

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СІРКОВОДНЕВОГО ОКРИХЧУВАННЯ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ МАРГАНЦЕВОЇ СТАЛІ

Глушкова Д. Б.¹, Волчук В. М.²

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

²Придніпровська державна академія будівництва та архітектури

Анотація. Дослідження присвячене вивченню механічних властивостей марганцевої сталі марки 30Г2, яка широко застосовується для виготовлення муфтових труб у нафтогазовій промисловості. Метою роботи був аналіз впливу агресивного H_2S -середовища на характеристики міцності та пластичності сталі, а також зміни в механізмах руйнування для розроблення рекомендацій щодо підвищення її експлуатаційної надійності. Експериментальні випробування проводилися на зразках сталі 30Г2 у двох станах: вихідному (після термічного оброблення) та після тривалої витримки в H_2S -середовищі (720 годин за методикою МСКР01-85). У вихідному стані сталь має високі механічні характеристики: межа міцності (σ_B) склала 842 МПа, межа плинності (σ_T) – 736 МПа, відносне подовження (δ_5) – 19,6 %, а відносне звуження (ψ) – 65,6 %. Ці показники значно перевищують стандартні значення для сталі 30Г2, що свідчить про ефективність застосованого термозміцнення. Після впливу H_2S -середовища спостерігається незначне зниження характеристик міцності (на 2–3%), що вказує на стійкість сталі до деградації міцності в агресивних умовах. Водночас пластичність зазнала більш помітного зниження: відносне подовження та звуження зменшилися на 10–13 %. Незважаючи на це, значення пластичності залишилися в межах, достатніх для забезпечення надійної експлуатації муфтових труб. Після впливу H_2S -середовища відбувся перехід до більш крихкого типу руйнування, що супроводжувався появою водневих тріщин. Ці зміни пов'язані з проникненням водню до мікроструктури сталі, що спричиняє локальну крихкість і зниження пластичності. Отримані результати підтверджують придатність модифікованої сталі 30Г2 для використання в муфтових трубах нафтогазових трубопроводів, які експлуатуються в агресивних H_2S -середовищах. Водночас такі зміни в пластичності та типі руйнування вказують на необхідність подальшої оптимізації хімічного складу сталі та режимів термічного оброблення. Зокрема пропонується розглянути введення легувальних елементів, що підвищують стійкість до водневої крихкості, а також вдосконалення технологій термооброблення для мінімізації внутрішніх напружень і дефектів мікроструктури. Ці заходи сприятимуть підвищенню довговічності та надійності труб у складних експлуатаційних умовах.

Ключові слова: марганцева сталь 30Г2, механічні властивості, H_2S -середовище, воднева крихкість, фрактографічний аналіз, термічне оброблення, нафтогазові трубопроводи.

Вступ

Процес термічного оброблення сприятливо впливає на властивості металів і сплавів [1–3], що дозволяє збільшити термін їх експлуатації [4, 5]. Структура багатьох металевих матеріалів після термічного оброблення зазнає трансформації [6–8]. Експлуатація сірководневмісних нафтогазових родовищ вимагає застосування насосно-компресорних труб, стійких до сірководневого розтріскування. Нині для цього застосовуються імпорتنі труби, зокрема марок C75-2. Термічне оброблення сталей підвищує експлуатаційні властивості трубопровідних сталей, що експлуатуються в агресивних середовищах із сірководнем (H_2S). Тому особливо актуальними є випробування марганцевистої сталі за методикою МСКР 0 I -85 [9], яка передбачає

тести на стійкість сталей до сірководневого розтріскування) за постійної швидкості деформації в агресивному середовищі з H_2S . Сірководневе середовище викликає водневе окрихчування та корозійне розтріскування під напругою [10], що призводить до утворення тріщин із самоподібною (фрактальною) морфологією [11, 12], для вивчення якої, крім фрактальної теорії, застосовуються різноманітні підходи [13–15].

У нашій роботі наведено дослідження впливу агресивного сірководневого середовища (H_2S) на структуру та властивості марганцевистої сталі 30Г2.

Мета та постановка завдання

Метою роботи є аналіз впливу агресивного H_2S -середовища на характеристики міцно-

сті та пластичності сталі, а також змін у механізмах руйнування для розроблення рекомендацій щодо підвищення її експлуатаційної надійності.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- 1 здійснити термічне оброблення марганцевої сталі та мікроструктурний аналіз до та після впливу сірководневого середовища;
- 2 реалізувати фрактографічний аналіз зламів сталі;
- 3 дослідити вплив сірководневого окрихчування на структуру та властивості марганцевої сталі.

