

УДК 620.1

О.В. Митраков¹, Н.О. Яковлев¹, Н.А. Якушева¹, А.В. Гриневиц¹**ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ СТАЛИ 20ХГСН2МФА-ВД ПРИ ИСПЫТАНИИ НА ВЯЗКОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-49-56

Рассматриваются особенности разрушения образцов из стали 20ХГСН2МФА-ВД при испытании на вязкость разрушения. Установлено, что разрушение образцов малой толщины (10 мм) реализуется сдвигом от касательных напряжений. Анализируется отклонение траектории разрушения от плоскости исходной усталостной трещины. Показано, что подобное развитие трещины обусловлено напряженно-деформированным состоянием материала в ее вершине. Увеличение толщины образцов меняет характер разрушения – формируется значительная зона отрыва. При определении вязкости разрушения на образцах толщиной 50 мм имеет место скачкообразное развитие трещины. Несущая способность образцов из стали 20ХГСН2МФА-ВД при этом не изменяется в связи с большими зонами пластической деформации, тормозящими разрушение. Снижение температуры испытания до -70°C привело к макрохрупкому излому образцов толщиной 50 мм и снижению вязкости разрушения.

Ключевые слова: вязкость разрушения, сдвиг, отрыв, траектория трещины, безопасная повреждаемость, напряженно-деформированное состояние, хрупкость.

O.V. Mitrakov¹, N.O. Yakovlev¹, N.A. Yakusheva¹, A.V. Grinevich¹**DESTRUCTION FEATURES OF STEEL 20ХГСН2МФА-ВД DURING THE FRACTURE TOUGHNESS TEST**

The article reviews the destruction features of specimens of steel 20ХГСН2МФА-ВД during the fracture toughness test. It has been found that the destruction of the samples with small thickness (10 mm) is conducted by the shift from shear stresses. The article analyzes the deviation of the fracture trajectory from the plane of initial fatigue cracks. It is shown that such development of cracks is due to the stress-strain state of the material at its top. Increasing of the samples thickness changes the nature of destruction – a significant separation zone is formed. In the determination of fracture toughness on samples with a thickness of 50 mm takes place stepwise development of cracks. The bearing load of the samples of steel 20ХГСН2МФА-ВД does not change due to large areas of plastic deformation, inhibiting the destruction. Reducing of the test temperature to -70°C led to a macro-brittle fracture of 50 mm thick samples and a decrease in the fracture toughness.

Keywords: fracture toughness, shear, detachment, the trajectory of the crack, safe damage, stress-strain state, brittleness.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Применение материала в силовой конструкции летательного аппарата возможно только после детальной и многосторонней оценки его физико-механических характеристик, которые являются основой для оценки несущей способности, ресурса и безопасной повреждаемости изделия [1–4]. Оценка вязкости разрушения – основного параметра механики разрушения – позволяет определить допустимый уровень наиболее опасного дефекта типа усталостной трещины в деталях, используемых в силовой конструкции летательного аппарата [5]. Оценка вязкости разрушения, которая определяет размер критического трещиноподобного дефекта в конструкции, является и оцен-

кой «хрупкой» прочности материала, характеризующей возможность разрушения деталей при напряжениях меньше предела текучести [6, 7].

Для ряда крупногабаритных, особо ответственных деталей силового набора летательных аппаратов применяется сталь 20ХГСН2МФА-ВД, обладающая высокими характеристиками прочности и пластичности. Под руководством разработчика стали Н.Г. Покровской была проведена оценка стабильности основных прочностных характеристик стали 20ХГСН2МФА-ВД.

Определение характеристик статической прочности проводилось на испытательной машине Zwick/Roell Z250, погрешность силоизмерительной системы которой не превышает 0,5% [8].

Испытания при растяжении долевых образцов из поковок диаметром 300 мм, полученных из нескольких плавок, показали высокую стабильность прочностных характеристик стали 20ХГСН2МФА-ВД. Среднее значение предела прочности составляло $\sigma_b=1500$ МПа, а условного предела текучести с допуском на остаточную деформацию 0,2% – $\sigma_{0,2}=1210$ МПа. При этом среднеквадратическое отклонение для предела прочности составило 8,4 МПа, а для условного предела текучести 12,5 МПа. Столь незначительный разброс характеристик статической прочности является гарантом стабильности основных прочностных характеристик, в том числе и при испытании образцов с трещиной, что существенно сокращает объем трудоемких испытаний при определении вязкости разрушения.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2. «Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов, неразрушающий контроль» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [9].

