

7. Разработка источника питания для высоковольтного электрохимического оксидирования. Высоковольтное оксидирование оксидных пленок алюминия / Н.М. Чекан [и др.] // Наука, образованию, производству, экономике: материалы 9-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 12–14 июля 2011 г. / БНТУ. – Минск, 2011. – Т. 1. – С. 326.

8. Томило, В.А. Высоковольтное электрохимическое оксидирование алюминия с предварительной электролитно-плазменной обработкой поверхности / В.А. Томило, Ю.В. Соколов, А.А. Паршутто // Весці Нац. акад. Навук Беларусі. Сер. физ.-техн. навук. – 2013. – № 2. – С. 25–27.

9. Композиционный материал для узлов безсмазочного трения космических аппаратов / Н.М. Чекан [и др.] // Веснік Гродзенскага дзярж. ўн-та імя Я. Купалы. Серыя 6, Тэхніка. – 2013. – № 1. – С. 24–32.

10. Перспективы использования высоковольтного электрохимического оксидирования алюминия / С.И. Багаев [и др.] // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 10-й Междунар. конф. – Минск, 2013. – С. 155–157.

УДК 621.774

В.М. КОНСТАНТИНОВ, д-р техн. наук,
Э.П. ПУЧКОВ, канд. техн. наук,
А.И. ГАЛИМСКИЙ (БНТУ),
Д.А. СЕМЕНОВ (РУП БМЗ)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРЯЧЕКАТАНЫХ ТРУБ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ СТАЛИ 09Г2С*

Введение. В настоящее время металлургические заводы выпускают широкий ассортимент труб, отличающийся химическим составом, уровнем механических свойств, надежностью и долговечностью в процессе эксплуатации. По химическому составу и уровню прочностных и пластических характеристик существует класс

труб, изготовленный из низколегированных сталей, содержащих в качестве основных легирующих элементов марганец и кремний, образующих с железом твердые растворы замещения с высоким уровнем твердорастворного упрочнения. Одним из ярких представителей таких сталей является сталь 09Г2С. Высокая механическая устойчивость к низким температурам позволяет применять трубы из стали 09Г2С в условиях климатического холода. Также достоинством этой стали является то, что она не склонна к отпускной хрупкости, что в свою очередь позволяет варьировать температуры отпуска в широком диапазоне.

С развитием нефтяной и газовой промышленности появилась потребность в высокопрочных обсадных, насосно-компрессорных и бурильных трубах с пределом прочности 680–800 МПа (категории качества К, Е, Л ГОСТ 633-80). Достижение данного уровня свойств возможно лишь за счет применения упрочняющей термической обработки. Термическая обработка является важнейшей составляющей в современной технологии производства труб. Для получения труб высоких групп прочности (ГОСТ 633-80) с сохранением достаточных пластических характеристик и необходимой ударной вязкости при пониженных температурах их подвергают термической обработке, включающей закалку и высокий отпуск. Температуру нагрева под закалку и отпуск выбирают в зависимости от химического состава стали и исходя из необходимого уровня механических свойств.

Цель работы. Целью настоящей работы является исследование возможности достижения категорий качества К, Е, Л (ГОСТ 633-80) на трубах, изготовленных из конструкционных сталей.

Для проведения исследования были выбраны горячекатаные трубы, изготовленные из стали 09Г2С. Химический состав плавки, из которой изготавливались трубы, приведен в нижеследующей таблице.

Таблица 1 – Химический состав стали 09Г2С, масс.%

| C | Si | Mn | Ni | S | P | Cr | N | Cu | As | Fe |
|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-----------|
| 0,095 | 0,76 | 1,57 | 0,108 | 0,056 | 0,016 | 0,056 | 0,0103 | 0,201 | 0,007 | Остальное |

Образцы для исследований вырезали из горячекатаных труб и подвергали термической обработке по следующим режимам:

- отжиг от температур 520–600 °С;
- нормализация от температур 860–980 °С;
- закалка от температур 920 °С с высоким отпуском 500–580 °С.

Механические свойства в соответствии с ГОСТ приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Механические свойства по ГОСТ 633-80

| Наименование показателя | Нормы механических свойств для стали группы прочности | | |
|---|---|--------------------------|--------------------------|
| | К | Е | Л |
| Временное сопротивление σ_b , не менее, МПа (кгс/мм ²) | 687 (70,0) | 689 (70,3) | 758 (77,3) |
| Предел текучести σ_t , не менее, МПа (кгс/мм ²) не более МПа (кгс/мм ²) | 491 (50,0) – (–) | 552 (56,2) 758 (77,3) | 654 (66,8) 862 (87,9) |
| Относительное удлинение δ_5 %, не менее | 12,0 | 13,0 | 12,3 |

Из термически обработанных заготовок изготавливали образцы для механических испытаний. Проводили испытания на ударный изгиб при –40 °С, испытания на разрыв, определялась доля вязкой составляющей в изломе и относительное удлинение.

В исходном состоянии после горячей прокатки микроструктура стали 09Г2С представляет собой ферритно-перлитную структуру с выделениями феррита по границам зерен.

