

УДК 620.178.74

DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-48-55

## АНАЛИЗ ХЛАДОСТОЙКОСТИ МЕТАЛЛОВ С РАЗЛИЧНЫМ ТИПОМ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ \*

**Ю. Г. Кабалдин**, доктор технических наук, профессор, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

**А. А. Хлыбов**, доктор технических наук, профессор, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

**М. С. Аносов**, кандидат технических наук, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

**Д. А. Шатагин**, кандидат технических наук, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

**Д. А. Рябов**, аспирант, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

*Целью настоящего исследования является оценка хладостойкости металлов с различным типом кристаллического строения, применяемых для изготовления конструкций и узлов, эксплуатирующихся в широком диапазоне низких температур.*

*Для решения поставленной цели проведены испытания на ударный изгиб исследуемых металлов в диапазоне температур климатического холода с последующим исследованием изломов металлов.*

*Исследования проводились с использованием методов оптической и электронной микроскопии, фрактрографических исследований и рентгеноструктурного анализа. В ходе исследования получены данные по изменению ударной вязкости, механизмам разрушения металлов для широкого диапазона низких температур, а также температуре вязкохрупкого перехода и параметру кристаллической решетки исследуемых металлов.*

*Установлено, что материалы с ГЦК- и ГПУ-решеткой проявляют большую сопротивляемость разрушению при низких температурах и имеют, как правило, больший параметр кристаллической решетки по сравнению с металлами с ОЦК-решеткой. Вязкохрупкий переход в рассматриваемом диапазоне температур наблюдается только для металлов с ОЦК-решеткой. Металлы с низким содержанием углерода проявляют большую сопротивляемость разрушению при ударных нагрузках, и температура вязкохрупкого перехода для таких сталей ниже.*

**Ключевые слова:** ударная вязкость, хладостойкость, вязкохрупкий переход, параметр решетки.

### Введение

**Д**ля Российской Федерации ускоренное развитие северных районов и Арктики, включая побережье и шельф арктических морей, является важным условием повышения экономического потенциала [1, 2]. Прежде всего оно означает развитие базовых отраслей промышленности (горнодобывающей, нефтяной и газовой) с созданием соответствующей инфраструктуры, транспорта, связи. Интенсивность выхода из строя различного рода металлических конструкций и механизмов машин в условиях эксплуатации при пониженных температурах возрастает до 7 раз, а для отдельных деталей – до 16 раз [3]. В связи с этим задача обеспечения безопасности тех-

нических объектов в регионах холодного климата является актуальной.

Повышение надежности машин и сооружений, работающих в условиях Крайнего Севера и Арктики, достигается прежде всего за счет правильного выбора и использования хладостойких материалов [4, 5], которые способны безотказно работать до температур климатического холода, а именно до  $-60^{\circ}\text{C}$  и ниже.

В настоящее время разработано большое количество хладостойких материалов (хладостойкие стали, алюминиевые, титановые, медные сплавы и т. д.) [6, 7]. Однако для выбора наиболее подходящего материала для конкретных эксплуатационных условий необходимо учитывать комплекс механических свойств, которые

© Кабалдин Ю. Г., Хлыбов А. А., Аносов М. С., Шатагин Д. А., Рябов Д. А., 2019

\* Исследование выполнено по гранту РФФИ № 19-19-00332 «Разработка научно обоснованных подходов и аппаратно-программных средств мониторинга поврежденности конструкционных материалов на основе подходов искусственного интеллекта для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов в арктических условиях».

обеспечит надежное функционирование технических систем в арктических условиях.

Важнейшим свойством хладостойких материалов является их способность сопротивляться ударным нагрузкам, особенно при низких температурах. Это связано с тем, что при понижении температуры эксплуатации значительно возрастает вероятность хрупкого разрушения материала. Как известно, хрупкое разрушение является одним из самых опасных видов разрушения, так как может происходить мгновенно и при сравнительно низких нагрузках, что приводит к огромным экономическим потерям [8]. Для оценки способности металлов сопротивляться хрупкому разрушению наиболее распространены динамические испытания на ударный изгиб с последующими фратографическими исследованиями излома образца [9–11]. Такие испытания в настоящее время являются наиболее надежным методом

оценки температуры вязкохрупкого перехода металла.

При этом температура вязкохрупкого перехода должна быть ключевым показателем для выбора материала для изготовления конструкций или механизмов с учетом температуры их эксплуатации.

Таким образом, целью настоящего исследования является оценка хладостойкости материалов с различным типом кристаллического строения в широком диапазоне низких температур.

