



## ИССЛЕДОВАНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ И ИХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ РОССИЙСКОГО СЕВЕРА

Академик РАН **В. П. ЛАРИОНОВ**, **О. И. СЛЕПЦОВ**, д-р техн. наук,  
**В. В. ЛЕПОВ**, **С. П. ЯКОВЛЕВА**, кандидаты техн. наук  
(Объединенный ин-т физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск РФ)

Рассмотрены проблемы эксплуатации и ресурса промышленных объектов и металлоконструкций в условиях российского Севера. Описаны направления фундаментальных и прикладных исследований якутских ученых по созданию новых материалов, процессов сварки, поведения сварных конструкций при эксплуатации. Рассмотрены перспективные направления дальнейших исследований.

*Ключевые слова:* сварные конструкции, оценка состояния, ресурс, экстремальные условия, конструкционные материалы, механические свойства, структура, трещины, материаловедческие задачи

Задачи оценки состояния и продления ресурса промышленных объектов, техники и металлоконструкций особенно актуальны для северных регионов вследствие специфического влияния на материалы низких температур при эксплуатации. Поэтому отрасль нефтегазового строительства, ранее не причислявшаяся к экологически опасным, стала таковой в субарктических и арктических регионах. В связи с этим понятна важность задачи обеспечения безопасности технических объектов в регионах холодного климата — Европейском Севере, Тюменском Севере, Ямале и др.

Среди важнейших факторов, учет которых необходим с момента создания и на всем протяжении эксплуатации конструкции, следующие: сезонный фактор, ремонтпригодность в условиях холодного климата, высокая стоимость восстановительных работ и пр. Например, сезонный фактор проявляется в необходимости учета низких температур зимой, резких суточных перепадов в межсезонье, высокой паводковой опасности весной, оттаивания мерзлых пород и др. [1–3]. Особенности условий, при которых производятся восстановительные работы в регионах российского Севера, включая выполнение таких технологических операций, как ремонтная и монтажная сварка, зачастую определяют работоспособность и надежность технических систем. Большинство аварий техногенного характера на Севере происходит в результате несоответствия существующих технологий сварки условиям эксплуатации, несоблюдения сварочных норм и рекомендаций [1–5]. Все эти факторы тесно связаны также с профессиональной подготовкой инженеров-сварщиков и специалистов по неразрушающему контролю, их сертификации и аттестации с учетом региональных условий климата.

Поэтому необходима разработка научно-технических подходов к оценке и продлению ресурса объектов техники и металлоконструкций, которые

должны базироваться на комплексном анализе всех стадий их жизненного цикла, включая проектирование, изготовление и эксплуатацию.

Широкий спектр экстремальных условий эксплуатации диктует новые технические требования к конструкторским решениям, материалам и технологическим процессам. При понижении температуры окружающей среды, как известно, в первую очередь сталкиваются с явлением хладноломкости. Поэтому одной из первостепенных задач при обеспечении работоспособности машин и конструкций в условиях Севера является применение соответствующих хладостойких материалов. Простое применение низколегированных хладостойких сталей, ставшее уже традиционным решением этой задачи, не снимает полностью проблемы сокращения количества отказов и катастрофических разрушений конструкций и машин. Безопасность эксплуатации и продление ресурса технологического оборудования, карьерной техники, трубопроводов и инженерных сооружений в арктических районах требует разработки конструкционных материалов (в том числе и неметаллических), обладающих высокими хладо- и износостойкими свойствами, сохраняющих свои характеристики при длительном использовании в условиях низких температур и при резких перепадах температур [2, 6, 7]. Немаловажно, что современные материалы позволяют уменьшить массу машин и конструкций при одновременном улучшении их эксплуатационных показателей.

Имеется мировой опыт использования колоссального количества материалов, причем каждый отличается по свойствам и назначению [6]. При этом непрерывно создаются новые материалы. Укрупненно можно выделить четыре основных вида конструкционных материалов: металл, керамика, композиты и полимеры. Причем несмотря на появление и постоянный рост объемов производства неметаллических материалов, наиболее распространенными конструкционными материалами в ближайшие десятилетия по-прежнему останутся стали и сплавы. Это предопределяется широким диапазоном их прочности и пластичности, относительно



низкой стоимостью производства, возможностью многократной утилизации и регенерации. Высокие конструктивные свойства, низкая удельная энергоемкость и цена еще долго будут предопределять приоритет металлов и сплавов. В связи с этим создание хладостойких конструкционных материалов должно базироваться прежде всего на решении задачи выявления природы вязкохрупкого перехода в металлах, механизма и особенностей деградации их структуры.

