Материаловедение / Materials science

УДК 669.13.018
DOI 10.17073/0368-0797-2026-3-265-271

CC BY

Оригинальная статья
Original article

Прочность и механизм разрушения серого чугуна при различных видах нагружения. Часть 1. Статическая трещиностойкость и прочность образцов при растяжении и кручении

Г. В. Клевцов[1], М. Л. Линдеров[1], Н. А. Клевцова[1], М. В. Фесенюк[2], М. Н. Тюрьков[1], И. Н. Пигалева[1]

[1] **Тольяттинский государственный университет** (Россия, 445667, Самарская обл., Тольятти, Белорусская ул., 14)
[2] **АО «ПО «Стрела»** (Россия, 460005, Оренбург, ул. Шевченко, 26)

klevtsov11948@mail.ru

Аннотация. Авторы исследовали образцы из феррито-перлитного серого чугуна СЧ15 в литом состоянии ($\sigma_в$ = 121 ± 7 МПа). Растяжение цилиндрических образцов диаметром 20 мм осуществляли на испытательной машине Н50КТ. Испытания чугуна на статическую трещиностойкость проводились при температурах 20, –70 и –196 °С на призматических образцах толщиной 10 и 20 мм по схеме трехточечного изгиба на установке Instron 8801. Авторы оценивали выполнение условий плоской деформации (ПД) по критерию $t/(K_Q/\sigma_{0,2})^2 \geq 0,6$, указанному в ГОСТ 25.506 – 85, а также по критерию $h_{max}/t < 10^{-2}$, где h_{max} – максимальная глубина пластической зоны под поверхностью изломов, t – толщина образца. Глубину пластических зон под поверхностью изломов определяли рентгеновским методом. Испытание на кручение цилиндрических образцов с диаметром рабочей части 10 мм и длиной 50 мм проводили при температуре 20 °С на установке МК-50. Авторы исследовали микрорельеф поверхности изломов с помощью растрового микроскопа SIGMA фирмы «ZEISS». Испытания чугуна на статическую трещиностойкость показали, что условие ПД по ГОСТ 25.506 – 85 соблюдается только в образцах толщиной 20 мм при температуре –70 °С. Однако, согласно критерию h_{max}/t, условие ПД соблюдается для всех образцов, независимо от толщины и температуры испытания. Таким образом, полученные значения статической трещиностойкости (20,6 ± 1,5 МПа·м$^{1/2}$) соответствуют K_{1C}. В области статического разрушения, независимо от толщины образцов и температуры испытания, разрушение чугуна происходило по механизмам межзеренного хрупкого разрушения и скола. Результаты испытания на кручение показали, что зарождение трещин происходит на графитовых включениях вблизи поверхности образцов. Дальнейшее разрушение произошло под некоторым углом к сечению образца по механизму скола.

Ключевые слова: серый чугун, структура, прочность, механизм разрушения, статическая трещиностойкость, макро- и микрорельеф изломов, растяжение, кручение

Для цитирования: Клевцов Г.В., Линдеров М.Л., Клевцова Н.А., Фесенюк М.В., Тюрьков М.Н., Пигалева И.Н. Прочность и механизм разрушения серого чугуна при различных видах нагружения. Часть 1. Статическая трещиностойкость и прочность образцов при растяжении и кручении. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2026;69(3):265–271. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-265-271

© Г. В. Клевцов, М. Л. Линдеров, Н. А. Клевцова, М. В. Фесенюк, М. Н. Тюрьков, И. Н. Пигалева, 2026

Strength and failure mechanism of gray cast iron under various loading conditions. Part 1. Static crack resistance, tensile and torsional strength of the samples

G. V. Klevtsov[1], M. L. Linderov[1], N. A. Klevtsova[1], M. V. Fesenyuk[2], M. N. Tyur'kov[1], I. N. Pigaleva[1]

[1] **Togliatti State University** (14 Belorusskaya Str., Togliatti, Samara Region 445667, Russian Federation)
[2] **JSC Production Association "Strela"** (26 Shevchenko Str., Orenburg 460005, Russian Federation)