Матеріал і методи дослідження

Кількість марганцю в досліджуваних трубах становить не більше ніж 1.4...1.8 % за масою (табл. 1).

Механічні випробування марганцевистої сталі здійснювалися згідно зі стандартом ISO 6892-1:2019 на 5-кратних поздовжніх зразках діаметром 6 мм (рис. 1).

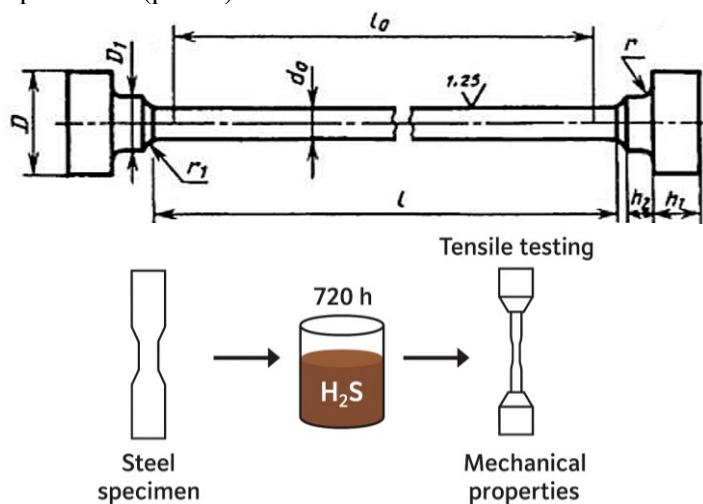


Рис. 1. Геометричні характеристики зразків з марганцевистої сталі для механічних випробувань під час розтягування та опис методики випробувань МСК-01-85

Таблиця 1 – Хімічний склад сталі 30Г2, у % за масою

C	Si	Mn	Ni
0,26–0,35	0,17–0,37	1,4–1,8	до 0,3
S	P	Cr	Cu
до 0,035	до 0,035	до 0,3	до 0,3

Результати аналізу механічних властивостей металу труб у вихідному стані наведені в табл. 2.

З таблиці випливає, що механічні властивості труб з марганцевої сталі відповідають вимогам до труб за стандартом API 5L. Матеріал усіх труб має відносно високі характеристики пластичності

Перед випробуваннями на розтягування зразки витримувалися протягом 720 годин у насиченому сірководневмісному середовищі згідно з методикою МСКР 01-85. Випробування проводилися за швидкості розтягування 1мм/хв.

Геометрична характеристика	Розміри, мм
d_0	6
l_0	30
l	42
D_1	8
D	15
r	1
r_1	3
h_1	6
h_2	4

Таблиця 2 – Механічні властивості матеріалу експериментальних муфтових труб із марганцевистої сталі

Умовний номер труби	Тимчасовий опір σ_B , МПа	Межа плинності σ_C , МПа	Відносне видовження δ_5 %	Відносне звуження ψ , %
1	838	734	20.0	66,7
2	840	730	20.5	65.8
3	835	729	21.0	67.0
4	841	735	19.5	65.0
5	845	738	19.0	65.5
6	846	740	19.0	64.9
7	850	745	18.0	64.0

За значеннями характеристик матеріалу у вихідному стані і після впливу сірководне-вмісного середовища розраховувалася їхня відносна зміна за формулою

$$\Delta i, \% = \frac{a_c - a_u}{a_u} \cdot 100\%,$$

де a_c, a_u – значення оцінюваної характеристики для матеріалу у a_c вихідному a_u стані та після впливу сірководню.

Результати випробувань і розрахунків наведені в табл. 3. З неї випливає, що після впливу сірководню показники пластичності хоч і знижуються, проте залишаються на досить високому рівні для всіх сталей; водночас характеристики міцності знижуються незначною мірою.

Таблиця 3 – Механічні властивості в процесі розтягування матеріалу експериментальних муфтових труб зі сталі 30Г2 після витримки зразків без навантаження в сірководневмісному середовищі за методикою МСКР 01-85

Умовний номер труби	Тимчасовий опір σ_B , МПа	Межа плинності σ_s , МПа	Відносне видовження δ_5 , %	Відносне звуження ψ , %
1	810	705	19.0	61.5
2	815	710	18.5	60.0
3	800	699	20.0	63.0
4	820	715	17.0	58.7
5	826	722	16.5	57.0
6	831	730	15.0	55.8
7	834	735	14.0	54.9

