

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ПОНИЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

*Кабалдин Ю.Г., Хлыбов А.А., Аносов М.С., Шатагин Д.А., Головин А.А.
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,
г. Нижний Новгород*

Ключевые слова: повреждаемость, металлы, механические свойства, пониженные температуры, трещина, карбиды, нитриды.

Аннотация. В работе проведено исследование различных групп металлов на ударный изгиб и растяжение в условиях пониженных температур. Выявлены особенности изменения механических свойств и характера разрушения металлов при понижении температуры. Показано, что источниками зарождения трещин в сталях аустенитного класса являются крупные карбиды, нитриды и карбонитриды, а время распространения хрупкой трещины в металле будет определяться прежде всего размером зерна, а также модулем упругости и плотностью материала.

STUDY OF DAMAGE TO METAL MATERIALS UNDER CONDITIONS OF REDUCED TEMPERATURES

*Kabaldin Yu.G., Khlybov A.A., Anosov M.S., Shatagin D.A., Golovin A.A.
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod*

Keywords: damage, metals, mechanical properties, low temperatures, crack, carbides, nitrides.

Abstract. In the study, various groups of metals were studied for shock bending and tension at low temperatures. The features of changes in the mechanical properties and nature of the destruction of metals with lowering temperatures are revealed. It is shown that the sources of cracks in austenitic steels are large carbides, nitrides and carbonitrides, and the propagation time of a brittle crack in a metal will be determined primarily by the grain size, as well as the elastic modulus and density of the material.

Развитие нефтяной и газовой промышленности в районах Севера, транспортных трубопроводов, работающих под давлением, а также проектирование транспортных средств для работы в зонах с низкими температурами, требует разработки и совершенствования хладостойких материалов. Наиболее широкое применение для изготовления деталей, работающих в условиях низких температур, получили малоуглеродистые стали, нержавеющие стали и алюминиевые сплавы [1].

Как показывают исследования, при низких температурах значительно возрастает вероятность разрушения деталей, при образовании в них даже незначительных трещин. Это, в свою очередь, требует исследования механизма хрупкого разрушения и образования микротрещин в металлах в условиях низких температур с целью обеспечения заданного срока службы детали.

Материалы и методы исследования. Для проведения исследований была выбрана сталь 20, 45, 12Х18Н10Т, титановый сплав ВТ8 и алюминиевый сплав Д16. Исследование микроструктуры проводилось на оптическом микроскопе KYENCE-VHX 1000.

Исследования на ударный изгиб 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».

Для определения влияния низких температур и силовых воздействий на процессы деформации и разрушения материала проводились также испытания в условиях растяжения. Испытания проводились на разрывной машине модели Tinius Olsen H100KU.

Охлаждение образцов осуществлялось с использованием разработанной автоматизированной криокамеры для испытаний на растяжение в условиях пониженных температур [2].

В качестве хладагента использовалась смесь основной (охлаждаемой) и охлаждающей жидкости, в качестве которой использовался жидкий азот. Рабочая температура контролировалась с использованием датчиков температуры (pt100), установленных на образце.

Испытания на ударный изгиб и растяжение проводились при температурах: 20°C , -20°C , -40°C , -60°C , -80°C и -100°C . При каждой из температур было испытано несколько образцов. Результаты подвергались обработке и анализу.

Экспериментальные исследования, анализ. Результаты испытаний образцов на ударный изгиб исследуемых металлов представлены на рис.1.