klevtsov11948@mail.ru

Abstract. The authors studied the samples of as-cast ferritic-pearlitic GG15 gray cast iron with lamellar graphite (σ_u = 121 ± 7 MPa). Tension of 20 mm diameter cylindrical samples was performed on N50KT testing machine. Static crack resistance tests of cast iron were carried out at temperatures of 20, –70 and –196 °C on 10 and 20 mm thick prismatic samples using a three-point bending scheme on Instron 8802 testing machine. The authors estimated the implementation of plane strain (PS) conditions by the $t/(K_Q/\sigma_{0.2})^2 \geq 0.6$ criterion specified in GOST 25.506 – 85, as well as by the $h_{max}/t < 10^{-2}$ criterion, where h_{max} is the maximum depth of the plastic zone under the fracture surface, t is the sample thickness. Depth of the plastic zones beneath the fractures surface was determined using *X*-ray diffraction. Tensile tests on cylindrical samples with a 10 mm diameter and 50 mm length were conducted at 20 °C using MK-50 tester. The authors examined the fractures surface microrelief using SIGMA scanning electron microscope (ZEISS). Static crack resistance tests of cast iron showed that at 20 °C, the PS condition according to GOST 25.506 – 85 is met only for 20 mm thick samples at –70 °C. However, according to the hmax/t criterion, the PS condition is met for all the samples, regardless of thickness and testing temperature. Therefore, the obtained static crack resistance values (20.6 ± 1.5 MPa·m$^{1/2}$) correspond to K_{1C}. To evaluate the PS conditions of GG15 cast iron, it is proposed to use the criterion $t/(K_Q/\sigma_{0.2})^2 \geq 0.38$. In the static failure area, regardless of the sample thickness and test temperature, cast iron destruction occurred via intergranular brittle failure and cleavage mechanisms. Results from tensile tests of the samples showed that crack initiation occurred at graphite inclusions near the sample surface. Subsequent sample failure occurred at an angle to the sample cross-section by a cleavage mechanism.

Keywords: gray cast iron, structure, strength, failure mechanism, static crack resistance, fracture macrorelief, fracture microrelief, tension, torsion

For citation: Klevtsov G.V., Linderov M.L., Klevtsova N.A., Fesenyuk M.V., Tyur'kov M.N., Pigaleva I.N. Strength and failure mechanism of gray cast iron under various loading conditions. Part 1. Static crack resistance, tensile and torsional strength of the samples. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2026;69(3):265–271. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-265-271

Введение

Чугун является основным литейным конструкционным материалом для изготовления отливок деталей сложной конфигурации, испытывающих в процессе эксплуатации не только сжимающие, но и другие виды нагружения. Одна из специфических особенностей микроструктуры промышленных чугунов – это, прежде всего, ярко выраженная гетерогенность, обусловленная наличием в металлической матрице включений графита [1; 2]. В процессе приложения нагрузки межфазная граница между включением графита и металлической матрицей или само включение могут служить местом зарождения трещины. Поэтому форма графита, наряду с металлической основой и другими факторами, оказывает существенное влияние на прочностные свойства чугунов [2 – 6]. В меньшей степени изучено влияние графитовых включений на статическую трещиностойкость чугунов [7 – 9], особенно в серых чугунах, где форма графита самая неблагоприятная. В дальнейшем трещина может распространяться по металлической матрице, огибая или разрушая графитовые включения [3; 10; 11]. Анализу механизмов разрушения промышленных чугунов посвящены работы [3; 7 – 15]. Так, в работах [11; 15] отмечено, что анализ результатов фрактографических исследований динамически разрушенных образцов показал, что разрушение серого чугуна СЧ35 и легированного износостойкого чугуна ЧМН-35М происходит по хрупкому типу с явным преобладанием межзеренного механизма.

При испытании образцов на статическую трещиностойкость (K_{1C}) одним из основных критериев реализации у вершины трещины условий плоской деформации, согласно ГОСТ 25.506 – 85 [16], является $t/(K_{1C}/\sigma_{0,2})^2 \geq 2{,}5$ для сталей, алюминиевых, титановых, магниевых сплавов и $t/(K_{1C}/\sigma_{0,2})^2 \geq 0{,}6$ для чугунов, где t – толщина образца или детали в месте разрушения; $\sigma_{0,2}$ – предел текучести материала. Основываясь на том, что согласно положению механики разрушения наиболее объективную информацию о локальном напряженном состоянии материала в момент разрушения дает анализ размеров и формы пластических зон, образующихся у вершины трещины [17], в работе [18] предложен единый критерий оценки локального напряженного состояния материала у вершины трещины при различных видах нагружения (статическом, ударном) как отношение максимальной глубины пластической зоны под поверхностью изломов h_{max} к толщине образца или

детали t, т. е. h_{max}/t. Согласно данному критерию, при плоской деформации (ПД) отношение $h_{max}/t < 10^{-2}$; при плоском напряженном состояния (ПН) $h_{max}/t > 10^{-1}$, в переходной области (ПД ↔ ПН) $10^{-2} \le h_{max}/t \le 10^{-1}$ [18].