**Материалы и методы исследования**

Для исследований и выявления особенностей разрушения материалов были выбраны металлы с различными типами кристаллического строения: ОЦК (стали 20, 45, 09Г2С), ГЦК (сталь 12Х18Н10Т и алюминиевый сплав Д16) и ГПУ (титановый сплав ВТ8).

Химический состав исследуемых материалов приведен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав материалов

Table 1. Chemical composition of materials

Материал	Массовая доля элементов, %													
	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Fe	Ti	Al	Mg	Mo	Zr
Сталь 20	0,19	0,25	0,55	–	0,009	0,02	0,05	–	Основа	–	–	–	–	–
Сталь 45	0,44	0,2	0,71	–	0,011	0,024	0,2	0,05		–	–	–	–	–
09Г2С	0,11	0,65	1,42	0,15	0,008	0,016	0,18	0,12		–	–	–	–	–
12Х18Н10Т	0,11	0,7	0,16	10,2	0,012	0,008	18,16	–		0,6	–	–	–	–
Д16		0,27	0,59	0,08	–	–	0,02	4,15	0,03	0,02	92,6	1,4	–	–
ВТ8	0,02	0,32	–	–	–	–	–	–	0,01	89,35	6,6	–	3,41	0,18

Материалы были подвергнуты ТО по режимам, указанным в табл. 2.

Исследования проводили на образцах типа Шарпи с V-образным концентратором (рабочее сечение 8×10), изготовленных в соответствии с требованиями ГОСТ 9454–78 «Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах».

Таблица 2. Режимы ТО исследуемых материалов

Table 2. Modes of heat treatment of the studied materials

Материал	Вид ТО
Сталь 20	Нормализация 920 °С
Сталь 45	Нормализация 870 °С
09Г2С	Нормализация 930 °С
12Х18Н10Т	Закалка 1080 °С
Д16	Закалка 500 °С, естественное старение
ВТ8	Двойной отжиг 920 °С 2ч + 570 °С 1ч

Исследование микроструктуры проводилось на оптическом микроскопе KYENCE-VHX 1000. Фактографический анализ проводился с приме-

нением растрового электронного микроскопа JSM-3U. Доля вязкой и хрупкой составляющих определялась согласно ГОСТ Р ИСО 148-1–2013 «Материалы металлические. Испытание на ударный изгиб на маятниковом копре по Шарпи. Часть 1. Метод испытания».

Рентгеноструктурный анализ проводился на установке ДРОН-2 с использованием излучения Fe анода K<sup>α</sup> серии.

Испытания на ударный изгиб проводились на маятниковом копре МК-300 (запас потенциальной энергии копра 450 Дж) с использованием разработанного устройства для охлаждения образцов (рис. 1), принцип работы которого подробно описан в литературе.

Для регистрации температуры в процессе охлаждения образцов использовался датчик рt100 (контактного типа), диапазон температур –196...+100 °С (±1 °С).

Общий диапазон температур испытаний составил –100...+20 °С

С использованием разработанной камеры (см. рис. 1) осуществлялось охлаждение образцов до температуры испытания и выдержка не

менее 15 мин, после чего образцы испытывали на маятниковом копре с определением величины ударной вязкости (KCV).

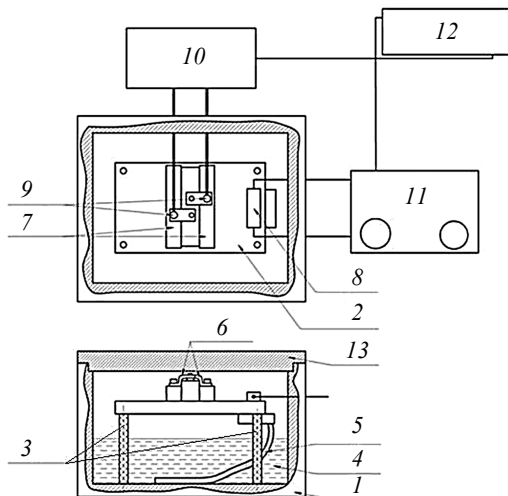


Рис. 1. Устройство для охлаждения образцов при испытании на ударный изгиб: 1 – корпус камеры; 2 – медная платформа; 3 – установочные стержни; 4 – хладагент; 5 – хладопровод; 6 – прижимы; 7 – образцы для испытания; 8 – резистор; 9 – датчики pt100; 10 – блок замера и контроля температуры; 11 – источник постоянного тока; 12 – ПК со специальным ПО; 13 – крышка камеры

Fig. 1. Device for cooling samples during impact bending testing: 1 - chamber body; 2 - copper platform; 3 - installation rods; 4 - refrigerant; 5 - cold line; 6 - clamps; 7 - samples for testing; 8 - resistor; 9 - pt100 sensors; 10 - block measuring and temperature control; 11 - a direct current source; 12 - PC with special software; 13 - camera cover

Подготовку к испытаниям, проведение испытаний и обработку результатов производили по ГОСТ 9454–78.

