

DOI: 10.24000/0409-2961-2021-5-

УДК 620.171.2

© Коллектив авторов, 2021

# О методах оценки сопротивления сталей хрупкому разрушению



**А.П. Корчагин,**  
канд. техн. наук, вед.  
науч. сотрудник



**К.А. Кузнецов,**  
канд. техн. наук, первый зам.  
ген. директора,  
k.kuznetsov@hm.irk.ru



**А.М. Кузнецов,**  
д-р техн. наук,  
ген. директор



**С.И. Кириллов,**  
зав. испытательным  
центром

АО «ИркутскНИИхиммаш», Иркутск, Россия

Стандартные прочностные расчеты, устанавливающие безопасные размеры элементов конструкций с учетом прочностных характеристик материала (предел текучести и временное сопротивление) и нормативных коэффициентов запасов прочности, не дают представления о надежности материала в конструкции, о его способности противостоять образованию трещин и последующему их развитию под действием фактических напряжений в детали. В результате многочисленных экспериментальных исследований найдены и внесены в нормативные документы определенные критериальные численные значения ударной вязкости, устанавливающие границу между областью нахождения металла в вязком состоянии и переходом из вязкого состояния в хрупкое.

**Ключевые слова:** сопротивление сталей, хрупкое разрушение, критическая температура хрупкости, коэффициент интенсивности напряжений, разрушение оборудования, корреляционные зависимости.

**Для цитирования:** Корчагин А.П., Кузнецов К.А., Кузнецов А.М., Кириллов С.И. О методах оценки сопротивления сталей хрупкому разрушению // Безопасность труда в промышленности. — 2021. — № 5. — С. . DOI: 10.24000/0409-2961-2021-5-

## Введение

В данной публикации представлены результаты наработок сотрудников АО «ИркутскНИИхиммаш» в области хрупкого разрушения сталей начиная с 1980 г.

Проблема оценки работоспособности сталей, их устойчивости против хрупкого разрушения в конструкциях, используемых в нефтехимической, энергетической, газовой и других отраслях промышленности, продолжает оставаться актуальной как при создании новых образцов техники, так и при оценке ресурса работоспособности уже эксплуатирующихся сосудов, аппаратов, резервуаров, газгольдеров, трубчатых печей, трубопроводов и др.

Существуют различные подходы к количественной оценке сопротивления сталей и стальных конструкций хрупкому разрушению. Наиболее распространенным способом в течение длительного времени традиционно остается испытание на ударный изгиб, благодаря простоте его реализации.

### Способы оценки сопротивления сталей хрупкому разрушению

Величина ударной вязкости (работа разрушения образца) рассматривается специалистами как ин-

тегральная характеристика материала, содержащая информацию о двух ее составляющих: работе зарождения ( $a_z$ ) и развития трещины ( $a_p$ ).

Составляющие ударной вязкости в первом приближении могут быть определены по результатам испытаний на удар образцов с остротой надреза 1 и 0,25 мм (с U- и (или) V-надрезом) в предположении, что ударная вязкость линейно зависит от радиуса в вершине надреза [1].

Путем несложных графических построений или математических расчетов можно определить аз и ар, линейно экстраполируя значения ударной вязкости образцов с надрезом радиусом 0,25 и 1 мм на образец с бесконечно малым радиусом при вершине (приближается к нулю), имитирующим трещину. По этой методике проведены испытания сталей марок 18Г2АФ, 30ХГСА, 17ГС после различной термообработки и определены значения составляющих ударной вязкости.

Однако широкого распространения эта методика не получила в связи с необходимостью изготовления двойного количества образцов, что не всегда возможно из-за отсутствия необходимого количества металла.

Работа зарождения и развития трещины также может быть определена в случае, если в конструкции маятникового копра предусмотрен осциллограф для записи диаграммы динамического разрушения ударного образца. Данные о составляющих ударной вязкости, полученные на основании осциллографии, являются наиболее достоверными.

