

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ, КАК ФАКТОРА ПОВЫШЕНИЯ ХЛАДОСТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

А. И. Галимский

Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

Повышение конструктивной прочности сталей является одной из проблем современного металлостроения. Традиционный путь достижения высоких значений прочности и вязкости разрушения – легирование, но в настоящее время он ограничен по экономическим соображениям. Термомеханическая обработка так же имеет существенные ограничения. В этой ситуации традиционная термическая обработка становится весьма привлекательной.

Ключевые слова: металлостроение, термическая обработка, хладостойкость, ударная вязкость, низколегированные стали

EXPLORE THE POSSIBILITY OF HEAT TREATMENT AS A FACTOR OF COLD-RESISTANT STRUCTURAL LOW-ALLOY STEEL

A. I. Halimski

Belarussian National Technical University, Minsk, Belarus

Increase the structural strength of steel is one of the problems of modern metallurgy. The traditional way to achieve high strength and fracture toughness - doping, but at the moment it is limited for economic reasons. Thermomechanical treatment also has significant limitations. In this situation, the traditional heat treatment becomes very appealing.

Keywords: metallography, heat treatment, cold resistance, impact strenght, low-alloy steel

Введение. Повышение конструктивной прочности сталей является одной из магистральных проблем современного металлостроения. Традиционный путь достижения высоких значений прочности и вязкости разрушения – легирование, но в настоящее время он ограничен по экономическим соображениям. Термомеханическая обработка так же имеет существенные ограничения. В этой ситуации традиционная термическая обработка становится весьма привлекательной. Общеизвестно, что термическая обработка является мощным инструментом управления структурой и свойствами сталей, в том числе с ее помощью можно достигать и необходимого комплекса свойств, требуемого для работы сталей в условиях климатического холода. Однако, каковы границы этих возможностей, для конкретных марок сталей?

Цель. Целью работы является определение возможностей термической обработки

низколегированных трубных сталей по повышению комплекса механических свойств отвечающих за долговечность работы сталей в условиях климатического холода.

Материалы и методики. Исследования проводили на низкоуглеродистых низколегированных конструкционных сталях 09Г2С, ТТ309, 32Г2А. Контролировались такие механические свойства как ударная вязкость $KCV_{-40^{\circ}C}$ Дж/см², предел текучести $\sigma_{0.2}$ МПа, предел прочности σ_b МПа, доля вязкой составляющей % и относительное удлинение %, по общепринятым гостированным методикам.

Результаты исследования. Для проведения исследований были выбраны конструкционные стали, зачастую использующиеся в одинаковых климатических условиях с одинаковыми требованиями к их механическим показателям. Однако эти стали значительно рознятся по своему химическому составу. Это стали 09Г2С, ТТ309, 32Г2А (таблица 1).

Таблица 1 – Химические составы плавок сталей, масс. %

Марка стали	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	As	Al	Mo	Ti
09Г2С	0,095	0,76	1,57	0,016	0,008	0,056	0,108	0,201	0,007	0,026	0,011	0,028
ТТ309	0,274	0,24	1,23	0,013	0,007	0,341	0,133	0,175	0,007	0,036	0,123	0,004
32Г2А	0,338	0,326	1,367	0,014	0,005	0,057	0,110	0,178	0,011	0,027	0,018	0,003

Сталь 09Г2С обладает невысокой концентрацией углерода. Это оказывает положительное влияние на стойкость при отрицательных температурах, что связано с понижением доли перлита, так как пластинки цементита в составе перлита обладают низкой пластичностью, и при низких температурах границы «феррит-цементит» в перлите играют роль препятствий, у которых скапливаются дислокации при их скольжении, и служат местами зарождения трещин. Марганец повышает прочность, не снижая пластичности, и резко снижает красноломкость стали, вызванную влиянием серы. Он способствует уменьшению содержания сульфида железа FeS, так как образует с серой соединение сульфид марганца MnS. Так же марганец измельчает зерно феррита и повышает (до концентрации Mn в чистом железе 3,4 % и более) его пластичность, что приводит к понижению порога хладноломкости. Стали содержащие в своем составе количество кремния выше технологической примеси (обычно не превышает 0,37 %) при обработке на одинаковую твердость с нелегированными обладают несколько более высоким запасом вязкости, а при равной температуре отпуска превосходят нелегированную сталь по показателям прочности, уступая ей, однако, в отношении вязкости. Добавление титана в сталь 09Г2С делает ее наследственно мелкозернистой, что способствует повышению технологичности этой стали. Помимо этого титан является сильным карбидообразующим элементом, что благоприятно сказывается на прочностных свойствах и измельчении зерна в стали.

