

© О.М. Ракаєв<sup>1</sup>, К.А. Зіборов<sup>2</sup>, І.Ю. Соловійов<sup>2</sup>, В.В. Філатов<sup>2</sup>, Д.І. Мамчур<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна

<sup>2</sup>Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## АНАЛІЗ КІНЕТИКИ РУЙНУВАННЯ ЗРАЗКІВ СТАЛІ 10Г2ФБ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД СТРУКТУРНОГО СТАНУ

© O. Rakaev<sup>1</sup>, K. Ziborov<sup>2</sup>, I. Soloviov<sup>2</sup>, V. Filatov<sup>2</sup>, D. Mamchur<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine

<sup>2</sup>Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

## ANALYSIS OF FRACTURE KINETICS OF 10G2FB STEEL SAMPLES DEPENDING ON THE STRUCTURAL STATE

**Мета.** Дослідження основних закономірностей кінетики руйнування сталі типу 10Г2ФБ у різних морфологічних типах бейнітної структури.

**Методика.** Для досягнення мети у роботі використані сучасні методи дослідження структури та властивостей металу, а саме: оптична мікроскопія, растрова електронна мікроскопія, макро- і мікрофрактографічний аналіз поверхонь руйнувань та визначення механічних властивостей.

**Результати.** Показано і досліджено механізми руйнування сталі 10Г2ФБ з різними морфологічними типами бейнітної структури. Показано і описано саму кінетику руйнування зразків сталі з різними морфологічними типами бейнітної структури. Показано, що, з точки зору кінетики руйнування, сталь 10Г2ФБ дуже добре підходить для використання її при виготовленні металевих конструкцій відповідального призначення.

**Наукова новизна.** Набули подальшого розвитку теоретичні положення кінетики руйнування низьковуглецевих сталей в залежності від морфології та просторової орієнтації бейнітної складової структури. Вперше для обраних марок сталей показано позитивний вплив формування структур проміжного типу на запобігання крихкого руйнування при використанні в конструкціях відповідального призначення. Прискорене охолодження від температур аустенітизації до 650°C реалізує в'язкий механізм руйнування за рахунок злиття мікропорожнин, таким чином, переважною є пластична деформація наряду з цим присутні елементи квазісколу. При температурі 600°C наряду з ферито-перлітною структурою присутній колонії верхнього бейніту. Поява колоній пояснюється тим, що тріщина розповсюджувалась по бейнітному фериту. Це дозволяє припустити, даний тип колоній мав положення паралельне фронту розповсюдження тріщини.

**Практична значимість.** Заміна частини елементів каркасу на високоміцну низьковуглецеву мікролеговану ванадієм та ніобієм сталь 10Г2ФБ призведе до зменшення витрат на метал у порівнянні з варіантом, де елементи каркасу виготовлені зі тривіальної сталі 09Г2С, крім того, очікується зниження маси каркасу, що безсумнівно приведе до вагомих матеріальних вигод.

**Ключові слова:** *низьколеговані сталі, бейніт, ферит, навантаження, деформація, поверхні руйнування, растрова мікроскопія, фрактографія.*

**Вступ.** Діюча у будівництві нормативна документація, розроблена у 80–90х роках минулого століття, має на увазі використання у будівництві сталей рівня

міцності С235...С590К. В останні десятиліття все більш широке застосування при виготовленні будівельних металевих конструкцій знаходять маловуглецеві низьколеговані сталі підвищеної та високої міцності, класів С345...С590. [1, 2]

У той же час, розроблені для потреб нафтогазовидобувної галузі сталі із границею плинності більш ніж 550МПа, вироблені за технологією контрольованої прокатки, що, у теперішній час, використовуються при виробництві труб і сполучних деталей для магістральних нафтогазопроводів не знаходять широкого застосування в будівництві. Випуск сталей даного класу визначено вітчизняними металургійними комбінатами, тому перспективно для вітчизняних виробників сталей даного класу використання їх при виробництві металевих конструкцій для промислового і цивільного будівництва. [3]

Разом з цим, металеві будівельні конструкції експлуатуються в умовах багатоциклічних навантажень, які значною мірою впливають на ресурс їхньої працездатності.

