

УДК 669.187.56

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.103.0.109

## ФРАКТОГРАФІЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РУЙНУВАННЯ ВАЛА-ШЕСТЕРНІ ЗІ СТАЛІ 34ХН1М

Носко О. А., Погребна Н. Е., Гребенєва А. В., Аюпова Т. А., Аюпов А. А.  
Український державний університет науки і технологій

*Анотація.* Проаналізовано причини та особливості експлуатаційного руйнування шестерні, виготовленої зі сталі марки 34ХН1М. Установлений крихкий втомний характер руйнування. Визначено, що причиною руйнування шестерні є втома металу під час дії циклічних напружень вигину та крутіння. Визначений незадовільний стан поверхні, для якого властиві пори та раковини, які є концентраторами напружень за умови появи тріщини.

*Ключові слова:* вал-шестерня, сталь 34ХН1М, втома, злам, тріщина, руйнування.

### Вступ

У процесі експлуатації сталевих деталей машин, устаткування й елементів конструкцій їх руйнування здебільшого починається з поверхні унаслідок зношування, втоми, контактної взаємодії тощо. Тому в багатьох ситуаціях надійність і довговічність виробів залежить від якості, міцності та напружено-деформованого стану металу поверхневих шарів деталей. Контактні напруження й деформації є основними факторами, що визначають характер і інтенсивність зношування деталей машин [1].

### Аналіз публікацій

Вали-шестерні, які передають крутний момент з одного вала на інший, є одним із вузлів механізму, що дуже швидко зношується. Величезні всебічні навантаження, що припадають на вал-шестерню в робочому процесі, швидко приводять її в абсолютно непридатний для роботи стан. Вал-шестерня працює в умовах дії радіального знакозмінного зосередженого навантаження, осьового навантаження та крутного моменту. Зуби зубчастого вінця відчувають згинальну силу, контактний тиск, тертя, під дією яких відбувається нагрів та зношування зубів. У процесі експлуатації зуби вала-шестерні піддаються вигину за максимального одноразового навантаження та вигину за умови багаторазових циклічних навантажень, унаслідок чого в корені зуба виникають найбільші напруження, які можуть спричинити втомне руйнування. Також відбувається зношування поверхневого шару. Полумки валів-шестерень найчастіше мають втомний характер і виникають у зоні наявності концентраторів напружень. Також відомі випадки виходу з ладу внаслідок ушкодження зубів

(втомні руйнування та контактні руйнування поверхонь, рідше – зношування).

Отже, якість цього вузла механізму має бути досить високою, щоб збільшити термін служби деталі та уникнути простою обладнання [2].

Легована сталь марки 34ХН1М широко застосовується для виготовлення деталей і металовиробів різного призначення, зокрема осей, валів, шатунів, зубчастих коліс, муфт, шпинделей, болтів, ричагів, шестерен та інших, що зазнають вібраційні й динамічні навантаження, а також можуть розігріватися до температур до 500 °С у процесі експлуатації. Для забезпечення вказаних вимог матеріал для виготовлення зазначених виробів повинен мати підвищені показники міцності, в'язкості та твердості [3]. Поліпшення властивостей заготовки зі сталі 34ХН1М для виробництва особливо відповідальних деталей реалізується термічним обробленням, а саме загартуванням і відпуском.

### Мета та постановка завдання

На експертизу надійшла зруйнована шестерня зі сталі 34ХН1М і були сформульовані такі питання: чи є руйнування одномоментним або несправність виникла задовго до тотального руйнування; на якому етапі виробництва або експлуатації виникла зазначена несправність та які методи запобігання цим видам пошкоджень можна рекомендувати.

Метою дослідження є встановлення причин і механізмів руйнування шестерні зі сталі 34ХН1М, надання рекомендацій щодо методів запобігання цього виду пошкодження виробу.

### Методика й результати досліджень

У роботі досліджували зруйновану в процесі експлуатації шестерню зі сталі 34ХН1М.

Хімічний склад цієї сталі наведений у табл. 1.

Поверхню зламу сталі досліджували візуально методом макроаналізу, та більш детальний фрактографічний аналіз проводили методом растрової електронної мікроскопії за допомогою мікроскопа РЕМ-100У за умови збільшення в 1 500–10 000 разів.

Мікроструктурний аналіз сталі марки 34ХН1М проводили на оптичному мікроскопі *Neophot-21* за умови збільшення в 250;

300; 800 разів. Зразки після механічного шліфування та полірування піддавалися хімічному травленню 5 %-им розчином азотної кислоти в етиловому спирті. Для дослідження виготовили пластинчасті зразки розміром 30х30х30 мм, поверхню яких перед обробленням ретельно знежирювали. Мікротвердість вимірювали за стандартною методикою на мікротвердомірі ПМТ-3М за умови навантаження 50 г.

Таблиця 1 – Хімічний склад дослідної сталі 34ХН1М

C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Cu	Mo	Fe
0,40	0,37	1,10	0,04	0,04	0,30	1,30	до 0,3	0,15	~96

На рис. 1 подана поверхня зламу шестерні зі сталі 34ХН1М.