### Основные результаты и выводы

На рис. 2 показаны микроструктуры исследуемых материалов.

На рис. 3 показаны зависимости ударной вязкости от температуры испытания для исследуемых материалов.

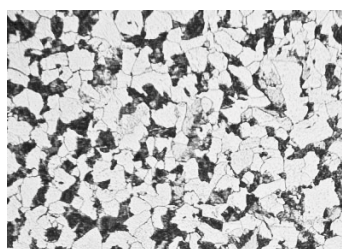
На рис. 3 зависимость ударной вязкости для алюминиевого сплава Д16 не показана, так как ударная вязкость в рассматриваемом диапазоне температур не изменяется и остается примерно 20 Дж/см<sup>2</sup>.

Характерные фрактограммы отдельных участков изломов образцов исследуемых материалов при температурах +20 и –60 °С показаны на рис. 4.

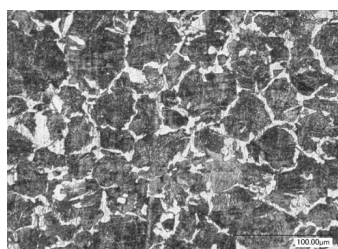
Как уже отмечалось, для повышения надежности функционирования узла или конструкции необходимо вводить ограничения для материала по минимальному значению ударной вязкости, которое в свою очередь определяет минимальную температуру эксплуатации. Чаще всего минимальная рабочая температура определяется температурой вязкохрупкого перехода, при которой значение ударной вязкости значительно снижается, а также значительно увеличивается вероятность хрупкого разрушения металла.

Для определения температуры вязкохрупкого перехода проводились фрактографические исследования изломов образцов с определением количества волокнистой (В) и хрупкой (Х) составляющих в изломе.

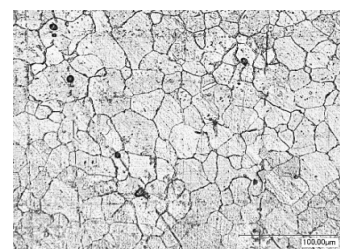
Зависимость количества волокнистой составляющей в изломеобразца (В, %) от температуры испытания для сталей 20, 45 и 09Г2С показана на рис. 5.



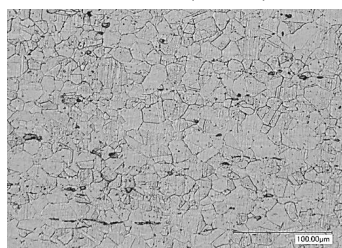
Сталь 20 (×1000)



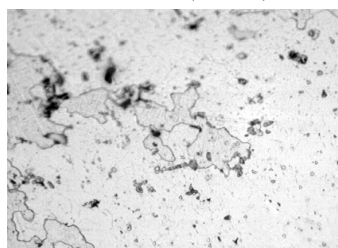
Сталь 45 (×1000)



09Г2С (×1000)



12Х18Н10Т (×1000)



Д16 (×1000)



ВТ8 (×500)