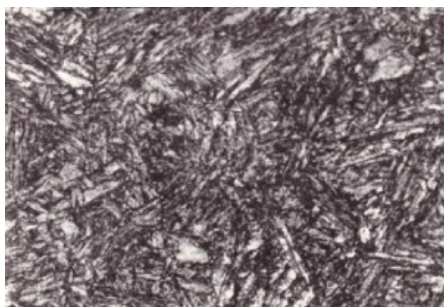


Рис. 2. Мікроструктура матеріалу муфтової труби НКТ у внутрішній стінці, $\times 1000$

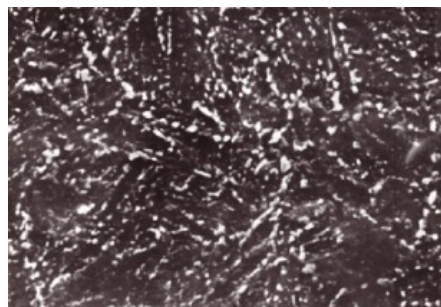


Рис. 3. Мікроструктура матеріалу муфтової труби НКТ біля зовнішньої поверхні, $\times 5000$

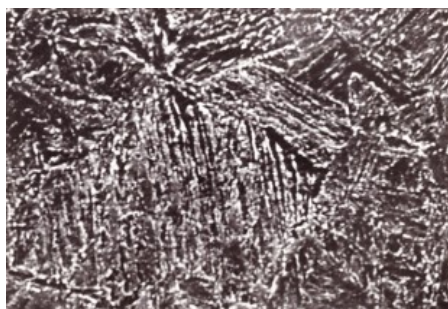


Рис. 4. Мікроструктура матеріалу муфтової труби НКТ посередині товщини стінки, $\times 2500$

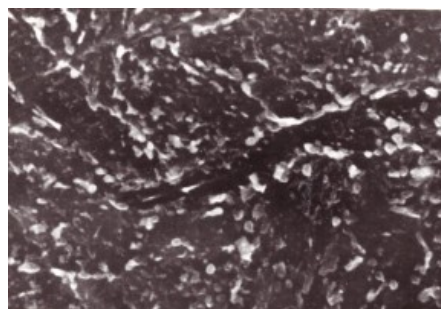


Рис. 5. Макроструктура матеріалу муфтової труби НКТ у внутрішній поверхні, $\times 10000$

Експериментальні результати та їх обговорення

Структура трубної марганцевої сталі наведена на рис. 2–5.

Макроструктура матеріалу досліджувалась за допомогою оптичного та растрового електронного мікроскопів біля зовнішньої та внутрішньої поверхонь та вздовж середини товщини стінки труб (рис 2 та рис. 4).

Структура труби зовнішньої (рис. 4) і внутрішньої (рис. 2, рис. 5) поверхонь є відпущеним мартенситом і відпущеним нижнім бейнітом.

Кількість відпущеного мартенситу біля зовнішньої поверхні становить 80 %. У внутрішньої поверхні на окремих ділянках спостерігається верхній бейніт (до 10 %).

З віддаленням від зовнішньої поверхні до середини стінки збільшується кількість відпущеного бейніту, з'являються ділянки відпущеного верхнього бейніту, а вздовж меж зерен утворюється сітка фериту (рис. 2; рис. 4), виникнення якої пояснюється, мабуть, недостатньою швидкістю охолодження.

Рельєфність феритних областей і значна кількість, зокрема на внутрішній поверхні труби, темних виділень, які, можливо, є карбідами, що недостатньо сформувалися, дозволяє припустити неповний перебіг процесів відпуску.

Механічні властивості труб із марганцевої сталі 30Г2 у вихідному стані демонструють високу міцність і пластичність (табл. 2). Ці значення підтверджують високу пластичність, визначальну для марганцевих сталей типу 30Г2, де марганець (1.4–1.8 %) покращує міцність, в'язкість і зварюваність.

Міцні характеристики зразків 30Г2, що витримувалися 720 годин у насиченому H_2S -середовищі за методикою МСКР 01-85 (табл. 3), знижуються незначною мірою (2–3 %), а пластичність знижується на

10–13 %, але залишається на високому рівні (>14% для подовження). Зниження тимчасового опору $\sigma_{\text{в}}$ і межі плинності $\sigma_{\text{Т}}$ на 2–4 % є мінімальним і не критичним для експлуатації. Це свідчить про гарну стійкість 30Г2 до деградації міцності в H_2S -середовищі, попри її схильність до відпускнуї крихкості. Зниження відносного подовження δ_5 та звуження ψ на 5–22 % свідчить про водневе окрихнення. H_2S викликає дифузію атомарного водню до структури 30Г2, який накопичується на дефектах (включеннях MnS , межах зерен), знижуючи пластичність. Більше зниження пластичності для труб з номерами 6 та 7 (до 22 %) може вказувати на варіації у мікроструктурі або складі (наприклад локальна сегрегація марганцю або включень).

