УДК 669.14’7

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТОЙ CR-NI-MO СТАЛИ С ДОБАВЛЕНИЕМ AL И SI ПОСЛЕ ЗАКАЛКИ ИЗ ДВУХФАЗНОЙ ОБЛАСТИ

Кудряшова О.В., Гервасьев М.А., Худорожкова Ю.В.

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, e-mail: olenka1709@mail.ru

Исследованы образцы из сталей машиностроительного класса на основе Cr-Ni-Mo-C, дополнительно легированных кремнием и алюминием в небольших количествах (до 1,6 % легирующего элемента). Методом растровой электронной микроскопии показано распределение легирующих элементов при формировании структуры изучаемых сталей. Методом дилатометрии в высокотемпературной области показано, что введение кремния и алюминия в данные стали приводит к расширению межкритического интервала температур. В работе разработаны и предложены новые режимы термической обработки: закалка с 920 °C + отпуск на 580 °C или 650 °C; закалка с 920 °C + закалка в межкритический интервал с 820 °C + отпуск на 580 или 650 °C. Анализ изменения механических свойств изучаемых сталей после термической обработки по различным режимам показал, что закалка из двухфазной области увеличивает ударную вязкость, что необходимо для достижения оптимальной конструктивной прочности. В работе проведен анализ микрофрактограмм изломов после различных испытаний и показано, что с понижением температуры испытания с 20 до –60 °C вязкий характер изломов изменяется на хрупкий.

Ключевые слова: сталь, термическая обработка, закалка, отпуск, межкритический интервал, двухфазная область, легирование, кремний, алюминий, углерод, механические свойства, ударная вязкость

STRUCTURE AND PROPERTIES OF MILD CARBON STEEL BASED ON CR-NI-MO QUENCHED FROM TWO-PHASE REGION

Kudryashova O.V., Gervasiev M.A., Khudorozhkova Y.V.

Ural Federal University named after the first Russian President B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, e-mail: olenka1709@mail.ru

Mild carbon containing engineering steels based on Cr-Ni-Mo with low addition of silicon and aluminum (up 1,6 % of alloying element) were investigated. Distribution of alloying elements in structure of experimental steels was shown by the method of scanning electron microscopy. Using the method of dilatometry in high temperature region it was shown that aluminum and silicon extends intercritical temperature range. Also new heat treatment was developed. It consisted of quenching from 920 °C + tempering on 580 or 650 °C; quenching from 920 °C + quenching from two-phase region from 820 °C + tempering 580 or 650 °C. Analysis of mechanical properties showed that quenching from two-phase region leads to an increase in impact elasticity, what is necessary for achievement of optimum structural strength. Analysis of micro fractures after various tests was made and it was shown, that with decreasing experimental temperature from 20 to –60 °C viscous character of fissures changes on brittle character.

Keywords: steel, heat treatment, quenching, tempering, intercritical temperature range, two-phase region, alloying, silicon, aluminum, carbon, mechanical properties, impact elasticity

Двухфазные стали широко используются в машиностроении [1], наиболее активно – в автомобилестроении [2]. Это объясняется особенностями поведения данных сталей в процессе их технологической обработки, двухфазные стали обеспечивают сложную глубокую вытяжку, высокое качество штампуемой поверхности и повышенную прочность [3]. Такие свойства сталей связаны с их внутренним строением, которое закрепляется термообработкой, состоящей из нагрева в межкритический интервал температур (между A_{C3} и A_{C1}) и последующего определенного охлаждения. После закалки получается феррито-мартенситная структура, которая состоит из прочного мартенсита и мягкого пластинчатого феррита. Свойства обработанных таким образом сталей определяются количеством мартенсита и размером ферритного зерна.

В автомобилестроении для некоторых деталей наряду с глубокой вытяжкой требуется повышенная прочность изделия [4], поэтому представляется перспективным изучение низколегированных хромом, никелем и молибденом стали с повышенным содержанием углерода, дополнительно легированных кремнием и алюминием [5].

Цель исследования – изучение закономерностей влияния формирования гетерофазной структуры на свойства разработанных Cr-Ni-Mo сталей, дополнительно легированных кремнием и алюминием.

Материал и методы исследования

Выплавка сталей осуществлялась на базе Центрального научно-исследовательского института материалов в г. Екатеринбурге.

Химический состав сталей приведен в табл. 1.

Выплавленные слитки проковывали с обжатием более 90 % на прутки квадратного сечения со стороной 14 мм. Затем отжигали для получения равновесной структуры.

Основными методами исследования являлись: металлографический анализ на растровом и сканирующем электронных микроскопах, высокотемпературная дилатометрия и анализ механических свойств.

