

Перспективные разработки в области металловедения для криогенного и низкотемпературного оборудования

СОЛНЦЕВ Ю.П.
СПбГУНХИТ

The paper reports in detail about the developments of the Chair of technology of metals and metal science of the SPb GUN and PT in the field of increasing of reliability and durability of cryogenic equipment. First of all, this is the creation of new marks of steel: maraging steels, metastable austenitic steels, and casting steels for low temperatures. The performance and advantages of new steels under operating conditions at low temperatures are presented. The other direction is an increase in reliability of equipment – the analysis of working ability of steels at low temperatures. For this purpose it is necessary to create new techniques of non-destructive control, one of which (for oil and gas lines) is proposed by the author.

К числу основных направлений, объединенных единой стратегической задачей повышения надежности, долговечности и безопасной эксплуатации оборудования, работающего в условиях климатического холода и криогенных температур, относятся:

✓ разработка новых марок высокопрочных сталей для низкотемпературной техники ответственного назначения;

✓ анализ структурных изменений в металле за время длительной эксплуатации;

✓ оценка фактического состояния оборудования и продление срока его безопасной эксплуатации за пределами расчетного срока службы.

Разработка новых марок сталей для криогенной техники

Мартенситно-стареющие стали

К недостаткам аустенитных Cr-Ni или Cr-Ni-Mn сталей для криогенной техники относится низкая прочность при комнатной температуре, особенно по пределу текучести (250...400 МПа).

К числу наиболее удачных решений в области криогенного материаловедения следует отнести создание новых – мартенситно-стареющих сталей (МСС). Мартенситно-стареющие стали удачно сочетают высокие прочностные и пластические свойства, хорошую тепло- и хладостойкость, сопротивление хрупкому разрушению, размерную стабильность при термической обработке.

Их основа – безуглеродистые сплавы железа с высоким содержанием никеля (до 20%), дополнительно легированные Co, Mo, Ti, Al, Cr и другими элементами. Особенности этой группы сталей являются получение при закалке с температурой 800...860 °С на воздухе практически безуглеродистого легированного мартенсита и выделение интерметаллитных фаз типа NiTi, Fe₂Mo, Ni₃(Ti, Al) при его последующем старении при температуре около 500 °С. Влияние кобальта на механические свойства мартенситно-стареющих сталей обусловлено его участием в процессе старения за счет образования сложных соединений Co-Ni-Mo-Ti, когерентно связанных с металлической матрицей. Кобальт,

как и никель, уменьшает растворимость молибдена в α -железе, подавляет образование δ -феррита и способствует упрочнению при старении. Он задерживает процесс разупрочнения, уменьшая скорость коагуляции высокодисперсных фаз.

Закалка фиксирует пересыщенный железоникелевый безуглеродистый мартенсит с высокой подвижностью дислокаций. Поэтому железоникелевый мартенсит при прочности около $\sigma_B = 1000$ МПа имеет высокую пластичность ($\delta = 18 - 20\%$, $\psi = 75 - 85\%$) и малую способность к упрочнению при холодной деформации. После закалки эти стали можно деформировать с большими степенями обжатия. В закаленном состоянии сталь хорошо обрабатывается давлением, резанием и хорошо сваривается.

Мартенситно-старяющая сталь упрочняется в основном при старении за счет выделения интерметаллидов. Если интерметаллидные фазы находятся на стадии предвыделения, когда они еще когерентно связаны с твердым раствором и имеют очень малые размеры, то в этом случае достигается наибольшее упрочнение.

По техническому заданию РКК «Энергия» сотрудниками кафедры технологии металлов и металловедения совместно с производственными предприятиями была разработана сталь 03X14K14H4M3T (ЭП 767), высокий уровень свойств которой определяется условиями формирования ее структуры. Оптимальное сочетание прочности, пластичности и вязкости достигается при термической обработке, состоящей из закалки при 1050°C , обработки холодом и старении при 520°C в течение 6 ч. В

результате такой термообработки механические свойства стали при комнатной температуре составляют (не менее): временное сопротивление $\sigma_B = 1450$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1350$ МПа, относительное удлинение $\delta = 15\%$, ударная вязкость $KCV = 70$ Дж/см². Высокий уровень ударной вязкости (более 50 Дж/см²) при температуре 77 К сохраняется благодаря присутствию в структуре 20 – 25 % остаточного аустенита (рис. 1).