Однако большинство маятниковых копров не укомплектовано осциллографами, и испытания на ударную вязкость проводятся без регистрации диаграммы разрушения.

В силу вышеназванных причин составляющие ударной вязкости в отличие от ее интегральной величины пока не являются нормируемыми характеристиками стали и не используются в расчетах на хрупкую прочность. В расчетах элементов конструкций на хрупкую прочность не учитывается и ударная вязкость. По результатам испытаний на ударную вязкость можно ранжировать стали по их склонности к хрупкому разрушению и лишь косвенно прогнозировать опасность хрупкого разрушения конструкции.

В процессе изготовления заготовок из листового и фасонного проката, труб, поковок, литья в них образуются несплошности (дефекты). При неразрушающем контроле заготовок, предусмотренном техническими условиями, всегда существует вероятность пропустить дефект. Поэтому в заготовках и, соответственно, в изготовленных из них изделиях остаются невыявленные дефекты технологического, а также конструктивного происхождения.

Для предупреждения развития такого рода дефектов в процессе эксплуатации конструкции у металла, предназначенного для ее изготовления, должны быть определены характеристики трещиностойкости (вязкости разрушения), чтобы расчетным путем оценить сопротивление материала хрупкому разрушению.

Количественная оценка сопротивления материалов хрупкому разрушению крайне актуальна в связи с выбором материалов для аппаратуры атомных энергетических установок, где повреждения элементов конструкций из-за охрупчивающего эффекта нейтронного облучения грозят негативными экологическими последствиями. Это также важно в других отраслях промышленности, где повреждения оборудования могут представлять опасность для окружающей среды и здоровья человека.

Прогнозирование и расчет устойчивости элементов конструкций против хрупкого разрушения получили импульс в связи с развитием нового направления в материаловедении — линейной механики разрушения, применяя положения которой можно с достаточной степенью точности оценить размеры дефектов, представляющих опасность для их последующей эксплуатации.

Способность материала элементов конструкций сопротивляться хрупкому разрушению в этом случае оценивается по величине критерия вязкости разрушения  $K_{1C}$  (критического коэффициента ин-

тенсивности напряжений), определяемого экспериментальным путем.

По величине  $K_{1C}$ , пользуясь методами линейной механики разрушения, оценивают опасность хрупких разрушений конструкций, в материале которых может иметь место сочетание плоского напряженного состояния (плоской деформации) с трещиноподобными дефектами (концентраторами напряжений) технологического или конструктивного происхождения.

Располагая данными о коэффициенте интенсивности напряжений  $K_{1C}$ , можно расчетным путем определить максимально допустимые размеры (глубину и длину) дефектов в металле элементов конструкций, не приводящие к ее разрушению, что является крайне важным при оценке их работоспособности.

Коэффициент интенсивности напряжений, если рассматривать его как характеристику материала, может использоваться для расчета хрупкой прочности, если при его определении обеспечены специальные условия: состояние плоской деформации в вершине трещины и соответствующее соотношение между геометрическими размерами образца (или изделия) и шириной пластически деформированной зоны в вершине трещины. В отечественной практике порядок и методика определения вязкости разрушения (критического коэффициента интенсивности напряжений) установлены в ГОСТ 25.506—85 [2]. Определение характеристики  $K_{1C}$  методически сложно выполнимо. Для экспериментального нахождения  $K_{1C}$  требуются специальное оборудование, крупногабаритные образцы с выращенной определенным способом трещиной. В отличие от известных способов оценки характера разрушения сталей и сплавов (испытание на растяжение, ударный изгиб) определение  $K_{1C}$  возможно только в специально оснащенных лабораториях.

Следуя рекомендациям [2] и других нормативных документов, провести полноразмерную контрольную вырезку из действующей аппаратуры (стенки сосуда, резервуара, трубопровода и т.п.) с размерами, необходимыми для изготовления крупномасштабных образцов для определения численных значений критерия вязкости разрушения, организационно и технически достаточно сложно, а иногда практически невозможно, в том числе и по экономическим соображениям.

