

Глава 3. МАТЕРИАЛЫ, УСТОЙЧИВЫЕ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ТЕМПЕРАТУРЫ И РАБОЧЕЙ СРЕДЫ

3.1. Хладостойкие материалы

Явление хладноломкости, т.е. хрупкого разрушения, связанного с действием низких температур, впервые стало предметом широкого обсуждения в связи с бурным строительством железных дорог в конце XIX в. Было отмечено, что рельсы, изготовленные из литого металла, внезапно разрушались при понижении температуры. Уже тогда была признана актуальной проблема хладноломкости металлов, необходимость изучения ее природы и выработки мероприятий по ее устранению.

Особую актуальность проблема хладноломкости приобрела в связи с освоением арктических и антарктических районов. Эффективность работы оборудования и транспорта в зимнее время в этих районах резко падает. Анализ работы автотранспортных организаций северных районов показал, что срок службы автомобилей обычного типа по сравнению с зоной умеренного климата сокращается в 2 раза, а аварии и поломки, связанные с климатическими условиями, выводят из строя до 25% парка машин.

Важнейшим фактором дальнейшего развития техники низких температур является создание материалов, пригодных для работы в этих условиях. Конструирование и выпуск хладостойкой техники должны быть основаны на глубоком знании поведения материалов при низких температурах, надёжных методах оценки работоспособности и долговечности материалов, научно обоснованных рекомендациях по выбору материалов.

3.1.1. Критерии хладостойкости стальных материалов

Под *хладостойкостью материала* понимают его способность сопротивляться деформации и разрушению при понижении температуры от 0 до -269°C ($273 - 4 \text{ K}$).

Особенностью низкотемпературной службы является ужесточение требований к материалу по *пластичности* и *вязкости*. Определенную сложность представляет выбор необходимого уровня пластических и вязких свойств. *Обычно минимальная рабочая температура определяется температурой вязко-хрупкого перехода, при которой вязкость падает до неприемлемо малых значений.*

По хладостойкости металлические материалы, используемые при низких температурах, условно могут быть разбиты на четыре основные группы:

1. Металлы и сплавы, характеристики механических свойств которых позволяют использовать их до температур климатического холода (-60°C). Они являются основными конструкционными материалами холодильного машиностроения. Их используют также для изготовления изделий так называемого северного исполнения. К этой группе относятся качественные углеродистые и низколегированные стали ферритного и перлитного классов с ОЦК-решеткой.

2. Ко второй группе относятся сплавы, сохраняющие вязкость и пластичность при охлаждении до 170 К. Это стали с 0,2–0,3% С, дополнительно легированные Ni, Cr, Ti, Mo. К этой группе относятся, например, низкоуглеродистые ферритные стали с 2–5% Ni, используемые при температурах 210–150 К.

3. К третьей группе относятся сплавы, способные без ухудшения свойств выдерживать температуры до 77 К (температура кипения жидкого азота). Сюда относятся стали типа 12X18H10T, 0H9A, большинство сплавов на основе Al, Ti, Cu, не обнаруживающих склонности к хрупкому разрушению. Для ненагруженных конструкций с целью экономии Ni применяют Cr–Mn и Cr–Ni–Mn стали типа 10X14Г14Н4Т (ЭИ711), 03X13АГ19 (ЧС36), 07X21Г7АН5 (ЭП222).

4. К четвертой группе относятся сплавы, используемые для работы при температуре ниже 77 К. К этой группе принадлежат материалы, используемые в космической технике, производстве и потреблении водорода, экспериментальной физике. Для работы при таких температурах пригодны лишь высоколегированные коррозионностойкие стали типа 10X11Н23ТЗМР (ЭП33), 03X20Н16АГ6, некоторые бронзы, никелевые, алюминиевые сплавы, легированные Mg, и сплавы титана.