Материалы и методы

Оценку вязкости разрушения образцов толщиной 50 мм проводили в соответствии с ГОСТ 25.506–85. Габаритные размеры также соответствовали данному стандарту. Определение вязкости разрушения проводили на образцах, в которых усталостная трещина формировалась как вдоль, так и поперек поковки. Вязкость разрушения образцов толщиной 10 мм определяли на образцах, на которых предварительно оценивали скорость развития усталостной трещины. При толщине образца 10 мм базовый размер образца, определяющий расстояние от оси приложения нагрузки до торца рабочей грани образца, равнялся 100 мм.

Испытания образцов толщиной 50 мм проводили на испытательной сервогидравлической машине MTS 810 с усилием 50 т с использованием программы MultiPurpose TestWare (MPT) и электромеханической машины Walter+Bai LFMZ с усилием 250 кН с использованием программы

DIONstat. Образцы толщиной 10 мм испытывали на испытательной машине Walter+Bai LFMZ с усилием 250 кН. Погрешность оценки нагрузки как машины MTS 810 (50 т), так и машины Walter+Bai LFMZ (250 кН), не превышала 0,5%.

Обработку результатов испытаний проводили в программах Excel и Matlab.

Результаты и обсуждение

Диаграмма «нагрузка–величина раскрытия трещины» для образцов из стали 20ХГСН2МФА-ВД толщиной 10 мм представлена на рис. 1.

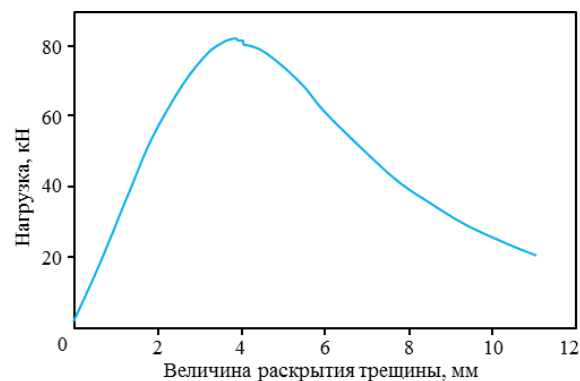


Рис. 1. Диаграмма «нагрузка–величина раскрытия трещины» для образцов стали 20ХГСН2МФА-ВД толщиной 10 мм

Диапазон изменения коэффициента интенсивности напряжений, являющегося силовой характеристикой вязкости разрушения, для образцов толщиной 10 мм находится в пределах $253\text{--}279$ МПа $\sqrt{\text{м}}$, как для образцов с продольным ($253\text{--}279$ МПа $\sqrt{\text{м}}$), так и с поперечным ($264\text{--}276$ МПа $\sqrt{\text{м}}$) направлением формирования трещины.

Разрушение образцов толщиной 10 мм характеризуется значительной пластической деформацией и переходом незначительной зоны отрыва у вершины трещины в плоскость сдвига, охватывающую всю область разрушения [10]. Характер разрушения образца из стали 20ХГСН2МФА-ВД толщиной 10 мм представлен на рис. 2.

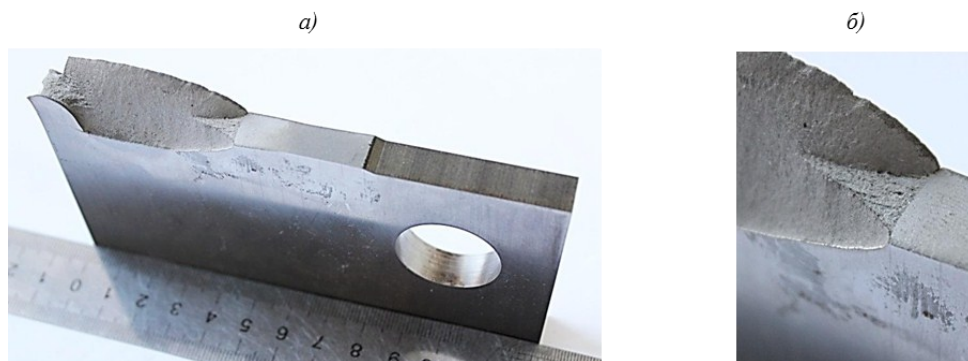


Рис. 2. Характер разрушения образца из стали 20ХГСН2МФА-ВД толщиной 10 мм: а – общий вид образца; б – начало разрушения с участком отрыва