Рис. 2. Микроструктуры исследуемых материалов

Fig. 2. Microstructures of the studied materials

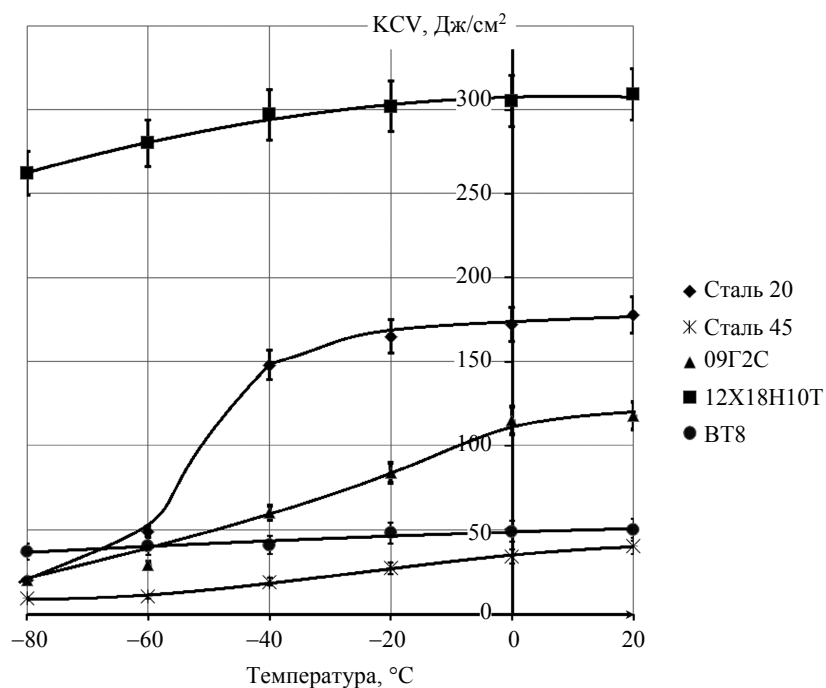


Рис. 3. Зависимости ударной вязкости от температуры для исследуемых материалов

Fig. 3. Temperature dependencies of impact strength

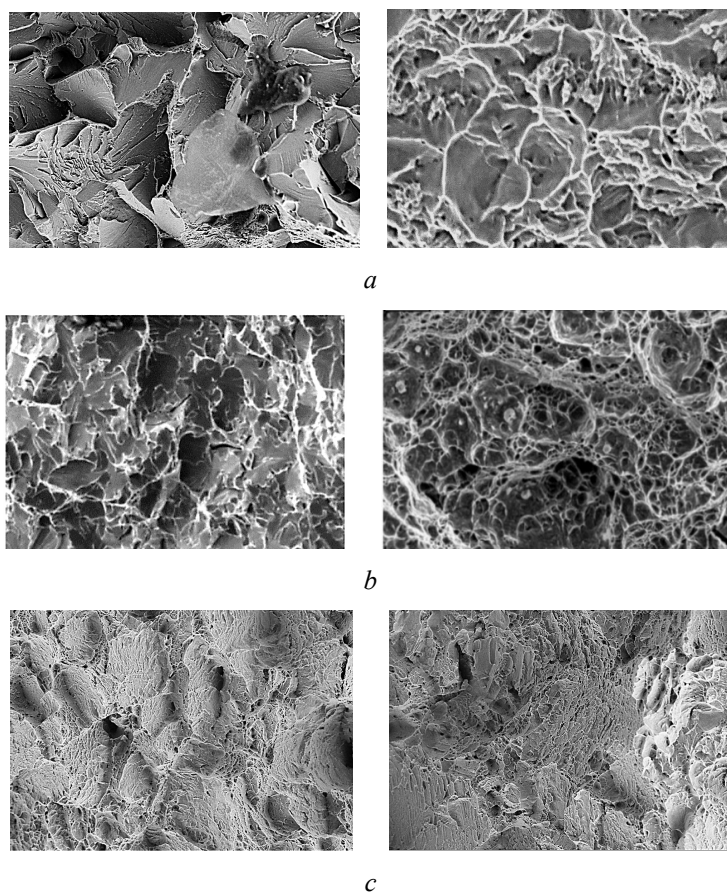


Рис. 4. Фрактограммы отдельных участков изломов образцов при температурах +20 (справа) и -60 (слева) °C: a – для стали 45; b – 09Г2С; c – VT8

Fig. 4. Fractograms of individual sections of fractures of samples at temperatures of +20 (right) and -60 (left) °C: a - for steel 45; b - 09Mn2Si; c - VT8

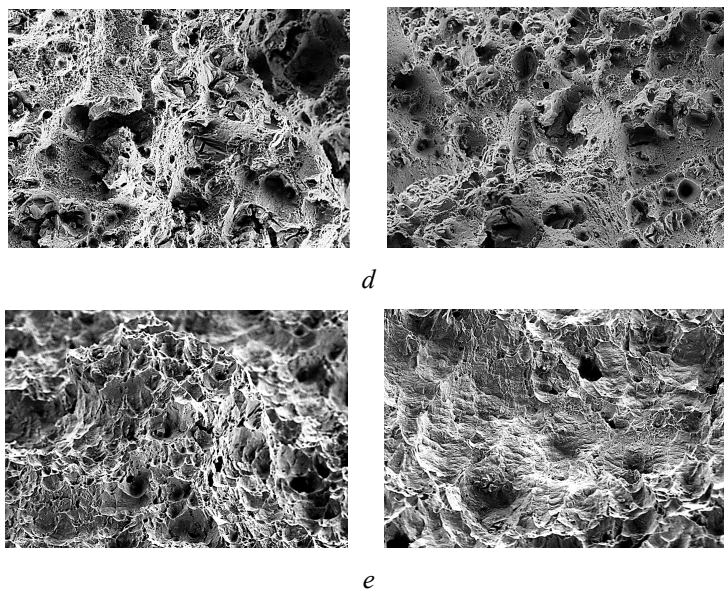


Рис. 4 (окончание). Фрактограммы отдельных участков изломов образцов при температурах +20 (справа) и -60 (слева) °С: *d* – Д16; *e* – 2Х18Н10Т