Методы механики разрушения позволяют расчетным путем устанавливать требования к  $K_{1C}$ , учитывая размеры наиболее вероятных и трудно обнаруживаемых дефектов.

Анализ имеющихся сведений относительно  $K_{1C}$  свидетельствует, что они касаются преимущественно определенного круга материалов — прежде всего сталей и сплавов, применяемых в ракетной, космической технике и ядерной энергетике, где накоплен значительный массив данных об этой характеристи-

ке. Это вполне объяснимо, так как именно в этих отраслях материаловедческие лаборатории всегда оснащались самым современным оборудованием, позволяющим находить фактические значения  $K_{1C}$  в соответствии со всем комплексом методических требований, которые должны выполняться при их определении.

Сложность прямого экспериментального определения  $K_{1C}$  в лабораториях, не оборудованных специальной аппаратурой, сдерживает его практическое применение в инженерных расчетах и регламентацию в технической документации на изготовление сталей.

Необходимость в сведениях о  $K_{1C}$  при оценке сопротивления сталей хрупкому разрушению заставляет искать иные пути установления этой характеристики, используя более простые и доступные методы испытаний, в том числе данные испытаний материала на ударную вязкость и осевое растяжение. Однако работы такого рода существенно усложняются тем, что процессы деформирования и разрушения ударных образцов при динамическом нагружении, а также схема и «жесткость» напряженного состояния при растяжении, характерная для одноосного растяжения (при определении предела текучести), существенно отличаются от напряженного состояния, реализующегося в условиях плоской деформации материала в вершине дефектов (трещин и т.п.).

Результаты исследований [3–6] свидетельствуют, что физической зависимости между величиной критического коэффициента интенсивности напряжений  $K_{1C}$  с ударной вязкостью KCV и с пределом текучести  $R_{0,2}$  не существует.

Однако в связи с исключительной важностью данных о  $K_{1C}$  при оценке сопротивления стали хрупкому разрушению уже на протяжении нескольких десятилетий предпринимаются попытки установить корреляционную зависимость между значением  $K_{1C}$  и характеристиками металла, определяемыми при стандартных механических испытаниях.

Одна из такого рода зависимостей предложена Дж. Барсомом и С. Рольфом [7]:

$$(K_{1C}/R_{0,2})^2 = (0,645/R_{0,2})(KCV - 0,00983R_{0,2}). \quad (1)$$

В последующем предлагалось достаточно много подобных корреляционных зависимостей, например:

$$(K_{1C}/R_{0,2})^2 = 1,41 \cdot 10^3 (KCV/R_{0,2})^{1,5}. \quad (2)$$

Опыт использования различных корреляционных зависимостей показал, что наилучшая корреляция между KCV,  $R_{0,2}$  и  $K_{1C}$  описывается соотношением Барсома и Рольфа.

В несколько трансформированном виде [8] это соотношение вошло в API 579-1/ASME FFS-1-2016 [9] в раздел F.4.5 «Оценка вязкости разрушения углеродистых и легированных сталей с помощью данных

по образцам Шарпи с V-образным надрезом» как корреляция Рольфа — Новака — Барсома:

$$(K_{1C}/R_{0,2})^2 = 0,64(KCV/R_{0,2} - 0,01). \quad (3)$$

В АО «ИркутскНИИхиммаш» с 1980 г. систематически ведутся работы по изучению сопротивления хрупкому разрушению сталей в температурном интервале от  $-40$  до  $20$  °С.