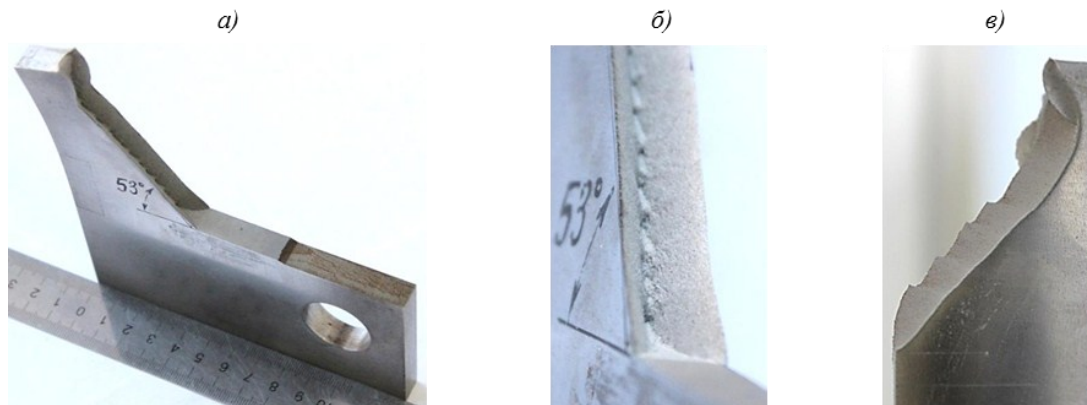


Рис. 3. Отклонение траектории разрушения в образцах из стали 20ХГСН2МФА-ВД толщиной 10 мм:
 а – общий вид образца с отклоненной траекторией трещины; б, в – дискретный характер разрушения с изменением локальной траектории разрушения

Наряду с вариантом разрушения, когда развитие трещины при статическом растяжении происходит по траектории развития усталостной трещины, имели место разрушения, в которых траектория развития трещины проходила под некоторым углом к траектории развития усталостной трещины (рис. 3, а).

Если внешний вид макроизлома характеризует непрерывность разрушения с углом отклонения от плоскости усталостной трещины 53 градуса, то развитие разрушения в вершине трещины представляется дискретным и траектория разрушения не параллельна траектории среза. Дискретность разрушения в вершине распространяющейся трещины иллюстрируется на рис. 3, б, в.

Траектория разрушения имеет волнообразный вид. Можно предположить, что в вершине трещины в средней части образца имело место разрушение отрывом, которое сменялось разрушением сдвигом от касательных напряжений. Дискретность разрушения прослеживается на диаграмме «нагрузка–величина раскрытия трещины» (рис. 4). При доминирующем сдвиговом характере разрушения образца на спадающей ветви диаграммы «нагрузка–величина раскрытия трещины» имеют место незначительные искажения плавного участка кривой, что, вероятно, обусловлено формированием зон отрыва.

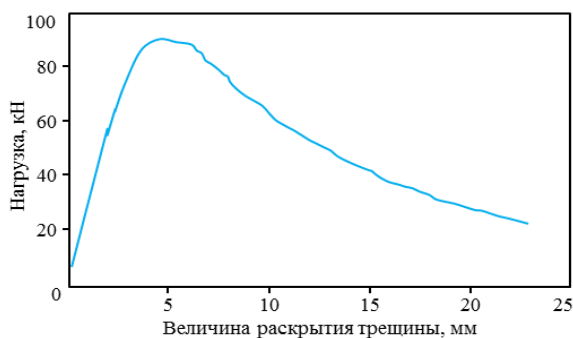


Рис. 4. Диаграмма «нагрузка–величина раскрытия трещины» образца толщиной 10 мм при дискретном развитии разрушения

Дискретность разрушения проявляется на спадающей ветви нагрузки и фактически не сказывается при определении вязкости разрушения.

