 1987. – 560 p.
22. Wang Y.-L. An analysis of the influence of plastic indentation on three-body abrasive wear of metals / Y.-L. Wang, Z.-S. Wang // Wear, 1988. – V.122. – N2. – P.123–133.
23. Beckmann G., Gotzmann J. Analytische Betrachtung zum Strahleverschleis von Metall // Schmierungstechnik. – 1979. – V.10. – N4. – S.104–107.

					<i>ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ</i>	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

24. Spurr R.T. The nature of contact during abrasion // Wear. – 1981. – V.67. – N3. – P.375–379.
25. Torrance A. A. An explanation of the hardness differential needed for abrasion // Wear. – 1981. – V.68. – N2. – P.263–266.
26. Rohrig K. Abrasionsbestandige Eisenguswerkstoffe. – VDI-Z. – 1962. – 124. – N5. – P. 11–14, 17–20, 23–24.
27. Kassim S. Al-Rubaie. Equivalent hardness concept and two-body abrasion of iron-base alloys // Wear. – 2000. – V.243. – 1-2. – P. 92–100.

					<i>ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ</i>	Арк.
						65
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

# ДОДАТКИ

					<i>ДРМТВАТАМ 24.20182.000. ПЗ</i>	Арк.
						66
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

**Хмельницький національний університет  
Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства**

***Тема:***

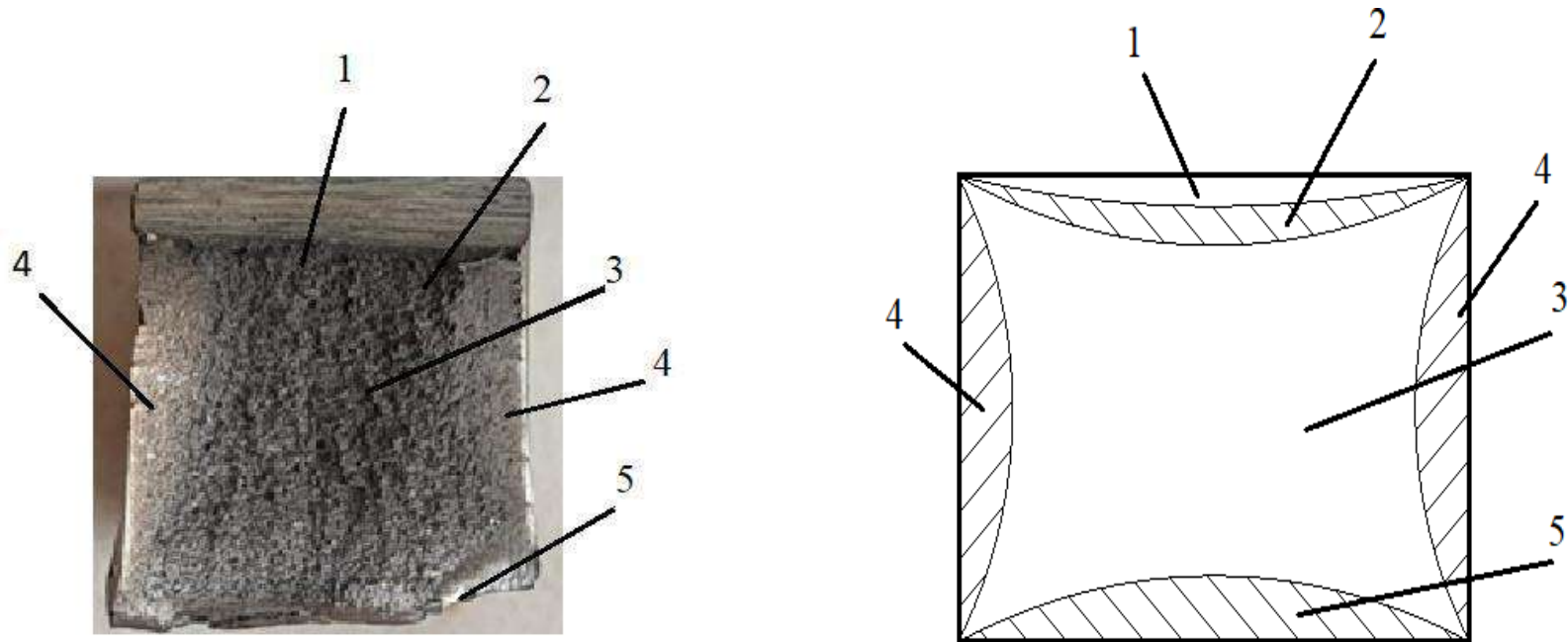
**Дослідження механізмів руйнування конструкційних та  
інструментальних сталей**