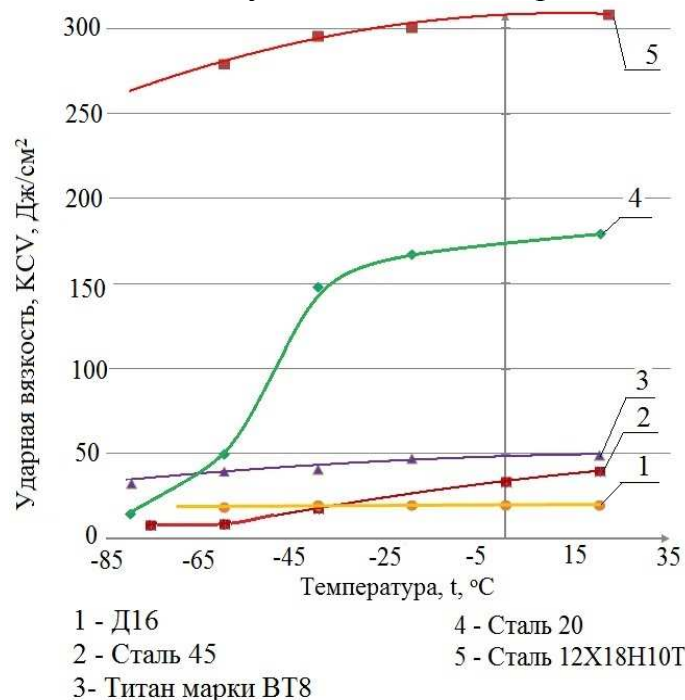


Рис. 1. Зависимость работы на изгиб материалов от температуры испытаний

Как видно из рис. 1 наибольшие значения ударной вязкости имеет сталь 12X18H10T, а наименьшие Д16 и титановый сплав ВТ8. С понижением температуры ударная вязкость снижается, причем наиболее активно при испытании углеродистых сталей, имеющих кристаллическую решетку ОЦК.

В табл. 1 в качестве примера показано изменение механических характеристик стали 12X18H10T в широком диапазоне пониженных температур. Из табл. 1 следует, что снижение температуры приводит к росту предела

прочности и предела текучести стали 12Х18Н10Т и снижению пластичности (δ), а также значений ударной вязкости. Однако как показывают аналогичные исследования других групп материалов [3], в частности углеродистых сталей, для стали 12Х18Н10Т изменение механических характеристик наблюдается менее интенсивно с понижением температуры. Это объясняется особенностями кристаллического строения стали 12Х18Н10Т, имеющей ГЦК решетку.

Табл. 1. Механические характеристики стали 12Х18Н10Т при различных температурах

Температура, °С	$\delta, \%$	$\sigma_{0,2}$	σ_B	KCV, Дж/см ²
20	42	208	546	309
-20	40	220	580	302
-40	-	-	-	297
-60	-	-	-	280
-80	38	283	792	262
-100	37	292	866	255

При хрупком разрушении в условиях низких температур, возникшая трещина становится нестабильной и растет самопроизвольно, если ее длина (при заданном напряжении) превышает некоторое критическое значение, а вершина трещины сохраняет остроту, соизмеримую (по радиусу у вершины) с атомными размерами. В этом случае напряжения на краю трещин оказываются достаточными для нарушения межатомной связи. Распространяющаяся трещина окаймлена узкой зоной пластической деформации, на создание которой затрачивается дополнительная энергия [4,5].

Исследования металлов с различным типом кристаллической решеткой [3] позволили выявить механизмы их хрупкого разрушения и наметить пути повышения хладноломкости. Как отмечалось выше, хрупкому разрушению металлических материалов предшествует образование трещины длиной – $l_{кр}$ [4,6]. Можно записать, что время τ , в течение которого трещина длиной l достигнет величины $l_{кр}$, пропорционально скорости звука [7]:

$$\tau \approx \frac{l}{c}, \tag{1}$$

где c – скорость звука.

В связи с тем, что при низких температурах снижается пластичность металлов, т.к. дислокации блокированы примесями вследствие отсутствия диффузионных процессов [8], для нахождения $l_{кр}$ воспользуемся уравнением Гриффитса [4,6].

$$l_{кр} = const \frac{2E\gamma_{эфф}}{\sigma^2}, \tag{2}$$

где $\gamma_{эфф}$ – эффективная поверхностная энергия, σ – напряжение, E – модуль упругости.

Расчеты $l_{кр}$ в уравнении (2) при $\sigma = 620$ МПа (при температуре вязко-хрупкого перехода) нержавеющей стали 12Х18Н10Т, позволили определить ее значения, равным 300 мкм, т.е. близким к среднему значению величины зерна

аустенита – \bar{d}_{cp} , в нержавеющей стали. Близкое значение к \bar{d}_{cp} выявлено и при электронно-микроскопических исследованиях.

На рис. 2а приведена микрофотография структуры стали 12Х18Н10Т в шейке образца после полировки и травления.