З рис. 1 тип зламу можна визначити як втомний. Будова зламу відображує послідовність процесів, що мали місце під час розвитку втомної тріщини. Злам містить осередок руйнування (місця утворення мікротріщини), що прилягає до поверхні деталі та має невеликі розміри й гладку поверхню (див. рис. 1, позиція 1). Зону втоми (див. рис. 1, позиція 2) формує послідовний розвиток тріщини втоми. У цій зоні спостерігаються характерні борозни, які мають конфігурацію кілець, що свідчить про стрибкоподібне просування тріщини втоми. Зона втоми розвивається доти, доки в робочому перерізі, який зменшується, напруження зростуть настільки, що спричинять його миттєве руйнування. Цю останню стадію руйнування характеризує зона доламу (позиція 3).

За один цикл утворюється одна борозна, а відстань між ними є мірою, що визначає відстань поширення тріщини за один цикл. З рис. 1, а можна побачити, що за один цикл навантаження втомна тріщина поширюється на значну відстань. Цей факт дає змогу зробити висновок про досить високу швидкість поширення тріщини в процесі руйнування дослідного виробу. Високі швидкості поширення тріщини з'являються внаслідок значних напружень поблизу вершини тріщини (великі тріщини або високі навантаження). Також втомні борозни мають слабо виражений, нерегулярний характер, що свідчить

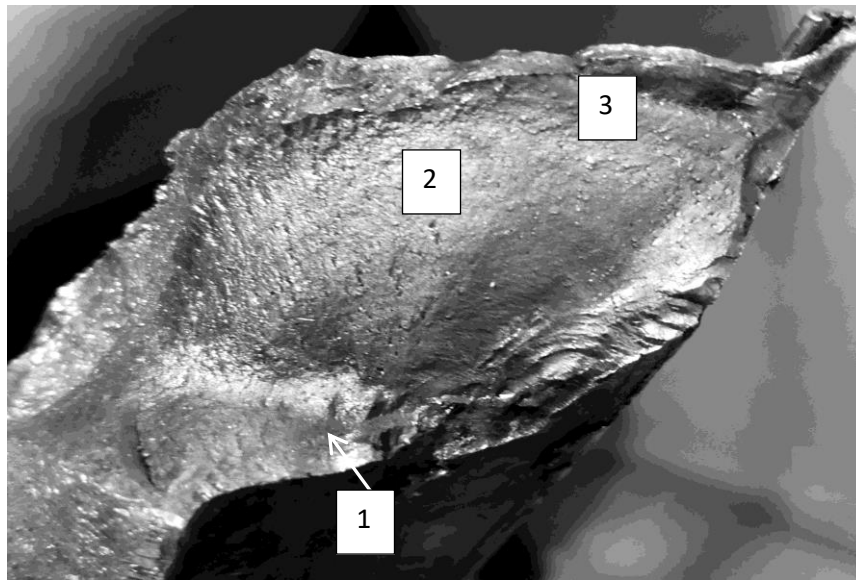
про обмежені можливості сталі вала-шестерні до пластичної деформації.

Зона доламу 3 (див. рис. 1, а) відповідає лавинному руйнуванню, фрактографічна поверхня блискуча та складається з фасеток відколу. Зона вкрита грубими рубцями, які віялоподібно розходяться від фокуса, має грубокристалічну будову, що властиво для крихкого руйнування.

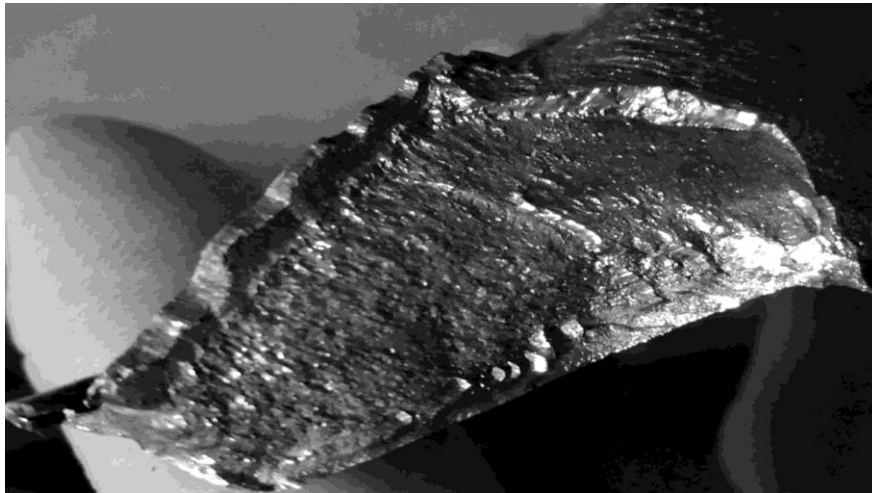
На рис. 2 наведено результати макроаналізу поверхні шестерні з дослідної сталі. Поверхневий шар металу дослідної шестерні має низьку якість, зокрема наявні пори, раковини, подряпини, відколи. У процесі макродослідження поверхні добре видно, що руйнування почалось у місці геометричного концентратора напружень (дефект поверхні – раковина) через викришування металу, внаслідок чого під дією циклічних навантажень утворилась втомна тріщина, що стала концентратором напружень у деталі в процесі експлуатації та призвела до втомного руйнування.

