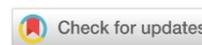


# ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY



УДК 669.1:66.04

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-242-249>

## Влияние магнитного поля на особенности поведения трещин в стали после термической обработки на высокопрочное состояние

В.Н. Пустовойт , Ю.В. Долгачев  

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

 [ydolgachev@donstu.ru](mailto:ydolgachev@donstu.ru)

EDN: OIJC0

### Аннотация

**Введение.** Усталостное разрушение происходит при напряжениях ниже предела прочности, характеризуясь внезапностью и катастрофическими последствиями. Статистические данные свидетельствуют о том, что разрушение при циклическом нагружении является одним из наиболее распространённых видов повреждений материалов, а их работоспособность во многом определяется сопротивлением росту трещин. Кроме уже известных методов достижения высокопрочного состояния, предлагается использовать термическую обработку в магнитном поле (ТОМП). Тем не менее, механизмы изменения поведения трещин после такой обработки и факторы, влияющие на трещиностойкость, всё ещё недостаточно изучены. В связи с этим поставлена цель оценить влияние структуры после ТОМП на кинетические особенности роста усталостных трещин и эффективность образуемых в процессе ТОМП структурных барьеров, препятствующих разрушению стали.

**Материалы и методы.** Кинетику развития усталостной трещины исследовали при циклических испытаниях призматических образцов на оригинальной установке со специальным стабилизатором амплитуды колебаний. Возникновение и последующее развитие трещины регистрировали методом электропотенциалов. Исследования проводили на сталях, термически обработанных на высокопрочное состояние: сталь 18Х2Н4ВА после закалки на воздухе со структурой мартенсита и сталь 30ХГСА после изотермической закалки при 380 °С на структуру нижнего бейнита. Магнитное поле напряженностью 1,6 МА/м получали в магнитном зазоре электромагнита ФЛ–1.

**Результаты исследования.** Установлено, что термическая обработка сталей 30ХГСА и 18Х2Н4ВА в магнитном поле напряженностью 1,6 МА/м приводит к заметному снижению скорости распространения усталостных трещин. Отмечено повышение пороговых значений напряжений для расслоения магистральной трещины по отрывному механизму, что свидетельствует о повышении долговечности. При анализе траекторий трещин был выявлен рост показателей их ветвления — увеличение стандартного отклонения углов наклона трещин, а также уменьшение интервала корреляции наклона изгибов трещины относительно среднего положения на 0,5 мкм. Эти изменения обусловлены влиянием магнитного поля на микроструктуру мартенсита, формированием большего числа эффективных барьеров на пути движения трещин, что в итоге сказывается на устойчивости к усталостному разрушению сталей и их механических свойствах.

**Обсуждение.** Анализ полученных результатов на основе современных теорий прочности и разрушения показал, что механизм вязкого разрушения, который характерен для исследуемых сталей, работает путём зарождения, роста и коалесценции пор. Под действием нормальных напряжений на поверхности микропор оседают вакансии и в результате этого пора постепенно трансформируется в трещину. Наблюдения за трещинами в фольгах показали, что изменение траектории трещины не зависит от вида термической обработки и является случайным процессом.

**Заключение.** Статистическая обработка опытных данных, полученных в этой работе, позволяет сделать вывод, что после ТОМП формируется структура, обеспечивающая увеличение микроизвилистости трещины с повышенной крутизной изгибов траектории из-за часто встречающихся структурных барьеров. Выявленные особенности поведения трещин положительно характеризуют ТОМП как практический способ создания высокопрочного состояния сталей, применимый для широкого ассортимента марок и не требующий кардинальных изменений в технологии их термической обработки. Повышение трещиностойкости сталей способствует улучшению безопасности различных устройств и техногенных систем, а также снижению их себестоимости и затрат на обслуживание.

**Ключевые слова:** сталь, высокопрочное состояние, магнитное поле, усталостное разрушение, трещины

**Благодарности.** Авторы благодарят редакцию журнала за ценные замечания и сотрудников кафедры «Материаловедение и технологии металлов» за помощь в получении и обсуждении результатов.

**Для цитирования.** Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В. Влияние магнитного поля на особенности поведения трещин в стали после термической обработки на высокопрочное состояние. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2025;9(3):242–249. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-242-249>

*Original Empirical Research*

## Influence of the Magnetic Field on the Behavior of Cracks in Steel after Heat Treatment to a High-Strength State

Viktor N. Pustovoyt , Yuri V. Dolgachev  

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

 [ydolgachev@donstu.ru](mailto:ydolgachev@donstu.ru)

### Abstract

**Introduction.** Fatigue failure develops at stresses below the ultimate strength and is characterized by its suddenness and catastrophic consequences. Statistical data indicate that failure under cyclic loading is one of the common types of damage to materials and their performance is largely determined by their resistance to crack growth. In addition to well-known methods for achieving high-strength states, it has been proposed to use heat treatment in the magnetic field (HTMF). However, the mechanisms of crack behavior changes after such treatment and factors affecting crack resistance remain poorly understood. In this regard, this study aims to assess the effect of the structure after HTMF on the kinetic features of fatigue crack growth and the effectiveness of structural barriers formed during HTMF, preventing the destruction of steel.