Целью настоящей работы являются оценка прочности и выявление особенности механизма разрушения серого чугуна с пластинчатым графитом при испытании образцов на растяжение, статическую трещиностойкость и кручение.

Материал и методики исследования

В качестве исследуемого материала был выбран промышленный феррито-перлитный серый чугун СЧ15 (GG15) (3,3 % C, 1,8 % Si, 0,75 % Mn) в литом состоянии. Исследование структуры чугуна проводили на металлографическом микроскопе Axiovert 40 MAT; испытания на твердость – на твердомере ТН 300. Статическое растяжение литых цилиндрических образцов диаметром 20 мм осуществляли при температурах 20, –70 и –196 °C на универсальной испытательной машине Н50КТ согласно ГОСТ 1497 – 84 и ГОСТ 22706 – 77. Испытания чугуна на статическую трещиностойкость проводились при температурах 20, –70 и –196 °C на призматических образцах толщиной 10 и 20 мм по схеме трехточечного изгиба на установке Instron 8801 согласно ГОСТ 25.506 – 85. Испытание на кручение цилиндрических образцов с диаметром рабочей части 10 мм и длиной 50 мм осуществляли при температуре 20 °C на установке МК–50 согласно ГОСТ 3565 – 80. По диаграмме «Крутящий момент – угол закручивания» рассчитывали механические свойства чугуна при кручении. Микрорельеф поверхности изломов исследовался на растровом электронном микроскопе (РЭМ) SIGMA фирмы «ZEISS».

При испытании чугуна на статическую трещиностойкость оценку локального напряженного состояния материалов у вершины трещины проводили по основному критерию $t/(K_{1C}/\sigma_{0,2})^2$, указанному в ГОСТ 25.506 – 85 [16], а также по критерию h_{max}/t [18]. Для определения глубины пластических зон под поверхностью изломов использовали метод послойного стравливания излома с последующим рентгенографированием его поверхности [18]. Глубину пластических зон под поверхностью излома определяли по изменению ширины рентгеновских дифракционных линий (211) Fe$K_{\alpha 1}$ после многократного стравливания. Съемку поверхности изломов проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-2.0 в FeK_{α} излучении.

Таблица 1. **Средний размер зерна ($d_{ср}$) и механические свойства чугуна СЧ15 при растяжении**

Table 1. **Average grain size ($d_{ср}$) and mechanical properties of GG15 cast iron under tension**

Материал	$d_{ср}$, мкм	HB	T, °C	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %
СЧ15	80	163	20	121 ± 7	105 ± 8	2,0 ± 0,8
			–70	131 ± 5	120 ± 15	0,7 ± 0,6
			–196	142 ± 12	131 ± 15	1,5 ± 0,5

Результаты исследования

Структура и механические свойства чугуна СЧ15 при растяжении

Чугун СЧ15 имеет феррито-перлитную структуру с пластинчатым графитом со средним размером зерна 80 мкм (рис. 1) и обладает невысокими прочностными свойствами при растяжении (табл. 1). При всех температурах испытания образцы разрушались хрупко. Изломы – кристаллические крупнозернистые.

Локальное напряженное состояние, статическая трещиностойкость и механизм разрушения образцов из чугуна СЧ15

Испытания на статическую трещиностойкость призматических образцов толщиной 10 и 20 мм из чугуна СЧ15 показали, что при температуре 20 °C, независимо от толщины образцов, условие ПД по ГОСТ 25.506 – 85

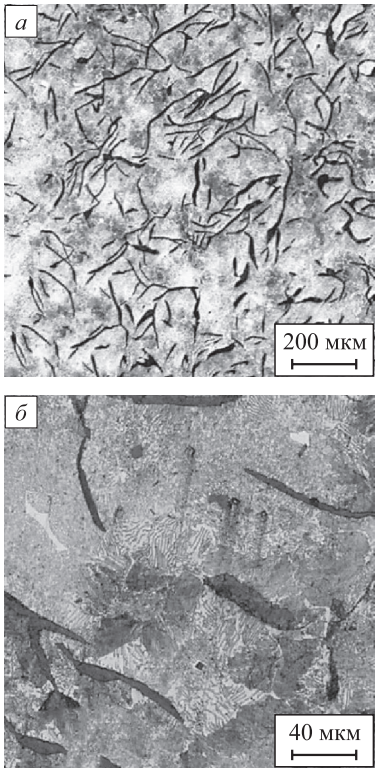


Рис. 1. Микроструктура (*а*) и перлитная область (*б*) чугуна СЧ15: *а* – 100×; *б* – 500×

