

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

УДК 669-156:620-17

СВОЙСТВА ВЫСОКОХРОМИСТЫХ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ, ПОДВЕРГНУТЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Смирнов М.А.¹, Пышминцев И.Ю.¹, Лаев К.А.¹, Храмов Е.В.², Алютин Д.М.²¹ Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности, Челябинск, Россия² Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

Аннотация. Исследовано влияние высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) на механические свойства высокохромистых сталей 20Х13 и 02Х13Н4М. При ВТМО деформация осуществлялась прокаткой с обжатием 30% при 1000–900°C с последующим охлаждением в масле. Установлено, что ВТМО обеспечивает при высоком отпуске небольшое повышение пределов текучести и прочности обеих сталей при некотором снижении их пластичности. Эффект термомеханического упрочнения возрастал с понижением температуры прокатки. Влияние ВТМО на ударную вязкость исследованных сталей различно. ВТМО не оказало положительного влияния на ударную вязкость стали 02Х13Н4М, претерпевающей в высокоотпущенном состоянии вязкое транскристаллитное разрушение. Рост ударной вязкости при ВТМО наблюдали на стали 20Х13, что связано с подавлением развития интеркристаллитных трещин при динамическом нагружении. Показано, что, заменяя интеркристаллитное разрушение транскристаллитным, ВТМО эффективно затрудняет развитие обратимой отпускной хрупкости.

Ключевые слова: высокотемпературная термомеханическая обработка, высокохромистые стали, ударная вязкость, прочностные свойства, пластичность, обратимая отпускная хрупкость.

Введение

В трубной промышленности для изготовления обсадных бесшовных труб, используемых для обустройства скважин в северных районах, применяют коррозионностойкие стали с 12–14% хрома. Трубы из этих сталей подвергают закалке и высокому отпуску. После такой обработки они должны обладать не только высоким уровнем прочности, но и высокой ударной вязкостью.

Известно, что комплекс механических свойств многих конструкционных сталей можно улучшить, используя высокотемпературную термомеханическую обработку (ВТМО) [1]. Представлялось целесообразным выяснить, как влияет такая обработка на механические свойства высокохромистых сталей. В настоящей работе после ВТМО сопоставлены свойства сталей 20Х13 и 02Х13Н4М, существенно различающихся уровнем пластичности и ударной вязкости в высокоотпущенном состоянии.

Материал и методика исследования

Химический состав исследованных сталей приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав исследованных сталей, %

Марка стали	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo
20Х13	0,20	0,55	0,68	0,004	0,016	13,26	0,10	0,02
02Х13Н4М	0,018	0,57	0,30	0,008	0,006	12,44	4,07	1,42

Сталь 20Х13 была промышленной выплавки. Из горячекатаных труб вдоль направления прокатки вырезались заготовки сечением 13×18 мм. Сталь 02Х13Н4М выплавляли в вакууме в лабораторных условиях. Слиток из этой стали прокатывали в прутки, из которых изготавливали заготовки, аналогичные заготовкам из стали 20Х13. ВТМО осуществляли по следующим режимам. Заготовки подвергали аустенизации при температуре 1000°C с 30-минутной выдержкой. Затем следовала деформация прокаткой со скоростью 1 с⁻¹ и обжатием 30% за один проход с последующим немедленным охлаждением в масле. Часть заготовок прокатывали непосредственно после аустенизации. Другие заготовки деформировали после подстуживания от 1000 до 950 и 900°C и двухминутной выдержки при этих температурах. Кроме того, партия

заготовок была закалена в масле от 1000°C без деформации. Окончательной операцией являлся односторонний отпуск при 650–700°C.

Структуру изучали с использованием оптической и электронной сканирующей микроскопии. Рентгеновскую съемку в железном излучении проводили на аппарате ДРОН-0,7, снабженном аппаратно-программным комплексом для автоматического управления дифрактометром и регистрации результатов. Испытания на статическое растяжение проводили на пятикратных образцах с диаметром рабочей части 6 мм. Для оценки ударной вязкости использовали образцы с V-надрезом.

Материал и методика исследования

При нагреве на 1000°C в стали 20X13 сформировалось аустенитное зерно 7–8 балла, а в стали 02X13N4M – 5–6 балла. При выбранных режимах деформации развития рекристаллизации не обнаружено. Для деформированных заготовок характерно вытянутое аустенитное зерно в направлении осуществления прокатки. На границах зерен наблюдалось слабо выраженная зубчатость, характерная для ВТМО.