Одним из определяющих требований при создании хладостойких конструкционных сталей является обеспечение мелкозернистой структуры, ограниченное содержание вредных примесей. Например, металл должен иметь пониженное содержание серы. В целом же пути и принципы создания хладостойких сплавов пока находятся только на стадии разработки. Существует ряд теорий феноменологического характера, описывающих преимущественно влияние металлургических факторов. Например, согласно имеющимся отечественным и зарубежным исследованиям в области влияния легирующих элементов на свойства стали микролегирующие и модифицирующие редкоземельными металлами повышает как прочностные свойства сталей, так и одновременно хладостойкость. Можно говорить об ответах только на отдельные вопросы, а основополагающих теорий по физической картине процесса перехода металлов из вязкого в хрупкое состояние пока нет. Отсутствуют теоретические основы, дающие возможность исследовать физическую природу хладноломкости на уровне коллективизированных электронов, межатомных сил, типа межатомных связей, искажений и изменений типа кристаллической решетки, в частности, при создании новых конструкционных сплавов. Особую значимость в этих условиях приобретают исследования, направленные как на разработку теоретических основ создания материалов с новыми свойствами на базе знаний об электронной и микроскопической структуре вещества, так и на изучение фундаментальных аспектов физической природы вязкохрупкого перехода материалов при низких температурах.

Якутские ученые уже более 30 лет занимаются разработкой хладо- и износостойких конструкционных материалов [8]. В результате изучения ряда физико-механических характеристик (внутреннего трения, микротвердости, электропроводности, эффекта Мёссбауэра и пр.) ими было показано, что вязкохрупкий переход углеродистых сталей обусловлен интенсивным образованием ковалентных связей (изменением электронной конфигурации атомов), влияющих на релаксационную способность материала [2]. В результате сделан вывод о возможности повышения хладостойкости сталей путем легирования определенными химическими элементами, снижающими направленную составляющую химической связи материалов на основе железа. В 1980-е годы в Институте физико-технических проблем Севера (ИФТПС) СО РАН совместно с коллегами из Томска создан новый износостойкий безникелевый сплав ИСЦ-1 — высокохромистый чугуун, оптимально модифициро-

ванный редкоземельными металлами. Он опробован и внедрен на горно-добывающих предприятиях Якутии. Кроме того, совместно с Уралчерметом и СО РАН разработана хладостойкая износостойкая сталь, опытно-промышленные испытания которой также проведены на горно-добывающих предприятиях Якутии. Сейчас, в условиях возрождения интереса к фундаментальным, инновационным разработкам, эти исследования получили свое продолжение в региональных программах РФФИ «Арктика», целевых республиканских программах, а также в рамках интеграционного комплексного проекта СО РАН.

В последние годы получили широкое развитие исследования наноматериалов. Как отмечалось выше, одним из методов улучшения механических свойств металлов и понижения температуры вязкохрупкого перехода является изменение зерна, и среди наиболее эффективных способов формирования структуры металлов — пластическая деформация. В результате интенсивного пластического деформирования может быть достигнут средний размер зерна в пределах от единиц до сотен нанометров; при этом очень высокая прочность сочетается с достаточной пластичностью. Несмотря на большое количество публикаций по этой тематике, процессы и механизмы, обуславливающие существенные изменения в свойствах, остаются еще малоизученными. Для практического использования металлов с нано- и субмикроструктурной структурой необходимы более полные сведения как об их механических свойствах, так и об механизмах их формирования. В этом направлении нами начаты исследования теоретических и экспериментальных основ получения повышенных механических свойств и хладостойкости конструкционных сталей путем обеспечения нанокристаллических структурных состояний.