В залежності від умов експлуатації готової конструкції металопрокат може поставлятися згідно діючої нормативної документації у різноманітному структурному стані (відпущений мартенсит, ферито-перлітна структура, ферито-бейнітна або ферито-мартенситна структура) [4]. При цьому, однією з найбільш цікавих структурних складових є бейніт, тому що сталі з бейнітною структурою володіють високою міцністю при задовільній пластичності. У зв'язку з цим, дослідження кінетики руйнування структур бейнітного типу є актуальним з точки зору використання металопрокату у такому структурному стані при виробництві будівельних металоконструкцій.

**Основна частина.** В проміжному інтервалі температур розпаду аустеніту утворюється ряд структур, котрі відрізняються одна від одної по своїм морфологічним ознакам. Японськими вченими Охтані та Окагучі, розроблена класифікація бейнітних структур. За їхньою класифікацією, враховуючи можливі варіанти розміщення карбідів, можна виділити три морфологічно відмінні форми верхнього бейніту [5].

Паралельно з класифікацією, запропонованою японськими вченими, Брамфіттом та Спіром була розроблена класифікаційна система продуктів проміжного перетворення аустеніту. Автори класифікаційної системи фактично замінюють поняття бейнітного ферита на голчастий. [6]

Для одержання в досліджуваному металі заданого структурного стану (утворення голчастого фериту та бейніту різної морфології) здійснювали термічну обробку з окремого нагріву за наступною методикою.

Зразки сталі 10Г2ФБ нагрівалися до температури аустенітизації (980°C), витримувалися у  $\gamma$ -області, далі відбувалось прискорене охолодження до температур в нижній частині ферито-перлітного та бейнітного перетворень (при 650°C, 600°C, 550°C та 500°C) та у верхній частині температурного інтервалу бейнітно-мартенситного перетворення (при 450°C и 400°C) з витримкою 20 хвилин [7, 8].

Результати досліджень впливу режиму ізотермічної обробки на комплекс механічних властивостей сталі 10Г2ФБ представлені у табл.

Залежність комплексу механічних властивостей сталі 10Г2ФБ від параметрів обробки при витримці 20 хвилин

Границя плинності ( $\sigma_T$ ), МПа	Границя міцності ( $\sigma_B$ ), МПа	Відносне подовження ( $\delta$ ), %	Відносне звуження ( $\psi$ ), %
Температура 650°C			
500	640	25	61
Температура 600°C			
515	650	25	62
Температура 550°C			
570	677	20	68
Температура 500°C			
650	713	19	65
Температура 450°C			
660	715	17	73
Температура 400°C			
657	710	17	60

Аналіз кінетики руйнування зразків сталі 10Г2ФБ в залежності від структурного стану. Загальний механізм руйнування при температурі 650°C являється в'язким, тобто руйнування відбулося за рахунок злиття мікропорожнин (рис. 1). При цьому, переважним є пластична деформація. Так, у процесі пластичної деформації неоднакова пружність і пластичність матриці часток другої фази приводить до утворення на границях розподілу між ними мікротріщин або вільних поверхонь. Подібний процес і називають злиттям порожнин. Поверхні зламу, що утворилися при злитті порожнин, являють собою округлі раковини. Усяка така раковина або порожнеча сама по собі є поверхнею зламу, спочатку повністю ізолюваної від інших порожнин. Із прискоренням пластичної течії ці порожнечі продовжують розширюватися. Якщо порожнина перебуває по сусідству з іншою вільною поверхнею, то вона росте доти, поки матеріал між двома вільними поверхнями не утворює тонку перегорудку, яка потім розривається.