Образцы стали 20X13, деформированные при 950 и 900°C, то есть ниже температуры исходного нагрева, имели меньшие значения параметра решетки мартенсита, чем образцы, закаленные непосредственно от 1000°C без деформации (табл. 2). Такой эффект следует связывать с обеднением аустенита углеродом и выделением карбидной фазы при осуществлении ВТМО. Судя по изменению параметра решетки, при снижении температуры прокатки от 950 до 900°C распад твердого раствора усиливается. Об этом же свидетельствует и характер изменения физического уширения интерференционных линий (110) и (211). На величину их уширения оказывает влияние как плотность дислокаций, так и содержание углерода в твердом растворе. Как известно, дислокационная структура, создаваемая в аустените горячей деформацией, наследуется при мартенситном превращении [1]. Чем ниже температура прокатки, тем выше должна быть плотность дислокаций в аустените, а следовательно, и в мартенсите, и соответственно больше уширение его интерференционных линий. Меньшие значения уширения интерференционных линий после прокатки при 900°C по сравнению с деформацией при 950°C можно связать с более интенсивным распадом твердого раствора при ВТМО. Отметим, что процессы карбидообразования при ВТМО могут получать развитие не только непо-

средственно во время деформирования, но и при подстуживании до температуры прокатки и при последеформационных паузах.

Таблица 2
Результаты рентгеноструктурного анализа стали 20X13

Режим обработки	Параметр решетки, Å	Физическое уширение линий	
		(110)	(211)
		рад·10 ⁻³	
Закалка от 1000°C	2,8691	6,1	13,2
ВТМО с деформацией при 950°C	2,8688	10,0	24,4
ВТМО с деформацией при 900°C	2,8678	9,5	23,4

Механические свойства стали 20X13 оценивали после отпуска при 700°C, который часто используют при термической обработке обсадных труб. Такой отпуск сопровождается образованием карбидов Me₂₃C₆, для выделения которых характерна локализация на границах аустенитного зерна и границах реек α-фазы, сохранившихся при отпуске.

В высокоотпущенном состоянии образцы, подвергнутые ВТМО, имеют более высокие пределы текучести и прочности, чем после обычной термической обработки. Но эффект дополнительного термомеханического упрочнения весьма невелик (табл. 3). Он несколько возрастает при снижении температуры прокатки от 1000 до 950°C. С дальнейшим понижением температуры деформации до 900°C уровень прочности несколько снижается. По-видимому, во время горячей пластической деформации при 900°C и, возможно, при подстуживании до этой температуры от 1000°C из аустенита выделяются карбиды неоптимальной степени дисперсности. В результате этого объемная доля карбидов, образующихся при отпуске, уменьшается, что приводит к снижению эффекта дисперсионного твердения.

Таблица 3
Механические свойства стали 20X13
после отпуска при 700°C

Режим обработки	σ _{0,2}	σ _в	δ	ψ	KCV +20°C, Дж/см ²
	МПа		%		
Закалка от 1000°C	583	798	23,7	64	87
ВТМО с деформацией при 1000°C	630	846	19,0	58	98
ВТМО с деформацией при 950°C	683	865	19,7	58	110
ВТМО с деформацией при 900°C	660	856	20,6	61	131

Сталь 02X13H4M подвергали отпуску при 650°C, то есть при более низкой температуре, чем сталь 20X13, так как легирование никелем сопровождалось значительным снижением точки A_{C3} . Как и в случае стали 20X13, термомеханическая обработка обеспечила лишь относительно небольшое дополнительное упрочнение этой стали. Но ввиду того, что при осуществлении ВТМО карбидообразование в аустенитной области не получило существенного развития, для нее наблюдалась другая зависимость прочности от температуры деформации: дополнительный эффект термомеханического упрочнения возрастал при снижении температуры прокатки от 1000 до 900°C (табл. 4).

Таблица 4
Механические свойства стали 02X13H4M
после отпуска при 650°C

Режим обработки	$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ	ψ	KCV, Дж/см ²	
	МПа		%		+20°C	-60°C
Закалка от 1000°C	775	863	17	75	194	148
ВТМО с деформацией при 1000°C	828	902	15	71	186	142
ВТМО с деформацией при 950°C	830	907	17	74	180	138
ВТМО с деформацией при 900°C	858	929	15	76	162	145

Что касается пластичности, то для обеих сталей характерна общая закономерность: увеличение прочности при ВТМО сопровождается небольшим ее снижением.