Fig. 1. Microstructure (*a*) and pearlitic area (*б*) of GG15 cast iron: *a* – 100×, *б* – 500×

Таблица 2. **Статическая трещиностойкость и критерии реализация условий ПД в образцах толщиной 10 и 20 мм по ГОСТ 25.506 – 85 и h_{max}/t**

Table 2. **Static crack resistance and criteria for implementation of PD conditions in samples with a thickness of 10 and 20 mm, according to GOST 25.506 – 85 and h_{max}/t**

T, °C	10 мм			20 мм		
	K_{1C} (K_C), МПа·м$^{1/2}$	$t/(K_Q/\sigma_{0,2})^2 \geq 0,6$	$h_{max}/t < 10^{-2}$	K_{1C} (K_C), МПа·м$^{1/2}$	$t/(K_Q/\sigma_{0,2})^2 \geq 0,6$	$h_{max}/t < 10^{-2}$
20	21,6 ± 1,5	0,24	$3,50 \cdot 10^{-3}$	21,2 ± 1,4	0,49	$1,75 \cdot 10^{-3}$
–70	–	–	–	19,4 ± 1,2	0,77	$1,00 \cdot 10^{-3}$
–196	20,2 ± 1,3	0,42	$1,50 \cdot 10^{-3}$	–	–	–

($t/(K_{1C}/\sigma_{0,2})^2 \geq 0,6$) не соблюдается (табл. 2). Следовательно, полученные значения статической трещиностойкости, согласно вышеуказанному ГОСТу, соответствуют величине КС. Однако, по критерию $h_{max}/t < 10^{-2}$ условие ПД для всех образцов, испытанных при 20 °С, соблюдается. Таким образом, полученное значение трещиностойкости, согласно данному критерию, есть K_{1C} [17].

При понижении температуры испытания условие ПД по ГОСТ 25.506 – 85 в образцах толщиной 10 мм не выполняется вплоть до температуры –196 °С, а в образцах толщиной 20 мм условие ПД соблюдается уже при температуре –70 °С (табл. 2). Таким образом, по критерию $h_{max}/t < 10^{-2}$ условие ПД выполняется для всех образцов, испытанных как при комнатной температуре, так и при низких температурах (табл. 2). Следовательно, полученные значения трещиностойкости соответствуют K_{1C}.

Рассмотрим фрактографические особенности строения изломов образцов из чугуна СЧ15, испытанных на статическую трещиностойкость при различных температурах испытания. Разрушение образцов в области статического разрушения чугуна, независимо от толщины и температуры испытания, произошло макрохрупко (рис. 2, *а – г*). Микрофрактографический анализ области статического разрушения образцов показал, что независимо от толщины образцов и температуры испытания разрушение чугуна произошло по механизму межзеренного хрупкого разрушения и механизму скола (рис. 2, *д – з*). Причем, на поверхности изломов образцов, разрушенных при 20 °С, доминирует скол (рис. 2, *д*, *ж*), а на поверхности изломов образцов, разрушенных при низких температурах, доминирует межзеренное хрупкое разрушение (рис. 2, *е*, *з*). Графитовые включения при всех температурах испытания разрушились хрупко.

Прочность и механизм разрушения чугуна СЧ15 при кручении

Результаты испытания на кручение образцов из чугуна СЧ15 диаметром 10 мм показали низкое значение крутящего момента и малый угол закручивания (рис. 3) по сравнению с углом закручивания образцов