Важнейшее требование, определяющее пригодность материала для работы при низкой температуре – *отсутствие хладноломкости*. Хладноломкость характерна для железа, стали, металлов и сплавов с ОЦК и ГП-решетками. Металлы с ГЦК-решеткой (аустенитные стали, медь, алюминий, никель) не склонны к хладноломкости.

3.1.2. Хладостойкие стали климатического холода

Стали являются основным конструкционным материалом для изготовления механизмов, машин и конструкций, работающих при низких температурах. *Стали для этих условий должны обеспечивать необходимую прочность в сочетании с высокой вязкостью и пла-*

стичностью, обладать малой чувствительностью к концентраторам напряжений и низкой склонностью к хрупкому разрушению.

С понижением температуры прочностные характеристики стали растут, а вязкость и пластичность уменьшаются. Поэтому при выборе стали для работы в этих условиях определяющими показателями являются: прочность при максимальной температуре эксплуатации – обычно комнатной; вязкость и пластичность – при минимальной температуре. Механические свойства и работоспособность сталей, применяемых для хладостойких конструкций, а также в холодильном и криогенном машиностроении, зависят от многих факторов. К ним, прежде всего, относится тип кристаллической решетки, размер зерна и состояние его границ, содержание легирующих элементов и примесей, форма и размеры неметаллических включений. Насыщение металла водородом увеличивает хрупкость стали. Сварка способствует росту зерна и дополнительному наводороживанию, что увеличивает хладноломкость сварных соединений. Кроме того, нагрев при сварке может способствовать фазовым превращениям и выделением примесей по границам зерен, что также повышает хрупкость стали.

Для надежной работы материала при низких температурах необходимо обеспечить температурный запас вязкости. Это достигается тогда, когда *порог хладноломкости материала расположен ниже температуры его эксплуатации. Чем больше температурный запас вязкости, тем меньше опасность хрупкого разрушения материала, выше его эксплуатационная надежность.*

Для деталей машин, предназначенных для эксплуатации в районах с холодным климатом (ХЛ), применяют стали с гарантируемой ударной вязкостью при отрицательных температурах (табл. 3.1, 3.2).

Низколегированные стали (в зависимости от механических свойств и химического состава) разделены на 15 категорий. Основной характеристикой металлических материалов является ударная вязкость до и после механического старения. Стали категории 6–9 имеют гарантированную ударную вязкость при температуре $-40\ldots-70^{\circ}\text{C}$. Стали категорий 12–15 дополнительно подвергают испытаниям на механическое старение. Стали поступают на машиностроительные заводы в термообработанном состоянии (нормализация или закалка и отпуск).

Склонность сталей к хрупкому разрушению зависит в основном от размера зерна, структуры, состава и наличия вредных примесей. Менее склонны к хрупкому разрушению стали, имеющие мелкозернистую структуру. Для получения этих сталей применяют моди-

фицирование добавками *алюминия, титана, ниобия и ванадия* при выплавке; раскисление неметаллических включений; термическую обработку горячекатаного металла (нормализацию и улучшение); контролируемый режим прокатки и др. Улучшение структуры сталей для обеспечения более низкого порога хладноломкости достигается улучшением (закалкой и отпуском) непосредственно после прокатки.

Таблица 3.1

Хладостойкие низколегированные стали для ответственных сварных деталей машин КХ (ГОСТ 19281-73)

Группа хладостойкости	Минимально допустимая температура, °С	Марка стали	Максимально допустимая толщина, мм	Гарантируемая ударная вязкость	
				KCU	При температуре, °С
1	-40	09Г2, 09Г2Д, 10Г2С1, 10Г2С1Д	30	3 (4)	-40
		09Г2С, 09Г2СД	30	3,5 (4)	-40
		10ХСНД	15	4,5	-40
		15ХСНД	30	3 (4)	-40
2	-50	09Г2С, 09Г2СД, 10ХСНД, 15ХСНД	11	3 (3,5)	-50
		09Г2, 09Г2Д, 10Г2С1, 10Г2С1Д	11	3 (3)	-50
3	-60	09Г2С, 09Г2СД, 15ХСНД, 10ХСНД	11	3 (3,5)	-60
		09Г2, 09Г2Д	11	3 (3)	-60
		10Г2С1, 10Г2С1Д	11	2,5 (3)	-60
4	-70	09Г2С, 09Г2СД, 10ХСНД, 15ХСНД	11	3 (3,5)	-70
		09Г2, 09Г2Д	11	3 (3)	-70
		10Г2С1, 10Г2С1Д	11	2,5 (3)	-70