ВТМО оказало благоприятное влияние на ударную вязкость высокоотпущенной стали 20X13 при комнатной температуре испытания. При этом уровень ударной вязкости термомеханически упрочненных образцов с понижением температуры прокатки возрастает.

Фрактографическое исследование изломов показало, что разрушение стали 20X13 при динамическом нагружении протекало как по телу, так и по границам аустенитного зерна. Транскристаллитное разрушение осуществлялось как вязко, так и квазисколом. При этом на участках излома, соответствующих транскристаллитному разрушению, преобладали фасетки квазискола. На участках интеркристаллитного разрушения, занимающих около 30–40% поверхности излома, наблюдались хрупкие

зернограницные фасетки. По-видимому, развитию интеркристаллитных трещин способствовало выделение зернограницных карбидов. После ВТМО разрушение стали 20X13 протекало преимущественно по телу зерна. Именно подавление хрупкого интеркристаллитного разрушения и следует считать основной причиной повышения ударной вязкости при ВТМО.

Сталь 20X13 склонна к развитию обратимой отпускной хрупкости. Представлял интерес проследить, как ВТМО влияет на этот вид интеркристаллитного охрупчивания. В связи с этим образцы стали 20X13 после отпуска 700°C подвергали дополнительному десятичасовому нагреву при 520°C. Такой провоцирующий нагрев сопровождался существенным охрупчиванием стали. Судя по положению серийных кривых ударной вязкости, ее температурный интервал вязкохрупкого перехода лежит в области положительных температур (рис. 1).

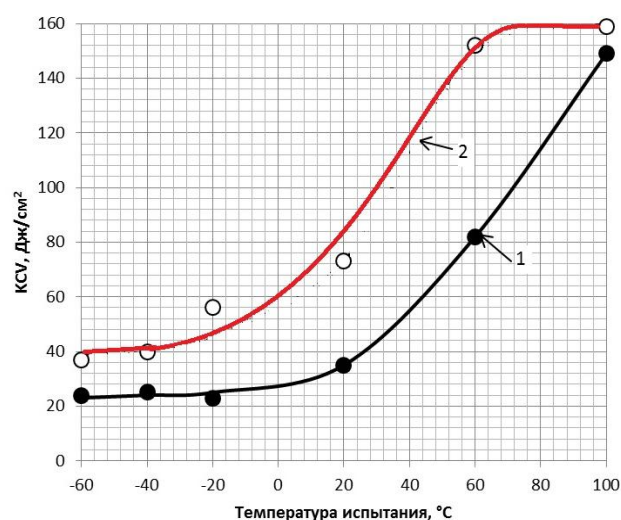


Рис. 1. Серийные кривые ударной вязкости
стали 20X13 после отпуска
700°C, 1 ч + 520°C, 10 ч: 1 – без деформации;
2 – ВТМО с деформацией при 900°C

Недеформированные образцы лишь при +100°C претерпевают преимущественно вязкое транскристаллитное разрушение; изломы имели ямочное дуплексное строение. Но даже в этом случае в средней части изломов встречаются в небольшом количестве хрупкие зернограницные фасетки. При снижении температуры испытания до комнатной температуры изломы недеформированных образцов становятся практически полностью хрупкими интеркристаллитными (рис. 2, а).

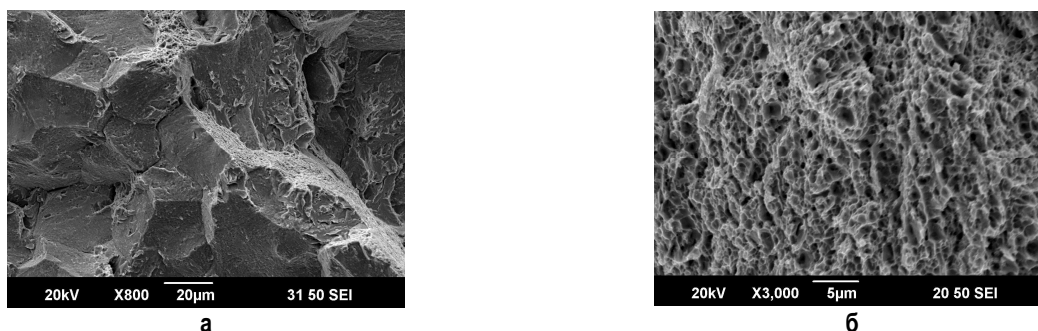


Рис. 2. Характерный вид изломов стали 20X13 после отпуска 700°C, 1 ч + 520°C, 10 ч при температуре испытаний +20°C: а – без деформации; б – ВТМО с деформацией при 900°C