Дослідження поверхонь руйнування зразків проводились для вихідного стану матеріалу й після витримки зразків протягом 720 годин у сірководневмісному середовищі, відповідно до методики МОКР 01-85, без навантаження.

Для матеріалу у вихідному стані злам є в'язко-тендітного типу (рис. 6, стовпець І).

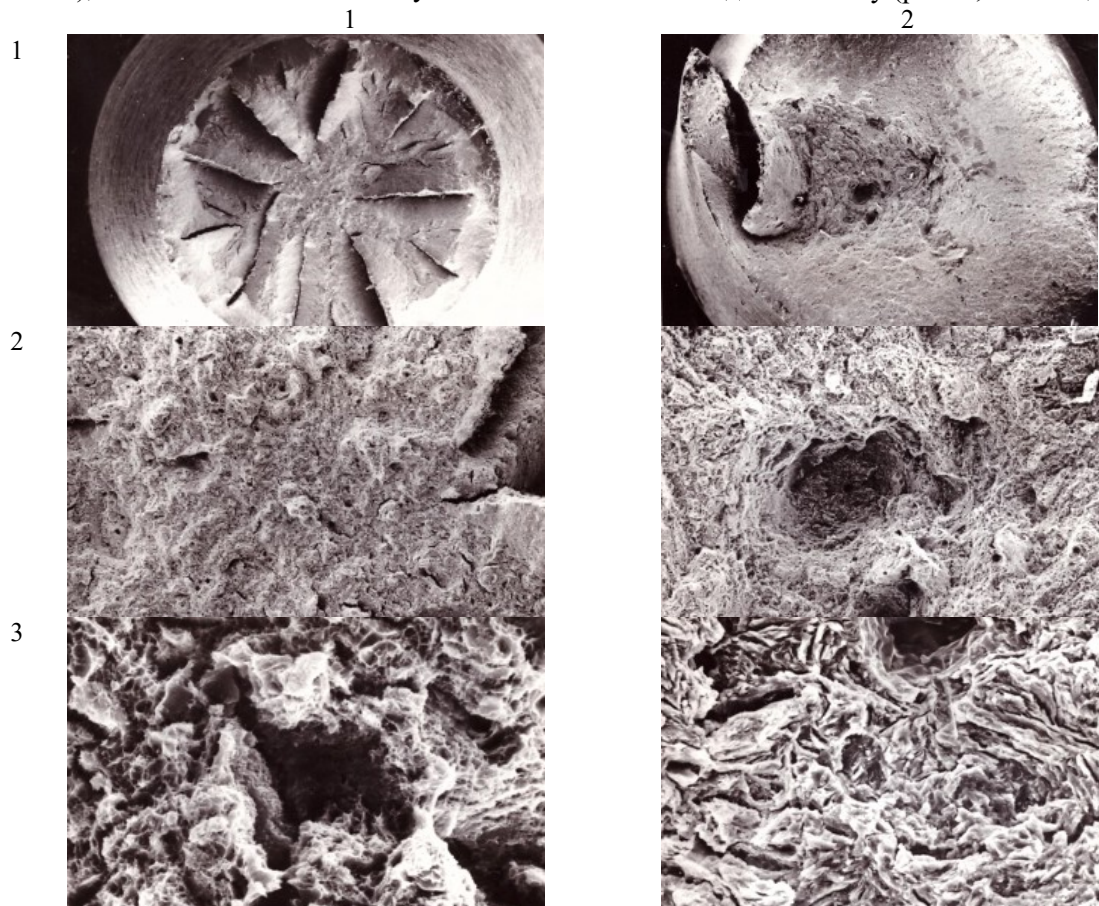


Рис. 6. Поверхні руйнування випробуваних на розтягування зразків матеріалу зі сталі 30Г2 у вихідному стані (рис. 6, стовпець 1) і після витримки без навантаження в сірководневмісному середовищі (рис. 6, стовпець 2) (РЕМ, 1–1,2–1×100, 1–2, 2 1–3–×2500, 2–3–×1000)

У центральній в'язкій зоні наявна значна кількість дрібних тріщин, що виникли на включеннях і, мабуть, вздовж меж зерен. Витримка матеріалу в сірководневому середовищі призвела до появи водневих тріщин і загального окрихнення зламу (рис. 6).