Эти работы проводятся в связи с необходимостью оценки сопротивления хрупкому разрушению металла резервуаров и шаровых емкостей для хранения нефтепродуктов, емкостей и ресиверов, сосудов и трубопроводов и других технических устройств, нагруженных внутренним давлением; бурильных труб в условиях воздействия низких климатических температур. Металл этих конструкций в процессе эксплуатации под воздействием низких климатических температур может переходить из вязкого состояния в хрупкое. Температурные зависимости ударной вязкости даже для одной марки стали могут иметь различный тренд.

Многолетние исследования механических свойств металла элементов технических устройств, изготовленных из различного сортамента, свидетельствуют, что заготовки (труба, лист, поковка), а также наклеп при их изготовлении, деформационное старение, длительное термическое воздействие оказывают определенное корректирующее влияние на вид температурной зависимости ударной вязкости даже для одной марки стали.

В институте накоплен значительный экспериментальный материал в виде температурных зависимостей ударной вязкости для материала различного вида заготовок (листов, труб, поковок) в состоянии поставки и для металла элементов технических устройств после их эксплуатации различной продолжительности.

Например, установлены температурные зависимости ударной вязкости углеродистых сталей марок Ст10кп, Ст10сп, Ст3кп, Ст3пс, С3сп, Ст20, кремний-марганцовистых сталей марок 09Г2С, 10Г2С1, 16ГС, 17Г1С и легированных сталей марок 15Х5М, 22Х3М, 25ХМФА, 20ХН2МФ, 20Х3МВФ, 13Х12Н2ВМФ, 20CrMoV135.

Построение температурных зависимостей (с коэффициентом достоверности не ниже 0,95) проводили по результатам серийных испытаний образцов с V-образным надрезом в температурном интервале от  $-40$  до  $20$  °С. В отдельных случаях испытания проходили как при более низких (до  $-70$  °С), так и при повышенных температурах  $350$ – $450$  °С.

При изготовлении и эксплуатации оборудования необходимо располагать данными о температуре, при которой сталь переходит из вязкого состояния в хрупкое, чтобы предупредить случаи поломки и выхода оборудования из строя. В инженерной практике в настоящее время при оценке сопротивления конструкций хрупкому разрушению используется

такая характеристика, как критическая температура хрупкости.

Считается, что при температурах ниже критической температуры хрупкости материал конструкции находится в хрупком состоянии, а при равных ей и более высоких температурах — в вязком. По существу критическая температура хрупкости  $T_k$  устанавливает для металла температурный предел его применения, безопасный с точки зрения предупреждения хрупкого разрушения конструкции.

Так, для перечисленных выше марок сталей на кривые температурной зависимости ударной вязкости KCV наносили критериальное значение ударной вязкости и определяли соответствующее ему значение температуры, которое и принимали за критическую температуру хрупкости  $T_k$ . Значения критических температур хрупкости  $T_k$  оценивали по нескольким принятым в настоящее время критериальным значениям ударной вязкости, исходя из рекомендаций отечественной нормативной документации для аппаратуры, работающей под избыточным давлением в атомной и теплоэнергетической отраслях [10, 11], и для вертикальных цилиндрических резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов [12].

При необходимости, используя температурные зависимости ударной вязкости, можно определить критическую температуру хрупкости и по иным критериальным значениям ударной вязкости.

В атомной энергетике, теплоэнергетике и применительно к аппаратуре высокого давления критериальные значения ударной вязкости предлагается оценивать более дифференцированно — с учетом прочностных характеристик материала. Это возможно осуществить и в рамках обобщенного авторами материала, например, в виде таблиц, в которых для каждой марки стали приводятся сведения о ее механических свойствах (пределе текучести и временном сопротивлении), а также о типе использованной заготовки (прокат, поковка и др.).

Используя температурные зависимости ударной вязкости и температурные тренды изменения величины предела текучести, по корреляционному соотношению (3) рассчитаны значения критического коэффициента интенсивности напряжений  $K_{1C}$  для некоторых марок сталей [13, 14].