В материаловедении важнейшим направлением фундаментальных исследований является изучение внутренних механизмов разрушения на различных структурных уровнях деформации, а также экспериментальное и компьютерное моделирование всего жизненного цикла конструкции и ее элементов [9]. Вместе с тем, до сих пор механики и материаловеды оперируют феноменологическими теориями, не связанными с действительным строением и структурой деформации материала. В то же время в физике твердого тела накоплен большой объем знаний о внутренней структуре вещества, который остается невостребованным материаловедцами.

Ведущиеся в ИФТПС исследования по разработке теории создания материалов включают изучение макроскопических характеристик прочности с вариацией температуры в широких пределах, рентгеноструктурный и дифрактометрический анализ тонкой структуры материала, оптической, растровой и зондовой микроскопии и фрактографии поверхностей разрушения и деформирования металлов, металлографии и исследований химического состава образцов. При этом немаловажное место занимает компьютерная обработка результатов эксперимента и математическое моделиро-



вание [9, 10]. Для выявления механизмов повреждения и разрушения металла при низких температурах исследованы пластически деструкционные аспекты процесса разрушения элементов реальных конструкций и модельных образцов, кроме того, выполнен комплекс металлографических и микроструктурных исследований. Получены уникальные данные относительно поведения материала при замедленном разрушении под действием водорода, влиянии взрывного нагружения на сопротивление материала образованию холодных трещин и распространению хрупкого разрушения [11]. Разрабатываются средства оценки ресурса узлов и деталей машин, эксплуатирующихся в условиях холодного климата, а также иерархическая модель разрушения материала при совместном действии различных силовых, температурных и коррозионных нагрузок (рис. 1). Для создания новых материалов, имеющих оптимальное количество ковалентных связей в исходном состоянии, также предложено применение системного подхода на основе генезиса целостности. Предложен ряд моделей хладноломкости, получивших свое экспериментальное подтверждение.

Для выявления механизмов разрушения металла при низких температурах исследованы поверхности разрушения элементов конструкций и модельных образцов. Осуществляются оптическая и туннельная сканирующая фрактография изломов образцов, разрушенных при различных внешних условиях и после различных видов воздействия на металл, комплекс металлографических и микроструктурных исследований.

Поверхность субмикротрещины, начинающейся от карбидного включения, показана на рис. 2. Субмикротрещина распространяется по кристаллографическим плоскостям мартенсита. Двухмерное изображение дает возможность измерить параметры субмикротрещины. По трехмерному изображению и профилю определен размер карбидного включения.

Использование в технических объектах новых современных материалов подразумевает и разработку передовых технологий, в частности технологии сварки. Например, вследствие высокой чувствительности сталей повышенной или высокой прочности к термическому воздействию, возможно значительное ухудшение механических свойств металла в зоне сварного шва. Действительно, из результатов анализа разрушений сварных изделий при низких температурах следует, что наибольшая их часть приходится на сварные соединения или начинается в них. Кроме того, при сварке на холоде горение сварочной дуги имеет свои особенности — температура сварочной дуги повышается в результате сжатия ее столба [1]. Следовательно, изменяется весь тепловой баланс сварочной ванны, вся кинетика термического и термомеханического циклов, фазовых и структурных превращений. Очевидно, что оптимизация технологий свар-



Рис. 1. Общая схема комплексных исследований процессов деформирования и разрушения гетерогенных сред на основе иерархической модели

ки при низких температурах воздуха требует учета всех этих факторов.

Проблема сварки конструкционных сталей с инженерной точки зрения связана с необходимостью обеспечения комплекса свойств по равнопрочности, предотвращению образования холодных трещин, а также структур, снижающих сопротивляемость сварных соединений хрупкому раз-