Рассмотрим теоретические предпосылки, обосновывающие возможность отклонения траектории трещины от ее прямолинейного развития. Согласно механике разрушения, напряжения в вершине трещины описываются уравнениями [11]

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right);$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right);$$

$$\sigma_z = \mu(\sigma_x + \sigma_y);$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2}; \quad \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$$

при $y=0, x>0, \sigma_x = \sigma_y = K_I / \sqrt{2\pi r}, \tau_{xy} = 0,$

где r – радиус окружности с центром в вершине трещины.

Представленные формулы описывают напряженно-деформированное состояние для случая плоской деформации; для плоского напряженного состояния напряжение по третьей оси приравнивается к нулю – $\sigma_z = 0$, а коэффициент Пуассона μ заменяется на $\mu/(1+\mu)$.

Анализ напряженного состояния с позиции оценки максимальных растягивающих и касательных напряжений, а также энергии формоизменения, являющихся критериальными при разрушении сплошного твердого тела, приводится в работах [12–14].

Исходя из общих решений теории упругости [13, 14] для вершины бесконечного углового выреза и сведя его к щели (как к частному случаю), можно определить изменение главных напряжений вдоль окружности малого радиуса с центром в вершине трещины. Графическая иллюстрация

изменения главных растягивающих напряжений представлена на рис. 5.

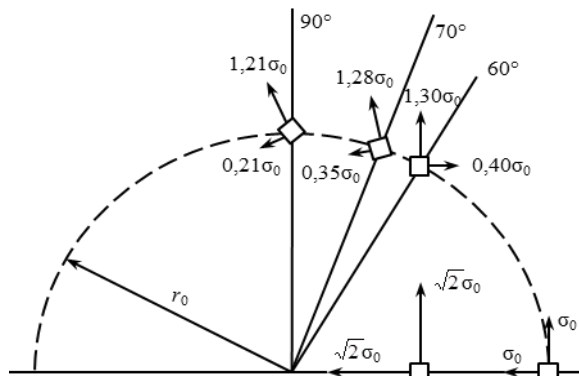


Рис. 5. Характер изменения главных напряжений в вершине трещины [12]

Согласно решению, приведенному в работах [13, 14], вблизи вершины трещины существует тенденция к гидростатическому растяжению. Главные растягивающие напряжения достигают максимума ($\sigma=1,3\sigma_0$) на площадке, ориентированной под углом 60 градусов к траектории трещины. Касательные напряжения достигают максимального значения, равного половине гидростатического растяжения ($\tau=0,5\sigma_0$), на площадке, расположенной под углом 90 градусов к ее траектории. Энергия формоизменения, являющаяся критерияльной при оценке пластической деформации, достигает максимума на площадках с углом ~ 70 градусов к траектории трещины, а не по ее оси. На направлении под углом 70 градусов к линии трещины значения энергии формоизменения на $1/3$ превосходят значения, определенные на ее продолжении.

Анализ напряженно-деформированного состояния указывает на возможность распространения разрушения по сложной траектории с отклонением от линейного развития, что часто наблюдается для высокопрочных материалов при исследовании скорости роста трещины усталости. Микроанализ изломов также указывает на сложный характер развития трещины. Это обусловлено тем, что напряженное состояние, характеристики которого достигают своего максимума не по оси трещины, а под значительным углом к ее траектории, спроецированное на неоднородную структуру материала, формирует крайне сложную структуру излома.

Следует также учитывать неоднородность напряженно-деформированного состояния в вершине трещины по толщине образца. Формулы механики разрушения описывают либо плосконапряженное, либо плоскодеформированное состояния, в то время как для реальных образцов на поверхности всегда будет реализовываться плосконапряженное состояние, а в центральной зоне трещины – плоскодеформированное. В зависимости от толщины образца соотношение зон с разным деформированным

состоянием изменяется, что приводит к изменению показателей вязкости разрушения материала от толщины образца. При увеличении толщины образца расширяется область трехосного растяжения в центральной части при сохранении области плосконапряженного состояния по его граням. Для большинства конструкционных материалов при плосконапряженном состоянии разрушение происходит в виде сдвига, а в условиях плоской деформации – в виде отрыва. Поскольку зону сдвига можно считать постоянной, то увеличение толщины образца приводит к пропорциональному увеличению площади отрыва и снижению вязкости разрушения. Толщина образца становится критериальной характеристикой определения вязкости разрушения при развитии трещины по схеме отрыва.