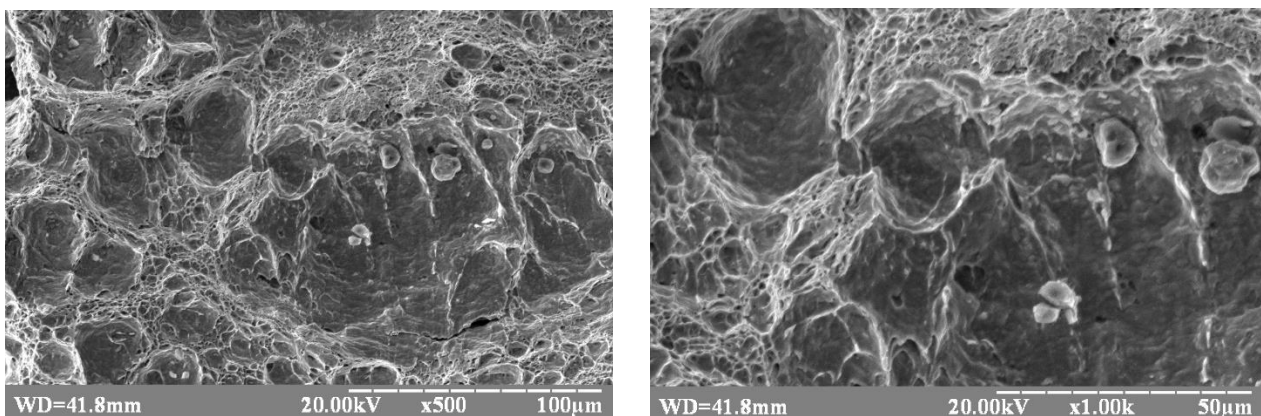


Рис. 1. Мікроструктура зламів сталі 10Г2ФБ після ізотермічної обробки при температурі 650°C та витримки на протязі 20 хвилин

При цьому, необхідно відзначити, що в зразку присутні елементи крихкого руйнування – квазісколу (рис. 2). У структурі металу при даній температурі обробки присутні ферит та перліт. Спільний аналіз металографічних досліджень та фрактографії дозволяє припустити, якщо руйнування феритних зерен відбувається по в'язкому механізму, то в перлітних колоніях тріщина, вірогідно за все, розповсюджується по площинам скола, пересікаючи карбідні пластинки. Цей факт можна пояснити тим, що, вірогідно за все, ферит в колоніях перліту, котрий утворився всередині аустенітного зерна, має однакову орієнтацію. Отже, ознаки крихкого руйнування мають перлітні колонії, тому що цементитна фаза в перліті є дисперсною й зміцнюючою.

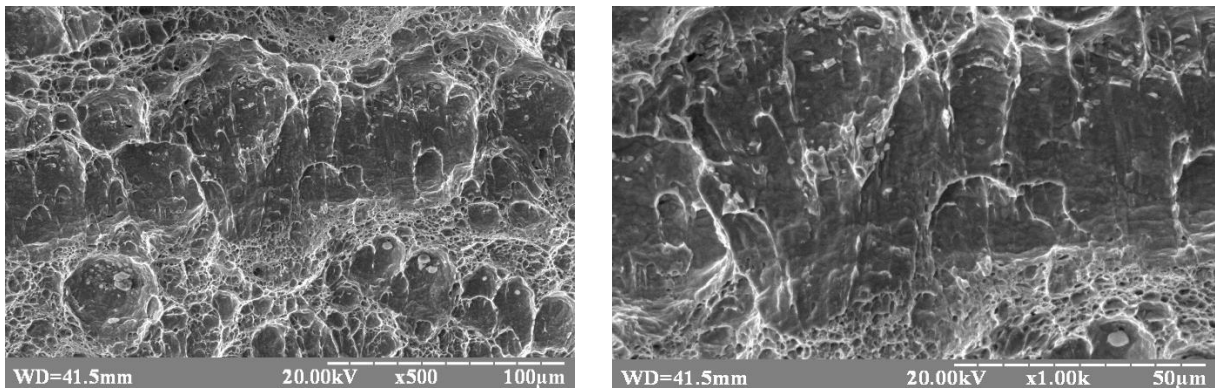


Рис. 2. Мікроструктура зламів сталі 10Г2ФБ після ізотермічної обробки при температурі 650°C та витримки на протязі 20 хвилин

Квазівідрив на початковій стадії утворення фасетки виявляє ознаки переважно кристалічного відриву, тоді як у місцях злиття мікротріщин виявляються ознаки пластичного руйнування. Відносні частки цих двох видів зламу залежать від складу (наприклад, від вмісту вуглецю), термічної обробки й умов випробувань (наприклад, від температури).