Сталь 03X14K14H4M3T обладает удовлетворительной свариваемостью. Механические свойства сварных соединений без упрочняющей термической обработки сохраняются на высоком уровне. Разрушение образцов без термоупрочнения при 77 К носит вязкий характер.

Эта сталь широко используется в ракетно-космической технике для изготовления тонколистовых конструк-

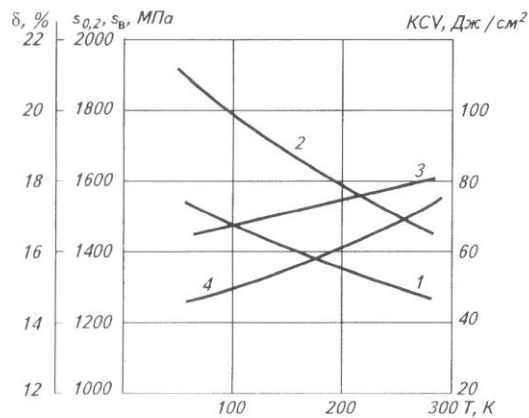


Рис. 1. Мартенситно-старяющая сталь ЭП 767 для криогенной техники ($T=77$ К):
1 – $\sigma_{0,2}$, МПа; 2 – σ_B , МПа; 3 – δ , %; 4 – KCV , Дж/см²

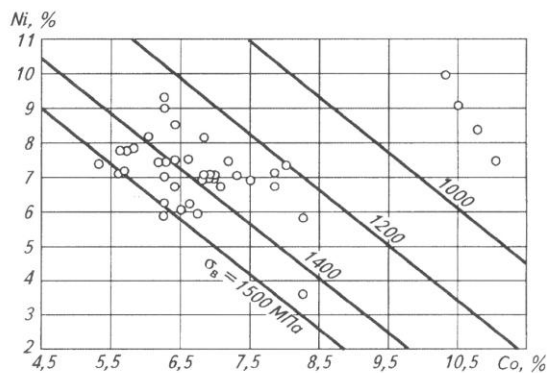


Рис. 2. Линии равного уровня временного сопротивления σ_B в зависимости от содержания никеля и кобальта

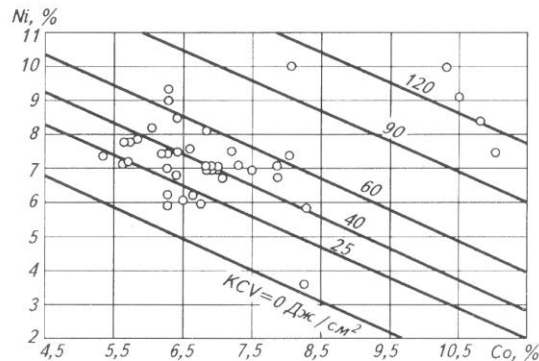


Рис. 3. Линии равного уровня ударной вязкости KCV при 20 К в зависимости от содержания никеля и кобальта

ций сложной конфигурации, деталей и узлов арматуры, надежно работающих более 20 лет при температуре до 77 К (золотники, втулки, опоры, стаканы, клапаны, тарелки и др.).

Недостаток стали ЭП767 в том, что она не обладает высокой прочностью при температуре кипения жидкого водорода. Кроме того, в составе стали содержится 13 – 15 % кобальта, что делает ее очень дорогой. РКК «Энергия» была поставлена задача расширения температурного интервала использования стали, экономно легированной кобальтом, до 20 К.

Методом главных компонент проведена математико-статистическая обработка большого числа плавов с целью определения взаимного влияния легирующих элементов на изменение механических свойств коррозионно-стойких мартенситно-старееющих сталей системы Cr-Ni-Co-Mo. С помощью расчетных уравнений регрессии произведен поиск оптимальных областей химического состава, обеспечивающего заданный комплекс свойств стали при пониженном содержании кобальта.

На рис. 2 и 3 приведены линии равного уровня прочности и ударной вязкости в зависимости от содержания Ni и Co ряда плавов мартенситно-старееющих сталей.