Таблица 1

Химический состав исследуемых сталей

Сталь	Марка	Химический состав (весовые %)									
		C	Mn	Si	S	P	Cr	Mo	Ni	Al	Fe
1	30Х2НМ	0,30	0,54	0,16	0,006	0,014	2,06	0,27	0,75	0,06	остальное
2	30Х2НМЮ2	0,29	0,53	0,18	0,006	0,014	2,46	0,24	0,83	1,7	остальное
3	30Х2НМС2	0,29	0,57	1,64	0,006	0,014	2,05	0,23	0,75	0,03	остальное

Изучение температурной зависимости удлинения проводилось на цилиндрических образцах диаметром ~3,0 мм и длиной ~ 10,0 мм на закалочном дилатометре «Linseis L78 R.I.T.A».

Анализ микроструктур проводился на результатах, полученных в лаборатории кафедры материаловедения в машиностроении Новосибирского государственного технического университета на растровом электронном микроскопе Zeiss EVO 50. Дополнительно использовался сканирующий электронный микроскоп Tescan VEGA II лаборатории конструкционного материаловедения Института машиноведения УрО РАН.

Результаты исследования и их обсуждение

Критические точки исследуемых сталей, полученные при дилатометрических исследованиях, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Критические точки исследуемых сталей

Сталь	Ac_1, °C	Ac_3, °C	Ac_3–Ac_1, °C
1	760	796	36
2	800	860	60
3	785	875	90

Полученные образцы обрабатывали по различным режимам термообработки, приведенным на рис. 1. Режим 1: закалка 920 °C + отпуск 580 или 650 °C. Режим 2: закалка 920 °C + закалка в межкритический интервал 820 °C + отпуск 580 °C или 650 °C. При температуре аустенитизации образцы выдерживали 20 минут, закаливали в масле, затем проводили отпуск при температуре 580 или 650 °C с выдержкой два часа и последующим охлаждением на воздухе. Другую часть образцов после закалки нагревали в межкритический интервал, выдерживали в течении 40 минут, затем закаливали в масле и проводили отпуск при температуре 580 или 650 °C с выдержкой два часа с последующим охлаждением на воздухе.

После закалки из аустенитной области в исследуемых сталях получили мартенситную структуру. Микрорентгеноспектральный анализ показал, что во время выдержки в межкритическом интервале температур происходит перераспределение углерода и легирующих элементов между ферритом и аустенитом (рис. 2). После охлаждения из межкритического интервала температур в структуре наблюдается мелкоигольчатый мартенсит с участками феррита, причём выделение феррита начинается от границ аустенитных зёрен.

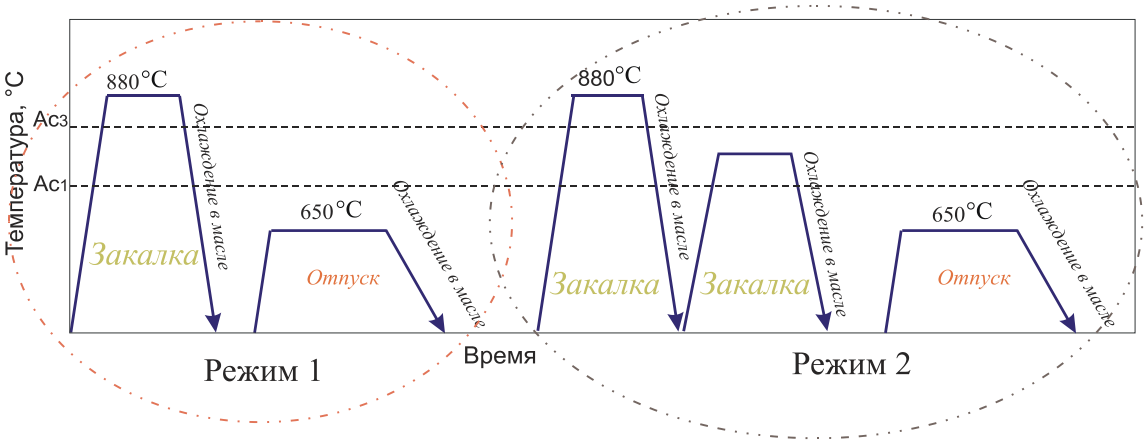


Рис. 1. Схема термической обработки стали 1

Двухфазная структура приводит к перераспределению вредных примесей между α и γ фазами, что уменьшает содержание этих примесей на границах зерна, в частности, фосфора и снижает вероятность межзеренного разрушения.