Механізм втомного руйнування багато в чому пов'язаний з неоднорідністю реальної структури матеріалів (наявність різних вкраплень – шлаків, домішок; дефектів кристалічної ґратки, дефектів поверхні матеріалу – подряпин, корозійних уражень).

За умови значних швидкостей поширення втомної тріщини (за умов великих навантажень) вкраплення перед вершиною тріщини можуть розколотися, випасти з матриці, утворюючи порожнину, що є додатковим концентратором напружень.



а



б

Рис. 1. Поверхня зламу шестерні зі сталі 34ХН1М

У зв'язку із зазначеною неоднорідністю за умови перемінних навантажень на границях окремих вкраплень та мікропорожнин і різних дефектів виникає концентрація напружень, що призводить до мікропластичних деформацій зсуву деяких зерен металу, а іноді, коли локальні напруження перевищують межу міцності матеріалу, – і до появи тріщин і подальшого їх розвитку [4].

З метою деталізації механізму руйнування виробу та встановлення ймовірних причин зниження пластичності його матеріалу вивчено злами зразків дослідної шестерні за допомогою растрової електронної мікроскопії (рис. 3).

Злам визначається як крихкий за ступенем пластичної деформації та енергії руйнування, що підтверджується вимірюванням ударної в'язкості зразків дослідної сталі 34ХН1М, якій властиве низьке значення (35–38 кДж/м<sup>2</sup>). У мікрорельєфі поверхні наявні

фасетки відколу, мікротріщини та осередки міжзеренного відколу. Такому типу зламу сприяє мікророзтріскування неметалевих вкраплень.

Характерним елементом мікроструктури є неметалеві вкраплення *MnS*. Незалежно від того, чи розташовані вони на границях зерен, перетинають їх чи розміщені в тілі зерна, навколо них утворюються два види пошкоджень – пори та клиноподібні порожнини, що формуються вздовж міжфазних границь сульфідного вкраплення – металева матриця. Навколо вкраплень *MnS* як структурних концентраторів напружень з'являються мікропори.

Під час тривалого часу експлуатації дослідна деталь розігрівається, і за температур понад 300–500 °С відбувається частковий розпад сульфідів *MnS* і дифузія атомів сірки, що послаблює міцність системи вкраплення – матриці та границь навколишніх зерен

матриці [5]. В умовах підвищеної концентрації напружень у зоні пори, що зростає, це призводить до її трансформації в порожнину, на базі якої розвивається міжзеренна мікротріщина. Це спричиняє суттєве локальне розтріскування, після якого починається процес руйнування дослідної деталі. Результати ме-

талографічного аналізу дослідної сталі 34ХН1М подані на рис. 4. Установлено, що основними структурними складниками є дисперсні структури бейніту та сорбіту відпуску з міжпластинчастою відстанню 0,4–0,2 мкм (визначено за методом Глаголева), а також продукти розпаду аустеніту.