В статье в обобщенном виде представлены температурные зависимости критического коэффициента интенсивности напряжений  $K_{1C}$ , располагая которыми можно расчетным способом оценить в первом приближении размеры трещин (глубину и длину), представляющих опасность с точки зрения хрупкого разрушения материала конструкции.

Для всей номенклатуры исследованных марок сталей в таблицах представлены подробные данные

об их химическом составе, типе заготовок и прочностных характеристиках.

Благодаря имеющейся информации (накопленные знания) при выборе марки стали и заготовки для вновь проектируемой конструкции, а также при оценке сопротивления хрупкому разрушению элементов уже действующего оборудования возможно без специальных исследований металла подобрать по таблицам ближайший (по химическому составу, типу заготовки и прочностным характеристикам) аналог и в первом приближении (не проводя контрольной вырезки из заготовки или элемента конструкции) определить для них численное значение ударной вязкости для любой температуры в диапазоне от  $-40$  до  $20$  °С, а также критическую температуру хрупкости и коэффициент интенсивности напряжений  $K_{1C}$ .

В этом и состоит главная практическая ценность представленных положений.

### Заключение

Необходимые для поиска аналога сведения о типе заготовки, ее фактическом химическом составе и прочностных характеристиках металла для вновь проектируемой конструкции или уже действующего оборудования могут быть (без изготовления образцов и их испытаний) получены следующими известными способами:

химический состав — портативным химическим анализатором;

твердость НВ (по Бринеллю) — малогабаритным переносным твердомером.

По найденному значению твердости и химическому составу для установленной марки стали определяют временное сопротивление  $R_m$  и предел текучести  $R_{0,2}$ .

Для определения численных значений  $R_m$  и  $R_{0,2}$  по результатам измерений твердости можно воспользоваться уравнениями, приведенными в таблице.

Используемый вид материала в элементах конструкций	Зависимости для расчета предела текучести $R_{0,2}$ (МПа) и временного сопротивления $R_m$ (МПа)	
Поковки, листовой и фасонный прокат	$R_{0,2} = 3,65\text{HB} - 213$	$R_m = 3,2\text{HB} + 38,5$
Трубы	$R_{0,2} = 3,55\text{HB} - 221$	$R_m = 2,97\text{HB} + 56,6$

По совокупности данных о типе заготовки, ее химическом составе, твердости и соответствующих им прочностных свойствах подбирается наиболее близкий аналог.

Данные об ударной вязкости, критической температуре хрупкости и коэффициенте интенсивности напряжений  $K_{1C}$  аналога, представленные на составленных по результатам многолетних наработок авторами и сотрудниками института графиках и в таблицах, могут быть использованы для предварительной оценки применимости материала в конструкции, в том числе при отрицательных температурах.

Опыт применения результатов вышеприведенных исследований, в частности, используется при анализе повреждений и разрушений технических устройств в целях установления их причин.