В структурі металу при температурі обробки 600°C наряду з ферито-перлітною структурою присутній верхній бейніт (рис. 3, 4), що накладає свій відбиток на кінетику розповсюдження тріщини у металі з даним структурним станом. При цьому, необхідно відмітити, що мікрофрактографічний аналіз поверхонь зламу, приведених на рис. 3 та на рис. 4, дозволяє припустити, що руйнування колоній верхнього бейніту відбувається по механізму, аналогічному механізму руйнування перлітних колоній, хоча спостерігаються колонії, в котрих розповсюдження відбувається нібито у одному зерні (рис. 3).

Появу таких колоній можна пояснити тим, що тріщина розповсюджувалась по бейнітному фериту та не зустрічала бар'єрів для свого руху у вигляді виділень частинок другої фази та/або залишкового аустеніту в міжреєчних проміжках. Це дозволяє припустити, даний тип колоній мав положення, паралельне фронту розповсюдження тріщини.

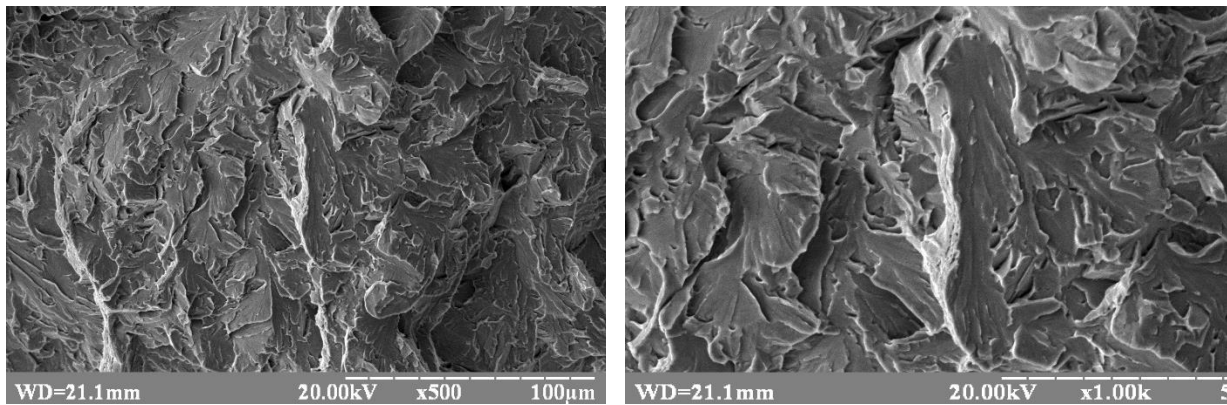


Рис. 3. Мікроструктура зламів сталі 10Г2ФБ після ізотермічної обробки при температурі 600°C та витримки на протязі 20 хвилин