Спеціальність 132 – «Матеріалознавство»

Студент групи МТВА -20-1

Микола СІРЖАНТ

## Поверхня та схема зламу



Поверхня зламу: а – схема зламу зразка; б – злам зразка: 1 – осередок руйнування; 2 – зона зародження тріщини; 3 – зона поширення тріщини; 4 – утяжка зламу; 5 – зона долому

## Загальні відомості про злами

Характер руйнування деталі можна класифікувати за типом зламу:

- Крихкий (Світлий) злам: на поверхні руйнування спостерігаються блискучі плоскі ділянки.
- В'язкий (Матовий) злам: поверхня руйнування містить дрібні уступи, волокна, які утворюються при пластичній деформації зерен під час руйнування.
- Змішаний злам: на поверхні зламу можуть спостерігатися як ділянки металу крихкої, так і в'язкої руйнації.

Відмінні характеристики зламів:

Відмінні ознаки	Крихке тіло	Пластичне тіло
Кристалографічний характер руйнування	Скол	Зріз
Зовнішній вигляд зламу	Кристалічний	Волокнистий
Швидкість розповсюдження тріщини	Висока (нестійка тріщина)	Низька (стійка тріщина)

## Матеріали для досліджень

Конструкційні	Чавун	Інструментальні
40ХНМА	ВЧ45	4Х5В2
40ХН		4Х5М

### 40ХН

Позначення	C	Mn	Si	O	S	Cr	Mo	Ni
Вміст ,%	0,416	0,588	0,257	0,012	0,006	0,707	0,044	1,40

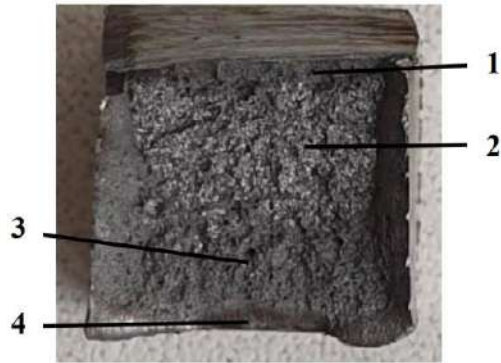
### 40ХНМА

Позначення	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni
Вміст ,%	0,372	0,682	0,285	0,012	0,008	0,873	0,157	1,320