Fig. 4 (continued). Fractograms of individual sections of fractures of samples at temperatures of +20 (right) and -60 (left) °C: *d* - D16; *e* - 12Cr18Ni10Ti

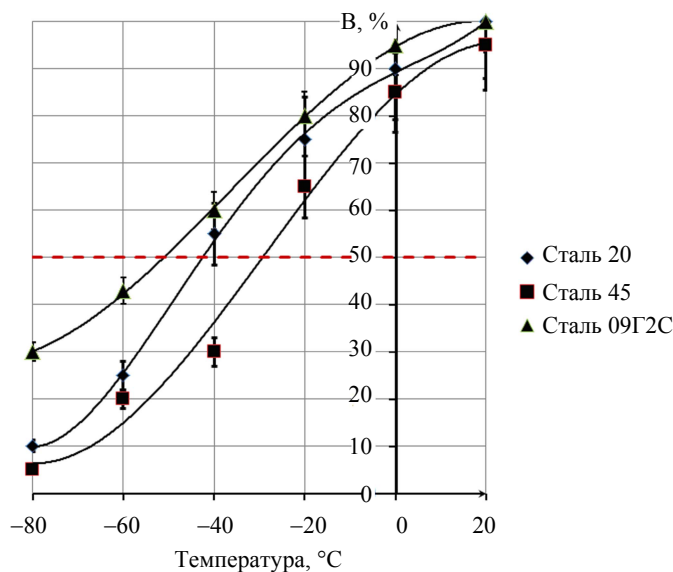


Рис. 5. Зависимость количества волокнистой составляющей, %, в изломе образцов от температуры испытания для исследуемых материалов

Fig. 5. Dependence of the amount of the fibrous component, %, in the fracture of the samples on the test temperature for the studied materials

Анализ зависимостей ударной вязкости (см. рис. 3) и результатов фрактографических исследований изломов металлов (см. рис. 5) показывает следующее.

1. Для металлов с ОЦК-решеткой (сталь 20, сталь 45 и 09Г2С) наблюдается значительное снижение ударной вязкости в рассматриваемом диапазоне температур (в 5-9 раз при  $t = -80$  °С относительно  $t = +20$  °С). Температура вязкохрупкого перехода составила: для стали 09Г2С

$\approx -52$  °С; стали 20  $\approx -43$  °С; стали 45  $\approx -28$  °С (см. рис. 5). Таким образом, металлы с низким содержанием углерода (сталь 20 и 09Г2С) проявляют большую сопротивляемость разрушению при ударных нагрузках (имеют более высокие значения ударной вязкости) и имеют более низкую температуру вязкохрупкого перехода. Для рассматриваемых металлов при комнатной температуре реализуются механизмы преимущественно вязкого (ямочного) раз-

рушения ( $B = 95...100 \%$ ). При понижении в изломе обнаруживаются фасетки скола и межзеренного разрушения (см. рис. 4).

2. Для металлов с ГЦК-решеткой (сталь 12Х18Н10Т и сплав Д16) наблюдается менее интенсивное падение ударной вязкости с понижением температуры относительно металлов с ОЦК-решеткой (см. рис. 3). Так, у алюминиевого сплава Д16 уровень ударной вязкости не изменяется с понижением температуры, однако находится на сравнительно низком уровне –  $\approx 20$  Дж/см<sup>2</sup>. Сталь 12Х18Н10Т значительно превосходит все исследуемые материалы по уровню ударной вязкости. При снижении температуры до температур климатического холода ( $t = -60$  °С) уровень ударной вязкости сохраняется на уровне 280 Дж/см<sup>2</sup>, что объясняется высоким содержанием в ней никеля. Форма излома стали 12Х18Н10Т сильно искажена, особенно при  $t = +20$  °С, что говорит о высокой пластичности данного материала, которая сохраняется на высоком уровне даже при температуре  $-80$  °С.

3. Титановый сплав ВТ8 (ГПУ-решетка) по сравнению со сталью 45 и сплавом Д16 практически в 2 раза превосходит их по уровню ударной вязкости, которая, как видно из зависимости (см. рис. 3), меняется с меньшей интенсивностью. ВТ8 имеет значительный запас ударной вязкости при температуре  $t = -60$  °С, которая сохраняется на уровне  $KCV = 40$  Дж/см<sup>2</sup>.

Анализ фрактограмм алюминиевого сплава Д16, стали 12Х18Н10Т, а также титанового сплава ВТ8 показал, что в рассматриваемом диапазоне температур преобладает волокнистая составляющая в изломах образцов. С понижением температуры для вязкого разрушения размер чашек в изломе уменьшается, что свидетельствует о снижении пластичности исследуемых материалов.