**Materials and Methods.** The kinetics of fatigue crack development was studied during cyclic testing of prismatic samples using an original setup with a special stabilizer of oscillation amplitude. The occurrence and subsequent development of a crack was recorded by the method of electric potentials. The studies were conducted on steels that had been heat-treated to achieve a high-strength state: 18Kh2N4VA steel after quenching in air with a martensite structure and 30KhGSA steel after isothermal quenching at 380°C to a lower bainite structure. A magnetic field of 1.6 MA/m was obtained in the magnetic gap of the FL-1 electromagnet.

**Results.** It was found that heat treatment of 30KhGSA and 18Kh2N4VA steels in a magnetic field of 1.6 MA/m led to a noticeable decrease in the rate of fatigue crack propagation. An increase in the threshold stress values for the delamination of the main crack by the tear-off mechanism was noted, which indicated an increase in durability. When analyzing the crack trajectories, an increase in their branching indicators was revealed: an increase in the standard deviation of crack inclination angles, as well as a decrease in the correlation interval of the crack bend inclination relative to the average position by 0.5 μm. These changes were due to the effect of the magnetic field on the microstructure of martensite, the formation of a greater number of effective barriers on the path of crack movement, which ultimately affected the resistance to fatigue failure of steels and their mechanical properties.

**Discussion.** Analysis of the obtained results, based on modern theories of strength and fracture, revealed that the mechanism of viscous destruction, which was typical for the steels under study, worked by the origin, growth and coalescence of pores. Under the influence of normal stresses, vacancies settled on the surface of micropores and as a result, the pore gradually transformed into a crack. Observations of cracks in foils showed that the change in the crack trajectory did not depend on the type of heat treatment and was a random process.

**Conclusion.** The statistical data obtained in this study allow us to conclude that after HTMF, a structure is formed that leads to an increase in the micro-tortuosity of cracks, with a steeper trajectory of bends due to frequent structural barriers. These features of crack behavior suggest that HTMF is a practical method for achieving a high-strength state in steels, which can be applied to a wide range of steel grades without requiring significant changes to their heat treatment processes. By increasing the crack resistance of steels, we can improve the safety of various devices and man-made systems, as well as reduce their costs and maintenance requirements.

**Keywords:** steel, high-strength condition, magnetic field, fatigue failure, cracks

**Acknowledgments.** The authors would like to thank the editorial board of the journal for their insightful comments and to the staff of the Department of Materials Science and Technology of Metals for their assistance in obtaining and reviewing the results.

**For citation.** Pustovoyt VN, Dolgachev YuV. Influence of the Magnetic Field on the Behavior of Cracks in Steel after Heat Treatment to a High-Strength State. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(3):242–249. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-242-249>

**Введение.** Разрушение при циклическом нагружении является одним из распространённых видов повреждений материалов, а работоспособность этих материалов во многом определяется их сопротивлением росту трещин. Проблема заключается в том, что циклические нагрузки могут привести к усталостному разрушению при напряжениях, которые ниже предела прочности. Хотя рост усталостной трещины происходит постепенно, само разрушение может произойти внезапно, что приводит к катастрофическим последствиям. Существует обширная статистика [1] случаев железнодорожных и авиакатастроф, обрушений мостов и техногенных аварий, обусловленных развитием подобных дефектов. По данным ASM International [2], в машиностроении до 90 % отказов механизмов связано с усталостью, а в нефтегазовой отрасли усталостные трещины в трубопроводах и буровых установках ежегодно приводят к миллиардным убыткам. В связи с этим внедряются методы неразрушающего контроля дефектов, затраты на которые в аэрокосмической отрасли могут составлять до 30 % от стоимости обслуживания. Для безопасной и длительной эксплуатации деталей машин и приборов актуально получение их высокопрочного состояния с повышенной трещиностойкостью.

Известные способы достижения высокопрочного состояния [1, 2] заключаются в сочетании определенного состава легированной стали с режимами термической обработки, минимизации неметаллических включений, создании гетерогенной микроструктуры и использовании методов поверхностного упрочнения. Ранее авторами была предложена технология термической обработки в магнитном поле (ТОМП) [3], позволяющая при определенных режимах достигать высокопрочного состояния в сталях. Особенностью предлагаемой технологии является увеличение прочностных показателей без снижения вязкости. При этом широко используемые марки легированных сталей подвергаются практически традиционным режимам термической обработки, но с наложением энергии постоянного магнитного поля.