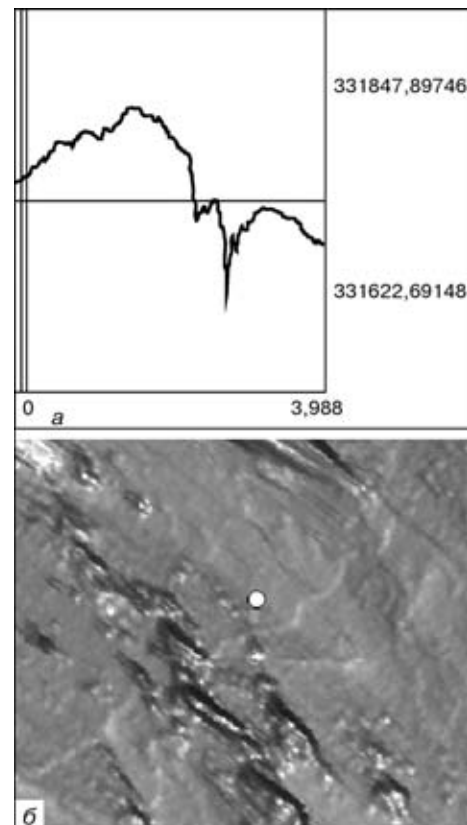


Рис. 2. Очаговая трещина, инициированная карбидной частицей, в мартенсите стали 14X2ГМР, полученная методом зондовой микроскопии (X16384): а — профиль поверхности; б — трехмерное изображение

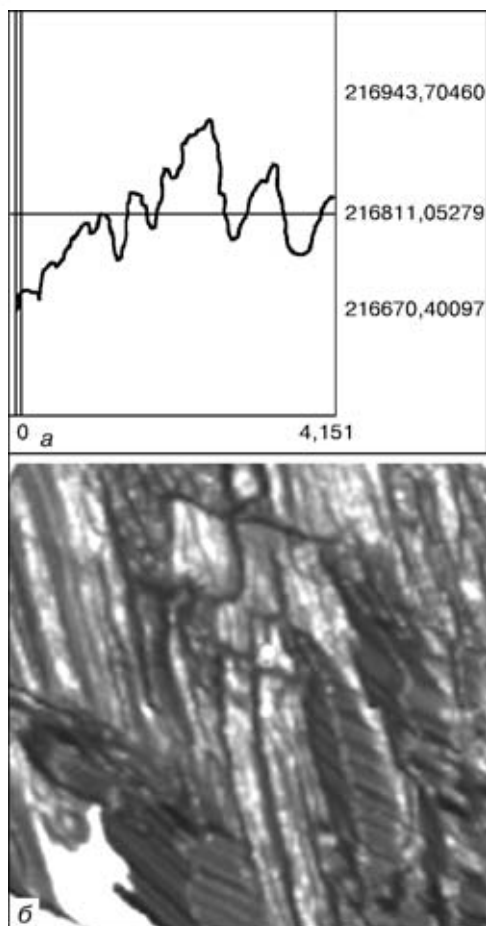


Рис. 3. Субструктурные блоки мартенсита образца-имитатора из стали 14X2ГМР зоны перегрева (X32768): *a* — профиль поверхности по сечению; *б* — трехмерное изображение

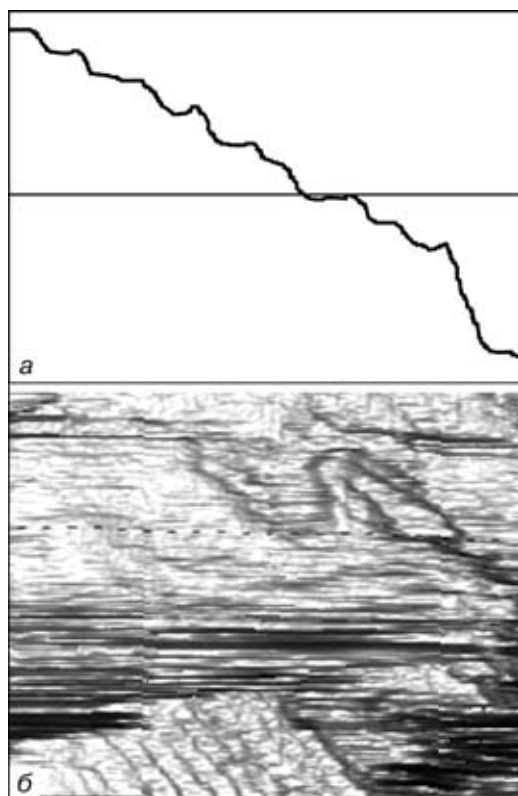


Рис. 4. Изображение пластинчатого мартенсита стали 14X2ГМР, полученного в сканирующем туннельном режиме (X65536): *a* — профиль поверхности по сечению; *б* — трехмерный скан

рушению. В ИФТПС исследована физическая природа аномальности сварочной дуги при сварке конструкционных сталей в условиях низких температур окружающей среды, кинетика сварочных деформаций и напряжений, процессы замедленного разрушения [1–3, 12]. Итогом явилась разработка принципиально новых положений технологии сварки, обеспечивающей технологическую и эксплуатационную прочность сварных соединений. В ее основе — оптимальное тепловложение при сварке, которое должно обеспечить выполнение условия сближения характеристик основного металла и металла шва, а также рациональный выбор и разработка сварочных материалов.