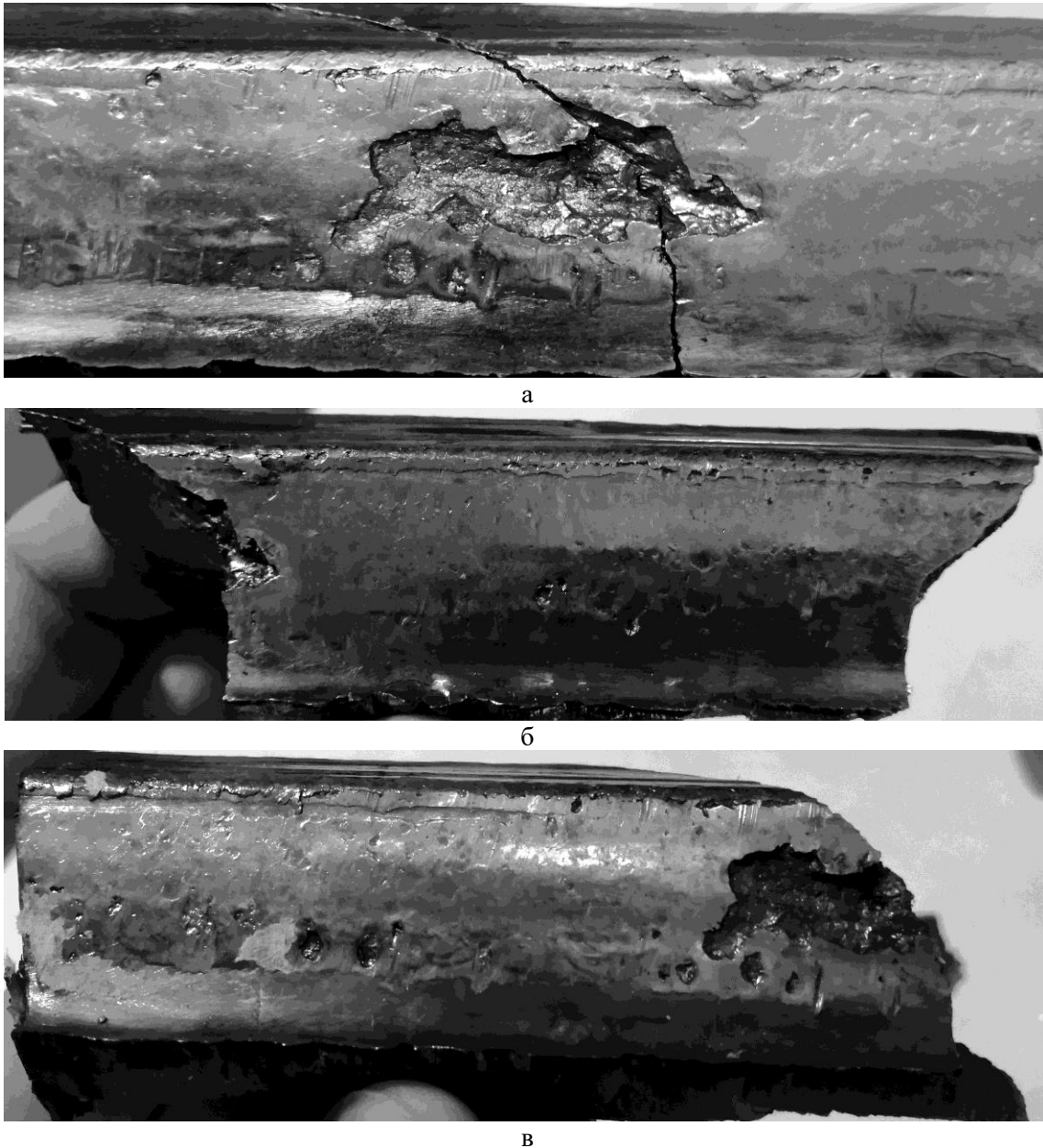


Рис. 2. Поверхневі дефекти сталі 34ХН1М

Під час експлуатації внаслідок зростання асиметрії циклу навантажень на характеристики тріщиностійкості впливає структурно-фазовий стан матеріалу, технології його отримання, термічного та інших видів зміцнювального оброблення [6].

Під час тривалої експлуатації зазначене співвідношення між структурними складниками сталі 34ХН1М (55 % фериту й 45 % пер-

літу, бейніту та сорбіту відпуску) може змінюватися. Під дією температурно-силових чинників легуючі елементи перерозподіляються, що призводить до збіднення твердого розчину (фериту), з одного боку, а з іншого – розпаду перліту та перетворення в карбідній фазі. У цьому разі значна частина хрому й молібдену переходить із твердого розчину в спеціальні карбіди ( $Me_{23}C_6$ ), що мають доста-



тньо великі розміри ( $>3$  мкм), пата розташовуються переважно вздовж феритних зерен, що може призвести до зниження пластичності.

Виявлено ділянки надлишкового фериту. Переважно об'ємна частка надлишкового

фериту присутня в поверхневому шарі, і відповідно до наближення до серцевини вона зменшується. Нерозчинені ділянки грубих вкраплень надлишкового фериту зменшують стійкість переохолодженого розчину, ініціюючи його розпад.