Поскольку разрушение при развитии трещины по схеме отрыва с предельным стеснением пластических деформаций в вершине трещины приводит к минимальным значениям вязкости разрушения, то определение данной характеристики правомерно для оценки безопасной повреждаемости деталей большой толщины. Анализ изломов образцов из стали 20ХГСН2МФА-ВД на вязкость разрушения проведен на образцах толщиной 50 мм.

Испытания образцов толщиной 50 мм выявили скачкообразный характер развития трещины при резком падении нагрузки на диаграмме «нагрузка–величина раскрытия трещины». Развитие трещины с высокой скоростью (проскок) наглядно подтверждается на диаграмме «продолжительность испытания–величина раскрытия трещины». Типичные диаграммы представлены на рис. 6.

Диаграмма «нагрузка–величина раскрытия трещины» на начальном участке нагружения имеет линейный характер, который при достижении некоторого уровня нагрузки заканчивается ее срывом и мгновенным увеличением раскрытия трещины, что обусловлено первым проскоком трещины. Дальнейшее нагружение приводит к повторному аналогичному срыву нагрузки и росту величины раскрытия трещины. Подобное скачкообразное разрушение образца обусловлено образованием больших зон пластической деформации – «губ среза», которые воспринимают нагрузку, компенсируя уменьшение рабочей части образца в связи с образованием трещины отрыва. Возникает парадоксальная ситуация, когда рост трещины отрыва не уменьшает несущую способность образца. Коэффициент интенсивности напряжений также возрастает. Вязкость разрушения, определенная по нагрузке при первом проскоке трещины, характеризуется величиной условного коэффициента интенсивности напряжений, равной $K_c^y=142$ МПа $\sqrt{м}$. При втором проскоке трещины коэффициент интенсивности напряжений повышается до величины $K_c^y=148$ МПа $\sqrt{м}$, и это при том, что вязкость разрушения оценивали по исходной длине трещины и не учитывали ее

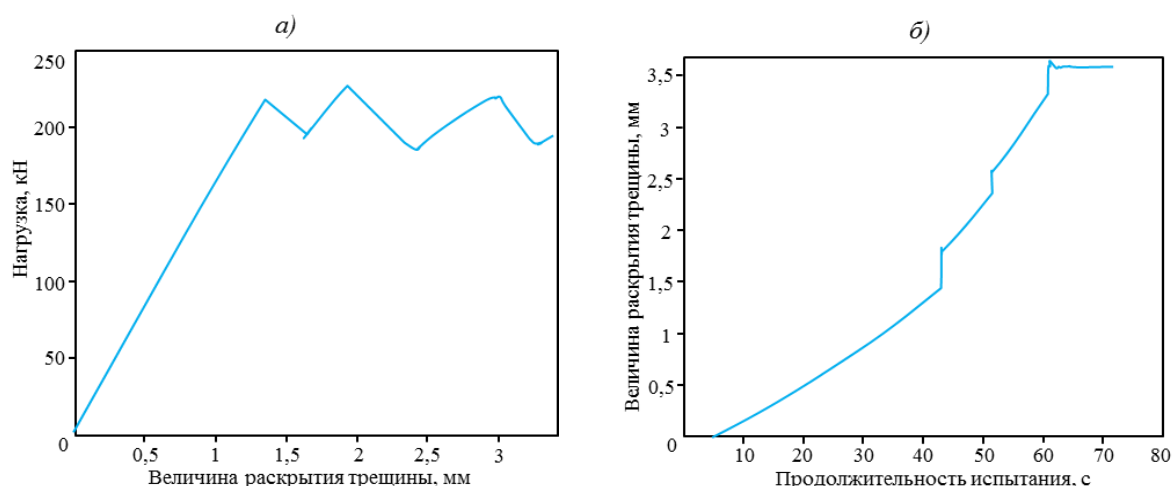


Рис. 6. Характер изменения нагрузки (а) и величины раскрытия трещины (б) при испытании образцов из стали 20ХГСН2МФА-ВД толщиной 50 мм

приращение при первом проскоке. Следует отметить, что приращение трещины имеет место только в центральной части образца в виде «ногтеобразной» дуги, которая удерживается по краям зонами пластической деформации. Скачкообразный характер разрушения возможен для материала с высокими характеристиками пластичности и, как следствие, с высокой вязкостью разрушения.

