

УДК 669.621.785

А. П. Ништа, кандидат технических наук, доцент, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

В. А. Храбров, кандидат технических наук, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СТАЛИ К65 ПРИ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ И ГИБКЕ

Проводится исследование микроструктуры и свойств стали класса прочности К65. Установлено, что после нагрева и гибки снижаются прочностные характеристики стали из-за снятия упрочнения, полученного при помощи высокотемпературной термомеханической обработки.

Ключевые слова: свойства стали, нагрев, охлаждение, микроструктура.

В настоящее время в связи со строительством новых нефтегазопроводов, за счет освоения месторождений Ямала, Якутии, Восточной Сибири, Дальнего Востока новые магистрали будут работать в сложных климатических условиях (до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$) и более высоких давлениях.

Перспективным подходом по реализации стратегии освоения данных месторождений является переход на производство нефтегазового оборудования (трубы, соединительные детали, запорная арматура) из стали повышенных классов прочности – К65 (Х80), а в последствии и до К80 (Х100) по технологии термомеханической обработки с ускоренным охлаждением (контролируемая прокатка) [1].

При строительстве нефте- и газопроводов наряду с прямолинейными трубными элементами применяются трубные элементы изогнутые на какой-либо угол. Для получения таких элементов исходная прямая трубная заготовка при помощи специальной установки изгибается на требуемый угол с заданным радиусом изгиба. Ввиду значительных размеров заготовки и высоких значений характеристик прочности материала, при гибке заготовки подвергаются зональному индукционному нагреву до температур $900\text{--}950\text{ }^{\circ}\text{C}$ с целью снижения усилия гибки. Для ускорения охлаждения трубы после гибки осуществляется полив ее водой.

При изготовлении криволинейных элементов из трубной заготовки класса прочности К65 с наружным диаметром 1420 мм и толщиной стенки 33,4 мм отмечено снижение прочностных характеристик материала. Временное сопротивление σ_B : исходная заготовка 690–720 МПа, после нагрева и гибки – 605–630 МПа. Предел текучести условный $\sigma_{0,2}$: исходная заготовка 645–610 МПа, после нагрева и гибки 375–455 МПа. Твердость по Бринеллю НВ: исходная заготовка 197–207 кг/мм², после нагрева и гибки 163–179 кг/мм².

Таким образом, полученный изогнутый элемент не удовлетворяет требованиям класса прочности К65 и является браком [2].

Целью данного исследования является:

– определение механических характеристик (σ_B , $\sigma_{0,2}$, НВ) и структуры материала исходной трубной заготовки;

– выявление причин, приводящих к снижению прочностных характеристик трубы после нагрева и гибки.

Объектом исследования является стальная трубная заготовка наружным диаметром 1420 мм, толщиной стенки 33,4 мм производства ЗАО «Ижорский трубный завод» и изготовленный из аналогичной трубы изогнутый отвод, материал – феррито-бейнитная трубная сталь 06Г2МФБЮ.

Химический анализ исследуемой стали показал, что в ней содержатся следующие элементы:

0,05–0,06 % С; ~1,7 % Мn; ~0,2 % Si; ~0,1 % Cr; ~0,25 % Mo; ~0,25 % Ni; ~0,07 % Nb; ~0,02 % V; ~0,04 % Al; ~0,009–0,01 % P; ~0,001 % S.

Таким образом, исследуемая сталь соответствует стандарту качества № 27013 от 06.04.2009 г.

Анализ характеристик прочности по данным ЗАО «Ижорский трубный завод» показал, что в исходном состоянии, т. е. состоянии поставки, материал трубы имеет σ_B не менее 650 МПа, $\sigma_{0,2}$ не менее 580 МПа, ударная вязкость КСV $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ не менее 310 Дж/см². Необходимо отметить, что анизотропия по характеристикам прочности и пластичности отсутствует.

Для сравнения механических свойств полученных на макро (плоских) образцах, испытанных на ЗАО «Ижорский трубный завод», были оценены механические свойства на образцах по ГОСТ 1497-84, Тип III № 7 с рабочим диаметром 5 мм, вырезанных по сечению вдоль трубы (наружная поверхность, центр, внутренняя поверхность). Результаты механических испытаний показали полное соответствие механическим свойствам, полученным на плоских макрообразцах.

Твердость исходного состояния НВ 217–228 кг/мм² (HRB 98–100). Для сравнения определяли твердость НВ_{ПЕР} переносным электронным твердомером: НВ_{ПЕР} ≈ 218–223, кг/мм².

Необходимо отметить, что по сечению исходной трубы твердость неоднородна. Так, на одном образце на поверхности НВ 217 кг/мм², в центре НВ 207 кг/мм², на втором образце, вырезанном из той же трубы на поверхности НВ 228 кг/мм², в центре НВ 217 кг/мм².