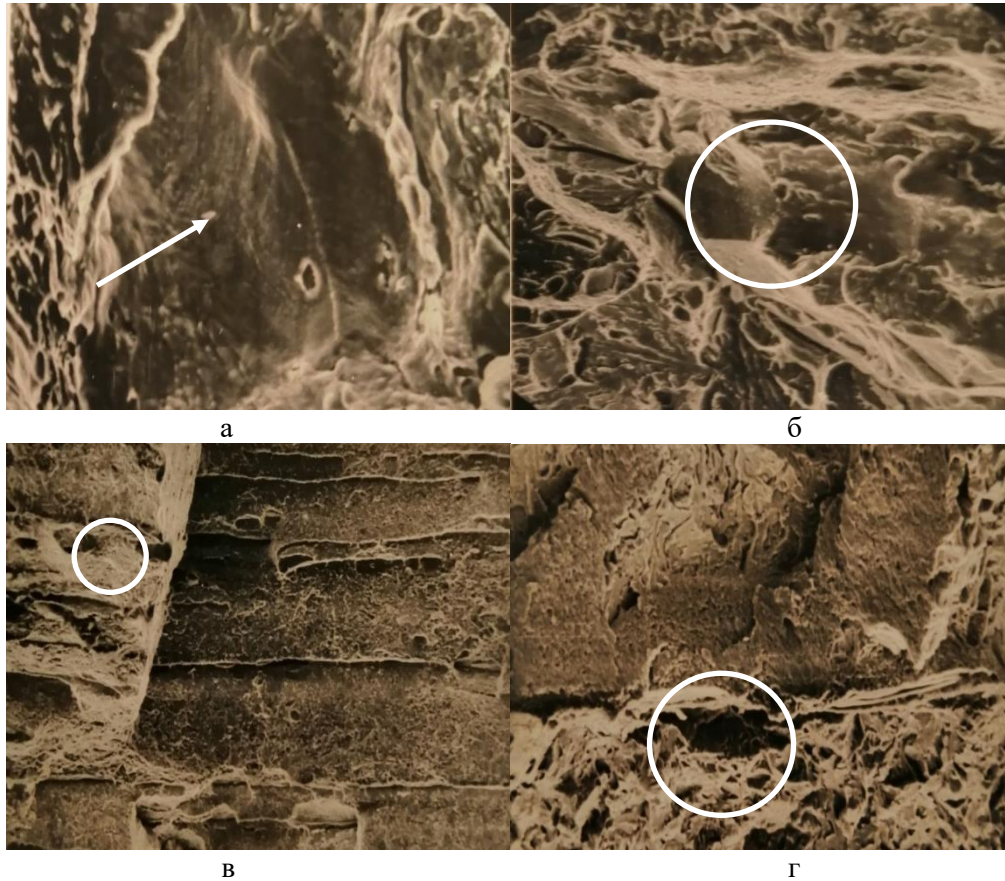


Рис. 3. Злами зразків зі сталі 34XN1M ( $\times 5000$ ): а – неметалеві вкраплення  $MnS$ , крихке втомне руйнування; б – крихке руйнування в зоні потрійного відколу зерен; в – сходишка відколу; г – міжзеренний відкол (зони з неметалевими вкрапленнями)

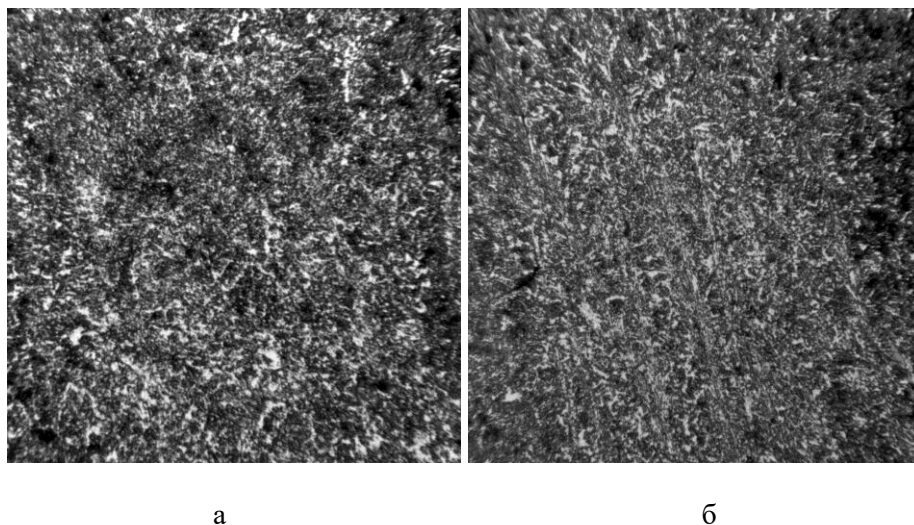


Рис. 4. Мікроструктура зразків дослідної сталі: а, б  $\times 250$ ; (початок)