### Список литературы

1. Гуляев А.П. Разложение ударной вязкости на ее составляющие по данным испытаний образцов с разным надрезом// Заводская лаборатория. — 1967. — № 4. — С. 473–475.
2. ГОСТ 25.506—85. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004652> (дата обращения: 10.12.2020).
3. Гиренко В.С., Дядин В.П. Зависимости между ударной вязкостью и критериями механики разрушения  $\delta_{1C}$  и  $K_{1C}$  конструкционных сталей и их сварных соединений// Автоматическая сварка. — 1985. — № 9. — С. 13–20.
4. Васильченко Г.С., Кошелев П.Ф. Практическое применение механики разрушения для оценки прочности конструкций. — М.: Наука, 1974. — 147 с.
5. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. — М.: Физматлит, 2006. — 328 с.
6. Estimation of fracture toughness  $K_{1C}$  from Charpy impact test data in T-welded connections repaired by grinding and wet welding/ G. Terán, S. Capula-Colindres, D. Angeles-Herrera et al.// Engineering Fracture Mechanics. — March 2016. — Vol. 153. — pp. 351–359. DOI:10.1016/j.engfrac-mech.2015.12.010
7. Барсом Дж.М., Рольф С.Т. Корреляция между  $K_{1C}$  и результатами испытаний образцов Шарпи с V-образным надрезом в интервале критических температур// Ударные испытания металлов. — М.: Мир, 1973. — С. 227–296.
8. Barsom J.M., Rolfe S.T. Fracture and fatigue control in structures: applications of fracture mechanics. — West Conshohocken: ASTM International, 1999.
9. API 579-1/ASME FFS-1-2016. Fitness For Service Evaluation. URL: <https://www.asme.org/learning-development/find-course/api-579-1-asme-ffs-1-fitness-service-evaluation> (дата обращения: 10.12.2020).
10. ПНАЭ Г-7-002—86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 523 с.
11. СТО 70238424.27100.005—2008. Основные элементы котлов, турбин и трубопроводов ТЭС. Контроль состояния металла. Нормы и требования. — М., 2008. — 590 с.
12. ГОСТ 31385—2016. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200138636> (дата обращения: 10.12.2020).
13. О зависимости между ударной вязкостью и коэффициентом интенсивности напряжений  $K_{1C}$  для сталей, применяемых при изготовлении нефтехимического оборудования/ А.П. Корчагин, К.А. Кузнецов, А.О. Мурашов и др.// Химическое и нефтяное машиностроение. — 2015. — № 9. — С. 37–41.
14. Relationship Between Impact Strength and Stress Intensity Factor  $K_{1C}$  for Steels Used in Manufacturing Petrochemical

Equipment/ А.П. Korchagin, К.А. Kuznetsov, А.О. Murashov et al.// Chemical and Petrochemical Engineering. — 2016. — Vol. 51. — Iss. 9-10. — pp. 630–635.

[k.kuznetsov@hm.irk.ru](mailto:k.kuznetsov@hm.irk.ru)

Материал поступил в редакцию 11 декабря 2020 г.  
Доработанная версия — 29 апреля 2021 г.

«Bezopasnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2021, № 5, pp.  
DOI: 10.24000/0409-2961-2021-5-

### On the Methods for Assessing the Resistance of Steels to Brittle Fracture

A.P. Korchagin, Cand. Sci. (Eng.), Lead Researcher  
K.A. Kuznetsov, Cand. Sci. (Eng.), First Deputy General Director, [k.kuznetsov@hm.irk.ru](mailto:k.kuznetsov@hm.irk.ru)  
A.M. Kuznetsov, Dr. Sci. (Eng.), General Director  
S.I. Kirillov, Head of the Testing Center  
JSC IrkutskNIIkhimmash, Irkutsk, Russia

#### Abstract

The problem of assessing steels durability, their resistance to brittle fracture in the structures used in various branches of industry, remains relevant at the development of the new equipment and control of the old equipment.

Standard strength calculations do not give a complete picture of the ability of steels due to their physical and mechanical properties to resist the formation and further development of defects and cracks under the action of actual stresses.

The correct choice of a structural material for technical devices operating at low temperatures, knowledge of its characteristics of resistance to brittle fracture, understanding of brittle fracture mechanism at low temperatures and research in this area are of great importance.

Since 1980s, JSC IrkutskNIIkhimmash systematically conducts the research works related to impact strength characteristics. These works are carried out in connection with the need for assessing the resistance to brittle fracture of metal of the equipment for storing oil products, vessels and pipelines, drill pipes and tubing, etc.

As a result of many years of research, the authors accumulated significant experimental material in the form of temperature dependences of impact strength — both for the material of various types of blanks (sheets, pipes, forgings) in the state of delivery, and for the metal of technical devices elements after their operation of various duration.

The main objective of the article is to assist specialists in establishing the correct choice of steel for the new or old structures in terms of their resistance to brittle fracture without conducting special studies.