Сталь ТТ309 имеет более высокое содержание углерода, чем сталь 09Г2С. Увеличение количества С в стали выше 0,21 % при содержании Mn более 1,4 % ухудшает свойства из-за выделения прослоек цементита по границам зерен. Также появляются участки грубого бейнита в продуктах распада аустенита, что ухудшает свойства сталей. Исходя из этих факторов содержание Mn в составе стали лимитируется 1,2–1,4 %. При наличии некогерентных частиц в матрице (дисперсное упрочнение) образуются дислокационные

петли при огибании препятствий скользящими дислокациями, что также повышает работу разрушения. Поэтому в стали используют легирование Mo и Cr – элементами, образующими с компонентами стали упрочняющие фазы – карбиды и карбонитриды, что также обеспечивает измельчение зерна. Кроме того, молибден, обладая химическим сродством к фосфору, понижает его химический потенциал в твердом растворе, что (согласно теории диффузии) снижает диффузионную подвижность атомов фосфора и тем самым затрудняет его сегрегацию на границах зерен.

Сталь 32Г2А имеет самое высокое количество углерода из трех выбранных. Данная сталь легирована Mn по такому же принципу, как и сталь ТТ309. Помимо этого она имеет более высокие требования к чистоте по вредным примесям. Более никаких особенностей по химическому составу данная сталь не имеет.

Образцы, изготовленные из этих сталей, подвергали следующим режимам термической обработки:

- 1) нормализация;
- 2) улучшение.

Температуры режимов термической обработки выбирали исходя из положения критических точек и анализа термокинетических диаграмм сталей, из которых изготавливались образцы (таблица 2).

Анализ полученных результатов по режимам показывает, что после нормализации сталь 09Г2С обладает самыми низкими из испытываемых сталей прочностными показателями, но самыми высокими пластическими показателями. Сталь 32Г2А обладает самыми высокими прочностными характеристиками, однако пластические характеристики превосходят сталь ТТ309. Сталь ТТ309 обладает промежуточными значениями прочностных характеристик и самыми низкими пластическими свойствами. После проведения улучшения картина существенно изменяется. Сталь ТТ309 обладает как самыми высокими прочностными показателями, так и самыми высокими пластическими. Сталь 32Г2А обладает самыми низкими и прочностными и пла-

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ, КАК ФАКТОРА ПОВЫШЕНИЯ ХЛАДОСТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

стическими показателями. Сталь 09Г2С занимает промежуточное значение.

Такие результаты обусловлены следующими факторами. Сталь 09Г2С является наследственно мелкозернистой и содержит незначительное количество углерода. Эти два фактора позволяют этой стали обладать значительным запасом вязкости, что в свою очередь позволяет в широких диапазонах варьировать температуры термической обработки,

а значит и управлять фазовым составом. Нагрев под закалку до температуры 920 °С позволяет получить аустенит повышенной гомогенности без увеличения размера зерна. Незначительно заниженная температура отпуска позволяет, в свою очередь, получить более высокие прочностные характеристики без опасения падения пластических свойств. Доля вязкой составляющей в изломе в этом случае составляет 90 % (рисунок 1).