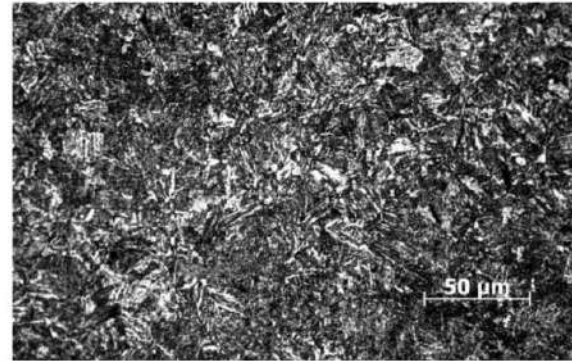
### 4Х5В2

Позначення	C	O	Si	Cr	Fe	W
Вміст ,%	13,68	2,86	0,68	5,36	73,12	4,31

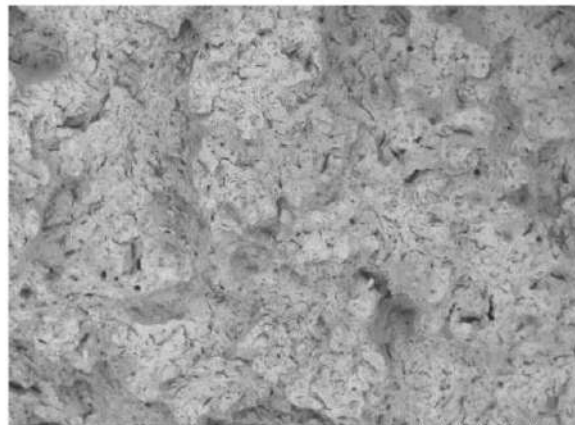
## Поверхня руйнування сталі 40ХН



*a*



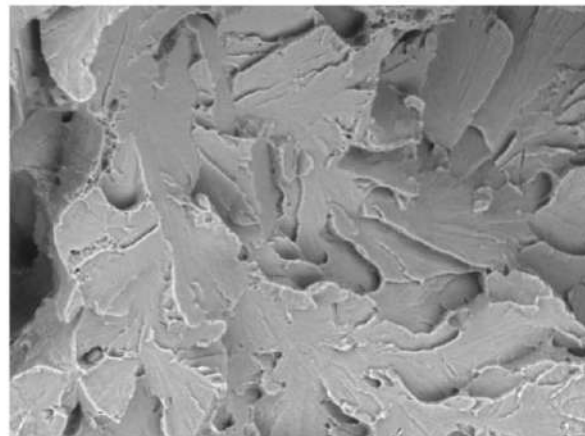
*б*



TM-1000\_

x120 500 μm

*в*



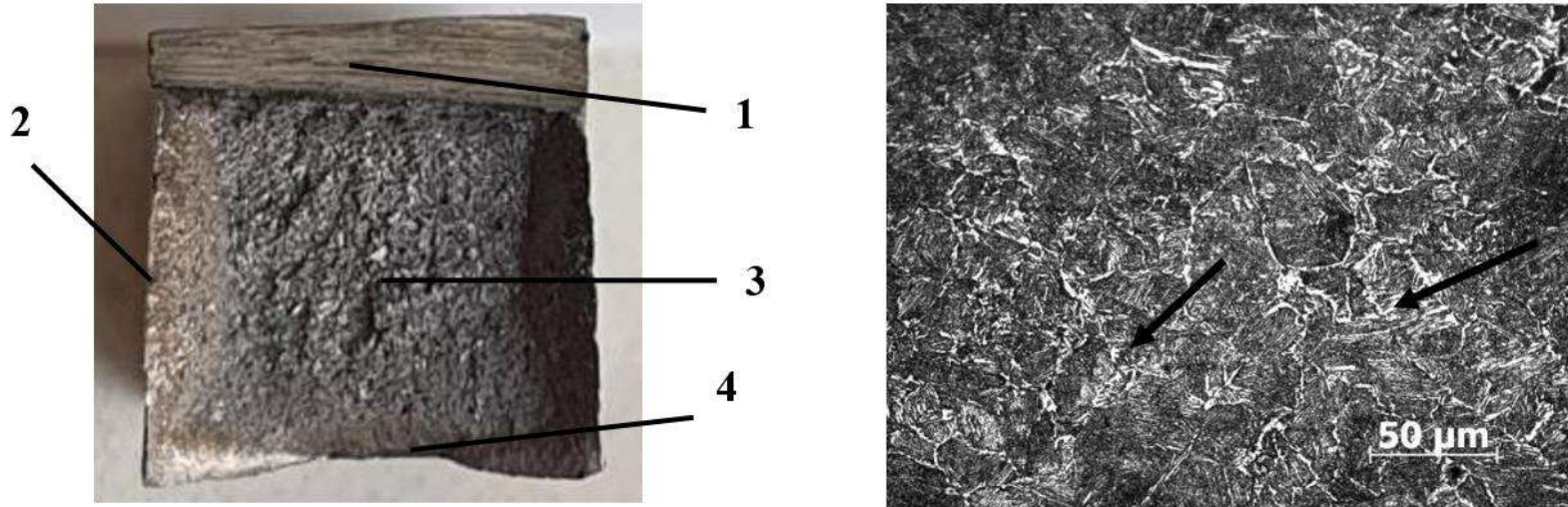
TM-1000\_

x3,0k 30 μm

*г*