Specialists can select the closest steel analogue (on chemical composition, mechanical properties, and the type of product without making cuts from the structure or blanks for additional research), and set the numerical value of the impact strength, critical temperature of brittleness and the stress intensity factor for any temperature in the range from -40 to 20° C in order to use them in further calculations.

**Key words:** steel resistance, brittle fracture, temperature of critical brittleness, stress intensity factor, equipment failure, correlation dependences.

### References

1. Gulyaev A.P. Impact strength decomposition into its components according to the test data of specimens with different notches. *Zavodskaya laboratoriya = Industrial Laboratory*. 1967. № 4. pp. 473–475. (In Russ.).
2. GOST 25.506–85. Design, calculation and strength testing. Methods of mechanical testing of metals. Determination of fracture toughness characteristics under the static loading. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200004652> (accessed: December 10, 2020). (In Russ.).
3. Girenko V.S., Dyadin V.P. Dependencies between impact strength and criteria of fracture mechanics  $\delta_{1C}$  and  $K_{1C}$  of structural steels and their welded joints. *Avtomaticheskaya svarka = Automatic welding*. 1985. № 9. pp. 13–20. (In Russ.).
4. Vasilchenko G.S., Koshelev P.F. Practical application of fracture mechanics for assessment of the structure strength. Moscow: Nauka, 1974. 147 p. (In Russ.).
5. Matvienko Yu.G. Models and criteria of fracture mechanics. Moscow: Fizmatlit, 2006. 328 p. (In Russ.).
6. Terán G., Capula-Colindres S., Angeles-Herrera D., Velázquez J.C., Fernández-Cueto M.J. Estimation of fracture toughness K<sub>1C</sub> from Charpy impact test data in T-welded connections repaired by grinding and wet welding. *Engineering Fracture Mechanics*. March 2016. Vol. 153. pp. 351–359. DOI:10.1016/j.engfracmech.2015.12.010
7. Barsom J.M., Rolfe S.T. Correlations between  $K_{1C}$  and Charpy V-notch test results in the transition-temperature range (Impact Testing of Metals). Moscow: Mir, 1973. pp. 227–296. (In Russ.).
8. Barsom J.M., Rolfe S.T. Fracture and fatigue control in structures: applications of fracture mechanics. West Conshohocken: ASTM International, 1999.
9. API 579-1/ASME FFS-1-2016. Fitness For Service Evaluation. Available at: <https://www.asme.org/learning-development/find-course/api-579-1-asme-ffs-1-fitness-service-evaluation> (accessed: December 10, 2020).
10. PNAE G-7-002–86. Norms for calculating strength of equipment and pipelines of the nuclear power plants. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 523 p. (In Russ.).
11. STO 70238424.27100.005–2008. Main elements of the boilers, turbines, and pipelines of the thermal power plant. Metal condition monitoring. Norms and requirements. Moscow, 2008. 590 p. (In Russ.).
12. GOST 31385–2016. Vertical cylindrical steel tanks for oil and oil-products. General specifications. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200138636> (accessed: December 10, 2020). (In Russ.).
13. Korchagin A.P., Kuznetsov K.A., Murashov A.O., Yudin A.N., Demkin S.V. On the relation between toughness and the stress intensity factor  $K_{1C}$  for steels used in the manufacturing petrochemical equipment. *Khimicheskoe i neftyanoe mashinostroyeniye = Chemical and Petroleum Engineering*. 2015. № 9. pp. 37–41. (In Russ.).
14. Korchagin A.P., Kuznetsov K.A., Murashov A.O., Yudin A.N., Demkin S.V. Relationship Between Impact Strength and Stress Intensity Factor K<sub>1C</sub> for Steels Used in Manufacturing Petrochemical Equipment. *Chemical and Petrochemical Engineering*. 2016. Vol. 51. Iss. 9–10. pp. 630–635.

Received December 11, 2020  
In final form — April 29, 2021