В результате исследований был разработан состав свариваемой, коррозионно-стойкой стали марки 05X12H7K6M4B с пониженным до 6 % содержанием кобальта. После оптимальной упрочняющей термической обработки, состоящей из закалки от 750 °С с охлаждением на воздухе и старения при 520 °С в течение 5 ч, при содержании 30 – 35 % остаточного аустенита сталь обеспечивала следующий уровень механических свойств при комнатной температуре: $\sigma_{0,2} \geq 1200$ МПа, $\sigma_B \geq 1300$ МПа, $\delta \geq 13\%$, $\psi \geq 50\%$, а при температуре 20 К $\sigma_{0,2} \geq 1700$ МПа, $KCV_{20} \geq 25$ Дж/см², что соответствует заданным требованиям.

Метастабильные аустенитные стали

Сотрудниками кафедры разработаны материалы для изготовления емкостей для хранения и транспортировки сжиженных газов, в том числе для перспективных проектов топливных баков автомобилей, работающих на сжиженном природном газе, а также топливных баков авиакосмической техники.

Основными требуемыми характеристиками металла для их изготовления являются высокая удельная прочность и технологичность.

Исследования показали, что высоким комплексом пластических и вязких свойств при низких температурах благодаря деформационному мартенситному превращению обладают метастабильные хромоникельмарганцевые аустенитные стали. Повышение прочности этих сталей достигается совместным дополнительным легированием азотом и ванадием с последующим дисперсионным твердением.

Термообработка проката из опытных плавов состояла из аустенизации при 1050 °С с охлаждением в воде и последующего старения при 690 °С в течение 25 ч. В качестве критерия интенсивности фазовых превращений была принята средняя скорость образования α -мартенсита при равномерной деформации статическим растяжением в заданных температурных условиях. Критерий $M = \alpha/\delta$ представляет собой отношение количества мартенсита (α), образовавшегося в зоне равномерной деформации образца при данной температуре, к относительному удлинению (δ) при той же температуре. Такой критерий наиболее полно связывает кинетику фазовых превращений с механическими свойствами метастабильных аустенитных сталей.

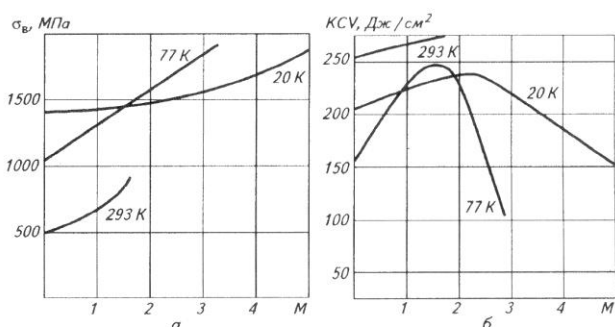


Рис. 4. Зависимость временного сопротивления (а) и ударной вязкости (б) от степени нестабильности аустенита в метастабильных сталях (критерий и интенсивность фазовых превращений M)

Таблица 1
Сравнительная характеристика материалов, применяемых для изготовления сосудов давления в криогенной технике

Марка материала	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_s , %	KCV, Дж/см ²		Модуль упругости E, МПа·10 ⁴	Удельная прочность $[\sigma_{0,2}/(\gamma \cdot g)]$, км
	при температуре, К						
	293	293	77	77	20		
AMr5	280	127	23	—	—	6,9	47
BT1	470	400	48	—	—	10,7	89
12X18H10T	529	235	37	280	250	18,6	30
06X15H9Г8АФ	900	500	46	240	221	20	64

Таблица 2

Механические свойства и результаты испытания внутренним давлением сосудов из стали
12X18H10T и 06X15H9Г8АФ

Марка материала	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$d_s, \%$		KCV, Дж/см ²		Давление разрушения, МПа	Напряжение в стенке в момент разрушения, МПа
	при температуре, К							
	293	293	77	20	77	20		
12X18H10T	660	260	37	32	300	280	9,8...13,2	490...660
06X15H9Г8АФ	900	500	46	36	242	220	18...21	1038...1240

Максимальными значениями ударной вязкости обладает сталь 06X15H9Г8АФ, содержащая по массе максимум 0,06 % С; 14 – 16 % Cr; 8,5 – 9,5 % Ni; 7 – 9 % Mn; 0,2 – 0,4 % N; 1 – 1,5 % V, которая характеризуется критерием интенсивности фазовых превращений около 1,2 и 1,8 при температурах 77 и 20 К соответственно. Отклонение от этих оптимальных значений в сторону как стабилизации, так и дестабилизации твердого раствора приводит к снижению ударной вязкости. Причем, если $M = \alpha/\delta$ при 77 К менее 1,2 или при 20 К менее 1,8, шейка не успевает упрочниться настолько, чтобы перестать быть самым слабым местом образца. При значениях же M более 1,2 при 77 К и более 1,8 при 20 К, что соответствует слишком интенсивному ходу мартенситного превращения, может произойти преждевременное разрушение образца по мартенситной структуре, которая обладает меньшей пластичностью (рис. 4).