Существующие способы повышения трещиностойкости [1, 2] оперируют следующими механизмами: увеличением зоны пластической деформации у вершины трещины; ветвлением траектории трещины (увеличением её пути); созданием сжимающих напряжений для замедления роста трещины; локальным упрочнением на пути движения трещины; уменьшением количества и размеров концентраторов напряжений; созданием микроструктурных барьеров. Однако сведений о поведении трещин в сталях, обработанных по режимам с наложением постоянного магнитного поля, в настоящее время недостаточно. В связи с этим в настоящей работе поставлена цель оценить изменения в трещиностойкости и кинетике развития трещин после ТОМП.

**Материалы и методы.** Особенности развития трещин во времени изучались с помощью установки, которая создает циклические колебания стабилизированной амплитуды, устройство которой описано в работе [4]. Метод электропотенциалов [5, 6] позволял фиксировать момент зарождения и этапы развития усталостных трещин. Полученные таким образом данные впоследствии переводились в реальные значения с помощью диаграммы калибровки при известных данных о длине трещины и размерах образца призматической формы.

Результаты исследования представлены в виде зависимостей с осями  $dl/dN - \lg \Delta K$  [2, 7], характеризующими развитие усталостного разрушения. Величина отношения  $dl/dN$  определяет экспоненциальную скорость распространения трещины за определённое число циклов нагрузки. Параметр  $\Delta K$  демонстрирует диапазон изменения коэффициента интенсивности напряжений (КИН) при циклических нагрузках и вычисляется как разность между наибольшим и наименьшим значениями КИН:

$$\Delta K = K_{lcmax}^II - K_{lcmin}^II \quad (1)$$

Значения  $K_{lc}^II$  вычислялись через максимальные напряжения ( $\sigma$ ), возникающие при циклическом изгибе призматического образца с трещиной длиной  $l$ , по формуле:

$$K_{lc}^II = \sigma \sqrt{\pi \cdot l} \quad (2)$$

Исследования проводили на призматических образцах из сталей 18Х2Н4ВА, 30ХГСА которые были термообработаны (18Х2Н4ВА — воздушная закалка на мартенсит; 30ХГСА — изотермическая закалка при 380 °С на нижний бейнит) на высокопрочное состояние. Магнитное поле напряженностью 1,6 МА/м получали магнитном зазоре электромагнита ФЛ – 1.

При изучении тонкой структуры применялся просвечивающий электронный микроскоп ЭММА – 4 и растворный электронный микроскоп (РЭМ) ZEISS CrossBeam 340.

**Результаты исследования.** Рис. 1 иллюстрирует зависимость длины усталостной трещины от числа циклов испытания после различной обработки для исследуемых сталей.

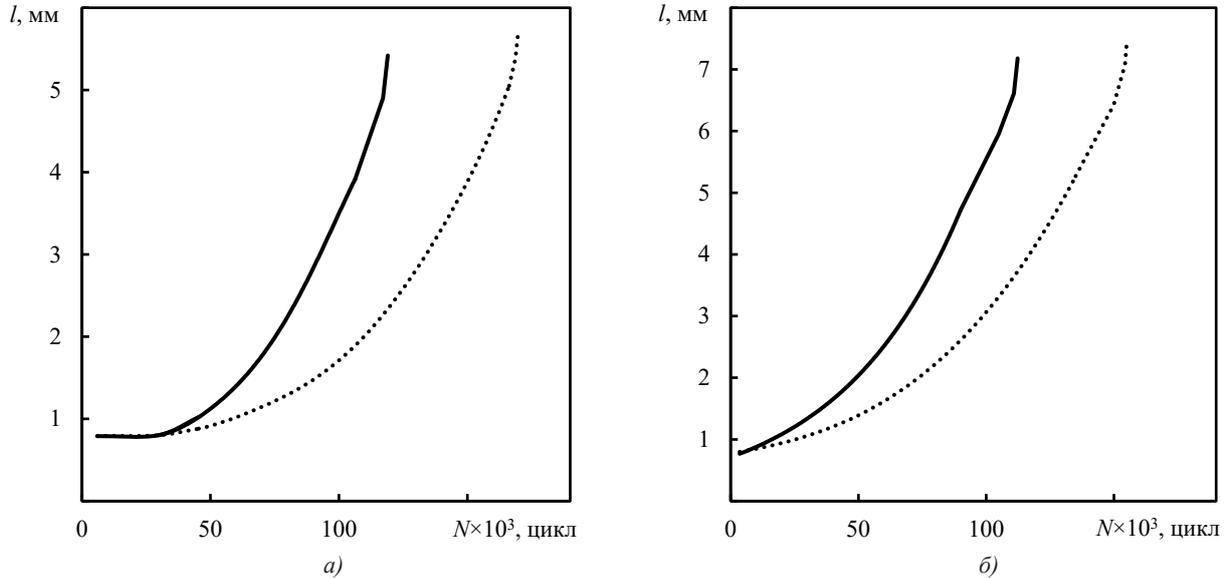


Рис. 1. Зависимость роста усталостной трещины от числа циклов знакопеременного изгиба сталей: *a* — 30ХГСА; *б* — 18Х2Н4ВА; сплошная линия — обработка без поля; точечная линия — в магнитном поле напряженностью 1,6 МА/м