Однако для оценки живучести конструкции наиболее правомерной является величина вязкости разрушения, определенная по первому проскоку трещины, которая на начальном этапе механики разрушения и определяла коэффициент интенсивности напряжений при плоской деформации.

При нагружении с заданной скоростью перемещения траверсы на системах нагружения с малым запасом упругой энергии для пластичных материалов при испытании на вязкость разрушения возможно многократное формирование участков проскока и остановки трещины из-за падения нагрузки. Излом образца из стали 20ХГСН2МФА-ВД толщиной 50 мм представлен на рис. 7.

Работоспособность сталей в области низких температур ограничивается некоторым температурным порогом, ниже которого разрушение характеризуется как хрупкое. Проблема работоспособности материалов при низкой температуре особенно остро встала в связи с освоением Крайнего Севера [15, 16]. Эффект хладноломкости хорошо выявляется при испытании металлических материалов на ударную вязкость и характеризуется при переходе температурной границы резким ее снижением [17, 18]. Однако ударная вязкость, определяемая при испытании стандартных образцов затратами энергии на единицу площади разрушения, являясь энергетической характеристикой, не выполняет роль расчетной прочностной характеристики. При ранжировании материалов по удельной энергии разрушения при ударном воздействии, ударная вязкость не может быть использована для оценки несущей способности конструкции. При введении в механику разрушения силовой характеристики разрушения твердого тела с трещиной – коэффициента интенсивности



Рис. 7. Характер разрушения образца из стали 20ХГСН2МФА-ВД толщиной 50 мм: а – общий вид разрушенного образца; б – скачкообразное развитие трещины в образце

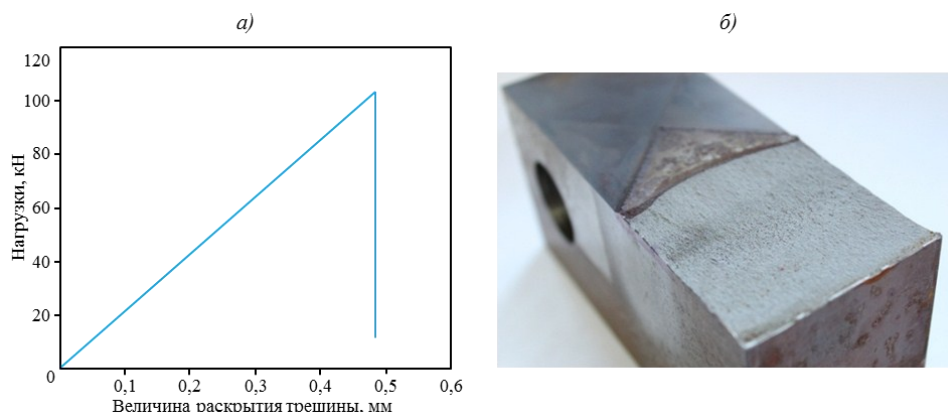


Рис. 8. Испытание образца из стали 20XGCH2MFA-ВД толщиной 50 мм при температуре -70°C : а – диаграмма «нагрузка–величина раскрытия трещины»; б – общий вид излома образца

напряжений, одновременно решен вопрос по оценке хладноломкости, поскольку была создана основа определения несущей способности конструкции с трещиной, в том числе и при низких эксплуатационных температурах.

Оценку характера разрушения образцов из стали 20XGCH2MFA-ВД проводили при температуре -70°C . Образцы стали толщиной 50 мм погружали в спирт, охлаждаемый жидким азотом. Контроль температуры осуществляли термопарой, расположенной непосредственно на поверхности образца. При оценке вязкости разрушения образца из стали 20XGCH2MFA-ВД толщиной 50 мм при температуре -70°C показано существенное снижение данной характеристики до значений $K_c^y = 58-65 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$.

Диаграмма «нагрузка–величина раскрытия трещины» и характерный вид излома при испытании на вязкость разрушения образца из стали 20XGCH2MFA-ВД толщиной 50 мм при температуре -70°C представлены на рис. 8.

Абсолютно плоский вид излома без зон пластической деформации на гранях образца указы-

вает на предельно «хрупкий» характер разрушения образца из стали 20XGCH2MFA-ВД толщиной 50 мм, испытанного при температуре -70°C , что подтверждает и диаграмма нагружения.