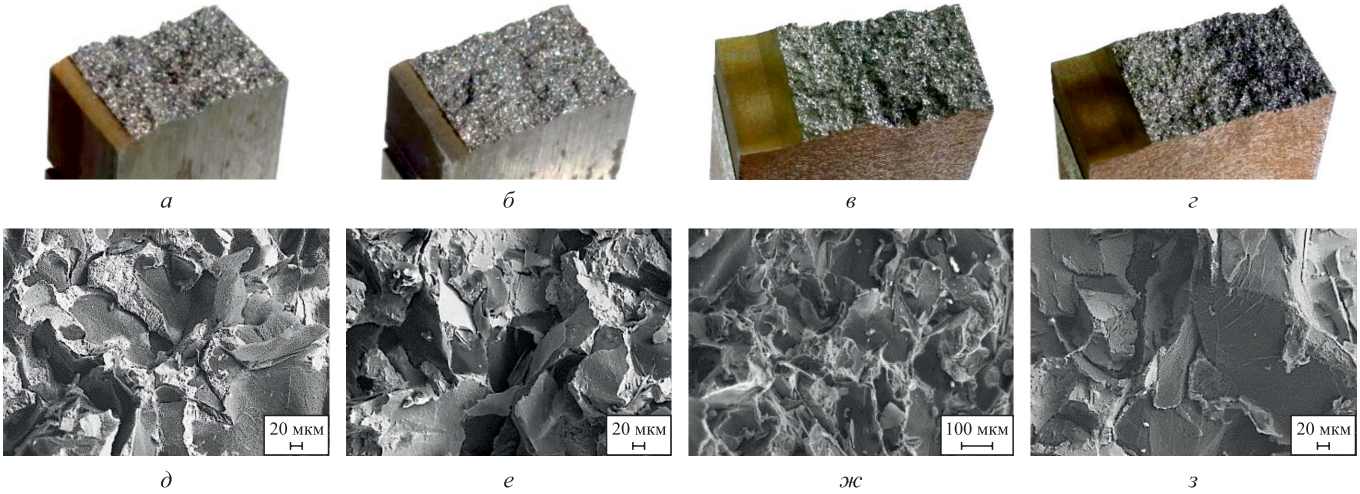


Рис. 2. Общий вид изломов образцов из чугуна СЧ15 толщиной 10 (*а*, *б*) и 20 мм (*в*, *г*), полученных при температурах 20 (*а*, *в*), –196 (*б*) и –70 °С (*г*), а также микрорельеф соответствующих изломов в области статического разрушения (*д – з*); *д*, *е*, *з* – 200×; *ж* – 100×

Fig. 2. General view of fractures of GG15 cast iron samples 10 (*а*, *б*) and 20 mm (*в*, *г*) thick obtained at temperatures of 20 (*а*, *в*), –196 (*б*) and –70 °С (*г*), and microrelief of the corresponding fractures in the static failure area (*д – з*); *д*, *е*, *з* – 200×; ж – 100×

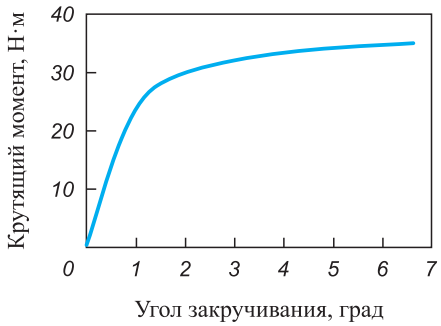


Рис. 3. Характерный вид диаграммы «Крутящий момент – угол закручивания» образцов из чугуна СЧ15

Fig. 3. Typical appearance of the "Torque – twist angle" diagram for GG15 cast iron samples

такого же диаметра, но из другой материала, например, аустенитной стали [19]. Оценка механических свойств чугуна при кручении, проведенная по результатам анализа диаграмм «Крутящий момент – угол закручивания», показала низкое сопротивление серого чугуна крутящим нагрузкам (табл. 3).

Изломы, полученные при испытании образцов из чугуна на кручение – макрохрупкие, кристаллические. Разрушение произошло частично под углом к плоскости сечения образцов (рис. 4, *а*) по механизму скола (рис. 4, *б – г*). В периферийной области изломов можно видеть частичное затирание микрорельефа, возникшее от трения с ответной поверхностью, а также хрупкое разрушение графитовых включений (рис. 4, *б*). Следовательно, можно предположить, что разрушение при кручении образцов из чугуна, как и в случае разрушения образцов из стали [19], началось с периферийной области, затем произошло хрупкое разрушения образца по всему сечению.