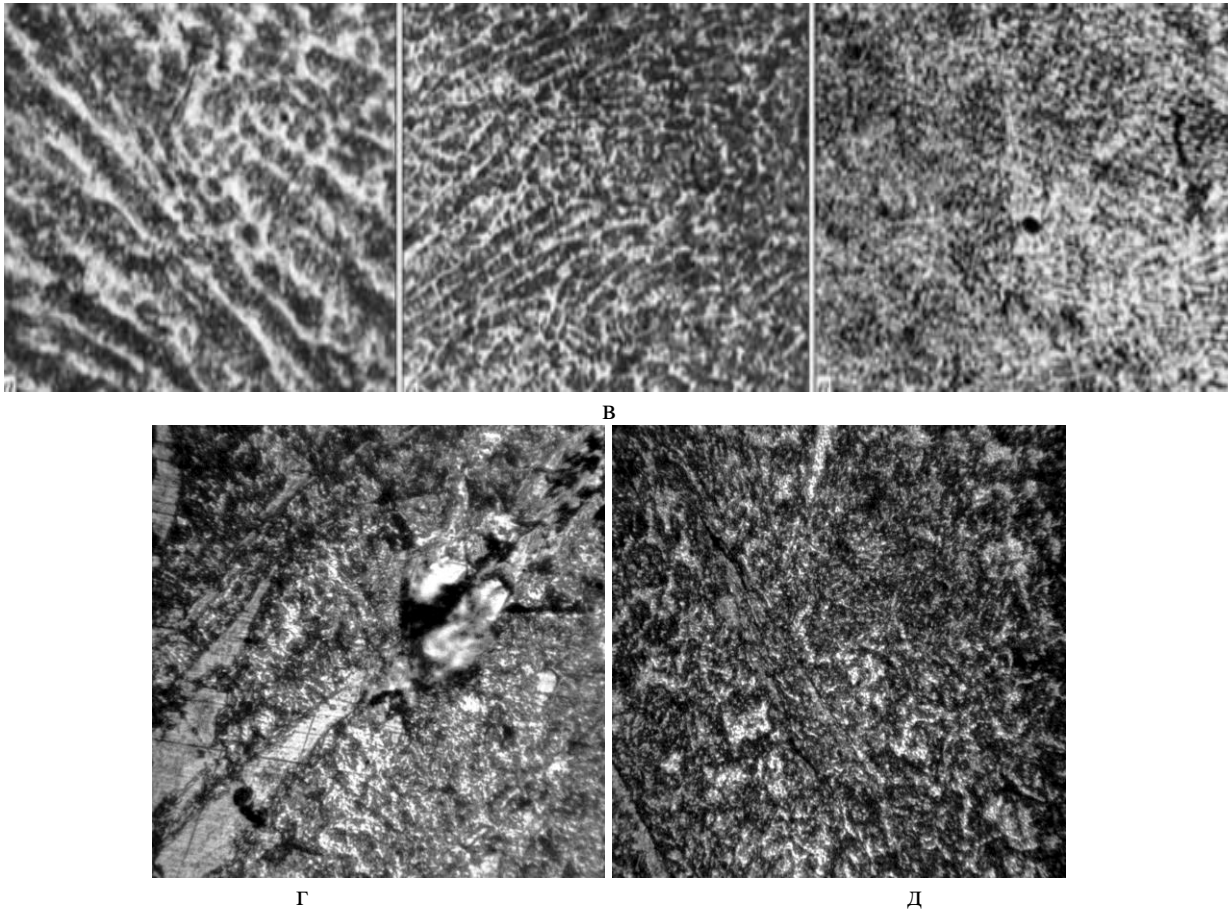


Рис. 4. Мікроструктура зразків дослідної сталі: в х300; г, д х800 (закінчення)

На рис. 5 наведено результати вимірювання мікротвердості поверхні зразків зі сталі 34ХН1М. Для кожного зразка робили не менше ніж 50 замірів.

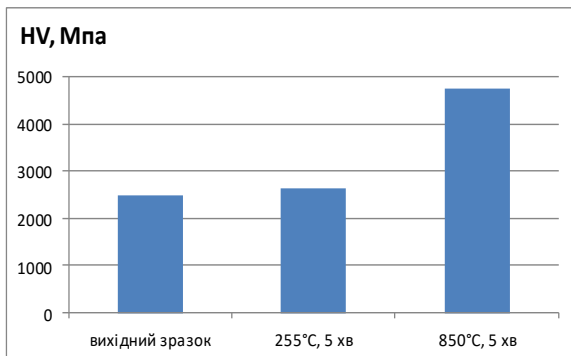


Рис. 5. Результати вимірювання мікротвердості сталі 34ХН1М

Мікротвердість сталі 34ХН1М у вихідному стані коливається в межах 255–262 HV (2551–2622 МПа).

Відтворюючи температурний режим експлуатації вала-шестерні, експериментальні зразки додатково нагрівали до 250...260 °С, що відповідає номінальному режиму роботи

виробу, і до 840...860 °С, моделюючи екстремальний локальний розігрів, що також може реалізуватися під час роботи. В обох випадках охолодження із зазначених температур проводилося на повітрі.

Спостерігається підвищення мікротвердості в обох ситуаціях. Після нагріву до 250...260 °С відбувається незначне її підвищення на 15...20 HV. Після нагріву до температури 840...860 °С протягом 3–5 хв та охолодження на повітрі мікротвердість збільшилася до 475 HV (4756 МПа). Це, імовірно, пов'язано з реалізацією загартування на повітрі дослідної сталі, яке, поряд із підвищенням твердості, зумовлює зменшення пластичності та в'язкості, що узгоджується з результатами фрактографічного дослідження, яке свідчить про втомний механізм руйнування з низьким запасом пластичності.

Твердість дослідних зразків становить 36 HRC. Ударна в'язкість дослідної сталі 34ХН1М має низькі значення (35–38 кДж/м<sup>2</sup>), що властиво для литого металу з чітко вираженою міжкристалітною ліквіацією.

З огляду на сказане вище можна надати такі рекомендації для запобігання втомному руйнуванню з дефіцитом в'язкості матеріалу:



- використання сталі зі зниженим вмістом сірки для зменшення кількості неметалевих включень, що містять сірку та є додатковими концентраторами напружень;
- додаткове оброблення поверхні деталі для запобігання утворення концентраторів напружень у місцях поверхневих несучильностей;
- дотримання номінального температурного режиму для запобігання мимовільного загартування матеріалу виробу.