Применительно к дуговой сварке высокопрочных низколегированных сталей одной из основных проблем считается необходимость исключения операции предварительного подогрева, в связи с чем особое значение приобретает управление поведением водорода в сварных соединениях как одним из факторов, связанных с хрупким разрушением сварных конструкций [13].

В ИФТПС при изучении роли растворенного водорода в замедленном разрушении применены методы зондовой микроскопии для микроструктурного и фрактографического анализа образцов низколегированной стали. Посредством туннельной микроскопии (мультимикроскоп СММ-2000ТА, сканер с полем 6X6X1 мкм) исследован излом образцов из стали 14X2ГМР, насыщенных водородом при температуре 400 °С и испытанных на замедленное разрушение. Они показали, что микротрещины распространяются в зоне надреза по границам субструктурных блоков мартенсита (рис. 3). Поверхность субмикротрещины на изломе образца показывает расщепление по плоскостям скольжения субструктурных построек. Профиль излома позволяет измерить размеры отдельных блоков субструктуры и их разориентировку относительно друг друга (рис. 4).

Использование новых материалов для совершенствования техники обуславливает необходимость внесения изменений в практику ее проектирования и серийного производства. Отсюда вытекает требование формирования новой системы критериев прочности, ресурса, живучести и безопасности конструкций для повышения их надежности через систему норм и правил проектирования, изготовления и эксплуатации, например, при строительстве железнодорожных путей в природно-климатических условиях российского Севера. Кроме сложнейших топографических и геологических условий региона (гористая местность, вечная мерзлота с буграми пучения, болотистые участки, оползни и пр.), необходим учет воздействия низких температур. Подобная ситуация наблюдается при строительстве газо- и нефтепроводов, развертывание которых в широких масштабах ожидается в первой четверти наступившего века. Между тем, на сегодня при расчетах инженерных сооружений минимум температуры принимают равным порядка  $-40$  °С, тогда, как в реальности возможны температуры до  $-55$  °С и ниже. Это означает, что требуется не только создание новых

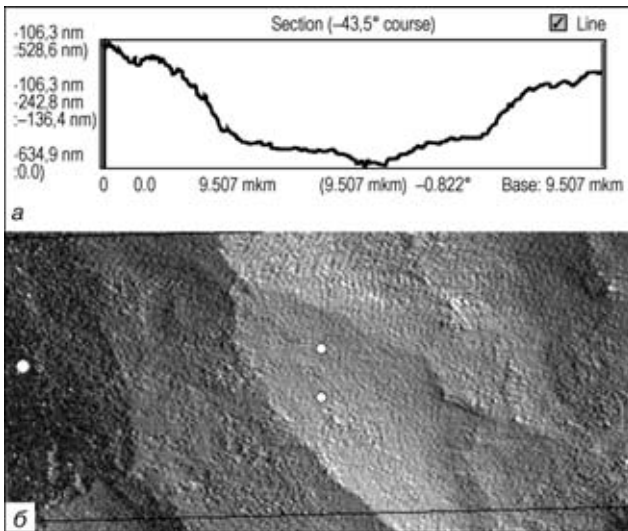


Рис. 5. Исходное состояние границы зерна хладостойкой стали экспериментального состава (размер скана 10×7 мкм): *a* — профиль поверхности по сечению; *б* — трехмерный скан