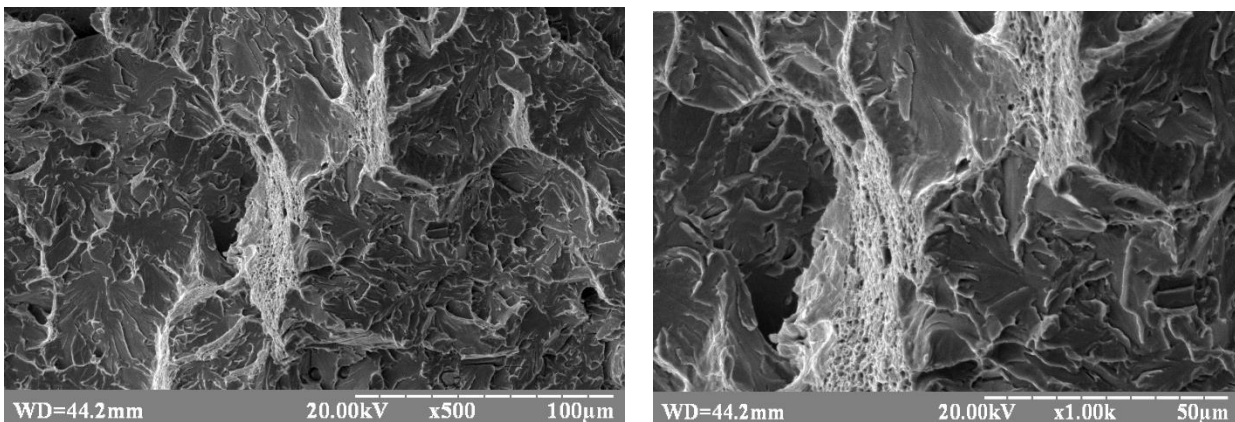


Рис. 4. Мікроструктура зламів сталі 10Г2ФБ після ізотермічної обробки при температурі 600°C та витримки на протязі 20 хвилин

Також присутні елементи квазівідриву, котрий протікає східчастим шляхом. При цьому сходи між паралельними площинами утворюються при відриві по системі вторинних площин або шляхом вторинного зрушення, як наслідок вони зливаються та утворюють "струмковий візерунок".

#### **Висновок.**

Металографічні дослідження показали, що розподіл структурних складових сталі 10Г2ФБ, в залежності від режиму ізотермічної обробки, зовсім різний. При температурі обробки 650°C та витримці 20 хвилин в структурі сталі присутні 80% феритної та 20% перлітної складових. Зниження температури витримки до 600°C призводить до появи верхнього бейніту, який складає 14%, при цьому ферит складає 48%, перліт 38%. При температурі витримки 550°C присутні два морфологічні типи бейніту – верхній (65%) та нижній (15%), та голчатий ферит 20%. При температурі витримки 500°C кількість голчатого фериту збільшується до 70%. Зниження температури витримки до 450°C призводить до появи мартенситу та зростання нижнього бейніту до 65%. При температурі витримки 400°C в структурі сталі присутні дві складові – 15% нижнього бейніту та 85% мартенситу.

Проведений аналіз отриманих результатів механічних властивостей сталі типу 10Г2ФБ, в залежності від параметрів обробки, показав, що зі зменшенням

температури витримки границя плинності ( $\sigma_T$ ) збільшується і досягає свого максимального значення 660 МПа при температурі витримки 450°C, при цьому мінімальне її значення спостерігається при температурі витримки 650°C та складає 500 МПа. Але зі зниженням температури витримки зменшуються значення відносного подовження ( $\delta_5$ ), мінімальне значення якого складає 17% при температурі витримки 400°C, при цьому максимальне значення 25% спостерігається при температурі 650°C.

Аналіз кінетики руйнування зразків сталі 10Г2ФБ, в залежності від структурного стану, показав, що при температурі 650°C загальний механізм руйнування є в'язким, тобто руйнування відбулося за рахунок злиття мікропорожнин. При цьому, переважною є пластична деформація. Необхідно відзначити, що в зразку присутні елементи крихкого руйнування – квазісколу.

В структурі металу при температурі обробки 600°C наряду з ферито-перлітною структурою присутній верхній бейніт. Появу таких колоній можна пояснити тим, що тріщина розповсюджувалась по бейнітному фериту та не зустрічала бар'єрів для свого руху. Це дозволяє припустити, даний тип колоній мав положення, паралельне фронту розповсюдження тріщини.