Процесс разрушения включал просок трещины (почти на всю длину рабочей части образца) и остановку разрушения в связи с резким падением нагрузки. Поскольку траверса испытательной машины продолжала перемещаться, то последующее нагружение образца при температуре -70°C привело к его долому с разделением на части.

Один из образцов после просока трещины при температуре -70°C сняли с испытательной машины и после длительной выдержки в лабораторной атмосфере повторно испытали при комнатной температуре.

Диаграмма «величина раскрытия трещины–нагрузка» при повторном нагружении при комнатной температуре представлена на рис. 9, а. Полный излом образца из стали 20XGCH2MFA-ВД толщиной 50 мм с начальной хрупкой зоной разрушения, полученной при температуре -70°C ,

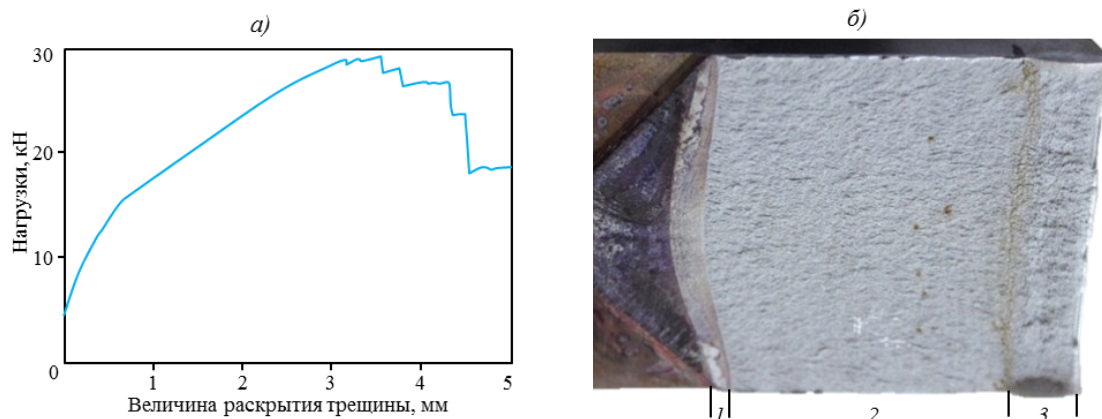


Рис. 9. Испытание образца из стали 20XGCH2MFA-ВД толщиной 50 мм при температуре -70°C и повторном нагружении при температуре 20°C :

а – диаграмма «нагрузка–величина раскрытия трещины» при температуре 20°C ; б – излом образца с зоной разрушения, полученной при повторном нагружении при температуре 20°C (1 – зона усталостной трещины; 2 – зона хрупкого излома при температуре -70°C ; 3 – зона долома при температуре 20°C)

и с зоной долома, полученной при повторных испытаниях при комнатной температуре, представлен на рис. 9, б.

При начальном нагружении при температуре -70°C трещина продвинулась на длину 87–88 мм, что составляет 0,87–0,88 от базовой характеристики: $\lambda=l/B$ – отношение длины трещины к расстоянию от оси приложения силы до торца образца. Поскольку в стандарте ГОСТ 25.506–85 характеристика $\lambda=l/B$ представлена в диапазоне 0,45–0,55, то оценку вязкости разрушения проводили по формуле стандарта ASTM E399:

$$K = \frac{P}{t\sqrt{B}} \cdot Y,$$

где P – нагрузка на образец; B – расстояние от оси нагружения до тыльной стороны образца; t – толщина

образца; $Y = \frac{(2+\lambda)}{\sqrt{(1-\lambda)^3}} [0,886 + 4,64\lambda - 13,32\lambda^2 + 14,72\lambda^3 - 5,6\lambda^4]$ при $0,2 < \lambda < 0,9$.

Условный коэффициент интенсивности напряжений, определенный по вышеприведенной формуле, равен $152 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$.

Вязкость разрушения, определенная при доломе образца, практически равна исходной вязкости разрушения, полученной при $\lambda \approx 0,5$.

Характер разрушения также существенно изменился. Долом отличается существенно большей пластической деформацией по сравнению с хрупкой зоной, полученной при проскоке трещины

при температуре -70°C . В зоне долома по краям образца видны зоны пластической деформации – «губы среза», характерные для разрушения при плосконапряженном состоянии.