На зернах аустенита (рис. 2а) видны вкрапления карбидов, нитридов и карбонитридов легирующих элементов в виде черных точек, упрочняющих аустенит, а на рис. 2в приведена схема объясняющая образование субмикротрещин путем микроскола карбидов, либо карбонитридов, и $l_{кр}$. Известно, что твердость аустенита [9] равна примерно 200 НВ, а твердость, например, карбидов железа, превышает 800 НВ, т.е. тверже аустенита более чем в четыре раза. Можно полагать, что пластичность аустенита при низких температурах снижается и он не может релаксировать напряжения вблизи твердых включений, т.е. на межфазных границах, в процессе его деформирования. Следовательно, наличие в зернах аустенита твердых частиц (карбидов и т.д.), облегчает образование субмикротрещин, прежде всего, путем микроскола (рис.2б) твердых элементов структуры нержавеющей стали.

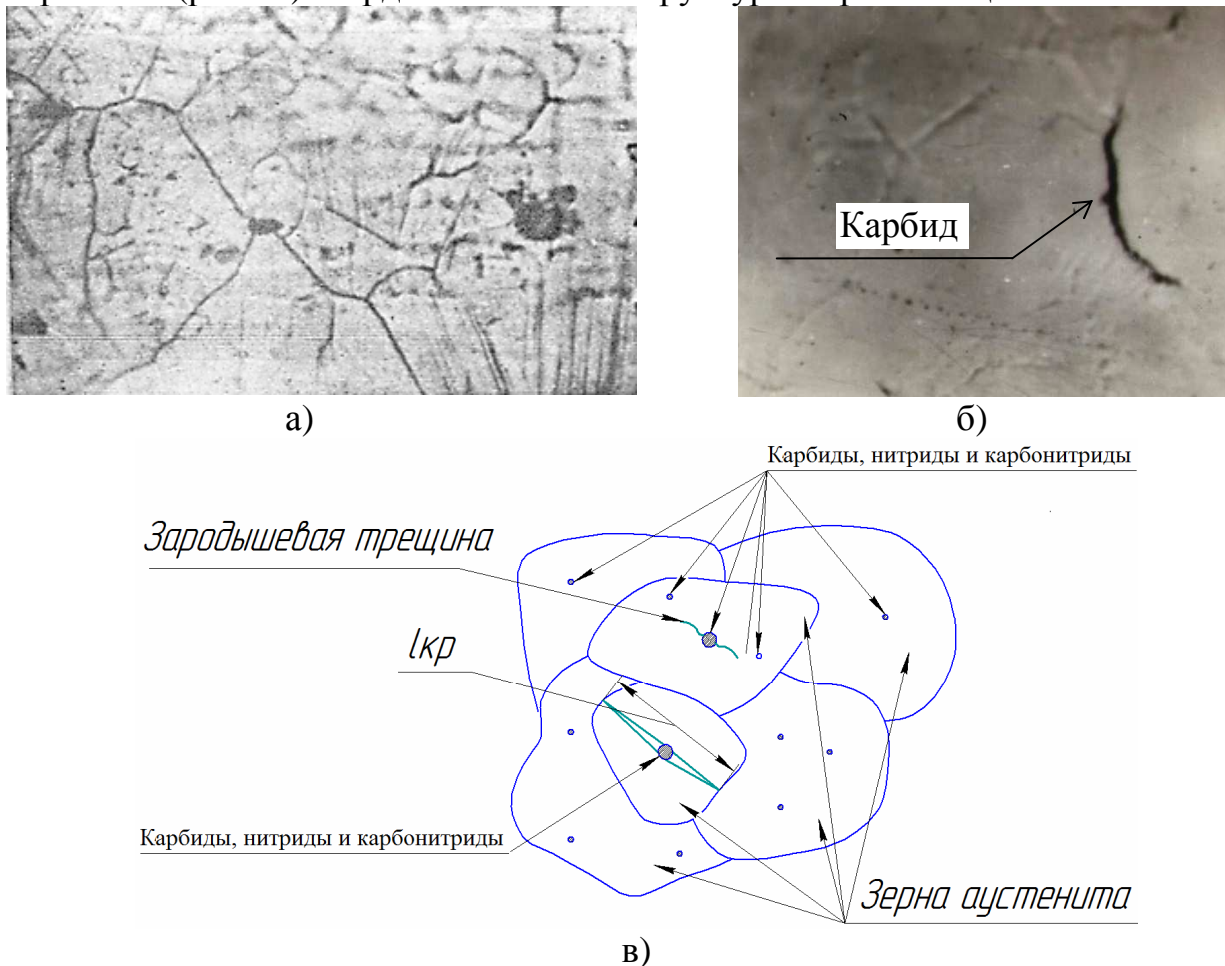


Рис. 2. а) микроструктура образца из стали 12Х18Н10Т (x1000); б) субмикротрещина при микросколе карбида в зерне аустенита; в) схема, поясняющая образования $l_{кр}$