Таблица 3.2

Стали для деталей машин исполнения КХ

Марка стали	Термическая обработка (закалка + отпуск) при температуре, °С	Предел прочности, ГПа	Температура применения не ниже, °С	Использование по толщине (мм) не более
1	2	3	4	5
1802Н4ВА	200	1,30	-100	200
18Х2Н4ВА	550-600	1,00	-120	200
12ХН3А	200	1,00	-80	40
12ХН2	200	0,90	-80	30
12Х2Н4А	200	1,20	-70	100

1	2	3	4	5
15XM	200	0,90	–60	20
20M	200	1,00	–50	15
15X	200	0,80	–50	10
20X	200	0,90	–40	15
20XГНР	200	1,30	–20	70
30ХГТ	500–550	1,00	–30	30
30ХН3А	550	1,00	–80	100
30ХМА	350	0,95	–80	30
38ХМ10А	600–650	1,00	–80	60
40ХН	500	1,00	–80	50
40ХНМА	580–600	1,10	–80	70
38ХА	500	0,95	–60	25
40ХФА	600–650	1,00	–60	30
40Х	500	1,00	–60	25
35ХРА	550	0,95	–50	40
20Г	500	0,50	–70	10
35	500	0,70	–60	15
45	500	0,90	–50	20
40Г	500	1,00	–40	20

Состав стали должен иметь перлитно-ферритную структуру, так как легирующие элементы (никель, марганец, молибден и др.) понижают порог хладноломкости.

Из всех легирующих элементов никель в наибольшей степени понижает хладноломкость стали. Никель и железо полностью растворимы друг в друге, имеют близкое строение кристаллических решеток. Он находится в твердом растворе в феррите или аустените. Никель упрочняет феррит и одновременно увеличивает его вязкость, а также увеличивает прокаливаемость стали, измельчает зерно, снижает концентрацию примесей на дислокациях и уменьшает блокирование дислокаций примесными атомами внедрения.

На рис. 3.1 приведена зависимость критической температуры хрупкости от содержания никеля в стали. Введение 1% никеля снижает порог хладноломкости примерно на 20 К.

Введение молибдена до 0,5% существенно снижает порог хладноломкости. Молибден оказывает сдерживающее влияние на диффузионную подвижность фосфора и уменьшает отпускную хрупкость.

Действие никеля на хладноломкость особенно эффективно в сочетании с молибденом.

Резко отрицательное действие на хладноломкость оказывают фосфор, сера, растворенные газы: кислород, азот, водород (рис. 3.2).

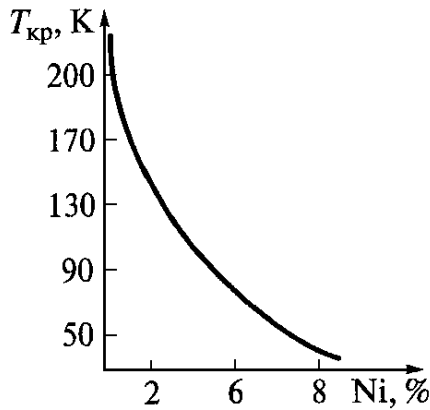


Рис. 3.1. Влияние содержания никеля на критическую температуру хрупкости низкоуглеродистой стали