Диаграммы развития усталостных трещин во времени показаны на рис. 2, их внешний вид иллюстрирует три стадии развития трещины. На каждой из этих стадий трещина имеет определённую скорость распространения: 1-я — стадия медленного роста; 2-я — стабильного роста и 3-я — ускоренного или нестабильного роста [1]. Для каждой из стадий характерны свои особенности рельефа поверхности разрушения [2], которые хорошо обнаруживаются на изломе образцов после испытания на циклический изгиб.

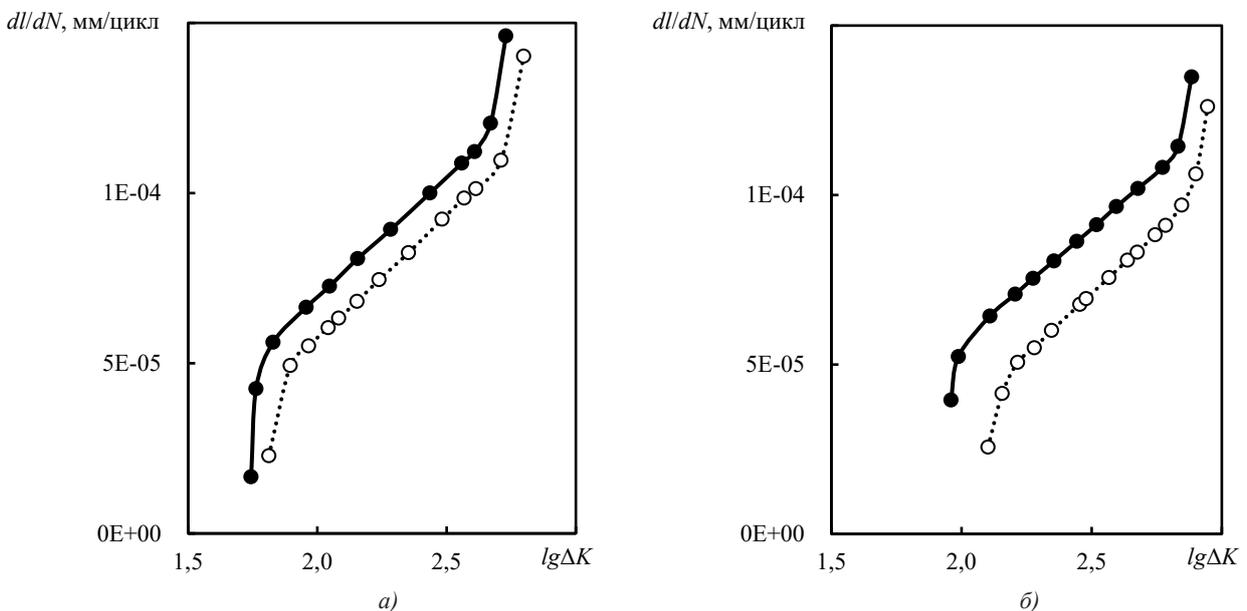


Рис. 2. Кинетические диаграммы развития усталостной трещины в сталях: *a* — 30ХГСА; *б* — 18Х2Н4ВА; сплошная линия — обработка без поля; точечная линия — в магнитном поле 1,6 МА/м

Видно (рис. 2), что после ТОМП значительно снижается скорость распространения трещины по сравнению с обработкой без поля, при этом диапазон значений КИН  $\Delta K$  остается соизмеримым. Разрушение образца происходит при большей циклической длине трещины и большей величине  $K_{Ic}^{II}$ , что показано в таблице 1. В числителе приведены данные для обработки без поля, а в знаменателе — в поле с напряженностью 1,6 МА/м. Доверительные интервалы указаны при доверительной вероятности  $P = 0,95$  и числе измерений  $n = 5$ .