Сравнительная характеристика материалов, применяемых для изготовления сосудов давления в низкотемпературной технике с характеристиками результатов стали 06X15H9Г8АФ, приведена в табл. 1.

Анализ таблицы позволяет рекомендовать использование метастабильной аустенитной стали 06X15H9Г8АФ наряду с титановыми сплавами для изготовления низкотемпературных транспортных емкостей и топливных баков. Однако титан характеризуется низкой жесткостью, его модуль упругости вдвое меньше модуля упругости разработанной стали. Кро-

ме того, титановые сплавы непригодны при ударных нагрузках в случае контакта с жидким кислородом и другими менее распространенными окислителями на основе фтора, что сужает область их возможного использования в жидкостных ракетных двигателях.

Результаты сравнительных натурных испытаний внутренним давлением топливных баков из разработанной кафедрой стали и применяемой обычно для этих целей стали марки 12X18H10T приведены в табл. 2.

Из данных табл. 2 следует, что метастабильная аустенитная сталь с азотом и ванадием имеет существенные преимущества для изготовления сосудов давления по сравнению с базовой сталью 12X18H10T.

Литейные стали для криогенной техники

Стальные отливки сравнительно редко применяют в криогенной технике. Однако существуют изделия, для которых их применение целесообразно, например запорно-регулирующая арматура для перекачки криогенных жидкостей. Изготовление корпусов вентилей из кованных, штампованных заготовок или проката путем механической обработки и сварки связано с большими трудозатратами, в то время как применение литья позволяет уменьшить трудоемкость.

Помимо хладостойкости стали этого назначения должны обладать хорошими литейными свойствами, обеспечивать плотность и герметичность отливки, иметь высокое сопротивление механической и термической усталости, выдерживая в течение более 10 лет до 5000

Таблица 3

Механические свойства сталей и результаты испытаний корпусов внутренним давлением

Марка стали	Механические свойства						Давление в момент разрушения, МПа
	T, К	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\delta_s, \%$	$\Psi, \%$	KCV, Дж/см ²	
07X13Г28АНФЛ	293	600	300	77	62	140	360
	77	1160	660	42	28	90	410
	20	1190	815	23	17	80	—
12X18H10T	293	575	220	66	56	115	80
	77	885	530	17	13	25	130
	20	900	610	8	6	20	—

циклов захлаживания-отогрева в диапазоне температур криопродукта и окружающей среды.

По условиям эксплуатации корпус арматуры может испытывать как статические, так и динамические нагрузки. Статические нагрузки действуют на корпус при непрерывном прохождении криопродуктов под давлением. Кратковременные динамические нагрузки появляются на переходных режимах, а также в случае гидравлического удара, связанного с резким торможением потока жидкости при подходе к местным сопротивлениям.

Обычно применяемые литейные хромоникелевые стали хорошо сопротивляются динамическим нагрузкам в криогенных условиях, но имеют низкую прочность при комнатной температуре. Кроме того, они не обеспечивают высокую герметичность изделий из-за склонности к пористости и пленкообразованию. Эти стали имеют тенденцию к образованию развитой литой дендритной структуры, оказывающей отрицательное влияние на хладостойкость отливок.

Оптимальное сочетание прочностных, пластических, вязкостных свойств, а также высоких литейных качеств и коррозионной стойкости обеспечила разработанная сотрудниками кафедры сталь 07X13Г28АНФЛ, содержащая по массе не более 0,1 % С; 27 – 29 % Мn; 12 – 14 % Cr; 0,5 – 1,5 % Ni; 0,1 – 0,2 % V; 0,2 – 0,3 % N.

Сравнение механических свойств корпусов из этой стали и стали 12X18Н10ТЛ приведены в табл. 3.

Из табл. 3 следует, что корпуса из стали 07X13Г28АНФЛ имеют лучшие свойства и выдерживают более высокое внутреннее давление, чем корпуса из литой стали 12X18Н10ТЛ, которая преждевременно разрушается из-за присутствия хрупких включений, плен и грубой литой дендритной структуры.