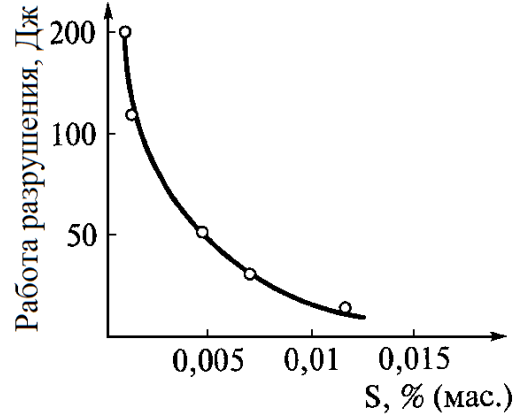


Рис. 3.2. Влияние содержания серы на работу удара поперечных образцов Шарпи из микролегированной мелкозернистой стали

С увеличением содержания серы растет количество сульфидных включений, играющих роль концентраторов напряжений. Так, увеличение содержания серы в литой стали 25Л от 0,02 до 0,05% более чем в 2 раза снижает ударную вязкость при температуре -40°C (233 К). Повышение содержания серы на 0,01% увеличивает порог хладноломкости примерно на 15 К.

Фосфор охрупчивает сталь за счет образования фосфидной эвтектики. При увеличении содержания углерода охрупчивающее влияние фосфора возрастает. Повышение содержания фосфора на 0,01% для литой стали 35Л увеличивает критическую температуру хрупкости примерно на 20 К. Вредное влияние фосфора подавляется за счет легирования молибденом.

Глубокая десульфурация и дефосфорация являются необходимыми условиями обеспечения высокой сопротивляемости хрупкому разрушению.

Отрицательное влияние вредных примесей уменьшается при введении редкоземельных металлов, а также кальция и циркония. Они снижают отпускную хрупкость конструкционных сталей.

Контролируемая прокатка, являющаяся разновидностью ТМО, позволяет повысить вязкость металла. При контролируемой прокатке строго регламентируют степень обжатия на последних стадиях деформации, проводимых при более низкой температуре. Эффект кон-

тролируемой прокатки возрастает при микролегировании стали ванадием и ниобием. Так, например, сталь 09ХГ2НФБ в результате контролируемой прокатки с последующим регулируемым охлаждением в процессе прокатки на стане имеет преимущественно бейнитную структуру, а критическая температура хрупкости $t_{50} = -100^{\circ}\text{C}$. Сталь, хорошо сваривается и может быть использована в сварных конструкциях ответственного назначения в строительстве и машиностроении.

Любая сталь обладает стойкостью против перехода в хрупкое состояние. Для её определения испытывают образцы при разных температурах. Сталь, имеющая более низкую температуру перехода в хрупкое состояние, считается более качественной.

На рис. 3.3, а показана схема перехода хрупкого разрушения сталей в пластическое. Кривая 1 характеризует изменение хрупкой прочности, а кривая 2 – изменение предела текучести в зависимости от температуры.

Выше пересечения кривых 1 и 2, в точке А, разрушение будет пластичным, ниже – хрупким.

На рис. 3.3, б показан также характер изменения ударной вязкости в зависимости от температуры. При понижении температуры наступает момент, когда ударная вязкость резко снижается. Температуру t_1 и t_2 называют соответственно верхней и нижней критической температурой перехода стали в хрупкое состояние.

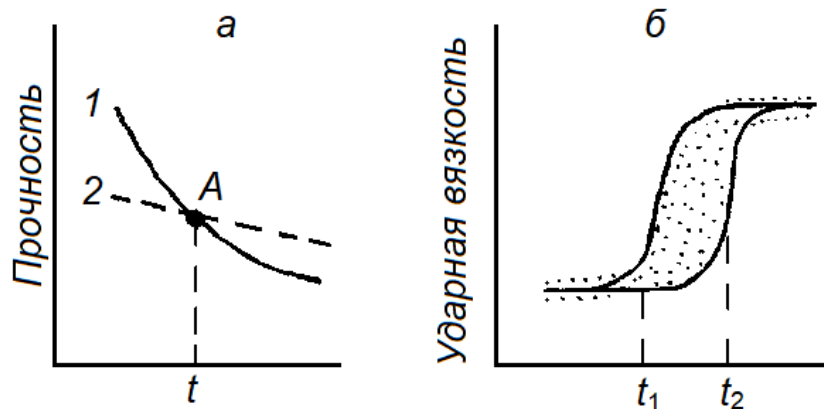


Рис. 3.3. Изменение прочности (а) и ударной вязкости (б) стальных материалов при понижении температуры