Параметры, характеризующие вязкость при циклическом разрушении

Сталь	$K_{1c}^D$	$K_{0}^D$	$l_{кр}, \text{мм}$	Число циклов до разрушения $N \times 10^3$
	МН/м <sup>3/2</sup>			
18Х2Н4ВА	$70,1 \pm 1,0$	$8,3 \pm 0,4$	$6,74 \pm 0,05$	$109 \pm 10$
	$81,5 \pm 1,0$	$9,9 \pm 0,4$	$7,11 \pm 0,05$	$153 \pm 10$
30ХГСА	$51,1 \pm 1,0$	$5,1 \pm 0,3$	$4,92 \pm 0,05$	$115 \pm 10$
	$60,3 \pm 1,0$	$6,3 \pm 0,3$	$5,16 \pm 0,05$	$168 \pm 10$

Рис. 3 а иллюстрирует механизм вязкого разрушения путём зарождения, роста и коалесценции пор, что характерно для сталей 18Х2Н4ВА и 30ХГСА. Рис. 3 б показывает результат того, как под действием нормальных напряжений из пор образуется трещина.

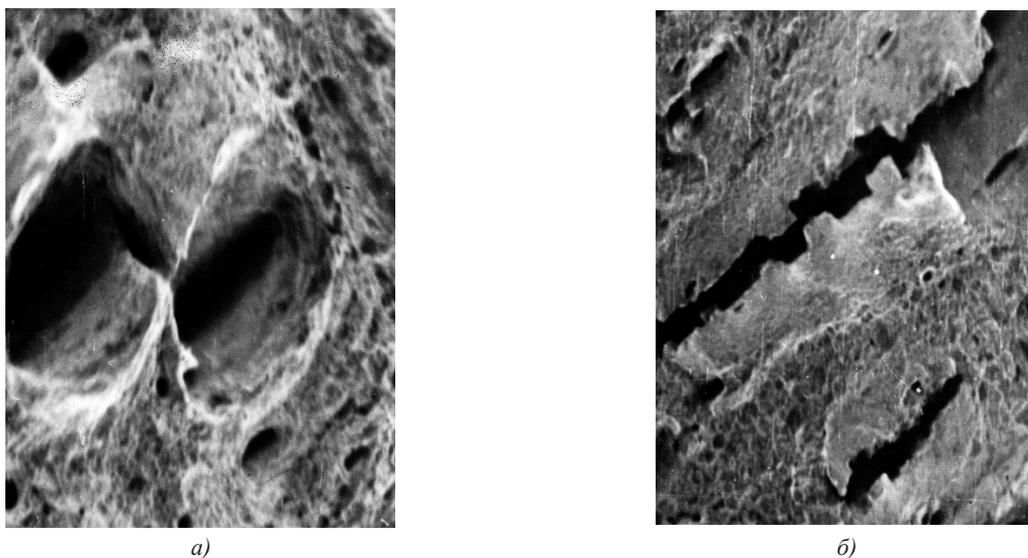


Рис. 3. Механизм образования трещины в стали 30ХГСА (РЭМ): а — излом с возникшими порами ( $\times 1\,200$ ); б — трансформация пор в трещину ( $\times 500$ )

На рис. 4 продемонстрированы фрагменты трещин при режимах термической обработки в магнитном поле и без поля. Проводился анализ подобных данных для выявления зависимости изменения траектории трещины от вида термообработки.

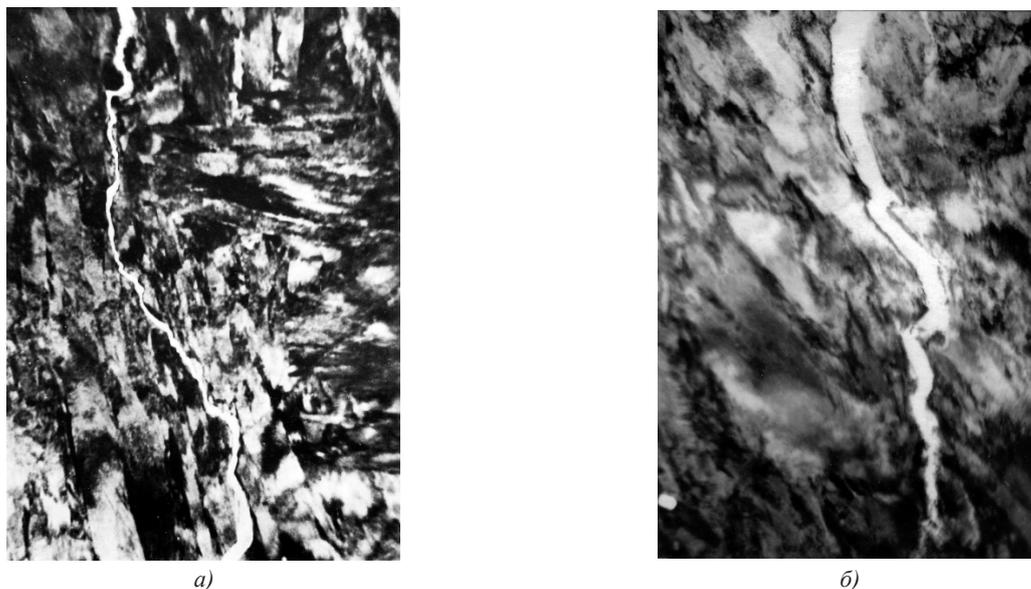


Рис. 4. Трещина в фольге стали 30ХГСА после закалки в масле ( $\times 10\,000$ ): а — в магнитном поле; б — без поля