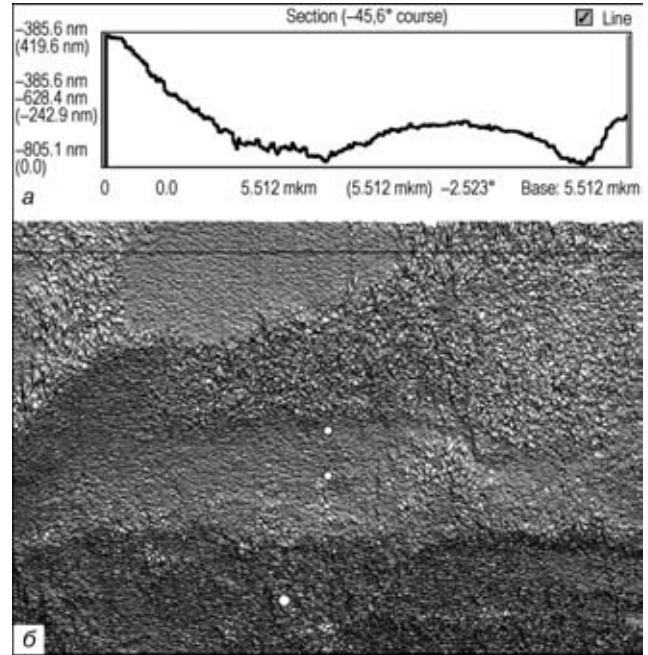


Рис. 6. Границы зерна хладостойкой стали при 5%-й пластической деформации (размер скана 5×5 мкм): *a* — профиль поверхности по сечению; *б* — трехмерный скан

материалов, но и пересмотр норм проектирования и технических условий на металлы для рельсов, мостов и пр.

Стадия проектирования — важнейший этап практической реализации фундаментальных исследований, на котором закладываются основные технико-экономические параметры изделия или конструкции. Известно, что при понижении температуры значения таких расчетных характеристик сталей, как временное сопротивление, предел текучести, модуль Юнга, повышаются; в то же время склонность к хрупкому разрушению возрастает. Использование традиционных критериев прочности и пластичности не дает положительных результатов. Эти критерии базируются на постулате о том, что предельное состояние определяется напряженным состоянием в точке; влияние остального объема материала полагается несущественным. Однако в ряде случаев это влияние может быть весьма значительным. Такое противоречие объясняется несовершенством используемых экспериментальных методов и подходов к оценке локальных свойств материалов. Рациональное конструктивное и технологическое решение, определяющее работоспособность материалов и элементов техники и конструкций при низких температурах, требует совершенствования методов расчета на прочность, разработки критериев прочности и несущей способности. Новые расчетные методы должны учитывать и нормировать работу элементов конструкций с трещинами, которые неизбежно имеются в них изначально, либо возникают в процессе эксплуатации.

Задача проектирования техники для экстремальных условий эффективно решается с использованием методов оценки деформаций и напряжений. Так, в ИФТПС на основе методов муара и голографической интерферометрии разработаны методики и созданы технические устройства для исследования поведения элементов конструкций в неоднородном поле напряжений, что позволило предложить критерий предельного состояния эле-

ментов конструкций, учитывающий неоднородность распределения напряжений и деформаций. Результаты этих исследований нашли практическое применение при доработке ответственных элементов горнотранспортной техники.

Исследование предельных состояний в материале напрямую связано с расчетным определением ресурса конструкций из существующих и новых материалов. Последние исследования в этом направлении связаны с изучением влияния состояния границ раздела, в частности, сегрегаций примесей на границах зерен, на механизмы разрушения гетерогенных поликристаллических и наноструктурных материалов. С помощью средств электронной сканирующей микроскопии нами проведены исследования по методу *in situ* эволюции поверхностной поврежденности малогабаритных образцов из хладостойкой стали экспериментального состава при деформировании. При этом использовано устройство с растягивающей нагрузкой до 4,5 кН и туннельный зонд с полем сканирования 20×20×2 мкм. Результаты сканирования зоны границы зерна до и после деформирования приведены на рис. 5, 6. На объемном изображении и профилях видно изменение поверхностного рельефа и появление микротрещин еще до возникновения макропластической деформации. Количественно поверхностная поврежденность может быть оценена только методами мультифрактального анализа [14], для чего необходимо проведение более тщательных экспериментов.

В настоящее время во всем мире наблюдается интерес к исследованиям связанных (multiphysics) задач и стохастическому моделированию. Полученные в этом направлении результаты позволяют решить задачу оценки ресурса слабых элементов (в том числе, содержащих сварные соединения) потенциально опасных объектов. Предложена модель распространения трещины в вязкопластическом гетерогенном материале, учитывающая слу-



чайный характер его свойств и базирующаяся на механизме подрастания основной трещины в результате развития перед ней пор и микротрещин.