Фрактографічний аналіз виявив перехід від в'язко-крихкого зламу у вихідному стані до більш тендітного після дії H_2S , що доводить накопичення водню в структурі сталі та його вплив на тріщиноутворення.

Злам в'язко-крихкий з центральною в'язкою зоною містить дрібні тріщини на включеннях і межах зерен (рис. 6, стовпець І). Це типово для 30Г2 з феритно-перлітною структурою: марганець стабілізує в'язкість, але сульфідні включення (MnS) та межі зерен є ініціаторами тріщин.

Після дії H_2S з'являються водневі тріщини та загальне окрихчування зламу (рис. 6). H_2S дисоціює, вивільняючи атомарний водень, який проникає в сталь 30Г2, накопичуючись на дефектах і викликаючи міжзерне розтріскування.

Це підтверджує зниження пластичності та збільшення крихкості.

Вплив H_2S погіршує мікроструктуру 30Г2, знижуючи стійкість до тріщиноутворення в агресивних середовищах.

Для підвищення стійкості рекомендується легування Cr/Mo або оптимізоване термооброблення (наприклад відпуск за 600–650 °C для зняття напруги).

Висновки

1. Механічні властивості муфтових труб із марганцевої сталі 30Г2 у вихідному стані визначаються високою міцністю ($\sigma_B \approx 842$ МПа, $\sigma_T \approx 736$ МПа) та гарною пластичністю ($\delta_s \approx 19.6\%$, $\psi \approx 65.6\%$). Ці показники перевищують стандартні значення сталі 30Г2, що свідчить про термозміцнення матеріалу.

2. Після витримки зразків у насиченому сірководневому середовищі протягом 720 годин зниження міцності становить лише 2–3 %, що вказує на стійкість сталі 30Г2 до деградації міцності в умовах H_2S .

3. Найбільші зміни спостерігаються в пластичних властивостях: відносне подовження та звуження знижуються на 10–13 % через водневе окрихчування й утворенням міжзеренних тріщин. Однак навіть після впливу H_2S пластичність залишається задовільною для експлуатації ($\delta_s > 14\%$, $\psi > 54\%$).

4. Фрактографічний аналіз виявив перехід від в'язко-крихкого зламу у вихідному стані

до більш крихкого після впливу H_2S , що підтверджує накопичення водню в структурі сталі та його вплив на тріщиноутворення.

5. Загалом модифікована сталь 30Г2 демонструє задовільну стійкість до сірководневої дії та може розглядатися як перспективний матеріал для нафтогазопровідних труб в агресивних H_2S -середовищах.

Для підвищення довговічності рекомендується подальша оптимізація хімічного складу та режимів термооброблення (наприклад легування Cr/Mo, додатковий відпуск за 600–650 °C).

Література

1. P. Andrenko, A. Rogovyi, I. Hrechka, S. Khovanskyi, M. Svyarenko. Characteristics improvement of labyrinth screw pump using design modification in screw. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. 1741(1) <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012024>
2. Y. Gutarevych, V. Mateichyk, J. Matijošius, A. Rimkus, I. Gritsuk, O. Syrota. Improving Fuel Economy of Spark Ignition Engines Applying the Combined Method of Power Regulation, Y. Shuba. 2020. *Energies*. 13(5). 1076 <https://doi.org/10.3390/en13051076>
3. G. I. Zaginaylov, V. I. Shcherbinin, K. Schuenemann, M. K. Thumme, Influence of background plasma on electromagnetic properties of "Cold" gyrotron cavity, *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2006. 34(3). 512–517 <https://doi.org/10.1109/TPS.2006.875760>
4. V. Maslova, R. Nastase, G. Veryasov, N. Nesterenko, E. Fourré, C. Batiot-Dupeyrat. Current status and challenges of plasma and plasma-catalysis for methane coupling: a review. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2024. 101. 101096 <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2023.101096>
5. K. M. Vafaeva, M. Dhyani, P. Acharya, K. Parik, S. Ledalla. Glass-basalt-plastic materials for construction in temperate and Arctic climatic regions. *Bio Web of Conferences*. 2024. 86. 01111 <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248601111>
6. D. B. Hlushkova, O. D. Hrinchenko, L. L. Kostina, A. P. Cholodov. THE CHOICE OF MATERIAL FOR STRENGTHENING OF LEADING EDGES OF WORKING BLADES OF STEAM TURBINES. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2018. 1(113). 181–188.
7. B. Trembach, I. Trembach, V. Maliuha et al. Study of self-shielded flux-cored wire with exothermic additions CuO-Al on weld bead morphology, microstructure, and mechanical properties. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2025. 137. 4685–4711 <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15414-0>
8. M. Krbata, M. Kohutiar, J. Escherova et al. Continuous Cooling Transformation of Tool Steels X153CrMoV12 and 100MnCrW4: Analysis of Microstructure and Hardness Changes, *Applied*