Исследуемая сталь является низколегированной малоуглеродистой сталью и по своему составу после прокатки и охлаждения на воздухе имеет твердость HB 150–170 кг/мм² и, соответственно, $\sigma_B \approx 500\text{--}600$ МПа.

Повышение прочности стали данного класса до 650 МПа достигнуто на заводе «Северсталь» за счет применения контролируемой прокатки, мощного всестороннего охлаждения штрипса водой, т. е. реализации эффекта высокотемпературной термомеханической обработки [3, 4].

Следовательно, получение класса прочности K65 достигнуто за счет фиксации повышенной плотности дислокаций, измельченной зеренной и субзеренной структуры и формированием дисперсной мартенситно-бейнитной структуры.

Исходя из С-образной кривой для данного класса сталей [2] мартенситно-бейнитная структура с мелкодисперсными карбидами получается при скоростях охлаждения не менее 50 °С/с.

Анализ микроструктуры исходных образцов стали с K65 (см. рис. 1) показал, что микроструктуру можно классифицировать как мелкодисперсную феррито-цементитную (карбидную) смесь. Для выявления бейнита (смесь мартенсита и феррито-цементитной смеси), а также субструктуры необходимо использование электронного микроскопа.

Металлографический анализ по микроструктуре в исходном состоянии позволил выявить зерно феррита 9 балла, и зернистого перлита 3 балла, которые определялись по ГОСТ 8233-56, шкала 2 – бал зернистого перлита и ГОСТ 5639-82, шкала 1 – величина зерна феррита.

Анализируя данные о механических свойствах и структуре материала трубы, можно утверждать, что в состоянии поставки с ЗАО «Ижорский трубный завод» труба наружным диаметром 1420 мм, толщиной стенки 33,4 мм соответствует классу прочности K65.

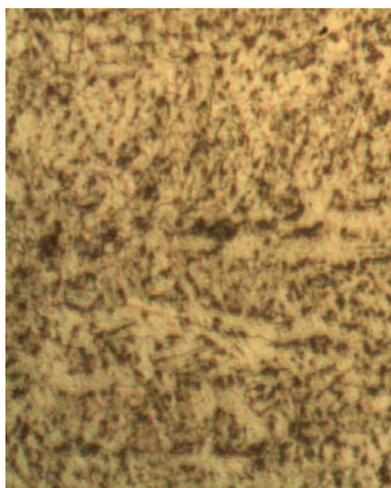


Рис. 1. Исходное состояние поставки: труба производства ЗАО «Ижорский трубный завод», $\sigma_B = 730$ МПа, HB = 2170 МПа. Термомеханическая обработка. Гранулированный бейнит ($\times 500$)

В ходе работы исследовалось состояние материала в состоянии поставки и после трех различных режимов нагрева и гибки.

Режим 1. Температура внешней поверхности трубы 900 °С, внутренней – 910 °С, скорость перемещения трубы при гибке 10 мм/мин., время нахождения металла в зоне действия индуктора (время нагрева) 240 сек.

Режим 2. Температура внешней поверхности трубы 900 °С, внутренней – 910 °С, скорость перемещения трубы при гибке 15 мм/мин., время нахождения металла в зоне действия индуктора (время нагрева) 160 сек.

Режим 3. Температура внешней поверхности трубы 890 °С, внутренней – 900 °С, скорость перемещения трубы при гибке 15 мм/мин., время нахождения металла в зоне действия индуктора (время нагрева) 160 сек.

Влияние скорости движения изгибаемой трубной заготовки, следовательно, и времени нагрева на свойства материала изучалось проведением эксперимента на полноразмерных образцах (труба диаметром 1420 мм с толщиной стенки 33,4 мм, класс прочности в состоянии поставки K65).

Для определения значений характеристик прочности и пластичности материала из исходной заготовки и труб, подвергнутых изгибу по режимам 1, 2, 3, были изготовлены четыре комплекта образцов по ГОСТ 1497-84, Тип III № 7 с рабочим диаметром 5 мм, вырезанных по сечению вдоль трубы (наружная поверхность, центр, внутренняя поверхность).

Данные испытаний представлены в таблице.

Механические свойства, определенные после режимов 1, 2, 3 (нагрев 900 °С, гибка, поверхностное охлаждение водой) не соответствуют категории прочности K65 (особенно по значению предела текучести $\sigma_{0,2}$, после гибки $\sigma_{0,2} = 450\text{--}480$ МПа, для соответствия категории K65 необходимо $\sigma_{0,2} = 580\text{--}620$ МПа).