Анализ и обсуждение результатов исследования

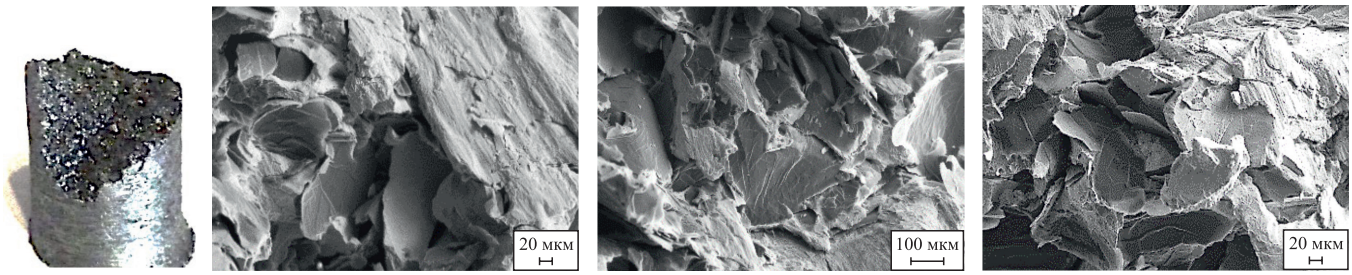
Одним из факторов, влияющих на прочность и механизм разрушения чугуна СЧ15, являются имеющиеся в его структуре пластинчатые графитовые включения, выполняющие роль концентраторов напряжения. При испытании образцов из серого чугуна на статическую трещиностойкость данный фактор, по-видимому, не должен оказывать существенного влияния на результаты испытаний, так как в образцах перед испытанием выращивают усталостную трещину. Увеличение толщины образцов от 10 до 20 мм и последующее охлаждение до низких температур, как следует из табл. 2, не оказало существенного влияния на локальное напряженное состояние материала у вершины трещины, а, следовательно, и на значение статической трещиностойкости чугуна СЧ15, которое составило в среднем 20,6 ± 1,5 МПа·м$^{1/2}$. Как видно из табл. 2, условие ПД по критерию $t/(K_{1C}/\sigma_{0,2})^2 \geq 0,6$ (ГОСТ 25.506 – 85) достигается только при испытании образцов толщиной 20 мм при температуре –70 °С, в то время как по критерию $h_{max}/t < 10^{-2}$ условие ПД соблюдается для всех образцов, испытанных как при комнатной температуре, так и при низких температурах.

Из рис. 2 видно, что разрушение образцов из чугуна СЧ15, независимо от толщины образцов и температуры испытания, произошло по механизмам межзеренного хрупкого разрушения и скола. Из работы [20] следует, что такие механизмы разрушения свидетельствуют о том, что разрушение материалов с ОЦК решеткой при

Таблица 3. **Механические свойства чугуна СЧ15 при кручении**

Table 3. **Mechanical properties of GG15 cast iron under torsion**

Материал	Диаметр образца, мм	Крутящий момент, Н·м	Угол закручивания, град	τ_k, МПа	$\tau_{0,3}$, МПа	g, %
Чугун СЧ15	10	34 ± 1,0	6,2 ± 0,3	22,3 ± 5	17,2 ± 8	1,9 ± 0,4



а *б* *в* *г*

Рис. 4. Общий вид (*а*) и микрорельеф поверхности излома образца из чугуна СЧ15 после кручения, полученный в периферийной (*б*), переходной (*в*) и центральной (*г*) части излома; *б*, *г* – 200×, *в* – 100×

Fig. 4. General view (*a*) and microrelief of fracture surface of GG15 cast iron sample after torsion, obtained in peripheral (*б*), transition (*в*) and central (*г*) fracture parts; *б*, *г* – 200×, *в* – 100×

однократных видах нагружения произошло в условиях ПД. Следовательно, независимо от толщины образцов и температуры испытания, разрушение по критерию $h_{max}/t < 10^{-2}$ произошло в условиях ПД. Отсюда также следует, что критерий реализации условия плоской деформации $h_{max}/t < 10^{-2}$ лучше коррелирует с механизмом разрушения чугуна, чем критерий $t/(K_{1C}/\sigma_{0,2})^2 \geq 0,6$.

Наличие пластинчатых графитовых включений в структуре чугуна СЧ15 оказало влияние и на механизм разрушения образцов при кручении. Микрорельеф поверхности излома образцов из чугуна в периферийной области (рис. 4, *б*) свидетельствует о том, что зарождение трещин произошло вблизи поверхности образцов на графитовых включениях, которые выполнили роль концентраторов напряжения. Дальнейшее разрушение произошло под некоторым углом к сечению образца по механизму скола (рис. 4, *в*, *г*). Такой механизм зарождения и распространения трещин предопределил малый угол закручивания (6,2°) и низкие значения механических свойств чугуна СЧ15 при кручении (табл. 3).

Выводы

При испытании образцов толщиной 10 и 20 мм из серого чугуна СЧ15 на статическую трещиностойкость разрушение образцов как при комнатной, так и при низких температурах произошло по механизмам межзеренного хрупкого разрушения и скола.

Критерий реализации условий ПД, рассчитанный по глубине пластической зоны под поверхностью изломов ($h_{max}/t < 10^{-2}$), лучше коррелирует с механизмом разрушения чугуна, чем критерий $t/(K_{1C}/\sigma_{0,2})^2 \geq 0,6$ по ГОСТ 25.506 – 85.

Среднее значение статической трещиностойкости (K_{1C}) серого чугуна СЧ15, независимо от толщины исследуемых образцов и температуры испытания, составляет 20,6 ± 1,5 МПа·м$^{1/2}$.