Поверхня руйнування сталі 40ХН: *a*- макробудова,  $\times 4,5$  (1 - осередок руйнування; 2 - стабільне зростання тріщини; 3 - прискорений розвиток тріщини; 4 - зона долому); *б*- сорбітна структура з наявністю неоднорідності; *в-г*- фрактограма

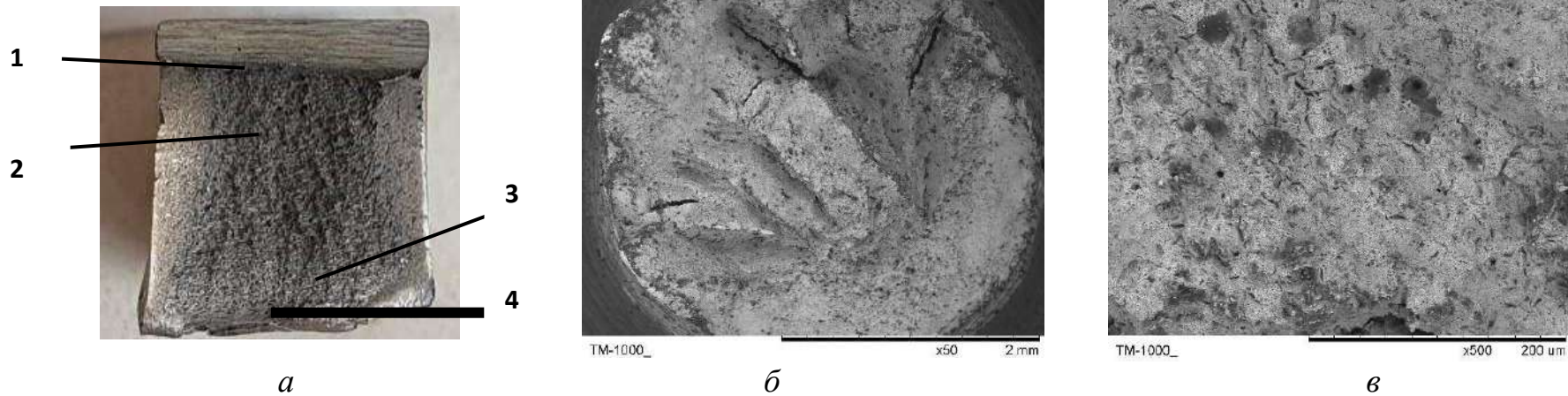
## Поверхня руйнування сталі 40ХНМА



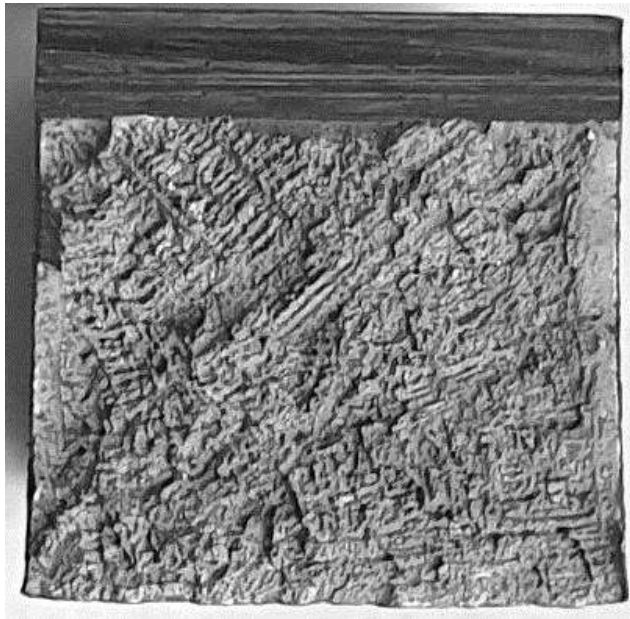
Поверхня руйнування та мікроструктура сталі 40ХНМА:

*a*– макроструктура злому,  $\times 4,5$ ; *б* – мікроструктура: 1 - зародження тріщини; 2 – утяжки; 3 – зона поширення тріщини; 4 – зона долому

## Поверхня руйнування сталі 38ХГМ, 30Х13



Досліджувана поверхня сталі 38ХГМ: *a*- макроструктура,  $\times 3,5$ ; *б-в* - фрактограми (розривний зразок).

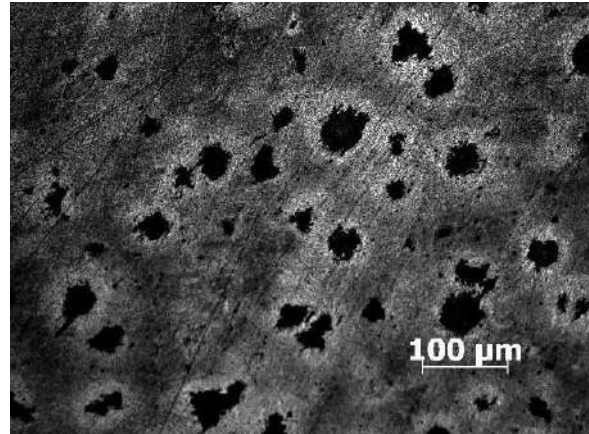


Поверхня руйнування ударного зразка з 30Х13 (з яскраво вираженою дендридною будовою),  $\times 4,5$