Повышение хладостойкости конструкционных сталей достигается термоупрочнением (закалкой и отпуском). Низколегированные хладостойкие стали, применяемые для деталей машин, – 09Г2, 09Г2С, 09Г2СНД, 10Г2С1, 10Г2С1Д, 10ХСНД, 15ХСНД, легированные – 30ХМА и 40ХНМА, с карбонитридным упрочнением – 14ХГ2АФ, 16Г2АФ и др.

Особую сложность представляет повышение хладостойкости литых сталей. Литая сталь отличается от деформированной наличием дефектов в виде раковин и трещин. Литые стали имеют крупное первичное зерно, и его измельчение представляет сложную задачу.

Хладостойкость литых сталей может быть повышена при условии:

- создания равномерной мелкозернистой структуры, предотвращающей образование пиков локальных напряжений;
- уменьшения количества и размеров неметаллических включений и перлитной составляющей, а также их глобуляризации;
- уменьшения количества вредных примесей, способных образовывать сегрегации на структурных неоднородностях.

Наиболее перспективным способом измельчения зерна в литых и деформированных сталях является микролегирование карбидообразующими элементами: ванадий, титан, ниобий, цирконий.

Для литых сталей наиболее целесообразно легирование ванадием, который полностью растворяется в аустените, обеспечивая измельчение зерна и дисперсионное твердение.

При совместном использовании ванадия и алюминия карбонитриды или карбиды ванадия обеспечивают упрочнение по механизму дисперсионного твердения, а нитриды алюминия способствуют измельчению аустенитного зерна и препятствуют его росту при нагреве.

Дополнительное введение вместе с ванадием и алюминием титана может дать положительный эффект в результате образования нитридов алюминия при более низких температурах.

Повысить хладостойкость литых сталей можно за счет введения щелочноземельных металлов.

Однако десульфидирующая способность подобных лигатур в значительной мере определяется степенью раскисления стали. Щелочноземельные металлы обладают высоким сродством как к кислороду, так и к сере, и в случае низкого содержания алюминия в стали в основном расходуются на раскисление, а с увеличением концентрации алюминия содержание несвязанного кислорода в стали уменьшается и, следовательно, вероятность взаимодействия щелочноземельных металлов с серой возрастает.

При концентрации алюминия в стали менее 0,03% наблюдается снижение ударной вязкости, связанное с наличием в структуре металла пленок сульфидных эвтектик, располагающихся по границам зерен (рис. 3.4). При концентрации алюминия более 0,03% щелочноземельные металлы активно участвуют в формировании оксисульфидных глобулярных включений.

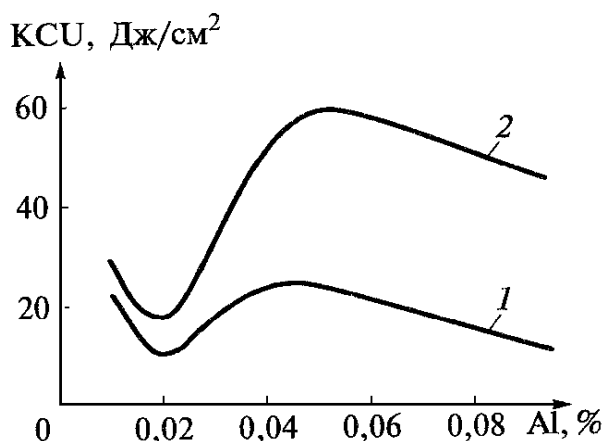


Рис. 3.4. Влияние содержания алюминия на ударную вязкость стали 12ХГФЛ: 1 – без обработки щёлочноземельными металлами, 2 – с обработкой

Наиболее важные технологические свойства сталей для холодного климата – свариваемость и пластичность. Сварку широко применяют в производстве конструкций, а пластичность необходима для изготовления тонких листов и тонкостенных элементов, менее склонных к хрупкому разрушению, чем массивные детали.