Разрушение образцов из чугуна СЧ15 при кручении произошло при малом угле закручивания (6,2°) по механизму скола. Зарождение трещин произошло в периферийной области образцов на графитовых включениях.

Список литературы / References

1. Гиршович Н.Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. Москва: Машиностроение; 1966:562.
2. Pokrovskii A.I., Chaus A.S., Kunovskii E.B. Effect of the shape of graphite inclusions on acoustic characteristics of articles from cast and deformed iron. *Metal Science and Heat Treatment*. 2011;53(7–8):311–317. https://doi.org/10.1007/s11041-011-9388-9
3. Покровский А.И., Хроль И.Н. Сравнительные исследования изломов высокопрочного чугуна в литом и деформированном состоянии. *Литье и металлургия*. 2015;81(4):131–145.

   Pokrovsky A.I., Khrol I.N. Comparative researches of fractures of high-strength cast iron in the as-cast and deformed state. *Litiyo i Metallurgiya (FOUNDRY PRODUCTION AND METALLURGY)*. 2015;81(4):131–145. (In Russ.).
4. Xu T., Hu C., Xie D. Effect of remodification and heat treatment on formation and growth of thermal fatigue crack in wear resistant cast iron containing low alloy. *Journal of Rare Earths*. 2003;21:202–205.
5. Bates C.E. Alloy Element Effects on Grey Iron Properties: Part II. *AFS Trans*. 1986;94:889–905.
6. Benedetti M., Curtolo T., Dallago M., Fontanari V., Lusuardi D. Yield and fracture loci for a ductile cast iron EN-GJS-600–3 under biaxial stresses. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2021;45(3):783–800. https://doi.org/10.1111/ffe.13633
7. Bradley W.L., Srinivasan M. Fracture and fracture toughness of cast irons. *International Materials Reviews*. 1990;35(1):129–161. https://doi.org/10.1179/095066090790324028
8. Owadano T., Kishitake K., Nagai K., Kubo Y. Fracture toughness of gray cast iron evaluated by J-integrals. *The Journal of the Japan Foundrymen's Society*. 1978;50(6):368–373. https://doi.org/10.11279/imono.50.6_368
9. Lindqvist S., Kuutti J., Sirkiä L., Forsström A. Constraint effects on fracture toughness of ductile cast iron in the ductile regime. *Engineering Fracture Mechanics*. 2024;306:110202. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2024.110202
10. Узлов К.И., Хулин А.Н., Борисенко А.Ю., Сухомлин В.И. Анализ характера разрушения промышленных изделий из высокопрочных бейнитных чугунов в зависимости от структурного состояния их матрицы. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2010;262(4):73–77.

    Uzlov K.I., Khulin A.N., Borisenko A.Yu., Sukhomlin V.I. Analysis of failure of industrial products from high-strength bainite cast irons depending on the structural state of their matrix. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2010;262(4):73–77. (In Russ.).
11. Iacoviello F., Di Bartolomeo O., Di Cocco V., Piacente V. Damaging micromechanisms in ferritic–pearlitic ductile cast irons. *Materials Science and Engineering: A*. 2008;478(1–2):181–186. https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.05.110
12. Ghahremaninezhad Ali, Ravi-Chandar K. Deformation and failure in nodular cast iron. *Acta Materialia*. 2012;60(5):2359–2368. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.12.037
13. Chemezov D., Filatov K., Bogomolova E., Sergeeva M., Noskova T., Lukashov S., Rudenok A. Experimental study of fracture of the cast iron specimen during compression. *ISJ Theoretical & Applied Science*. 2020;12(92):144–148. https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2020.12.92.27 13
14. Yoganandh J., Natarajan S., Babu S.P.K. Erosive wear behavior of nickel-based high alloy white cast iron under mining conditions using orthogonal array. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2013;22:2534–2541. https://doi.org/10.1007/s11665-013-0539-6
15. Габец Д.А., Марков А.М. Исследование влияния легирующих элементов на структуру и свойства серых чугунов, работающих в условиях ударно-фрикционного износа. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2019;21(1):70–81. https://doi.org/10.17212/1994-6309-2019-21.1-70-81

    Gabets D.A., Markov A.M. Study of the influence of alloying elements on the structure and properties of gray cast iron operating under conditions of shock-friction wear. *Obrabotka*

metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2019;21(1):70–81. (In Russ.). https://doi.org/10.17212/1994-6309-2019-21.1-70-81

16. ГОСТ 25.506–85. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. Москва: Издательство стандартов; 1985;61.

17. Браун У., Сроули Дж. Испытание высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации. Москва: Мир;1972;246.