На данном этапе развития экономики России необходимо решить проблему обновления устаревшего технического парка машин, выработавших свой расчетный ресурс потенциально опасных промышленных объектов (нефте- и газопроводы, хранилища, системы водоснабжения, теплоэнергостанции и т. д.), в связи с этим особую важность приобретает решение задач диагностики и продления их ресурса. Прогноз и предупреждение аварийных ситуаций позволит говорить об управлении риском возникновения катастрофических ситуаций на инженерных объектах.

Суммарно материаловедческие, технологические и инженерные задачи повышения ресурса технических систем различного назначения и уровня сложности, обеспечения эффективности и безопасности их функционирования в условиях северных и арктических регионов требуют разработки теоретических основ (прочности, повреждаемости, разрушения) и создания новых хладостойких материалов с высоким сопротивлением замедленному разрушению; усовершенствованных сварочных технологий; критериев оценки прочности и ресурса для техники Крайнего Севера; расчетно-экспериментальных методов оценки хладостойкости крупногабаритных металлоконструкций; современных аналитических, статистических и экспериментальных методов исследования технических систем.

1. Ларионов В. П. Электродуговая сварка конструкций в северном исполнении. — Новосибирск: Наука, 1986. — 256 с.
2. Ларионов В. П. Сварка и проблемы вязкохрупкого перехода. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. — 593 с.

Problems associated with operation and repair of industrial facilities and metal structures under the Russian North conditions are considered. Areas of basic and applied research conducted by Yakut scientists with a purpose to develop new materials, welding processes and study behaviour of welded structures during operation are described. Promising lines for further research are presented.

3. Слепцов О. И. Технологическая прочность сварных соединений при низких температурах. — Новосибирск: Наука, 1985. — 102 с.
4. Прохоров В. А. Оценка параметров безопасности эксплуатации нефтехранилищ в условиях Севера. — М.: Недра, 1999. — 142 с.
5. Махутов Н. А., Кузьмин В. Р., Прохоров В. А. Экспертные оценки состояния резервуаров по критериям прочности // Контроль. Диагностика. — 2000. — № 10. — С. 15–19.
6. Лякишев Н. П. Конструкционные и некоторые функциональные материалы. Настоящее и будущее // Сб. трудов междунар. конф. «Сварка и родственные технологии — XXI век». — Киев: Наук. думка, 1998. — С. 152–165.
7. Ларионов В. П. Фундаментальные аспекты обеспечения хладостойкости, надежности и долговечности сварных конструкций в условиях холодного климата // Там же. — С. 120–129.
8. Хладноломкость металлоконструкций и деталей машин / Р. С. Григорьев, В. П. Ларионов, Г. А. Новиков, П. Г. Яковлев. — М.: Наука, 1969. — 96 с.
9. Стохастическое моделирование разрушения гетерогенной повреждаемой среды / В. В. Лепов, К. Я. Лепова, В. Т. Альмов, В. П. Ларионов // Физ. мезомеханика. — 2002. — 5, № 2. — С. 23–41.
10. Архангельская Е. А., Лепов В. В., Ларионов В. П. Связная модель замедленного разрушения повреждаемой среды // Там же. — 2001. — 4, № 5. — С. 81–87.
11. Повышение прочности сварных конструкций для Севера / О. И. Слепцов, В. Е. Михайлов, В. Г. Петушков и др. — Новосибирск: Наука, 1989. — 222 с.
12. Замедленное разрушение металлоконструкций при низких температурах / В. П. Ларионов, В. В. Альмов, В. Е. Михайлов, В. В. Лепов. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. — 242 с.
13. Походня И. К. Проблемы сварки высокопрочных низколегированных сталей // Сучасне матеріалознавство XXI сторіччя. — Киев: Наук. думка, 1998. — С. 31–69.
14. Лепов В. В., Ачкасова В. С., Иванова А. А. Исследование поврежденности низколегированной стали и кристаллов алмаза методами фрактального анализа // Тр. I Евраз. симп. по проблемам прочности материалов в условиях холодного климата. Якутск, 16–20 июля 2002. — Якутск: Изд-во СО РАН, 2002. — Ч. 2. — С. 93–107.

Поступила в редакцию 13.03.2003