### Висновки

1. Проаналізовано причини та ознаки експлуатаційного руйнування шестерні, виготовленої зі сталі марки 34ХН1М. Установлений втомний характер руйнування. Злам складається з фокуса руйнування, зони втоми, зони доламу. Істотна відстань між втомними борознами свідчить про досить високу швидкість поширення тріщини в процесі руйнування дослідного виробу. Втомні борозни мають слабо виражений, нерегулярний характер, що свідчить про обмежені можливості сталі вала-шестерні до пластичної деформації. Фрактографічна поверхня зони блискуча та містить фасетки відколу, вкрита грубими рубцями, що віялоподібно розходяться від фокуса, має грубокристалічну будову, властиву для крихкого руйнування.

2. Виявлено незадовільну якість поверхні дослідного виробу: наявні раковини, пори, подряпини, відколи. Руйнування почалось у місці геометричного концентратора напружень (дефект поверхні – раковина) через викривлення металу.

3. Методом сканувальної електронної мікроскопії встановлено крихку природу зламу. У мікрорельєфі поверхні наявні фасетки відколу, мікротріщини та осередки міжзеренного відколу. Виявлено неметалеві включення  $MnS$ , які є додатковими структурними концентраторами напружень. Мікротріщини зароджуються біля неметалевих включень; на межах колишніх аустенітних зерен, особливо в їх потрійних стиках; на межах поділу матриці та вторинних фаз.

4. Установлено підвищення мікротвердості з 2500 до 4750 HV після нагріву до 840...860 °C з подальшим охолодженням на повітрі, що можна пояснити ймовірним загартуванням дослідної сталі, яке поряд з підвищенням твердості зумовлює зниження пластичності сталі.

5. Необхідно рекомендувати використання сталі зі зниженим вмістом сірки, додатково

во обробляти поверхні деталі для запобігання утворення концентраторів напружень у місцях поверхневих несучильностей, а також дотримуватися номінального температурного режиму для запобігання мимовільного загартування матеріалу виробу.

### Література

1. Погребна Н.Е., Куцова В.З., Котова Т.В. Механічна стабільність матеріалів: навч. посіб. Дніпро: НМетАУ, 2021. 108 с.
2. Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування: монографія / Є.А. Фролов та ін. Полтава: ПолтНТУ, 2019. 204 с.
3. Лященко Б.А., Редько О.В., Скуратовський А.К. Збільшення ресурсних показників через застосування енергозберігаючих технологій поверхневого зміцнення. *Наукові вісті НТТУ КІП*. 2010. № 1. С. 115–119.
4. Механіка руйнування та міцність матеріалів: довідн. посіб. / під заг. ред. В.В. Панасюка; Т. 15. Осташ О.П. Структура матеріалів і втомна довговічність елементів конструкцій. Львів: СПОЛОМ, 2015. 312 с.
5. Influence of Nonmetallic Inclusions on Microbreaks Formation in Wheel Steel and Railway Wheels / S. Gubenko, Yu. Proidak, A. Kozlovsk'yy, O. Shramko, M. Is'kov. *Transport problems*. Т. 3. Zeszyt 3. 2008. P. 77–81.
6. Ясній П.В. Пластично деформовані матеріали: втомна і тріщинотривкість: монографія. Львів: Світ, 1998. 292 с.

### References

1. Pohrebna, N.E., Kutsova, V.Z., Kotova, T.V. (2021). *Mekhanichna stabilnist materialiv: Navchalnyi posibnyk [Mechanical Stability of Materials: Study guide]*. Dnipro: NMetAU, 108 s. [in Ukrainian].
2. Frolov, Ye.A., Kravchenko, S.I., Popov, S.V., Hnitko, S.M. (2019). *Tekhnologichne zabezpechennia yakosti produktsii mashynobuduvannia: monohrafiia [Technological Assurance of Quality of Engineering Production: Monograph]*. Poltava: PoltNTU, 204 s. [in Ukrainian].
3. Liashchenko, B.A., Redko, O.V., Skuratovskyi, A.K. (2010). *Zbilshennia resursnykh pokaznykiv cherez zastosuvannia enerhozberihaiuchykh tekhnolohii poverkhnevoho zmitsnennia [Increase in Resource Indicators Due to surface Strengthening Energy-Saving Technologies Use]*. *Naukovi visti NTTU KPI*, no. 1, s. 115–119. [in Ukrainian].
4. *Mekhanika ruinuvannia ta mitsnist materialiv: dovidn. pos. [Fracture Mechanics and Strength of Materials: ref. guide] / pid zah. red.. V.V. Panasiuka. T. 15. Ostash, O.P. (2015). Struktura materialiv i vtomna dovhovichnist elementiv konstruktsii . Lviv: SPOLOM, 312 s. [in Ukrainian].*

5. Gubenko, S., Proidak, Yu., Kozlovsk'yy, A., Shramko, O., Is'kov, M. (2008). Influence of Nonmetallic Inclusions on Microbreaks Formation in Wheel Steel and Railway Wheels. *Transport problems*. Т. 3. Zeszyt 3, p. 77–81. [in English].
6. Yasnii, P.V. (1998). *Plastychno deformovani materialy: vtoma i trishchynotryvkist: monohrafiia* [Plastically Deformed Materials: Fatigue and Crack Resistance: Monograph]. Lviv: Svit, 292 s. [in Ukrainian].