Таблица 2 – Режимы термической обработки сталей

Марка стали	Режим термической обработки	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	KCV ₋₄₀ , Дж/см ²	Относительное удлинение, %	Доля вязкой составляющей, %
09Г2С	Нормализация 980 °С	343	471	154	36,5	33
ТТ309	нормализация 900 °С	450	674	13,5	8,94	12
32Г2А	Нормализация 880 °С	621	736	27,5	7,26	17
09Г2С	Закалка 920 °С, отпуск 560 °С	593	700	128,8	22,1	90
ТТ309	Закалка 850 °С, отпуск 620 °С	748	782	233	6,55	≈100
32Г2А	закалка 860 °С отпуск 600 °С	548	622	34,7	6,43	6



а)



б)

Рисунок 1 – Изломы образцов сталей: а) Излом образца из стали 09Г2С; б) Излом образца из стали 32Г2А

Сталь ТТ309 обладает достаточным содержанием углерода для получения высоких прочностных характеристик, помимо этого наличие таких карбидообразующих элементов как Cr и Mo упрочняет твердый раствор и в значительной мере измельчает зерно в стали, что благоприятно сказывается как на прочностных, так и на пластических свойствах. Большой запас стали ТТ309 по прочностным свойствам позволяет без опасений поднимать температуру высокого отпуска для обеспечения высоких значений вязкости и хладостойкости. Доля вязкой составляющей в изломе составляет порядка 100 %.

Сталь 32Г2А обладает относительно высоким содержанием углерода и повышенной чистотой по содержанию вредных примесей. Это позволяет ей иметь достаточные прочностные характеристики, однако небольшой запас пластичности не позволяет в широком диапазоне варьировать температуру термической обработки. Доля вязкой составляющей в образцах составляет лишь 6 %.

Заключение. При помощи термической обработки можно существенно повысить хладостойкость низколегированных сталей, но для каждой стали существуют свои особенно-

сти лимитирующие возможности получения необходимого комплекса свойств. Наиболее перспективными показывают себя стали легированные карбидообразующими элементами. Уменьшение содержания углерода в стали положительно сказывается на повышении хладостойкости стали, однако следует учитывать, что с понижением содержания углерода прочностные характеристики так же падают. На нелегированных конструкционных сталях получение высоких значений хладостойкости затруднено. Из проведенных исследований видно, что сталь ТТ309 обладает высокими значениями хладостойкости, показатели стали 09Г2С ниже, чем у ТТ309, но тоже имеют высокие значения. На стали 32Г2А высоких значений хладостойкости достигнуть не удалось.

Список литературы

1. Солнцев, Ю. П. Материаловедение [Текст] / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин. – СПб.: Химиздат, 2007. – 784 с.
2. Солнцев, Ю. П. Специальные материалы в машиностроении [Текст] / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин, В. Ю. Пирайнен. – СПб.: Химиздат, 2004. – 640 с.

3. Солнцев, Ю. П. Материалы для низких и криогенных температур [Текст]: Энциклопедический справочник / Ю. П. Солнцев, Б. С. Ермаков, О. И. Слепцов. – СПб.: Химиздат, 2008. – 770 с.

4. Пикеринг, Ф. Б. Физическое металловедение и разработка сталей [Текст] / Ф. Б. Пикеринг; пер. с англ. – М.: Металлургия, 1982. – 184 с.

5. Ващенко, И. П. Структура и свойства малоуглеродистых низколегированных сталей [Текст] / И. П. Ващенко // Вестник МГТУ. – 2007. – Т. 10. – № 4. – с. 558–560.

6. Константинов, В. М. Исследование влияния режимов термической обработки на структуру и механические свойства горячекатаных труб, изготовленных из стали 09Г2С [Текст] / В. М. Константинов, Э. П. Пучков, А. И. Галимский, Д. А. Семенов // Металлургия: Межведомственный сб. науч. тр. – Мн.: 2014. – Вып. № 35. – С. 131–136.

Галимский Александр Иванович – аспирант,
e-mail: Stoker171@mail.ru

Белорусский национальный технический
университет (БНТУ),
г. Минск, Республика Беларусь