Сталь 07X13Г28АНФЛ обладает высокими литейными свойствами, хорошо сваривается без горячих и холодных трещин. Отношение прочности основного металла к прочности сварного соединения находится в пределах 0,95 – 0,98.

Литейные стали для холодного климата

Сталь для сварно-литой рамы трактора

В настоящее время почти 70% стальных отливок для Севера и Сибири изготавливают из обычных углеродистых сталей марок 20Л – 45Л с недостаточной прочностью и низкой хладостойкостью. Это приводит как к увеличению металлоемкости машин, так и к снижению эффективности техники, особенно в суровых климатических условиях.

Кафедрой совместно с рядом НИИ и заводов разработан ГОСТ 21357 – 87, определивший требования к хладостойким литейным сталям и их составам.

Для сварно-литой рамы крупногабаритных тракторов и экскаваторов обычно применяют сталь марки 20Л.

Количественную оценку уровня требований к механическим свойствам литой стали проводили на основании тензометрирования рамы при стеновых испытаниях. Стенд имитировал наиболее тяжело нагруженный режим работы трактора, когда происходит отрыв

колес подмоторного моста от грунта, что позволило выявить максимальные нагрузки, возникающие в конструкции рамы.

В результате исследований была разработана свариваемая литейная сталь 12ХГФЛ, которая после нормализации обеспечила требуемый уровень прочности при сохранении высокой пластичности и вязкости при низких температурах. Статистический анализ стали промышленных плавов в 12-тонных электропечах позволил получить следующие средние значения свойств металла: $\sigma_{0,2} = 418$ МПа, $\sigma_B = 533$ МПа, $\delta = 24,7$ %, $\psi = 44,8$ %, $KCV^{+20} = 95$ Дж/см², $KCV^{-60} = 43$ Дж/см². Вязкость разрушения этой стали в 1,4 раза больше, чем стали 20Л.

Литейная износостойкая сталь для зубьев ковшей экскаваторов

Для работы в особо тяжелых условиях копания с элементами ударно-абразивного износа наиболее широкое применение нашла классическая сталь Гадфильда – 110Г13Л. Основное достоинство стали Гадфильда – ее высокая износостойкость при приложении больших истирающих давлений. Для обеспечения пластичности и вязкости сталь подвергают аустенизации при

Таблица 4
Химический состав износостойких сталей для горнодобывающей техники

Химический элемент	Породы	
	Малоабразивные	Высокоабразивные
	Содержание элементов в стали, %	
C	0,3 – 0,35	0,38 – 0,45
Cr	0,95 – 1,4	2,0 – 2,5
Ni	0,8 – 1,1	1,3 – 1,6
Mo	0,2 – 0,3	0,2 – 0,3
V	0,1 – 0,15	0,1 – 0,15

Таблица 5
Механические свойства износостойких сталей после закалки и низкого отпуска (а) и высокого отпуска (б)

Свойства сталей	Породы			
	Малоабразивные		Высокоабразивные	
	а	б	а	б
σ_B , МПа	1650	1000	1750	950
$\sigma_{0,2}$, МПа	1450	900	1600	850
δ , %	10	20	8	15
ψ , %	25	70	15	60
KCV^{-40} , Дж/см ²	25	60	20	40

1050...1100 °С с фиксацией структуры в воде. Исследования сопротивления хрупкому разрушению деталей из стали 110Г13Л показали, что если в структуре этой стали наблюдаются избыточные карбиды, а также карбофосфидная эвтектика, то разрушение всегда проходит по межкристаллитному механизму.

Анализ опыта эксплуатации стали Гадфильда показал, что наибольшее количество отказов происходит из-за износа и хрупкого разрушения. Кроме того, эта сталь является экологически опасной при выплавке и ремонте сваркой. Твердость ненаклепанной стали 110Г13Л составляет всего 190...230 НВ. Давлений, возникающих в процессе работы, либо недостаточно для эффективного упрочнения стали, либо толщина наклепанного слоя настолько мала, что он легко продавливается абразивными частицами.

Для различных горных пород сотрудниками кафедры совместно с ОАО «Ижорские заводы» были рекомендованы среднелегированные стали, состав и механические свойства которых приведены в табл. 4, 5.