18. Клевцов Г.В., Ботвина Л.Р., Клевцова Н.А., Лимарь Л.В. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций. Москва: МИСиС; 2007:264.

19. Клевцов Г.В., Валиев Р.З., Фесенюк М.В., Клевцова Н.А., Тюрьков М.Н., Абрамова М.М., Рааб Г.И. Прочность и механизм разрушения при кручении ультрамелкозернистой аустенитной стали медицинского назначения. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021;64(11):832–838. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-11-832-838

Klevtsov G.V., Valiev R.Z., Fesenyuk M.V., Klevtsova N.A., Tyur'kov M.N., Abramova M.M., Raab G.I. Strength and fracture mechanism during torsion of ultrafine-grained austenitic steel for medical applications. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021;64(11):832–838. (In Russ.). https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-11-832-838

20. Klevtsov G.V., Valiev R.Z., Klevtsova N.A. Effect of the local stress state on the fracture mechanism of metallic materials with different lattices under single loads. *Physical Mesomechics*. 2023;26:656–665. https://doi.org/10.1134/S102995992306005X

Сведения об авторах / Information about the Authors

Геннадий Всеволодович Клевцов, *д.т.н., профессор кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»*, Тольяттинский государственный университет
ORCID: 0000-0002-4928-7415
E-mail: klevtsov11948@mail.ru

Михаил Леонидович Линдеров, *к.ф.-м.н., старший научный сотрудник НИИ прогрессивных технологий*, Тольяттинский государственный университет
ORCID: 0000-0001-8655-4191
E-mail: dartvi@gmail.com

Наталья Артуровна Клевцова, *д.т.н., доцент, профессор кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»*, Тольяттинский государственный университет
ORCID: 0000-0001-8667-656X
E-mail: inshtet@mail.ru

Максим Викторович Фесенюк, *к.т.н., начальник отдела*, АО «ПО «Стрела»
ORCID: 0000-0002-4584-6638
E-mail: maksim_fesenyuk@mail.ru

Максим Николаевич Тюрьков, *к.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой «Прикладная механика и инженерная графика»*, Тольяттинский государственный университет
ORCID: 0000-0002-1828-6102
E-mail: turkovmn@mail.ru

Ирина Николаевна Пигалева, *заведующий лабораторией кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»*, Тольяттинский государственный университет
E-mail: irina1.985@mail.ru

Gennadii V. Klevtsov, *Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Welding, Pressure Processing and Related Processes*, Togliatti State University
ORCID: 0000-0002-4928-7415
E-mail: klevtsov11948@mail.ru

Mikhail L. Linderov, *Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher of the Research Institute of Advanced Technologies*, Togliatti State University
ORCID: 0000-0001-8655-4191
E-mail: dartvi@gmail.com

Natal'ya N. A. Klevtsova, *Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Prof. of the Chair of Welding, Pressure Processing and Related Processes*, Togliatti State University
ORCID: 0000-0001-8667-656X
E-mail: inshtet@mail.ru

Maksim V. Fesenyuk, *Cand. Sci. (Eng.), Head of the Division*, JSC Production Association "Strela"
ORCID: 0000-0002-4584-6638
E-mail: maksim_fesenyuk@mail.ru

Maksim N. Tyur'kov, *Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assist. Prof., Head of the Chair of Applied Mechanics and Engineering Graphics*, Togliatti State University
ORCID: 0000-0002-1828-6102
E-mail: turkovmn@mail.ru

Irina N. Pigaleva, *Head of Laboratory of the Chair of Welding, Pressure Processing and Related Processes*, Togliatti State University
E-mail: irina1.985@mail.ru

Вклад авторов / Contribution of the Authors

Г. В. Клевцов – научное руководство.
М. Л. Линдеров – проведение испытаний на K_{1C}.
Н. А. Клевцова – расчет характеристик материала при растяжении и кручении.
М. В. Фесенюк – проведение испытаний на кручение.
М. Н. Тюрьков – макро- и микрофрактография изломов.
И. Н. Пигалева – проведение низкотемпературных испытаний на K_{1C}.

G. V. Klevtsov – scientific guidance.
M. L. Linderov – conducting tests on K_{1C}.
N. A. Klevtsova – calculation of material properties under tension and torsion.
M. V. Fesenyuk – conducting torsion tests.
M. N. Tyur'kov – macro- and microfractography of fractures.
I. N. Pigaleva – conducting low-temperature tests on K_{1C}.

Поступила в редакцию 02.12.2025
После доработки 23.01.2026
Принята к публикации 03.04.2026

Received 02.12.2025
Revised 23.01.2026
Accepted 03.04.2026