Полученные результаты рентгеноструктурного анализа свидетельствует о связи хладноломкости металлов с типом кристаллической решетки (табл. 3).

Таблица 3. Связь параметра решетки с температурой  $T_{50}$

Table 3. Relation of the lattice parameter to temperature

Материал	Параметр решетки, нм	$T_{50}$ , °С
Сталь 45	0,2775	-28
Сталь 20	0,2886	-43
09Г2С	0,2869	-52
12Х18Н10Т	0,3573	Ниже -100
ВТ8	0,2932	
Д16	0,4054	

Причем металлам с ГЦК- и ГПУ-решеткой соответствуют более низкие температуры перехода из вязкого состояния в хрупкое (сталь 12Х18Н10Т и титановый сплав ВТ8) [12]. Наличие связи температуры вязкохрупкого перехода испытанных металлов с типом их кристаллических решеток связано, по-видимому, с его влиянием на подвижность дислокаций. В металлах с ГЦК-решеткой подвижность дислокаций выше [13], чем в металлах с ОЦК-решеткой.

Анализ проведенных исследований показывает, что материалы с ГЦК-решеткой (стали аустенитного класса и алюминиевый сплав Д16) и ГПУ-решеткой (титановые сплавы) проявляют большую сопротивляемость разрушению при низких температурах. Вязкохрупкий переход в рассматриваемом диапазоне температур наблюдается только для металлов с ОЦК-решеткой.

Предположительным механизмом вязкохрупкого перехода в ОЦК-сталях является дислокационно-фононный. Хрупкое разрушение обусловлено флуктуациями на очагах в виде микропор микротрещин и дальнейшим их ростом по дислокационному механизму. Ответственными за разрыв связей становится неупругое рассеяние фононов, а также внешние растягивающие напряжения [14].

Наличие вязкохрупкого перехода в металлах с ОЦК-решеткой связывают с внутренним трением в металлах, которое в значительной степени влияет на подвижность дислокаций. Так, в металлах с ОЦК-решеткой при температурах ниже  $T_{50}$  наблюдается низкий, значительно меньший, чем в ГЦК-металлах, уровень внутреннего трения (сухое трение), а при температурах выше  $T_{50}$  – резкое увеличение внутреннего трения (вязкого торможения дислокаций).

В ряде работ указывается [15], что вязкохрупкий переход связан со сменой механизма торможения дислокаций. Если при высоких температурах торможение дислокаций с ростом температуры преобладает фононовое торможение дислокаций, то при низких температурах торможение дислокаций связано с электронной составляющей. Анализ показывает, что температура вязкохрупкого перехода определяется свойствами металлов.

В заключение отметим, что в ряде работ [16–20] изучались методы повышения хладостойкости низкоуглеродистой стали с ОЦК-структурой с различным структурным состоянием и при различных видах испытаний. Отмечено влияние легирующих элементов на вязкохрупкий переход при измерении ударной вязкости образцов и его отсутствие при испытаниях на растяже-

нии. Как отмечают авторы работы, исчерпывающего ответа на это пока нет.

### Библиографические ссылки

1. Лажнецов В. Н. Социально-экономическое пространство и территориальное развитие Севера и Арктики России // Экономика региона. 2018. Т. 14, вып. 2. С. 353–365.

2. Экономическая безопасность Российской Арктики: особенности и проблемы обеспечения / под науч. ред. В. С. Селина, Т. П. Скуфьиной, Е. П. Башмаковой, М. В. Ульченко. Апатиты : КНЦ РАН, 2018. 103 с.

3. Повышение эффективности работы транспорта в условиях Крайнего Севера и Сибири / Ю. А. Зиновьев, И. О. Леушин [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. 2013. № 1 (98). С. 236–241.

4. Горынин И. В. Конструкционные материалы – важный компонент надежности и экологической безопасности инфраструктуры Арктики // Арктика: экология и экономика. 2015. № 3 (19). С. 82–87.

5. Солнцев Ю. П., Ермаков Б. С., Слепцов О. И. Материалы для низких и криогенных температур : энциклопедический справочник. СПб. : ХИМИЗДАТ, 2008. 768 с. : ил. ISBN 978-5-93808-157-4.

6. Орыщенко А. С., Мальшевский В. А., Хлусова Е. И. Современные конструкционные стали для Арктики // Судостроение. 2013. № 3. С. 46–49.

7. Кабалдин Ю. Г., Аносов М. С., Зиновьев Ю. А. Исследование хладостойкости материалов для ответственных узлов технических средств, работающих при низких температурах // Машиностроение. 2016. Т. 4, № 2. С. 14–17.

