ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

INTERNATIONAL WORKSHOP

**«Multiscale Biomechanics and Tribology
of Inorganic and Organic Systems»**

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ,
ПОСВЯЩЕННАЯ 50-ЛЕТИЮ ОСНОВАНИЯ
ИНСТИТУТА ХИМИИ НЕФТИ**

«Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа»

DOI: 10.17223/9785946218412/263

**ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО РАЗРУШЕНИЯ
ПРОМЫШЛЕННОЙ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ ТРУБНОЙ СТАЛИ ДЛЯ
СОВРЕМЕННЫХ ГАЗОПРОВОДОВ**

Деревягина Л.С., Гордиенко А.И., Сурикова Н.С.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

Низкоуглеродистые малолегированные стали с высокой прочностью и низкотемпературной вязкостью разрабатываются давно и широко используются в разнообразных приложениях, таких как кораблестроение, в строительстве зданий и морских сооружений, а также при производстве газо- и нефтепроводов, работающих в суровых климатических условиях Северных регионов. С целью обеспечения безопасности энергосбережения и снижения веса изделий спрос на улучшенные свойства стали постоянно растет. Оптимальное сочетание прочности и вязкости стали достигается не только изменением химического состава, но и совершенствованием термомеханических обработок (ТМО), обеспечивающих в ходе фазовых превращений однородную дисперсную структуру. Изучение структур после различных ТМО является первостепенной задачей, позволяющей выявить ключевые факторы, обеспечивающие требуемый комплекс свойств.

Целью настоящей работы является изучение микроструктуры и характера низкотемпературного разрушения промышленной трубной стали газопровода «Сила Сибири», являющегося основной магистралью Якутского и Иркутского центров газодобычи и транспортировки.

Исследуемая низкоуглеродистая сталь категории прочности K60 (X70) имела следующий химический состав, % (масс.): 0.055 C; 1.59 Mn; 0.073 Si; 0.025 Cr; 0.187 Ni; 0.005 V; 0.019 Ti; 0.047 Nb; 0.12 Cu; 0.0043 S; 0.0062 P; 0.003 N. Заготовки трубной стали были поставлены после контролируемой прокатки с окончанием прокатки в (γ - α)-области с последующим ускоренным охлаждением. Ускоренное охлаждение проводили до температур бейнитного превращения с последующей выдержкой для протекания бейнитного превращения, после этого охлаждение проводили на воздухе.

Исследования структуры проводили методами оптической (микроскоп марки Zeiss Axiovert 25) и растровой микроскопии (РЭМ, микроскоп Philips SEM 515), системы с электронным и сфокусированным ионным пучками Quanta 200 3D с приставкой NORDLYS Oxford Instruments HKL Technology для автоматического анализа дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD), а также просвечивающей электронной микроскопии (ЭМ, микроскоп HT-7700 (Hitachi)). Для оценки уровня механических свойств стали проводили испытания на статическое растяжение образцов в форме двойной лопатки с размерами рабочей части 15×3×1 мм на установке типа Поляни. Ударные испытания на изгиб стандартных образцов 10×10×55 мм с V-образным надрезом проводили на маятниковом копре INSTRON MPX 450 в диапазоне $T_{исп}$ от +20°C до -70°C.

По данным оптической металлографии микроструктура стали представляла собой смесь ферритных, бейнитных зерен и областей вырожденного перлита. Средний размер ферритных зерен равнялся 4.5 мкм, а бейнитных 1-1.5 мкм. Объемная доля перлита составила 6%. По данным EBSD-анализа доля большеугловых границ зерен в структуре равнялась 81%, а доля малоугловых границ – 19%. Из анализа прямых и обратных полюсных фигур обнаружено, что в структуре прокатанного прутка стали K60 в плоскости прокатки содержатся ориентировки кристаллографических плоскостей {001} и {112}, а направление прокатки совпадает с направлением близким к $\langle 110 \rangle$.

Результаты ЭМ показали, что в ферритных зернах увеличена плотность дислокаций, внутри зерен присутствуют мелкодисперсные частицы карбида Nb₂C размерами 5-10 нм. В промежутках между ферритными зернами расположены бейнитные зерна, которые имеют неравноосную форму, однако реечной структуры не выявлено (рис.1, а). Это позволяет заключить, что формируется гранулярный бейнит. Особенностью бейнитных зерен является

Секция 4. Научные основы разработки материалов с многоуровневой иерархической структурой, в том числе для экстремальных условий эксплуатации

присутствие на некоторых их границах участков остаточного аустенита (рис. 1, в). Объемная доля аустенита мала и составляет 1-2%. Аустенитные области представляют собой небольшие квазиравноосные области шириной 100-300 нм, а также вытянутые пластины шириной 50-60 нм, длиной до 1000 нм (рис. 1, г). В структуре также обнаружены отдельные частицы Fe_3C размерами 20-50 нм и карбиды Fe_2C и Mn_7C_3 (рис. 1, б).

Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения структуры стали К60: светлопольное изображение (а), соответствующая микродифракционная картина (б): обозначены рефлексy зоны $[111]\alpha$, стрелкой указаны рефлексy $\langle 110 \rangle \gamma$; $\langle 132 \rangle \text{Mn}_7\text{C}_3$, $\langle 200 \rangle \text{Fe}_3\text{C}$, $\langle 202 \rangle \text{Fe}_2\text{C}$; соответствующее темнопольное изображение в рефлексe $\langle 002 \rangle$ от $\gamma\text{-Fe}$ (в) (указан стрелкой); темнопольное изображение в рефлексe $\langle 002 \rangle$ от $\gamma\text{-Fe}$ (г) (другое поле)

Полученная структура обеспечивает требуемые для категории К60 механические характеристики и хорошие показатели ударной вязкости разрушения KCV, хладостойкости (табл.1). При комнатной температуре испытаний на ударный изгиб величины KCV составляют 400 Дж/см², а при снижении температуры испытаний до $-40 \div -70^\circ\text{C}$ величины KCV снижаются плавно до 310 Дж/см². При всех температурах испытаний характер разрушения вязкий ямочный, без элементов хрупкого разрушения. Температура вязко-хрупкого перехода находится в области температур ниже -70°C .

Таблица 1. Механические характеристики стали К60

	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_B , МПа	ϵ , %	KCV ^{+20°C} , Дж/см ²	KCV ^{-40°C} , Дж/см ²	KCV ^{-70°C} , Дж/см ²	T _{хв} , °C
Сталь К60	540	630	18	400	382	310	Ниже -70

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, направление III.23.