**Носко Ольга Анатоліївна**, декан, к.т.н., доц. каф. покриттів, композиційних матеріалів і захисту металів,

тел. +380 063-689-99-81, [olganosko30@gmail.com](mailto:olganosko30@gmail.com).

**Погребна Наталя Емілівна**, к.т.н., проф. кафедри матеріалознавства та термічної обробки металів, тел.+38067-564-49-34,

[nataliapogrebnaa3@gmail.com](mailto:nataliapogrebnaa3@gmail.com).

**Гребенєва Анна Вікторівна**, к.т.н., доц. каф. матеріалознавства та термічної обробки металів, тел. +38068-400-50-32,

[zhivotovich.anna@gmail.com](mailto:zhivotovich.anna@gmail.com),

**Аюпова Тетяна Анатоліївна**, к.т.н., доц. каф. матеріалознавства і термічної обробки металів, тел. +38 050-101-52-03, [tanyaayupova@ukr.net](mailto:tanyaayupova@ukr.net),

**Аюпов Олександр Альбертович**, студент каф. систем якості, стандартизації та метрології, тел. +38 095-530-33-92, [tk136@ua.fm](mailto:tk136@ua.fm).

Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровська обл., місто Дніпро, 49010, Україна.

### Fractographic research of destruction of 34CrNi1Mo steel gear shaft

**Abstract. Goal.** The purpose of this research work is to establish the causes and mechanisms of destruction of gear shaft made of 34CrNi1Mo steel, to provide recommendations to prevent this type of product damage. **Methodology.** The gear shaft made of 34CrNi1Mo steel destroyed during operation was studied. The fracture surface of the investigated steel was studied by macroanalysis and scanning electron microscopy using a SEM-100Y microscope at a magnification of 1500-10000 times. Microstructural analysis of 34CrNi1Mo steel was carried out on Neophot-21 optical microscope at x250, 300; 800 magnification. Microhardness was measured according to the standard method on a PMT-3M microhardness tester at a 50 g loading. **Results.** The causes and nature of the operational destruction of the gear shaft made of steel grade 34CrNi1Mo were analyzed. The fatigue nature of fracture was determined. The unsatisfactory quality of the surface of the experimental product was established: shells, pores, scratches, chips were found on the surface. The destruction began in the place of the geometric stress concentrator (surface defect – shell) due to metal

chipping. **Originality.** The features of the destruction of the gear shaft were determined: at the break, there is a significant distance between the fatigue grooves, which indicates a high crack propagation rate, the fatigue grooves are weakly expressed, irregular, which indicates the limited possibilities of steel to plastic deformation. The fractographic surface of the fracture is shiny and consists of cleavage facets, covered with coarse scars, fan-shaped diverge from the focus, has a coarse-grained structure, typical for brittle fracture. The brittle nature of the fracture was confirmed by scanning electron microscopy. The surface microrelief contains cleavage facets, microcracks, and intergranular spall cells. Non-metallic inclusions of MnS, which are additional structural stress concentrators, have been revealed. Microcracks originate near non-metallic inclusions; at the boundaries of former austenite grains, especially at their triple junctions; at the interface between matrix and secondary phases. An increase in microhardness from 2500 to 4750HV after heating to 840–860°C with subsequent cooling in air was established, which can be explained with the probable hardening of the experimental steel, which, along with an increase in hardness, leads to a decrease in steel ductility. **Practical value.** It is recommended to use steel with a low sulfur content, additional gear shaft surface treatment to prevent the formation of stress concentrators in places of surface discontinuities; compliance with the nominal temperature regime also prevents spontaneous hardening of the product material.

**Key words:** gear shaft, steel 34KhN1M, fatigue, fracture, crack, destruction.

**Nosko Olha**, Dean, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Coatings, Composite Materials and Protection of Metals, [olganosko30@gmail.com](mailto:olganosko30@gmail.com), +380 063-689-99-81,

**Pohrebna Nataliia**, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, [nataliapogrebnaa3@gmail.com](mailto:nataliapogrebnaa3@gmail.com) +38067-564-49-34,

**Hrebenieva Anna**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, [zhivotovich.anna@gmail.com](mailto:zhivotovich.anna@gmail.com), +38068-400-50-32,

**Aiupova Tetyana**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, [tanyaayupova@ukr.net](mailto:tanyaayupova@ukr.net), +38 050-101-52-03,

**Aiupov Oлександр**, Student of the Department of Quality Systems, Standardization and Metrology, [tk136@ua.fm](mailto:tk136@ua.fm), phone +38 095-530-33-92.

Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan str., 2, Dnipropetrovsk region, Dnipro, 49010, Ukraine.