ВТМО с деформацией при 900°C приводит к смещению серийной кривой ударной вязкости в сторону более низких температур. При всех исследованных температурах испытания эта обработка подавила интеркристаллитное разрушение, заменив его транскристаллитным. Судя по ямочному строению изломов, транскристаллитное разрушение деформированных образцов при +100...–20°C протекает вязко (рис. 2, б). Наблюдаемому уменьшению ударной вязкости при снижении температуры испытания в этом интервале соответствует уменьшение размеров и глубины ямок в изломах. При более низких температурах испытания (–40 и –60°C) на поверхности разрушения наряду с участками вязкого разрушения появляются фасетки скола.

Иной характер влияния ВТМО оказала на ударную вязкость стали 02X13H4M. Эта сталь по сравнению со сталью 20X13 имеет в высокоотпущенном состоянии больший уровень KCV. Ему соответствует вязкий транскристаллитный характер разрушения вплоть до –60°C. Такой же тип разрушения наблюдался и у термомеханически упрочненных образцов. При отсутствии принципиального изменения характера разрушения положительное влияние ВТМО на ударную вязкость отсутствовало. После этой обработки уровень KCV тоже несколько понизился по сравнению с недеформированным состоянием.

Таким образом, при ВТМО высокохромистых сталей, закаливаемых на мартенсит и подвергаемых высокому отпуску, реализуются закономерности, которые ранее были выявлены на сложнолегированных высокоотпущенных сталях [2, 3]:

- Проведение ВТМО может осложняться преждевременным обеднением аустенита углеродом и образованием карбидов при подстуживании от температур аустенизации до температур прокатки и последующем деформировании. Выделение карбидов неоптимальной степени дис-

персности отрицательно влияет на эффект термомеханического упрочнения.

- Если при высоком отпуске отсутствует развитие процессов охрупчивания, то ВТМО, увеличивая прочностные свойства, несколько снижает ударную вязкость.

- ВТМО ослабляет развитие интеркристаллитного охрупчивания, обусловленного выделением межзеренных карбидов или образованием зернограничных сегрегаций вредных примесей (обратимая отпускная хрупкость).

Одной из основных причин торможения развития интеркристаллитных трещин после ВТМО является зубчатое строение границ зерен [4]. Микротрещина, возникшая в пределах одного элемента зубчатости, оказывается отделенной от соседней микротрещины и их слияние в общую трещину сопровождается пластической деформацией приграничных районов. ВТМО также влияет на сегрегацию примесей на границах аустенитных зерен. Есть основания считать, что процессы, происходящие при горячей деформации, способствуют очищению границ зерен от примесей. Не вызывает сомнений, что это общие закономерности воздействия ВТМО на состояние границ зерен реализуются и на высокохромистых сталях.

Известно, что при ВТМО некоторых сталей и сплавов может существенно изменяться характер выделения межзеренных карбидов, в частности их морфология, что также влияет на склонность к развитию межзеренных трещин [2]. Но такого эффекта при исследовании стали 20X13 не обнаружено: в недеформированных и деформированных образцах на границах зерен наблюдали глобулярные частицы близкой степени дисперсности.

Выводы

1. ВТМО обеспечивает сравнительно небольшое повышение прочностных свойств высокоотпущенных сталей 20X13 и 02X13H4M при некотором снижении их пластичности.

2. Влияние ВТМО на ударную вязкость зависит от особенностей разрушения высокоотпущенных сталей при динамическом нагружении. Если сталь претерпевает хотя бы частичное инттеркристаллитное разрушение, то ВТМО, затрудняя его развитие, повышает ударную вязкость (20Х13). Когда разрушение происходит полностью транскристаллитным путем, благоприятное влияние ВТМО на ударную вязкость не реализуется (02Х13Н4М).

3. ВТМО ослабляет развитие обратной отпускной хрупкости в стали 20Х13, заменяя инттеркристаллитное разрушение транскристаллитным.