- Mechanics*. 2025. 6(1). 16. <https://doi.org/10.3390/applmech6010016>
9. N. E. Kalinina, D. B. Glushkova, A. I. Voronkov, V. T. Kalinin. Influence of nanomodification on structure formation of multicomponent nickel alloys. *Functional Materials*. 2019. 26(3). 514–518 <https://doi.org/10.15407/fm26.03.514>
 10. D. B. Hlushkova, A. V. Kalinin, N. E. Kalinina, V. M. Volchuk, V. A. Saenko, A. A. Efimenko. Study of nanomodification of nickel alloy gs3 with titanium carbide. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2023. 144(2). 126 <https://doi.org/10.46813/2023-144-126>
 11. D. Leontiev, O. I. Voronkov, V. Korohodskiy, D. Hlushkova, I. Nikitchenko, E. Teslenko, O. Lykhodii. Mathematical Modelling of Operating Processes in the Pneumatic Engine of the Car, *SAE Technical Paper*. 2020. 2020-01-2222 <https://doi.org/10.4271/2020-01-2222>
 12. A. I. Borovkov, K. M. Vafaeva, N. I. Vatin, I. Ponyaeva. Synergistic Integration of Digital Twins and Neural Networks for Advancing Optimization in the Construction Industry: A Comprehensive Review, *Construction Materials and Products*. 2024. 7(4). 7 <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-4-7>
 13. M. Rajendran, M. Arumugam, L. Sourirajan et. al. Multi-dimensional analysis of the hybrid profiled propeller of a pentacopter UAV: Aerodynamic, aero-acoustic, and structural parametric estimations utilizing synergistic engineering approaches, *Results in Engineering*. 2025. 26. 104614 <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104614>
 14. K. M. Vafaeva, N. I. Vatin, D. F. Karpov, V. Romanovski. Monitoring hybrid glass-basalt plastic pipes: a fractal approach to failure analysis. *Materials Research Express*. 2025. 12. 075307 <https://doi.org/10.1088/2053-1591/adf161>
 15. C. Ding, L. Jiang, J. Xu, S. Guo, J. Zhang, P. Xiong, Z. Piao. Correlation between Spatial Fractal and Temporal Chaos During the Sling Wear Process of AISI 5120 Steel, *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 2025. 35(08). 2550098 <https://doi.org/10.1142/S0218127425500981>
- ### References
1. P. Andrenko, A. Rogovyi, I. Hrechka, S. Khovanskyi, M. Svyrenko (2021). Characteristics improvement of labyrinth screw pump using design modification in screw. *Journal of Physics: Conference Series*, 1741(1) <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012024>
 2. Y. Gutarevych, V. Mateichyk, J. Matijošius, A. Rimkus, I. Gritsuk, O. Syrota. (2020). Improving Fuel Economy of Spark Ignition Engines Applying the Combined Method of Power Regulation, Y. Shuba, *Energies*, 13(5), 1076 <https://doi.org/10.3390/en13051076>
 3. G. I. Zaginaylov, V. I. Shcherbinin, K. Schuenemann, M. K. (2006). Thumme, Influence of background plasma on electromagnetic properties of "Cold" gyrotron cavity, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 34(3), 512–517 <https://doi.org/10.1109/TPS.2006.875760>
 4. V. Maslova, R. Nastase, G. Veryasov, N. Nesterenko, E. Fourré, C. Batiot-Dupeyrat. (2024). Current status and challenges of plasma and plasma-catalysis for methane coupling: a review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 101, 101096 <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2023.101096>
 5. K. M. Vafaeva, M. Dhyani, P. Acharya, K. Parik, S. Ledalla. (2024). Glass-basalt-plastic materials for construction in temperate and Arctic climatic regions, *Bio Web of Conferences*, 86, 01111 <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248601111>
 6. D. B. Hlushkova, O. D. Hrinchenko, L. L. Kostina, A. P. Cholodov. (2018). THE CHOICE OF MATERIAL FOR STRENGTHENING OF LEADING EDGES OF WORKING BLADES OF STEAM TURBINES, *Problems of Atomic Science and Technology*, 1(113), 181–188.
 7. B. Trembach, I. Trembach, V. Maliuha et al. (2025). Study of self-shielded flux-cored wire with exothermic additions CuO-Al on weld bead morphology, microstructure, and mechanical properties, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 137, 4685–4711 <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15414-0>
 8. M. Krbata, M. Kohutiar, J. Escherova et. al. (2025). Continuous Cooling Transformation of Tool Steels X153CrMoV12 and 100MnCrW4: Analysis of Microstructure and Hardness Changes, *Applied Mechanics*, 6(1), 16. <https://doi.org/10.3390/applmech6010016>
 9. N. E. Kalinina, D. B. Glushkova, A. I. Voronkov, V. T. Kalinin. (2019). Influence of nanomodification on structure formation of multicomponent nickel alloys, *Functional Materials*, 26(3), 514–518 <https://doi.org/10.15407/fm26.03.514>
 10. D. B. Hlushkova, A. V. Kalinin, N. E. Kalinina, V. M. Volchuk, V. A. Saenko, A. A. Efimenko. (2023). STUDY OF NANOMODIFICATION OF NICKEL ALLOY GS3 WITH TITANIUM CARBIDE. *Problems of Atomic Science and Technology*, 144(2), 126 <https://doi.org/10.46813/2023-144-126>
 11. D. Leontiev, O. I. Voronkov, V. Korohodskiy, D. Hlushkova, I. Nikitchenko, E. Teslenko, O. Lykhodii. (2020). Mathematical Modelling of Operating Processes in the Pneumatic Engine of the Car, *SAE Technical Paper*, 2020-01-2222 <https://doi.org/10.4271/2020-01-2222>
 12. A. I. Borovkov, K. M. Vafaeva, N. I. Vatin, I. Ponyaeva. (2024). Synergistic Integration of Digital Twins and Neural Networks for Advancing Optimization in the Construction Industry: A Comprehensive Review, *Construction Materials and Products*, 7(4), 7 <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-4-7>
 13. M. Rajendran, M. Arumugam, L. Sourirajan et. al. (2025). Multi-dimensional analysis of the hybrid profiled propeller of a pentacopter UAV: Aerodynamic, aero-acoustic, and structural