8. Горицкий В. М. Диагностика металлов. М. : Metallurgizdat, 2004. 408 с.

9. Лебедев Д. В. Конструктивная прочность криогенных сталей. М. : Metallurgija, 1976. 264 с.

10. Новиков Н. В., Лебедев А. А., Ковальчук Б. И. Механические испытания конструкционных материалов при низких температурах. Киев : Наукова думка, 1974. 192 с.

11. Чернов В. М., Кардашев Б. К., Мороз К. А. Хладноломкость и разрушение металлов с разными кристаллическими решетками // Дислокационные механизмы : Журнал технической физики. 2016. № 7. С. 57–64.

12. Kabaldin Y.G., Anosov M.S., Zhelonkin M.V. Russ. Engin. Res. (2018) 38: 848. <https://doi.org/10.3103/S1068798X18110047>.

13. Судзуки Т., Есинова Х., Такеути С. Динамика дислокаций и пластичность : пер. с яп. М. : Мир, 1989. 296 с.

14. Ачикасова В. С., Лепов В. В. Низкотемпературный вязкохрупкий переход и внутреннее трение // Наука и образование. 2015. № 1. С. 75–77.

15. Внутреннее трение и хрупковязкий переход в конструкционных сталях / Б. К. Кандрашов, А. С. Нефагин, Г. Н. Ермолаев [и др.] // Письмо в ЖТФ. 2008. Т. 2, вып. 18. С. 44–49.

16. О природе хрупкой прочности сталей с ОЦК-структурой / В. Е. Панин [и др.] // Физическая мезомеханика. 2013. Т. 16, № 33-12. С. 5–12.

17. Семенов Я. С. Теория вязкохрупкого перехода сталей и сплавов железа. Обоснование механизма вязкохрупкого перехода // ДАН. 2007. Т. 416, № 6. С. 780–783.

18. Хладостойкость материалов и элементов конструкций: результаты и перспективы / В. П. Ларионов, В. Р. Кузьмин, О. И. Слепцов [и др.]. Новосибирск : Наука, 2005. 290 с.

19. Ларионов В. П., Семенов Я. С. Физические основы вязкохрупкого перехода низколегированных сталей и сплавов железа. Новосибирск : Наука, 1992. 171 с.

20. Kabaldin Y.G., Anosov M.S., Shatagin D.A. Russ. Engin. Res. (2017). 37: 866. <https://doi.org/10.3103/S1068798X17100124>.

### References

1. Lazhencev V.N. [Socio-economic space and territorial development of the North and the Arctic of Russia]. *Jekonomika regiona*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 353-365 (in Russ.).

2. Selin V.S., Skufina T.P., Bashmakova E.P., Ul'chenko M.V. (eds.). *Jekonomicheskaja bezopasnost' Rossijskoj Arktiki: osobennosti i problemy obespechenija* [Economic security of the Russian Arctic: features and problems of ensuring]. Apatity, KNC RAN Publ., 2018, 103 p. (in Russ.).

3. Zinov'ev Ju.A., Leushin I.O. *Povyshenie effektivnosti raboty transporta v usloviyakh Krainego Severa i Sibiri* [Improving transport performance in the extreme north and Siberia]. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R. E. Alekseeva* [Proc. of the Nizhny Novgorod State Technical University. R. E. Alekseeva], 2013, vol. 98, no. 1, pp. 236-241 (in Russ.).

4. Gorynin I.V. [Structural materials are an important component of the reliability and environmental safety of the Arctic infrastructure]. *Arktika: jekologija i jekonomika*, 2015, vol. 19, no. 3, pp. 82-87 (in Russ.).

5. Solncev Ju.P., Ermakov B.S., Slepcov O.I. *Materialy dlja nizkih i kriogennyh temperatur* [Materials for low and cryogenic temperatures]. St. Petersburg, Khimizdat Publ., 2008, 768 p. ISBN 978-5-93808-157-4 (in Russ.).

6. Oryshhenko A.S., Malyshevskij V.A., Hlusova E.I. [Modern structural steels for the Arctic]. *Sudostroenie*, 2013, no. 3, pp. 46-49 (in Russ.).

7. Kabaldin Ju.G., Anosov M.S., Zinov'ev Ju.A. [Study of the cold resistance of materials for critical components of technical equipment operating at low temperatures]. *Mashinostroenie*, 2016, vol. 4, no. 2, pp. 14-17 (in Russ.).

8. Gorickij V.M. *Diagnostika metallov* [Diagnostics of metals]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 2004, 408 p. (in Russ.).

9. Lebedev D.V. *Konstruktivnaja prochnost' kriogennyh stalej* [Structural strength of cryogenic steels]. Moscow, Metallurgija Publ., 1976, 264 p. (in Russ.).