Анализ работоспособности сталей для низких температур

Наряду с созданием новых материалов все большую значимость приобретают исследования, посвященные анализу работоспособности материалов низкотемпературной техники за пределами расчетного срока службы. Эти работы условно можно подразделить на две группы:

✓набор статистических сведений об изменениях, произошедших в структуре и свойствах материалов в ходе длительной эксплуатации;

✓создание новых методик неразрушающего контроля, определяющих надежность и долговечность состояния металла оборудования в условиях низких температур, сложного напряженного состояния и агрессивного-коррозионного воздействия внешней среды.

В настоящее время как в понятие «ресурс», так и в целом в понятие «надежность» закладываются усредненные исходные данные по свойствам материалов аттестуемого оборудования. Влияние длительности срока службы в условиях низких температур на изменения, происходящие в материалах оборудования, учитываются только в ролевых функциях элементов, что связано с малым объемом информации о процессах, протекающих в сталях и сплавах в ходе длительной эксплуатации.

В основном при техническом диагностировании цепочка срок службы – изменение свойств материалов сводится только к двум точкам контроля: исходное состояние материалов оборудования и состояние по исчерпанию гарантированного производителем ресурса. Практически полностью отсутствует мониторинг изменений текущего состояния материалов в ходе эксплуатации. Такое положение было бы допустимо, если бы после исчерпания гарантированного ресурса оборудование автоматически изымалось из производственного цикла и подлежало обязательной замене. К сожалению, сейчас использование старого оборудования настолько

распространено повсеместно, что его автоматическое списание привело бы к остановке как отдельных производств, так и целых отраслей промышленности.

На наш взгляд, путь продления безопасной эксплуатации оборудования, эксплуатируемого в области низких температур за пределами расчетного срока службы, состоит в постепенном переходе от средневзвешенной оценки состояния материалов к созданию индивидуальных инженерных методов диагностики каждой конкретной единицы оборудования с учетом фактических условий его эксплуатации, проведенных ремонтов, времени простоя и мероприятий по консервации в этот период.

Индивидуальная диагностика оборудования требует:

✓разработки методов длительного прогнозирования характеристик материалов на основании исходной (паспортной) информации, для чего необходимо увеличение объема сведений, вносимых в паспорт объекта надзора;

✓разработки новых подходов к оценке фактического состояния оборудования, его технической диагностики, для чего необходимо создание принципиально новых и совершенствование существующих методик контроля, которые позволили бы осуществлять непрерывный или периодический мониторинг состояния металла и изменений в нем, происходящих в ходе длительной эксплуатации.

Мониторинг нефтяных и газовых трубопроводов

К числу разработок кафедры технологии металлов и металловедения СПбГУНиПТ относится предлагаемый метод оценки надежности и безопасной эксплуатации трубопроводов различного назначения, в частности магистральных и промысловых газопроводов.

Анализ статистических данных по отказам газопроводов и нефтепроводов из разных марок стали (14ХГС, 09Г2С, 16Г2АФ и др.) позволил установить зависимость числа отказов от времени эксплуатации. Независимо от системы легирования и уровня прочности трубных сталей, временной зависимости числа отказов трубопроводов и механических свойств основного металла и сварного соединения существует два интервала (рис. 5).

В первом интервале число отказов трубопроводов минимально и сохраняется практически на одном уровне (см. рис. 5,а). В этом интервале пластические и вязкие свойства материалов трубопроводов практически не изменяются (см. рис. 5,б).

Во втором интервале происходит снижение ударной вязкости основного металла и сварных соединений труб, а изломы образцов приобретают хрупкий характер. Одновременно резко увеличивается число отказов в трубопроводах. Происходят процессы изменения интегральных дислокационных структур, подобные процессам деформационного старения как в основном металле, так и в металле шва. Дальнейшее увеличение длительности нагружения усиливает процессы закрепления дислокаций атомами азота и углерода.

Повреждения трубопроводных систем, особенно магистрального назначения, представляют одну из слож-

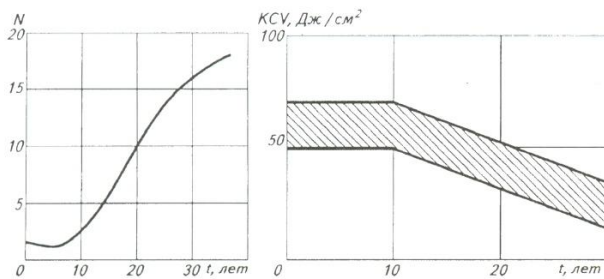


Рис. 5. Распределение числа отказов нефтепроводов N и уровня ударной вязкости KCV основного металла в зависимости от длительности эксплуатации t

нейших проблем воздействия техногенной среды на среду обитания человека. Имеющие длину в сотни километров и проходящие через малонаселенные, труднодоступные области Сибири и Крайнего Севера такие трубопроводы – наиболее сложные объекты технического диагностирования с целью оценки их надежности и безопасной эксплуатации. Еще более осложняют проблему контроля тяжелые природные и климатические условия расположения этих систем, которые делают практически невозможными работы на них в течение значительной части календарного года.