- parametric estimations utilizing synergistic engineering approaches. Results in Engineering, 26, 104614
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104614>
14. K. M. Vafaeva, N. I. Vatin, D. F. Karpov, V. Romanovski. (2025). Monitoring hybrid glass-basalt plastic pipes: a fractal approach to failure analysis, *Materials Research Express*. 12, 075307
<https://doi.org/10.1088/2053-1591/adf161>
 15. C. Ding, L. Jiang, J. Xu, S. Guo, J. Zhang, P. Xiong, Z. Piao. (2025). Correlation between Spatial Fractal and Temporal Chaos During the Sling Wear Process of AISI 5120 Steel. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 35(08), 2550098

Глушкова Діана Борисівна¹, д.т.н., проф., зав. каф. технології металів та матеріалознавства, diana@khadi.kharkov.ua, тел. +38 (057)707-37-29,

Волчук Володимир Миколайович², д.т.н., проф., зав. каф. матеріалознавства та обробки матеріалів, тел. +38 097-334-75-88, volchuk.volodymyr@gmail.com,

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, 61002, 61002, м. Харків, Україна,

²Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Арх. О.Петрова, 24-а, 49600, м. Дніпро, Україна.

Investigation of the Impact of Hydrogen Sulfide Embrittlement on the Microstructure and Properties of Manganese Steel

Annotation. Statement of the problem. Heat treatment significantly enhances the properties of metals and alloys, thereby extending their service life. The microstructure of many metallic materials undergoes transformation following heat treatment. The operation of oil and gas fields containing hydrogen sulfide (H_2S) necessitates the use of tubing and casing pipes resistant to sulfide stress cracking. Currently, imported pipes, such as those of grade C75-2, are employed for this purpose. Heat treatment of steels improves the operational properties of pipeline steels used in aggressive H_2S -containing environments. Consequently, testing manganese steel under the MCKP 01-85 methodology, which involves assessing resistance to sulfide stress cracking through constant strain rate testing in an H_2S -containing aggressive environment, is particularly relevant. The H_2S environment induces hydrogen embrittlement and stress corrosion cracking, leading to the formation of cracks with self-similar (fractal) morphology. To study this morphology, various approaches are employed alongside fractal theory. This study focuses on investigating the effects of an aggressive hydrogen sulfide (H_2S) environment on the microstructure and properties of manganese steel 30G2. **Purpose and setting of the task.** The aim of this study is to evaluate the impact of an aggressive H_2S environment on the strength and ductility characteristics of manganese steel, as well as to analyze