10. Novikov N.V., Lebedev A.A., Koval'chuk B.I. *Mehanicheskie ispytaniya konstrukcionnyh materialov pri nizkih temperaturah* [Mechanical testing of structural materials at low temperatures]. Kiev, Haykova dumka Publ., 1974, 192 p. (in Russ.).
11. Chernov V.M., Kardashev B.K., Moroz K.A. [Cold brittleness and fracture of metals with different crystal lattices]. *Dislokatsionnye mekhanizmy*, 2016, no. 7, pp. 57-64 (in Russ.).
12. Kabaldin Y.G., Anosov M.S., Zhelonkin M.V. Russ. Engin. Res. (2018) 38: 848. <https://doi.org/10.3103/S1068798X18110047>.
13. Sudzuki T., Esinava H., Takeuti S. *Dinamika dislokatsii i plastichnost'* [Dislocation dynamics and ductility]. Moscow, Mir Publ., 1989, 296 p. (in Russ.).
14. Achikasova V.S., Lepov V.V. [Low temperature viscous-brittle transition and internal friction]. *Nauka i obrazovanie*, 2015, no. 1, pp. 75-77 (in Russ.).
15. Kandrashov B.K., Nefagin A.S., Ermolaev G.N. [Internal friction and brittle-ductile transition in structural steels]. *Pis'mo v ZhTF*, 2008, vol. 2, no. 18, pp. 44-49 (in Russ.).
16. Panin V.E. [On the nature of the brittle strength of steels with a body-centered structure]. *Fizicheskaja mezomehanika*, 2013, vol. 16, no. 33-12, pp. 5-12 (in Russ.).
17. Semenov Ja.S. [The theory of visco-brittle transition of steels and iron alloys. Justification of the mechanism of viscous-brittle transition]. *DAN*, 2007, vol. 416, no. 6, pp. 780-783 (in Russ.).
18. Larionov V.P., Kuz'min V.R., Slepcev O.I. *Hladostojkost' materialov i jelementov konstrukcij: rezul'taty i perspektivy* [Cold resistance of materials and structural elements: results and prospects]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005, 290 p. (in Russ.).
19. Larionov V.P., Semenov Ja.S. *Fizicheskie osnovy vjazkohrupkogo perehoda nizkolegirovannyh stalej i splavov zheleza* [Physical principles of the viscous-brittle transition of low alloy steels and iron alloys]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1992, 171 p. (in Russ.).
20. Kabaldin Y.G., Anosov M.S., Shatagin D.A. Russ. Engin. Res. (2017). 37: 866. <https://doi.org/10.3103/S1068798X17100124>.

### Evaluation of Cold Resistance of Metals with Various Type of Crystal Structure

*Yu.G. Kabaldin*, DSc in Engineering, Professor, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

*A.A. Khlybov*, DSc in Engineering, Professor, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

*M.S. Anosov*, PhD in Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

*D.A. Shatagin*, PhD in Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

*D.A. Ryabov*, Post-graduate, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

*The purpose of this study is to evaluate the cold resistance of metals with various types of crystalline structures, which are widely used for the manufacture of structures and assemblies operating in a wide range of low temperatures.*

*To achieve this goal, we tested the shock bending of the studied metals in the temperature range of climatic cold, followed by the study of metal fractures.*

*The studies were carried out using methods of optical and electron microscopy, fractographic studies and X-ray diffraction analysis. In the course of the study, data were obtained on the change in toughness, metal fracture mechanisms for a wide range of low temperatures, as well as the temperature of the viscous-brittle transition and the crystal lattice parameter of the studied metals.*

*It has been established that materials with a face-centered cube lattice and a densely packed hexagonal lattice are more resistant to fracture at low temperatures and, as a rule, have a larger crystal lattice parameter compared to metals with a lattice-centered cube. A viscous-brittle transition in the considered temperature range is observed only for metals with a lattice of a body-centered cube. Metals with a low carbon content exhibit greater resistance to fracture under impact loads; and the temperature of the ductile-brittle transition for such steels is lower.*

**Keywords:** impact strength; cold resistance; viscous-brittle transition; lattice parameter.

Получено 05.09.2019

### Образец цитирования

Анализ хладостойкости металлов с различным типом кристаллического строения / Ю. Г. Кабалдин, А. А. Хлыбов, М. С. Аносов, Д. А. Шатагин, Д. А. Рябов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019 Т. 22, № 3. С. 48–55. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-48-55.

### For Citation

Kabaldin Yu.G., Khlybov A.A., Anosov M.S., Shatagin D.A., Ryabov D.A. [Analysis of cold resistance of metals with various types of crystalline structure]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 3, pp. 48-55 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-48-55.