

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ  
НА СОПРОТИВЛЕНИЕ МИКРОДЕФОРМАЦИИ И ХЛАДОСТОЙКОСТЬ  
НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ**

<sup>1</sup>Мишетьян А.Р., <sup>2</sup>Великоднев В.Я., <sup>2</sup>Шабалов И.П., <sup>1</sup>Филиппов Г.А., <sup>1</sup>Чевская О.Н.

<sup>1</sup>ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», г. Москва, Россия

<sup>2</sup>ООО «Трубные инновационные технологии»,  
г. Москва, Россия, E-mail: mishetyan@bk.ru

Высокие значения прочности и вязкости современных низколегированных сталей для электросварных труб обеспечиваются подбором химического состава и режимами термомеханической обработки при изготовлении листового проката. При этом близкие значения прочности и вязкости могут быть получены в низколегированных сталях с различными типами микроструктур (от феррито-перлитной до феррито-бейнитной). Однако сопротивление хрупкому разрушению (хладостойкость) сталей с различными типами микроструктур может существенно отличаться.

Известно, что сопротивление хрупкому разрушению сплавов железа зависит от степени неоднородности развития микропластической деформации, отражающей склонность металла к возникновению локальных микронапряжений под нагрузкой, тем ниже сопротивление хрупкому разрушению. Можно полагать, что разное сопротивление хрупкому разрушению высоковязких низколегированных трубных сталей является следствием различной структурной неоднородности и разной степени локализации микропластической деформации.

Одним из способов, позволяющим судить о степени неоднородности микропластической деформации, является испытание на релаксацию напряжений в макроупругой области.

Известно, что величина релаксационного эффекта отражает уровень локальных микронапряжений, возникающих в металле под нагрузкой. Чем больше при данной скорости деформации величина релаксационного эффекта – степень падения напряжения в ходе релаксации, тем выше неоднородность микропластической деформации. В связи с этим, для выяснения природы разной хладостойкости трубных сталей с различными типами микроструктуры исследовали склонность трубных сталей класса прочности от К52 до К65 к хрупкому разрушению и релаксации напряжений при нагружении в макроупругой области.

В качестве объектов исследования для сравнения выбран металл листового проката различных категорий прочности (К52, К56, К60, К65). Анализ результатов испытаний образцов металла листового проката показал, что механические свойства листового проката отвечают предъявляемым требованиям к листовому прокату соответствующих категорий прочности по уровню прочности, пластичности (табл. 1).

Таблица 1 – Механические свойства исследуемых сталей

Класс прочности	$\sigma_B$	$\sigma_{пц}$	$\sigma_T(\sigma_{0,2})$	$\sigma_{0,2}/\sigma_B$	$\delta$
	Н/мм <sup>2</sup>			-	%
К52	510	338	378	0,74	23
К56	614	470	531	0,86	22
К60	637	385	552	0,87	24
К65	712	517	619	0,87	18

Исследование структурного состояния показало, что микроструктура образцов листового проката классов прочности К52, К56, К60 – феррито-перлитная, полосчатая, отличающаяся соотношением фаз феррита, перлита. В структуре листа К52 присутствует небольшая доля бейнитной составляющей. Металл К65 имеет практически полностью бейнитную однородную мелкодисперсную структуру.

Оценку ударной вязкости металла проводили по испытаниям ударных образцов с острым надрезом (KCV) и ударных образцов с острым надрезом с заранее нанесенной усталостной трещиной (KCT) в интервале температур от  $-20$  до  $-100^{\circ}\text{C}$ . На рисунке 1 приведены температурные зависимости ударной вязкости KCV и KCT для исследуемых сталей.