changes in the fracture mechanisms to develop recommendations for enhancing its operational reliability. To achieve this objective, the following tasks must be accomplished: 1 conduct heat treatment of manganese steel and perform microstructural analysis before and after exposure to the H_2S environment; 2 perform fractographic analysis of the fracture surfaces of the steel; 3 investigate the effect of hydrogen embrittlement induced by the H_2S environment on the microstructure and properties of manganese steel. **Materials and Research Methods.** Experimental tests were conducted on samples of 30G2 manganese steel in two states: the initial state (after heat treatment) and after prolonged exposure to an H_2S environment (720 hours, according to the MCKP 01-85 methodology). In the initial state, the steel exhibited high mechanical properties: ultimate tensile strength (σ_B) of 842 MPa, yield strength (σ_T) of 736 MPa, relative elongation (δ_5) of 19.6 %, and relative reduction in area (ψ) of 65.6 %. These values significantly exceed the standard specifications for 30G2 steel, indicating the effectiveness of the applied heat treatment. **Research material and methods.** Following exposure to the H_2S environment, a slight reduction in strength characteristics (by 2–3 %) was observed, indicating the steel's resistance to strength degradation under aggressive conditions. However, ductility experienced a more significant decline, with relative elongation and reduction in area decreasing by 10–13%. Despite this, the ductility values remained within acceptable limits to ensure reliable operation of coupling pipes. After exposure to the H_2S environment, a transition to a more brittle fracture behavior was noted, accompanied by the formation of hydrogen-induced cracks. These changes are attributed to hydrogen penetration into the steel's microstructure, which causes localized embrittlement and reduced ductility.

The obtained results confirm the suitability of the modified 30G2 steel for use in coupling pipes for oil and gas pipelines operating in aggressive H_2S environments. However, the observed changes in ductility and fracture behavior highlight the need for further optimization of the steel's chemical composition and heat treatment regimes. Specifically, it is recommended to consider the addition of alloying elements to enhance resistance to hydrogen embrittlement and to improve heat treatment technologies to minimize internal stresses and microstructural defects. These measures will contribute to enhancing the durability and reliability of pipes under challenging operational conditions. **Conclusions.** 1 The mechanical properties of coupling pipes made from 30G2 manganese steel in the initial state are characterized by high strength ($\sigma_B \approx 842$ MPa, $\sigma_T \approx 736$ MPa) and good ductility ($\delta_5 \approx 19.6\%$, $\psi \approx 65.6\%$). These values exceed the standard specifications for 30G2 steel, indicating effective heat strengthening of the material. 2 After exposure of the samples to a hydrogen sulfide (H_2S)-saturated environment for 720 hours, the reduction in strength is minimal, at only 2–3 %, demonstrating the resistance of 30G2 steel to strength

degradation under H_2S conditions. 3 The most significant changes are observed in the ductility properties: relative elongation and reduction in area decrease by 10–13 %, which is associated with hydrogen embrittlement and the formation of intergranular cracks. However, even after H_2S exposure, the ductility remains satisfactory for operational purposes ($\delta_s > 14$ %, $\psi > 54$ %). 4 Fractographic analysis revealed a transition from ductile-brittle fracture in the initial state to a more brittle fracture after H_2S exposure, confirming the accumulation of hydrogen in the steel's microstructure and its influence on crack formation. 5 Overall, the modified 30G2 steel exhibits satisfactory resistance to H_2S -induced effects and can be considered a promising material for oil and gas pipelines operating in aggressive H_2S environments. To enhance durability, further optimization of the chemical composition and heat treatment regimes is recommended (e.g., alloying with Cr/Mo, additional tempering at 600–650 °C).

Key words: manganese steel 30G2, mechanical properties, H_2S environment, hydrogen embrittlement, fractographic analysis, heat treatment, oil and gas pipelines.

Hlushkova Diana¹, Doct. Sc. (Tech.), Head of the Department of Technology of Metals and Materials Science, ORCID: 0000-0001-8612-6584, e-mail: diana@khadi.kharkov.ua,

Volchuk Volodymyr², Doct. Sc. (Tech.), Head of the Department of Materials Science and Materials Processing, ORCID: 0000-0001-7199-192X, e-mail: volchuk.volodymyr@gmail.com,

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25 Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

²Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-A O. Petrova str., Dnipro 49600, Ukraine.