**Обсуждение.** Данные на рис. 1 показывают, что в случае термообработки в магнитном поле кинетика распространения трещин проявляет более подавленный характер по сравнению с обработкой без поля, а последняя стадия разрушения наступает при большем количестве циклов испытания. Кинетические диаграммы развития усталостной трещины (рис. 2) также демонстрируют существенное снижение скорости развития трещины в условиях обработки в магнитном поле при сохранении интервала КИН ДК. Существуют представления [8, 9], что при циклических испытаниях целесообразнее характеризовать вязкость начальной (пороговой) величиной КИН  $K_0^{\text{II}}$ , соответствующей началу расслоения магистральной трещины по отрывному механизму (с заданной степенью стеснения пластической деформации), а не максимальной величиной КИН, отвечающей предельному состоянию. Как видно из таблицы 1, после ТОМП значение величиной  $K_0^{\text{II}}$  увеличивается. Обосновано можно ожидать повышения долговечности и работоспособности изделий машиностроения после проведения термообработки в магнитном поле [10, 11], на что также указывают результаты предыдущих исследований о воздействии ТОМП на механические свойства [12, 13].

В монографии [3] обобщены данные о том, что при обработке на высокопрочное состояние (структура мартенсита отпуска или нижнего бейнита [14, 15]) влияние магнитного поля проявляется в существенной фрагментации структуры, повышении дисперсности отдельных кристаллов ферромагнитной  $\alpha$ -фазы и их ансамблей (пакетов), увеличении удельной поверхности субгранц, препятствующих движению дислокаций в процессе нагружения. Локальное перенапряжение у вершины дислокационного скопления может релаксировать через образование зародыша трещины, развитие которой зависит от характера структуры стали. В зависимости от условий нагружения и исходного состояния мартенсита [16, 17], рост микроскопической трещины может протекать по различным механизмам, определяющим вид поверхности излома. Следует отметить, что для рассматриваемых сталей 30ХГСА и 18Х2Н4ВА вязкое разрушение происходит при появлении пор, их росте и объединении (рис. 3 а). Знакопеременные нагрузки приводят к усталостному разрушению путем образования большого количества избыточных вакансий (например, в результате междислокационных взаимодействий и скольжения с образованием порогов [2, 18]), которые могут объединяться, образуя пору. Нормальные напряжения, действуя на поверхности зародышей пор, способствуют стоку вакансий, что приводит к трансформации пор в трещину (рис. 3 б).

Продвижение образовавшейся трещины зависит от наличия препятствий на её пути, что определяется особенностями имеющейся у материала структуры. В связи с этим с помощью электронной микроскопии исследовались параметры траектории распространения трещин в тонких фольгах, т.к. они очень зависимы от структуры [1]. Результаты анализа тонкой структуры позволяют сделать заключение, что использование технологии ТОМП не влияет на механизм изменения траектории трещины, т.е. смена траектории происходит случайным образом (рис. 4) при встрече с различными структурными элементами (карбидами, границами фаз и т.п.) и не зависит от способа термообработки.

Оценить эффективность структурных барьеров, обусловленных ТОМП, на пути развития трещины позволяет анализ автокорреляционных функций (АКФ) [19, 20] связывающих отклонение линии трещины от её среднего положения и 1-ую производную траектории её распространения (рис. 5), что характеризует угловые параметры изменения траектории распространения трещины в фольге. АКФ позволили оценить влияние ТОМП на статистические параметры трещин:  $K_x(0)$  — стандартное отклонение линии трещины;  $K'_x(0)$  — стандартный разброс тангенса угла наклона траектории (показатель извилистости);  $\tau_x(0)$  и  $\tau'_x(0)$  — диапазоны взаимозависимости функций линейного разброса и тангенсов углов наклона соответственно (характеризуют увеличение длины трещины в результате воздействия однократно возникшего фактора). Статистические параметры трещин  $K_x(0)$ ;  $\tau_x(0)$ ;  $K'_x(0)$ ;  $\tau'_x(0)$  для стали 30ХГСА показаны в таблице 2, где приведены среднеквадратичные отклонения экспериментальных данных.