Можно полагать, что в процессе растяжения в шейке образца образуются несколько трещин различной длины (локальные микротрещины-субмикротрещины), вследствие растрескивания, прежде всего, крупных зерен

карбидов, либо карбонитридов, располагающихся в зернах аустенита (рис.2в), и на границах зерен, одна из которых является лидирующей, высвобождающаяся энергия которой достаточна для ее роста до $l_{кр}$.

Аналогичный механизм возникновения субмикротрещин в углеродистых сталях описан в работе [5]. Здесь образование первичной субмикротрещины связано с раскалыванием перлитных колоний

Представим отношение (1), заменив l на \bar{d}_{cp} , в следующем виде:

$$\tau = \bar{d}_{cp} / \left(\frac{E}{\rho} \right)^{-1}. \quad (3)$$

Таким образом, время распространения хрупкой трещины в металле будет определяться размером зерна \bar{d} , модулем упругости E и плотностью материала ρ . При низких температура два последних параметра (E и ρ) практически не зависят от нее в широком диапазоне отрицательных температур. Поэтому время распространения хрупкой трещины будет определяться только размером зерна – \bar{d} , и величиной $l_{кр}$ в металле.

Действительно, согласно закону Холла-Петча, размер зерна существенно определяет хладостойкость металлов и температуру вязко-хрупкого перехода. В частности, температура вязко-хрупкого перехода у мелкозернистых структур ниже, чем у крупнозернистых [6].

Малая длина критической трещины у сплава Д16 обеспечивают этому сплаву высокую сопротивляемость хрупкому разрушению (рис.1).

Исследование выполнено по гранту РНФ № 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».

Список литературы

1. Солнцев Ю.П. Материалы для низких и криогенных температур: Энциклопедический справочник / Ю.П. Солнцев, Б.С.Ермаков, О.И.Слепцов. Под ред. Ю.П. Солнцева. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2008.
2. Патент № 177639 РФ. Автоматизированное устройство для охлаждения образцов при испытании на растяжение при пониженных температурах / Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Зиновьев Ю.А., Головин А.А., Шатагин Д.А., Сидоренков Д.А. – Приоритет от 23.11.2016; опубл. 05.03.2018, Бюл. №7.
3. Кабалдин Ю.Г., Хлыбов А.А., Аносов М.С. и др. Анализ хладостойкости металлов с различным типом кристаллического строения // Вестник ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова. 2019. Т. 22, №3. С. 48-55. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-48-55
4. Сибелев А.В., Мишин В.М. Установление критерия хладноломкости стальных образцов на основе критерия локального разрушения // Фундаментальные исследования. – 2013. – №4-4. – С. 843-847.
5. Котречко С.А. Локальный подход к анализу хрупкого разрушения и его физическая интерпретация // Проблемы прочности. – 2003. – № 4. – С. 14-31
6. Мешков Ю.Я. Физические основы разрушения стальных конструкций. – Киев: Наукова думка, 1981. – 240 с.
7. Финкель В.М. Физика разрушения. – М.: Металлургия, 1970. – 178с.

8. Красовский А.Я. Хрупкость металлов при низких температурах. – Киев: Наукова думка, 1980. – 340 с.
9. Солнцев Ю.П. Материаловедение: Учебник / Ю.П. Солнцев, С.А. Вологжанина, А.Ф. Иголкин. – М.: Academia, 2016. – 288 с.

Сведения об авторах:

Кабалдин Юрий Георгиевич – д.т.н., профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г.Нижний Новгород;

Хлыбов Александр Анатольевич – д.т.н., профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г.Нижний Новгород;

Аносов Максим Сергеевич – к.т.н., старший преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г.Нижний Новгород;

Шатагин Дмитрий Александрович – к.т.н., доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г.Нижний Новгород;

Головин Антон Алексеевич – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г.Нижний Новгород.