Структура образцов после нагрева и гибки состоит из феррита и феррито-цементитной смеси (рис. 2).

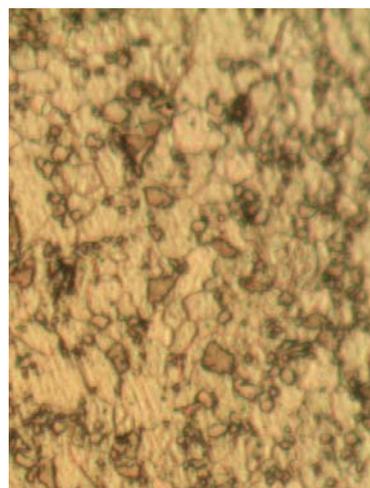


Рис. 2. Состояние после гибки трубы при температуре 900 °С: $\sigma_B = 600$ МПа, HB = 1764 МПа. Феррит, феррито-цементитная смесь (зернистый перлит и островки перлита пластинчатого) ($\times 500$)

Механические свойства стали K65 в зависимости от режима обработки

Номер образца	Режим обработки	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	НВ, МПа
1В	Режим 1	375	605	20,5	1700
1Н	Режим 1	440	630	22,0	1630
1С	Режим 1	375	610	21,0	1700
2В	Режим 2	385	620	22,5	1790
2Н	Режим 2	395	630	18,5	1700
2С	Режим 2	420	630	20,0	1700
3В	Режим 3	390	610	21,0	1700
3Н	Режим 3	455	630	20,0	1790
3С	Режим 3	400	615	19,5	1790
4В	Состояние поставки	645	690	10,0	1970
4Н	Состояние поставки	690	720	12,0	1870
4С	Состояние поставки	610	695	9,5	2070

Примечание: В – внутренний слой стенки трубы; Н – наружный слой; С – середина. Параметры режимов: 1, 2 – температура наружной поверхности заготовки 900 °С, внутренней – 910 °С; для режима 3 – 890 °С и 900 °С соответственно. Наружная поверхность подвергалась охлаждению водой.

Это свидетельствует о том, что в результате температурно-временного воздействия на металл происходит разупрочнение.

Известно, что контролируемая прокатка с применением ВТМО способствует дополнительному упрочнению за счет образования повышенной плотности дислокаций, дополнительного субструктурного упрочнения и естественного фазового наклепа при ускоренном охлаждении. Следовательно, как показано выше, $\sigma_{0,2}$, естественно, уменьшится после повторного нагрева на 900 °С, так как произойдет уменьшение плотности дислокаций и появятся начальные стадии рекристаллизации.

Проведенная оценка механических свойств σ_B , $\sigma_{0,2}$, НВ, НRV исходной трубной заготовки и после режимов 1, 2, 3 позволяет сделать важный вывод: температурно-временные параметры режимов 1, 2, 3 полностью снимают упрочнение, полученное при контролируемой прокатке с использованием ВТМО. Следовательно, режим гибки, температура и подача, охлаждение поверхности трубы не способствуют сохранению прочностных характеристик, получен-

ных в штрипсе при термомеханическом упрочнении, т. е. данная технология гибки подходит лишь для исходно нормализованных труб с прочностью не более K55.

Библиографические ссылки

1. Высокопрочные трубные стали нового поколения с феррито-бейнитной структурой / Ю. Ф. Морозов, М. Ю. Матросов, С. Ю. Настич, А. Б. Арабей // *Металлург.* – 2008. – № 8. – С. 39–42.
2. *Лопатка В. В.* Освоение высокопрочных сталей класса прочности K65 и выше // *Сфера нефтегаз.* – 2010. – № 1. – С. 146–149.
3. *Морозов Ю. А., Эфрон Л. Н., Немтинов А. А.* Развитие требований к стали для новых проектов магистральных газопроводов и проблемы обеспечения свойств толстолистового проката для труб // *Материалы 6-й Междунар. науч.-практич. конф. «Готовность ОАО «Харьковский завод» к производству труб для высокопрочных трубопроводов», 14–17 мая 2007 г., г. Ялта, Украина.*
4. *Морозов Ю. Д., Эфрон Л. Н.* Сталь для труб магистральных трубопроводов: состояние и тенденции развития // *Металлург.* – 2006. – № 5. – С. 53–57.

A. P. Nishta, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University
V. A. Khrabrov, PhD in Engineering, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Structure and Properties of Steel K65 in Induction Heating and Bending

The article is devoted to the study of microstructure and properties of steel of strength class K65. It is established that after heating and bending the strength characteristics of steel are reduced due to the removal of hardening obtained with the help of high-temperature thermo-mechanical treatment.

Key words: properties of steel, heating, cooling, microstructure.