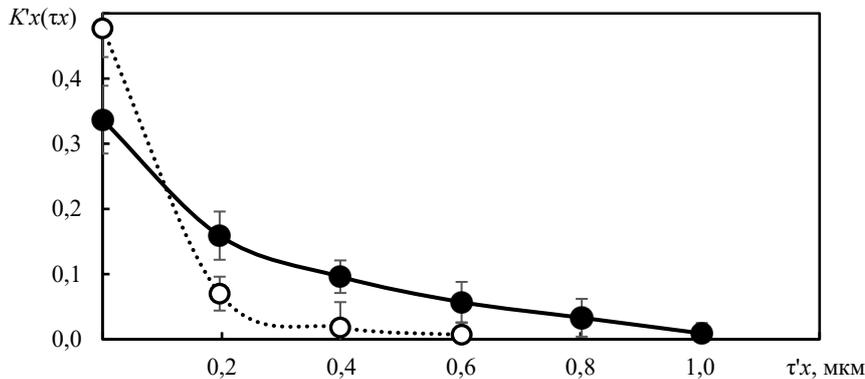


Рис. 5. Графики функций автокорреляции наклона изгибов линии трещины относительно среднего положения: сплошная линия — обработка без поля; точечная линия — обработка в магнитном поле напряженностью 1,6 МА/м

Влияние режимов термообработки на параметры распространения трещины длиной  $l = 6$  мкм

Величина напряженности магнитного поля, МА/м	$\sqrt{K_x(0)}$	$\tau_x(0)$	$\sqrt{K'_x(0)}$	$\tau'_x(0)$
0,0	0,156 ± 0,03	0,5 ± 0,20	0,58 ± 0,04	1,1 ± 0,3
1,6	0,144 ± 0,03	1,1 ± 0,15	0,66 ± 0,03	0,6 ± 0,2

По данным в таблице 2 можно отметить, что ТОМП оказывает влияние на все приведённые статистические характеристики трещин. Стандартный разброс тангенса углов наклона участков линии трещины ( $\sqrt{K'_x(0)}$ ) после ТОМП увеличивается на 0,12, что отвечает увеличению среднего модуля наклона траектории трещины на  $\sim 6^\circ$  (от  $29$  до  $35^\circ$ ). При этом интервал корреляции ( $\tau'_x(0)$ ) снижается на 0,5 мкм.

**Заключение.** Основным результатом работы является установление изменений в кинетике развития усталостных трещин, а также выявление механизмов, обуславливающих повышенную трещиностойкость после ТОМП. На основе полученных данных можно сделать вывод, что технология термической обработки в магнитном поле способствует формированию структуры, обеспечивающей увеличение извилистости трещин: наблюдается увеличение крутизны изгиба траектории из-за большего числа эффективных барьеров (увеличение дисперсности мартенсита) на её пути. В этой связи можно заключить, что характер организации структуры при ТОМП имеет много общего с процессом высокотемпературной термомеханической обработки. Таким образом, в арсенале практических методов для создания высокопрочного состояния появляется новый, который применим для широкого ассортимента марок сталей и не требует кардинальных изменений в технологии их термической обработки. В свою очередь, повышение трещиностойкости сталей позволяет обеспечить большую безопасность различных устройств и техногенных систем, а также снизить их себестоимость и затраты на обслуживание.

#### Список литературы / References

- Gdoutos EE. *Fracture Mechanics: An Introduction*. Springer Nature Switzerland AG; 2020. 477 p.
- Yukitaka Murakami. *Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions*. Academic Press; 2019. 758 p.
- Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В. *Магнитная гетерогенность аустенита и превращения в сталях*. Монография. Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет; 2021. 198 с.
- Pustovoit VN, Dolgachev YuV. *Magnetic Heterogeneity of Austenite and Transformations in Steels*. Monograph. Rostov-on-Don: Don State Technical University; 2021. 198 p. (In Russ.)
- Пустовойт В.Н., Гришин С.А., Дука В.В., Федосов В.В. Установка для исследования кинетики развития трещины при испытаниях на циклический изгиб. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2020;86(7):59–64. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-7-59-64>
- Pustovoit VN, Grishin SA, Duka VV, Fedosov VV. Setup for Studying the Kinetics of Crack Growth in Cyclic Bending Tests. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2020;86(7):59–64. (In Russ.) <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-7-59-64>
- Si Y, Rouse JP, Hyde CJ. Potential Difference Methods for Measuring Crack Growth: A Review. *International Journal of Fatigue*. 2020;136:105624. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105624>
- Tarnowski KM, Dean DW, Nikbin KM, Davies CM. Predicting the Influence of Strain on Crack Length Measurements Performed Using the Potential Drop Method. *Engineering Fracture Mechanics*. 2017;182:635–657. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.06.008>
- Zerbst U, Madia M, Vormwald M, Beier HTh. Fatigue Strength and Fracture Mechanics – A General Perspective. *Engineering Fracture Mechanics*. 2018;198:2–23. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.04.030>
- Pineau A, McDowell DL, Busso EP, Antolovich SD. Failure of Metals II: Fatigue. *Acta Materialia*. 2016;107:484–507. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.05.050>
- Tatsuo Sakai, Akiyoshi Nakagawa, Noriyasu Oguma, Yuki Nakamura, Akira Ueno, Shoichi Kikuchiet, et al. A review on fatigue fracture modes of structural metallic materials in very high cycle regime. *International Journal of Fatigue*. 2016;93(2):339–351. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.05.029>
- Schastlivtsev VM, Kaletina YuV, Fokina EA, Mirzaev DA. Effect of External Actions and a Magnetic Field on Martensitic Transformation in Steels and Alloys. *Metal Science and Heat Treatment*. 2016;58:247–253. <https://doi.org/10.1007/s11041-016-9997-4>
- Yan Wang, Zhiguo Xing, Yanfei Huang, Weiling Guo, Jiajie Kang, Haidou Wang, et al. Effect of Pulse Magnetic Field Treatment on the Hardness of 20Cr2Ni4A Steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2021;538:168248. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168248>

12. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В. Структурное состояние мартенсита и остаточного аустенита в углеродистых сталях после закалки в магнитном поле. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2022;(12(810)):10–14. <https://doi.org/10.30906/mitom.2022.12.10-14>

Pustovoyt VN, Dolgachev YuI. Structural State of Martensite and Retained Austenite in Carbon Steels after Quenching in Magnetic Field. *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*. 2022;(12(810)):10–14. (In Russ.) <https://doi.org/10.30906/mitom.2022.12.10-14>

13. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.Н. Формирование эпюры остаточных напряжений после закалки в магнитном поле. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2024;8(4):54–61. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-54-61>

Pustovoyt VN, Dolgachev YV. Formation of Residual Stress Diagram after Quenching in a Magnetic Field. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2024;8(4):54–61. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-54-61>

14. Bhadeshia HKDH, Honeycombe RWK. *Steels: Structure, Properties, and Design*. Elsevier; 2024. 550 p.

15. Fultz B. *Phase Transitions in Materials*. Cambridge University Press; 2020. 604 p.

16. Jinliang Wang, Xiaohui Xi, Yong Li, Chenchong Wang, Wei Xu. New Insights on Nucleation and Transformation Process in Temperature-Induced Martensitic Transformation. *Materials Characterization*. 2019;151:267–272. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.03.023>

17. Wang JL, Huang MH, Xi XH, Wang CC, Xu W. Characteristics of Nucleation and transformation sequence in Deformation-Induced Martensitic Transformation. *Materials Characterization*. 2020;163:110234. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110234>

18. Anderson PM, Hirth JP, Lothe J. *Theory of Dislocations*. Cambridge University Press; 2017. 699 p.

19. Webster JG, Eren H (eds.). *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook: Two-Volume Set*. CRC press; 2018. 3559 p.

20. Whitehouse DJ. *Handbook of Surface Metrology*. CRC press; 2023. 350 p.

#### **Об авторах:**

**Виктор Николаевич Пустовойт**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Материаловедение и технологии металлов» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [pustovoyt45@gmail.com](mailto:pustovoyt45@gmail.com)

**Юрий Вячеславович Долгачев**, доктор технических наук, доцент кафедры «Материаловедение и технология металлов» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ydolgachev@donstu.ru](mailto:ydolgachev@donstu.ru)

#### **Заявленный вклад авторов:**

**В.Н. Пустовойт:** формирование основной концепции, цели и задач исследования, научное руководство, доработка текста, корректировка выводов.

**Ю.В. Долгачев:** получение экспериментальных данных, расчеты, анализ результатов исследований, подготовка текста, формулирование выводов.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.**

#### **About the Authors:**

**Viktor N. Pustovoyt**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Materials Science and Metal Technology Department, Don State Technical University, (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [pustovoyt45@gmail.com](mailto:pustovoyt45@gmail.com)

**Yuri V. Dolgachev**, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Materials Science and Metal Technology Department, Don State Technical University, (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ydolgachev@donstu.ru](mailto:ydolgachev@donstu.ru)

#### **Claimed Contributorship:**

**VN Pustovoyt:** formulation of the basic concept, goals and objectives of the research, academic advising, text revision, conclusions correction.

**YuV Dolgachev:** obtaining experimental data, calculations, research results analysis, text preparation, conclusions formulation.

**Conflict of Interest Statement:** the authors declare no conflict of interest.

**All authors have read and approved the final manuscript.**

**Поступила в редакцию / Received** 06.06.2025

**Поступила после рецензирования / Reviewed** 02.07.2025

**Принята к публикации / Accepted** 10.07.2025