Сотрудниками кафедры предложен метод непрерывного мониторинга трубопроводных систем различного назначения, основанный на методах ультразвуковой локации повреждений.

Обследование проводится неразрушающим методом, который предусматривает разбивку контролируемого трубопровода на отдельные мерные участки. Оборудование для контроля разделено на две группы: диагностическая группа, которая стационарно закрепляется на поверхности контролируемого объекта; обрабатывающая группа, которая размещается в мобильном аналитическом центре (например, в специально оборудованном вертолете, движущемся вдоль объекта).

В начале и в конце каждого из мерных участков на нагруженной поверхности труб стационарно устанавливаются блок измерительной и регистрирующей аппаратуры с источником питания, возбуждения и приема импульсов ультразвуковых колебаний, что позволяет проводить прямой мониторинг качества металла трубопроводов в ходе его эксплуатации.

Оператор или автоматическое устройство аналитического центра при подлете к началу мерного участка дают команду на подачу диагностического импульса заданной интенсивности. Остаточный уровень сигнала затем снимается аппаратурой, размещенной в конце мерного участка, транслируется в аналитический центр и там обрабатывается.

Действие системы контроля основано на эффекте внутреннего трения, т.е. разном рассеянии упругой волны в твердом теле без дефектов и с дефектом конечной длины – трещиной. Полученная виброграмма на

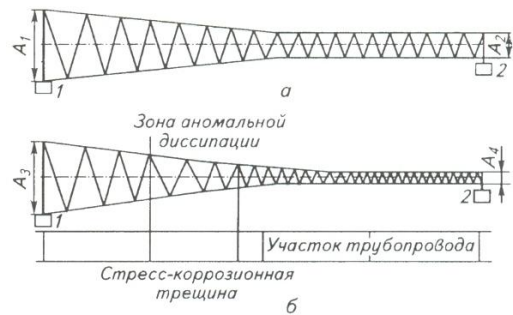


Рис. 6. Виброграммы бездефектного (а) и поврежденного (б) участка трубопровода:

1 – излучатель – возбудитель колебаний; 2 – система приемников колебаний; A_1 и A_3 – амплитуды входного сигнала, передаваемого с датчика-возбудителя в металл исследуемых участков трубопровода, $A_1 = A_3 = const$; A_2 , A_4 – амплитуды выходных сигналов, $A_2 \neq A_4$

борту вертолета подвергается компьютерной обработке. Изменение качества металлов определяется по изменению формы сигнала в поврежденном металле по сравнению с формой сигнала в бездефектном металле, который записывается для каждого мерного участка в момент первичного обследования.

На рис. 6 приведены примеры виброграмм бездефектного участка и того же участка с трещиной вдоль продольного сварного шва трубы.

На основании полученной информации оператор определяет местоположение дефекта, его протяженность, а при сравнении с данными предыдущего контроля – скорость его роста. На основании полученных и обработанных данных принимается решение о сроках и объемах ремонта трубопровода.

Обследование может проводиться без вскрытия изоляции и обваловки труб, в любое время года с любой необходимой периодичностью. Контроль может выполняться как по всей протяженности трубопровода, так и на специально выделенных участках, например, только в зонах, где ранее были обнаружены дефекты.

Метод позволяет проводить постоянный или периодический контроль на работающем оборудовании, более тщательно контролировать поврежденные участки. Скорость контроля регламентируется скоростью пролета подвижного аналитического центра над трубопроводом, которая для получения и обработки сигнала не должна превышать 150...180 км/ч.

Использование подобной системы дает возможность не только определить фактическое состояние трубопроводов в целом и каждого из его элементов в отдельности, но, набирая статистические данные, например, по скорости роста стресс-коррозионных повреждений трубы надежно определить безопасный ресурс эксплуатации, сроки и объемы планируемых ремонтов.

Окончание следует