Для повышения хладостойкости и свариваемости используют стали, легированные азотом в сочетании с различными сильными нитридообразующими элементами, в качестве которых чаще всего применяют ванадий, алюминий, ниобий и титан. Выделение азота из твердого раствора в виде нитридов уменьшает его охрупчивающее действие, что увеличивает прочность стали и, способствуя измельчению зерна, не ухудшает её хладостойкости.

К сталям этой группы относятся стали марок 09Г2С, 09Г2СД, 16Г2АФ, 14Г2АФ, 14Г2САФ и др. Механические свойства при температуре 20°C (293 К), а также значения ударной вязкости листового проката толщиной 10–25 мм из двух марок стали этой группы приведены в табл. 3.3.

При температуре воздуха до –50°C при сварке применяют флюсы АН-348 с проволокой Св-ЮНМ или ОСЦ-45 с Св-08ХИМ. При температуре ниже –20°C обязателен предварительный прогрев места сварки.

Помимо легирующих элементов необходимо учитывать влияние углерода. Углерод, хотя и способствует эффективному упрочнению, но резко снижает вязкость и пластичность стали, способствуя повышению хладноломкости. Принято считать, что увеличение в стали содержания углерода на каждые 0,1% повышает порог хладноломкости на 20°C (рис. 2.2, б). Снижение содержания углерода предотвращает

образование при сварке в зоне термического влияния хрупких закалочных мартенситных структур. В свариваемых хладостойких сталях содержание углерода должно быть ниже 0,2%.

Таблица 3.3

Механические свойства низколегированных свариваемых сталей марок 09Г2С, 14Г2САФ

Марка стали	Термическая обработка	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	КСУ, Дж/см ² , при температуре, °С		
					20	–40	–70
09Г2С	Состояние поставки	500	350	21	60	40	330
14Г2САФ	Нормализация при температуре 930°С	40	490	25	100	80	660
	Закалка – отпуск	590	410	32	200	40	1120

При конструировании металлоконструкций машин следует учитывать следующие требования: минимальное количество концентраторов напряжений; отсутствие резких изменений сечений; ребра жёсткости не должны доходить до поясов, испытывающих растягивающие напряжения; отсутствие сплошных поперечных швов; использование только наклонных сварочных швов на элементах металлоконструкций, испытывающих растягивающие напряжения.

3.1.3. Цветные хладостойкие сплавы

Алюминий и его сплавы, не имея порога хладноломкости, остаются вязкими при –253...–269°С. При охлаждении σ_B у них повышается на 35–60%, $\sigma_{0,2}$ – на 15–25%, а ударная вязкость монотонно уменьшается до 0,2–0,5 МДж/м². Вязкость разрушения K_{1c} практически не уменьшается, а значит алюминиевые сплавы при охлаждении менее чувствительны к надрезам, чем при 25°С. При низких температурах (от –253 до –269°С) используют алюминий и сплавы АМц, АМг2, АМг5. Для несвариваемых изделий, работающих при температурах до –253°С, применяют термически упрочняемые сплавы Д16, АК6, АК8, а также литейные сплавы.

Титан и его сплавы не охрупчиваются при температурах от –196 до –269°С и из-за большой удельной прочности используются в космической технике. Широко применяют технически чистый титан и его однофазные сплавы типа ВТ5-1. Они пластичны, легко сваривают-