#### Перелік посилань

1. Liu, F., Yu, X., Huang, C., He, L., Chen, Y., & Bu, W. (2015). Microstructure and mechanical properties of AerMet 100 ultra-high strength steel joints by laser welding. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 30(4), 827–830
2. Keehan, E., Zachrisson, J., & Karlsson, L. (2010). Influence of cooling rate on microstructure and properties of high strength steel weld metal. *Science and Technology of Welding and Joining*, 15, 233–238. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1179/136217110X12665048207692?icid=int.sj-abstract.citing-articles.5>
3. Svensson, L.-E. (2007). Microstructure and Properties of High Strength Weld Metals. *Materials Science Forum*, 539–543, 3937–3942. <https://www.semanticscholar.org/paper/eb6b76c01ec0d8067a7e429ed77c1d92592e0498>
4. Markashova, L. I., Poznyakov, V. D., Shelyagin, V. D., Berdnikova, E. N., Bernatsky, A. V., & Alekseenko, T. A. (2018). Effect of metal structure on service properties of high-strength steel welded joints produced using different methods of welding. *Automatic Welding*, 2018(2), 11–18. <https://doi.org/10.15407/as2018.02.02>
5. Ohtani, H., Okaguchi, S., Fujishiro, Y., & Ohmori, Y. (1990). Morphology and properties of low-carbon bainite. *Metallurgical Transactions A*, 21(3), 877–888. <https://doi.org/10.1007/bf02656571>
6. Bramfitt, B. L., & Speer, J. G. (1990). A perspective on the morphology of bainite. *Metallurgical Transactions A*, 21(3), 817–829. <https://doi.org/10.1007/bf02656565>
7. Feng, X., Wang, B., Gu, N., & Ma, X. (2005). Effect of moderate temperature deformation on microstructure of link chain steel 23MnNiCrMo54. *Journal of iron and steel research*, 3, 42–46. [http://caod.oriprobe.com/articles/8919493/Effect\\_of\\_Moderate\\_Temperature\\_Deformation\\_on\\_Microstructure](http://caod.oriprobe.com/articles/8919493/Effect_of_Moderate_Temperature_Deformation_on_Microstructure)
8. Laukhin, D., Ziborov, K., Fedoryachenko, S., & Rott, N. (2024). Influence of Temperature-Strain Parameters of Shelters Reinforcing Materials on Increasing Properties in the Z-Direction. *Materials Science Forum*, 1126, 111–118. <https://doi.org/10.4028/p-j10tbi>

#### ABSTRACT

**Purpose.** Study of the main laws of fracture kinetics of steel type 10G2FB in different morphological types of bainite structure.

**Methodology.** To achieve the goal, modern methods of studying the structure and properties of the metal were used in the work, namely: optical microscopy, scanning electron microscopy, macro- and microfractographic analysis of fracture surfaces and determination of mechanical properties.

**Results.** The fracture mechanisms of steel 10G2FB with different morphological types of bainite structure were shown and investigated. The fracture kinetics of steel samples with different morphological types of bainite structure were shown and described. It was shown that, from the point of view of fracture kinetics, steel 10G2FB is very well suited for use in the manufacture of metal structures for critical purposes.

**The originality.** Further development of the theoretical position of the kinetics of the collapse of low-carbon steels in storage due to the morphology and spatial orientation of the bainitic warehouse structure has begun. First, for certain grades of steel, a positive infusion of molding of intermediate-type structures is shown to prevent critical collapse during vicorization in structures of a similar type. Accelerated cooling at austenitization temperatures up to 650°C implements a viscous mechanism for the flow of micro-sills, so plastic deformation is important along with these present elements quasi-cleavage. At a temperature of 600°C, along with the ferrite-pearlite structure, a colony of upper bainite was present. The appearance of colonies is explained by the fact that the crack spread throughout the bainitic ferrite. This allows us to assume that this type of colony is positioned parallel to the front of the widening crack.

**Practical significance.** Replacing some of the frame elements with high-quality low-carbon micro-alloyed vanadium and non-alloy steel 10G2FB will lead to a change in waste to metal from the same option as the frame elements were produced. With standard steel 09G2S, in addition, there will be a reduction in the weight of the frame, which will undoubtedly lead to many material benefits.

**Keywords:** *low-alloy steels, bainite, ferrite, loading, deformation, fracture surfaces, raster microscopy, fractography.*