Список литературы

1. Бернштейн М.Л., Займовский В.А., Капуткина Л.М. Термомеханическая обработка стали. М.: Металлургия, 1983. 480 с.
2. Смирнов М.А., Петрова С.Н., Смирнов Л.В. Высокотемпературная термомеханическая обработка и хрупкость сталей и сплавов. М.: Наука, 1991. 167 с.
3. Смирнов М.А., Филатов В.И. Высокотемпературная термомеханическая обработка легированных конструкционных и инструментальных сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. 2014. №9. С. 15–21.
4. Соколов Е.Н., Петрова С.Н. Влияние пластической деформации в аустенитном состоянии на характер разрушения стали 35ХГСА в состоянии отпускной хрупкости // Физика металлов и металловедение. 1959. Т. 7. Вып. 2. С. 306–308.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

PROPERTIES OF HIGH-CHROMIUM CORROSION-RESISTANT STEELS EXPOSED TO HIGH-TEMPERATURE THERMOMECHANICAL TREATMENT

Smirnov Mikhail Anatolievich – D.Sc. (Eng.), Researcher of the Russian Research Institute of the Tube&Pipe Industries Open Joint Stock Company, Chelyabinsk, Russia.

Pyshmintsev Igor Yurievich – D.Sc. (Eng.), General Director, the Russian Research Institute of the Tube&Pipe Industries Open Joint Stock Company, Chelyabinsk, Russia.

Laev Konstantin Anatolievich – Engineer, the Russian Research Institute of the Tube&Pipe Industries Open Joint Stock Company, Chelyabinsk, Russia.

Khramkov Evgeny Vladimirovich – Postgraduate Student, National Research South Ural State University, Chelyabinsk, Russia. Tel.: +7-951-476-17-07. E-mail: hramkov@rosniti.ru

Alyutin Dmitriy Mikhailovich – Postgraduate Student, National Research South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

Abstract. The influence of high-temperature thermomechanical treatment (HTTT) on mechanical properties of high-chromium steels 20Cr13 and 02Cr13Ni4Mo was studied. In case of HTTT deformation was performed by rolling with a reduction of 30% at 1000-900°C, followed by cooling in oil. It was found that HTTT with high tempering provided a slight increase in yield strength and strength of both steels with some decrease in their ductility. The effect of thermomechanical hardening increased when the rolling temperature decreased. Influence of HTTT on toughness of the steels was different. HTTT didn't have a positive effect on toughness of steel 02Cr13Ni4Mo. High-tempered 02Cr13Ni4Mo had viscous transcrystalline fracture. The growth of toughness of steel 20Cr13 was observed, which was associated with the suppression of intercrystalline cracks under dynamic loading. It was shown that by replacing intercrystalline fracture with transcrystalline fracture, HTTT effectively hindered development of reversible temper brittleness.

Keywords: High-temperature thermomechanical treat-

ment, high-chromium steels, toughness, mechanical properties, ductility, reversible temper brittleness.

References

1. Bernstein M.L., Zaymovsky V.A., Kaputkina L.M. *Termomekhanicheskaya obrabotka stali* [Thermomechanical processing of steel]. Moscow: Metallurgy, 1983, 480 p.
2. Smirnov M.A., Petrova S.N., Smirnov L.V. *Vysokotemperaturnaya termomekhanicheskaya obrabotka i khrupkost' staley i splovov* [High-temperature thermomechanical treatment and brittleness of steels and alloys]. Moscow: Nauka, 1991, 167 p.
3. Smirnov M.A., Filatov V.I. High-temperature thermomechanical treatment of alloy structural and tool steels. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgy and heat treatment of metals]. 2014, no. 9, pp. 15-21.
4. Sokolov E.N., Petrova S.N. Influence of plastic deformation in the austenitic state on the nature of the destruction of steel 35KhGSA in a state of temper brittleness. *Fizika metallov i metallovvedenie* [Physics of metals and metallurgy]. 1959, vol. 7, issue 2, pp. 306-308.

Свойства высокохромистых коррозионностойких сталей, подвергнутых высокотемпературной термомеханической обработке / Смирнов М.А., Пышминцев И.Ю., Лаев К.А., Храмов Е.В., Алютин Д.М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №3. С. 78–82.

Smirnov M.A., Pyshmintsev I.Yu., Laev K.A., Khramkov E.V., Alyutin D.M. Properties of high-chromium corrosion-resistant steels exposed to high-temperature thermomechanical treatment. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 78–82.