Заключения

Характер разрушения сталей при испытании на вязкость разрушения определяется интегральным взаимодействием структуры материала в вершине трещины с напряженно-деформированным состоянием, характеристики которого достигают максимальных значений при значительных углах отклонения от прямолинейной траектории развития трещины.

Увеличение толщины образца из стали 20ХГСН2МФА-ВД с 10 до 50 мм привело к изменению характера разрушения – от сдвига, обусловленного касательными напряжениями, к образованию плоской зоны отрыва от нормальных напряжений в центральной зоне образца и снижению вязкости разрушения в 1,8 раза.

Понижение температуры испытаний образцов из стали 20ХГСН2МФА-ВД толщиной 50 мм до -70°C привело к макрорхрупкому излому с полной ликвидацией «губ среза» и снижению вязкости разрушения в 2,4 раза по сравнению с нормальными условиями испытаний.

Вязкость разрушения сталей с высоким уровнем пластичности возможно определять на образцах с максимальной толщиной материала, применяемой в конструкции, по первому проскоку трещины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Махутов Н.А., Москвичев В.В., Морозов Е.М., Гольдштейн Р.В. Современные задачи механики разрушения и механики катастроф // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. №10. С. 55–64.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // Защита и безопасность. 2014. №4. С. 28–29.
3. Гриневич А.В., Лаптев А.Б., Скрипачев С.Ю., Нужный Г.А. Матрица прочностных характеристик для оценки предельных состояний конструкционных металлических материалов // Авиационные материалы и технологии. 2018. №2 (51). С. 67–74. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-67-74.
4. Каблов Е.Н., Гриневич А.В., Ерасов В.С. Характеристики прочности металлических авиационных материалов и их расчетные значения // 75 лет. Авиационные материалы. М.: ВИАМ, 2007. С. 370–379.
5. Махутов Н.А., Москвичев В.В., Морозов Е.М., Гольдштейн Р.В. Унификация методов испытаний конструкционных материалов на трещиностойкость. История проблемы и формирование нормативной базы // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. №10. С. 41–52.
6. Шляников В.Н., Яруллин Р.Р., Иштыряков И.С. Развитие поверхностных трещин в полых цилиндрических образцах при комбинированном циклическом нагружении // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. №8. С. 47–54.
7. Махутов Н.А., Макаренко И.В., Макаренко Л.В. Расчетно-экспериментальный анализ напряженно-деформированного состояния для наклонных полуэллиптических поверхностных трещин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. №3. С. 49–53.
8. Соловьев А.Е., Голынец С.А., Хвацкий К.К., Асланян И.Р. Проведение статических испытаний при растяжении на машинах фирмы Zwick/Roell // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №8. Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.12.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-12-12.
9. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
10. Григоренко В.Б., Морозова Л.В. Применение растровой электронной микроскопии для изучения начальных стадий разрушения // Авиационные материалы и технологии. 2018. №1 (50). С. 77–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-77-87.

11. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. Ижевск: ИКИ, 2012. 872 с.
12. Ивлев Д.Д. Механика пластических сред. М.: Физматлит, 2002. Т. 2. 448 с.
13. Williams M.L. On the stress distribution at the base of stationary crack // *Journal of Applied Mechanics*. 1957. Vol. 24. P. 109–114.
14. Williams M.L. The bending stress distribution at the base of stationary crack // *Journal of Applied Mechanics*. 1961. Vol. 28. No. 1. P. 78–82.
15. Махутов Н.А., Лебедев М.П., Большаков А.М., Захарова М.И. Особенности возникновения чрезвычайных ситуаций на газопроводах в условиях Севера // *Вестник Российской академии наук*. 2017. Т. 87. №9. С. 858–862.
16. Каблов Е.Н., Лебедев М.П., Старцев О.В., Голиков Н.И. Климатические испытания материалов, элементов конструкций, техники и оборудования в условиях экстремально низких температур // *Труды 6-го Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата*. Якутск, 2013. С. 5–7.
17. Большаков А.М., Бурнашев А.В. Исследование ударной вязкости стали магистрального газопровода после длительной эксплуатации в условиях Крайнего Севера // *Деформация и разрушение*. 2018. №8. С. 43–45.
18. Ильин А.В., Артемьев Д.М., Филин В.Ю. Анализ корреляции критических температур вязкохрупкого перехода и температуры торможения хрупкого разрушения на основе численного моделирования МКЭ // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2018. Т. 84. №2. С. 46–55.