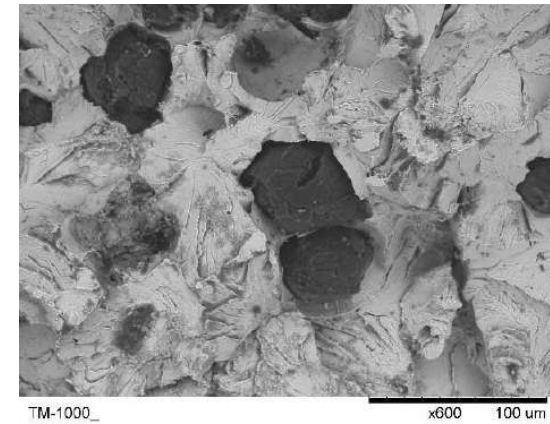
## Поверхня руйнування чавуну



*a*



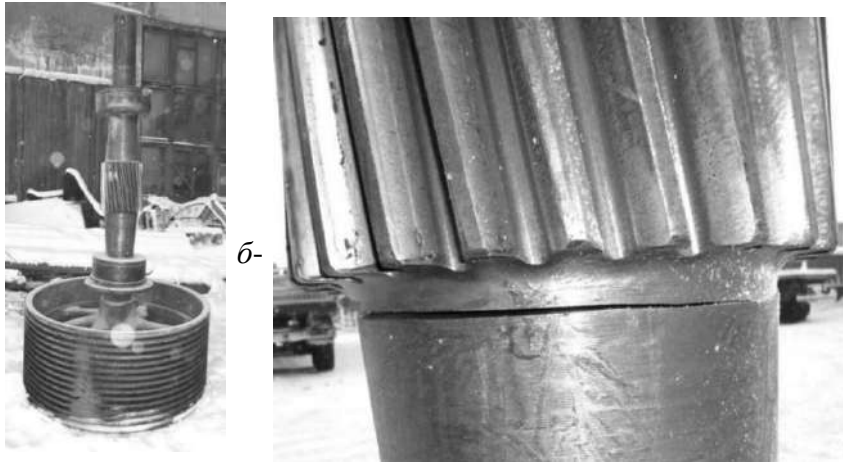
*б*



*в*

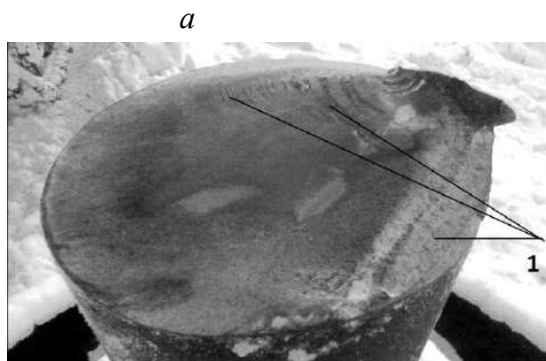
Поверхня руйнування та структура чавуну ВЧ45: *a* – макроструктура,  $\times 4$ ; *б* – мікроструктура; *в* – мікроскопічне зображення поверхні руйнування чавуну.

## Аналіз експлуатаційних руйнувань

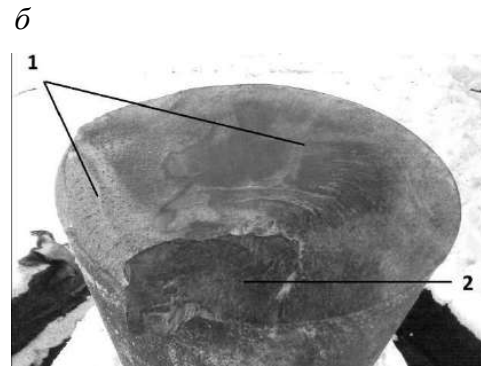


Привідний вал гідралічного насоса: *a* – загальний вигляд;

*б* – тріщина на валу

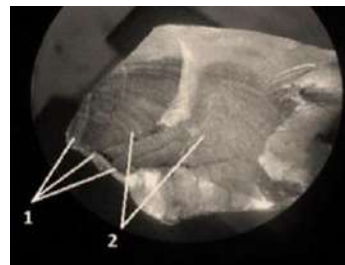
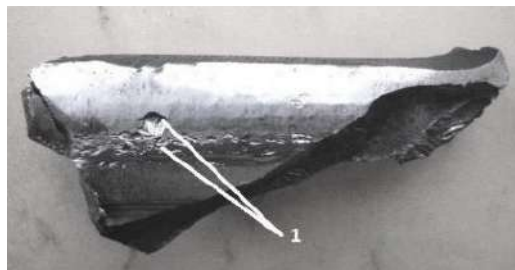


*a*



*б*

Поверхня втомного руйнування валу: 1 - втомна тріщина,  
2 - зона долому, яка сформувалася в результаті руйнування  
валу після його демонтажу



Поверхня втомного руйнування зуба з характерним рельєфом: 1 –  
осередки зародження тріщини; 2 – втомні тріщини

## ВИСНОВКИ

- Проведено дослідження, яке підтверджує, що руйнування виробів, що працюють у умовах циклічного навантаження, переважно відбувається за механізмом втоми.
- Виявлено, що локальні зони, що найбільше піддаються нарузі під час експлуатації, слугують вогнищами зародження тріщин.
- Встановлено, що довжина зони долому залежить від рівня діючих напружень та властивостей матеріалу.
- Отримані дані про взаємозв'язок між макро- та мікроструктурою матеріалу з характером руйнування та видом зламів.
- Встановлено, що наявність неоднорідної мікроструктури сприяє прискореному поширенню тріщини втоми та остаточному руйнуванню.
- Проведено аналіз поверхні руйнування зразків із конструкційної та інструментальної сталі після випробування на ударну в'язкість.

**Дякую за увагу**