Отжиг образцов, вырезанных из труб (сталь 09Г2С) проводили при двух температурах: 520 и 600 °С. Увеличение температуры отжига с 520 до 600 °С приводит к незначительному снижению прочностных характеристик и возрастанию пластических. Повышение температуры отжига привело к уменьшению количества дефектов кристаллического строения и увеличению степени коагуляции карбидной фазы в структуре стали. Уменьшение количества дефектов и снятие внутренних напряжений привело к незначительному повышению пластических характеристик и уменьшению прочностных.

Механические свойства после проведения отжига не соответствуют ни одной из категорий качества, требуемых ГОСТ 633-80 (таблицы 2, 3).

Таблица 3 – Механические свойства стали 09Г2С при различных режимах термической обработки

| Режим | Температура, °С | $\sigma_{в}$, МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | KCV ₋₄₀ , Дж/см ² | ϕ , % |
|--------------|----------------------------------|--------------------|----------------------|---|------------|
| Отжиг | 520 | 546 | 374 | 91 | 34,7 |
| Отжиг | 600 | 464 | 334 | 103 | 40,4 |
| Нормализация | 860 | 459 | 332 | 136 | 35,5 |
| Нормализация | 980 | 471 | 343 | 154 | 36,5 |
| Улучшение | $t_3 = 920$ вода, $t_0 = 500$ | 824 | 771 | 194 | 17,8 |
| Улучшение | $t_3 = 920$ вода, $t_0 = 530$ | 757 | 690 | 207 | 18 |
| Улучшение | $t_3 = 920$ вода, $t_0 = 580$ | 721 | 623 | 213 | 22,1 |

На следующем этапе работ проводили нормализацию образцов, вырезанных из труб (сталь 09Г2С) при температурах: 860, 980 °С. Увеличение температуры нормализации с 860 до 980 °С привело к увеличению как прочностных, так и пластических характеристик за счет повышения гомогенности аустенита. При последующем охлаждении это позволило получить более плотные и дисперсные пакеты перлита в структуре стали. Также увеличение гомогенности аустенита позволило получить более равномерное и дисперсное зерно, что незначительно повысило весь комплекс механических характеристик. Однако механические свойства стали 09Г2С после проведения нормализации также не соответствовали ни одной из категорий качества требуемых ГОСТ 633-80. Поэтому далее было проведено улучшение стали.

Улучшение образцов, вырезанных из труб (сталь 09Г2С) проводили по режиму: закалка 920 °С, отпуск при температурах 500, 530,

580 °С. После проведения закалки от 920 °С с последующим отпуском 500 °С были получены механические свойства, соответствующие категории качества Л, ГОСТ 633-80. Увеличение температуры отпуска до 580 °С привело к снижению прочностных и увеличению пластических характеристик. Это связано с повышением степени сфероидизации карбидных включений в структуре сорбита отпуска. Полученные результаты механических свойств стали 09Г2С при температуре отпуска 580 °С соответствуют категории качества К, ГОСТ 633-80. После проведения отпуска при температуре 530 °С был получен уровень механических свойств соответствующий требованиям категории качества Е, ГОСТ 633-80. Доля вязкой составляющей в изломе во всех случаях соответствовала приблизительно 80 % (рисунок 1).



Рисунок 1 – Излом образцов стали 09Г2С, увеличение $\times 20$, температура испытания $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Микроструктуры образцов представляют собой сорбит отпуска (рисунок 2), степень дисперсного которого определяется температурой отпуска. Повышение температуры отпуска уменьшает дисперсность сорбита.

Таким образом, варьируя температуру отпуска, удалось достичь необходимого уровня свойств для трех категорий качества К, Е и Л, ГОСТ 633-80.

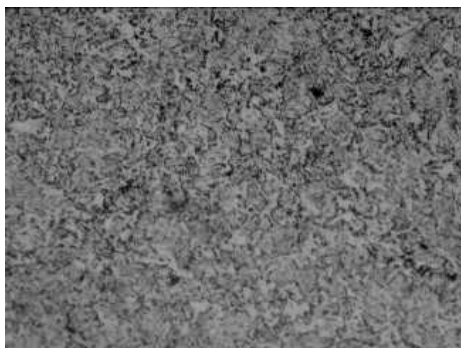


Рисунок 2 – Структура образцов стали 09Г2С (сорбит отпуска) (×500)

Заключение. Проведены исследования влияния режимов отжига, нормализации и улучшения на структуру и механические свойства бесшовных горячекатаных труб, изготовленных из стали 09Г2С.

Результаты исследований свидетельствуют, что трубы, изготовленные из стали 09Г2С, после закалки и высокого отпуска соответствуют требованиям, предъявляемым категориями качества К, Е и Л, ГОСТ 633-80. Также обеспечивается высокий уровень ударной вязкости при отрицательных температурах и необходимой доли вязкой составляющей в изломе. Разработанные технологические приемы позволяют управлять структурообразованием при распаде мартенсита и получать требуемое соотношение прочностных и вязкостных свойств конструкционной стали 09Г2С.

Литература

1. Солнцев, Ю.П. Специальные материалы в машиностроении / Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин, В.Ю. Пирайнен. – С.-Пб.: Химиздат, 2004 – 640 с.
2. Меськин, В.С. Основы легирования стали / В.С. Меськин. – М.: Металлургия, 1964. – 684 с.