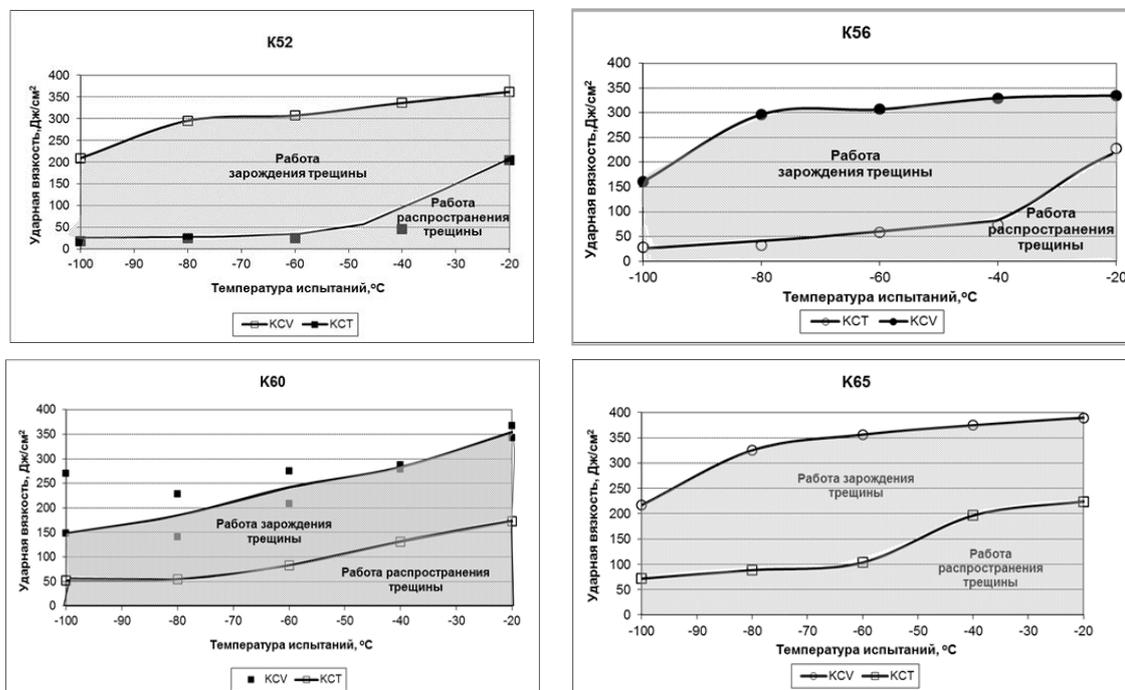


Рисунок 1 – Температурная зависимость ударной вязкости металла листового проката различной категории прочности

Сравнение температурной зависимости ударной вязкости на образцах KCV и KCT позволяет вычлнить долю работы зарождения и долю работы распространения трещины при ударных испытаниях в общей удельной энергии разрушения в зависимости от температуры испытания образцов.

Из рисунка видно, что образцы обладают неодинаковым уровнем энергоемкости. Основную долю в энергии разрушения составляет работа зарождения трещины.

Сравнение видов температурных зависимостей ударной вязкости, полученных на образцах KCV и KCT, показало, что металл K65 характеризуется более высоким уровнем энергоемкости – общая работа разрушения составляет  $200\text{--}380$  Дж/см<sup>2</sup> и имеет более высокую работу распространения трещины металл K65 ( $150\text{--}300$  Дж/см<sup>2</sup>) по сравнению с металлом других категорий прочности, особенно это проявляется при понижении температуры испытаний.

Исследование температурной зависимости доли вязкой составляющей образцов с острым надрезом не выявило значительной разницы в сопротивлении разрушению металла четырех исследуемых сталей, что связано с практически полностью вязким характером разрушения, сохраняемым вплоть до температуры испытаний  $-80^{\circ}\text{C}$ . Определение порога хладноломкости  $T_{90}$  показало, что при испытаниях образцов с трещиной наблюдается сдвиг этой температуры на  $30\text{--}40^{\circ}\text{C}$  в область более высоких температур. Наиболее низкое значение  $T_{90}$  наблюдается для металла K65 с бейнитной структурой.

Для оценки уровня микронапряжений в структуре был использован чувствительный метод – измерение релаксационного эффекта  $\Delta\sigma_p$ , который отражает степень перехода упругой деформации в пластическую после прекращения нагружения. Склонность к релаксации напряжений отражает степень неравномерности распределения упругой энергии в металле под нагрузкой и может служить качественной характеристикой неоднородности внутренних микронапряжений, возникающих при нагружении металла.

Релаксационный эффект определяется по величине падения напряжения с течением времени после нагружения до заданного уровня приложенной нагрузки  $\Delta\sigma = \sigma_0 - \sigma_t$ . С повышением уровня приложенной нагрузки величина релаксационного эффекта возрастает для всех исследованных сталей, что вероятно является следствием повышения уровня локальных внутренних напряжений при более высоких приложенных нагрузках. Можно полагать, что более высокий уровень релаксационного эффекта в сталях К52, К56, К60 обусловлен высоким уровнем локальных «пиков» напряжений, связанных с повышенной неоднородностью структуры в этих сталях (рис.2).

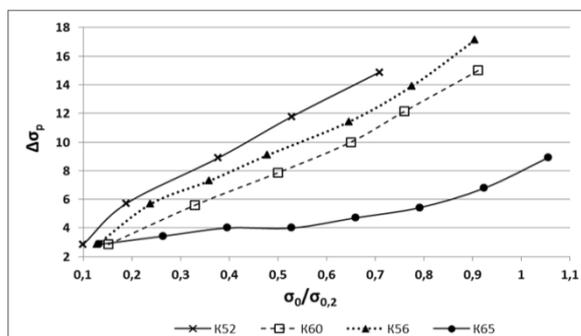


Рисунок 2 – Зависимость релаксационного эффекта  $\Delta\sigma_p$  от уровня приложенного напряжения для трубных сталей различного класса прочности

Как было показано ранее, структура стали К65 отличается более мелким зерном и отсутствием полосчатости. Релаксация напряжений при нагружении металла в макроупругой области при комнатной температуре происходит за счет протекания микропластической деформации в местах действия локальных внутренних напряжений, значительно превышающих средний уровень. Эта деформация может протекать как в ходе нагружения, так и после его прекращения.

Релаксация после прекращения нагружения протекает за счет перераспределения дислокаций в области локальных напряжений, что приводит к их разрядке. Чем выше уровень локальных напряжений при достижении заданного уровня приложенного напряжения, тем больше величина релаксационного эффекта.

Из полученных результатов следует, что, несмотря на близкие значения ударной вязкости, в вязкой области сопротивление хрупкому разрушению (хладостойкость) стали К65 обусловлено пониженным уровнем локальных внутренних напряжений, возникающих в ходе нагружения вследствие более однородной и мелкозернистой структуры.