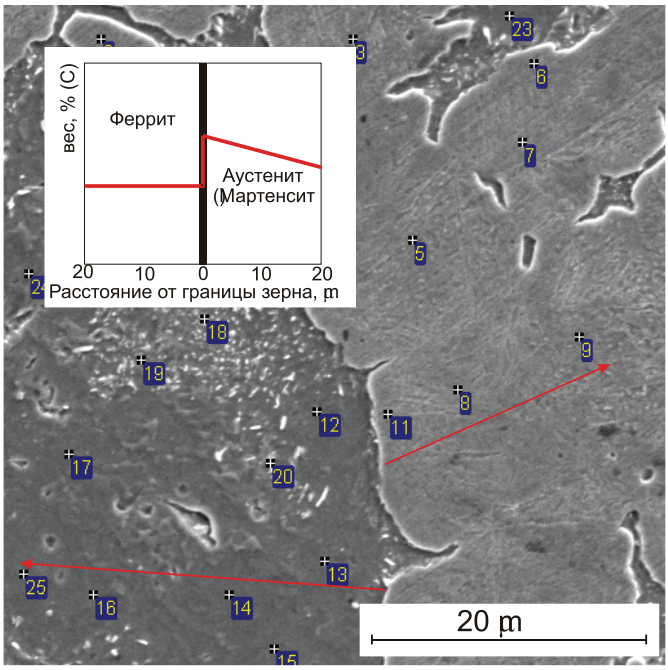


Рис. 2. Перераспределение углерода в исследуемых сталях

Легирование Al и Si существенно увеличивает межкритический температурный интервал (табл. 2), что облегчает проведение термической обработки.

Показатели прочности для всех исследуемых сталей после закалки из межкритического интервала меньше, чем после закалки из аустенитной области, это можно объяснить присутствием в структуре участков феррита. Введение в сталь кремния позволяет увеличить показатели прочности, а после закалки из межкритического интервала и отпуска 580 °C стали 3 показатели прочности близки к значениям полученным после закалки из аустенитной области стали 1.

Показатели относительного сужения, как видно из табл. 3 и 4, выше при всех режимах обработки для стали 2, а относительного удлинения – для стали 1. Для всех исследуемых сталей показатели пластичности выше для гетерофазной структуры.

Таблица 3

Механические свойства сталей после закалки 920 °C

Сталь	Отпуск, °C	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{в}$, МПа	Ψ, %	δ, %
1	580	1027	1121	58,4	15,3
	650	861	952	66,1	17,7
2	580	879	955	29,9	10,7
	650	752	847	51,3	19,3
3	580	1337	1394	51	14,3
	650	1075	1162	58,4	18,3

Таблица 4

Механические свойства сталей после закалки 920 + 820 °C

Сталь	Отпуск, °C	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{в}$, МПа	Ψ, %	δ, %
1	580	794	857	64,1	18,0
	650	605	718	71,6	25,3
2	580	548	668	68,1	27,7
	650	559	655	61,7	25
3	580	952	1026	59,9	19,3
	650	826	934	62,2	23,7

После термообработки сталей по режиму 2 получили комплекс механических свойств, отличный от свойств, полученных после термообработки по режиму 1, который представлен в табл. 4.

Исследование влияния структуры и легирования алюминием и кремнием на ударную вязкость (табл. 3, 4, рис. 3) изучаемых сталей показало, что получение гетерофазной, мартенсито-ферритной структуры приводит к повышению ударной вязкости. Это вызвано наличием в структуре феррита – наиболее пластичной структурной составляющей.

При температуре отпуска 650 °С ударная вязкость выше, чем после отпуска при 580 °С. Это характерно для всех рассматриваемых сталей.

Значения ударной вязкости при отрицательных температурах исследования зависят от структуры и от температуры отпуска, что видно из табл. 5, 6. Однако сравнительный анализ влияния легирующих элементов кремния и алюминия на ударную вязкость показал, что введение в химический состав кремния значительно снижает показатели ударной вязкости стали.

Таблица 5

Ударная вязкость исследуемых сталей после закалки 920 °С

Сталь	Отпуск, °С	Температура испытания, °С					
		20		-40		-60	
		KCU, МДж/м^2	% В	KCU, МДж/м^2	% В	KCU, МДж/м^2	% В
1	580	1,02	100	1,17	100	0,94	0
	650	1,32	100	1,54	100	1,31	60
2	580	1,14	100	0,49	0	0,32	0
	650	2,1	100	1,01	50	0,44	0
3	580	0,41	10	0,42	0	0,09	0
	650	0,46	10	0,45	0	0,39	0

Таблица 6

Ударная вязкость исследуемых сталей после закалки 920 + 820 °С

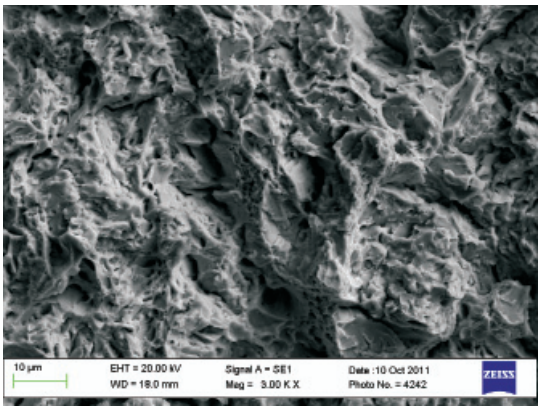
Сталь	Отпуск, °С	Температура испытания, °С					
		20		-40		-60	
		KCU, МДж/м^2	% В	KCU, МДж/м^2	% В	KCU, МДж/м^2	% В
1	580	1,29	100	1,26	100	1,27	100
	650	2,01	100	2,09	100	1,7	100
2	580	1,5	100	0,95	50	0,81	40
	650	2,91	100	1,52	100	2,42	100
3	580	0,66	20	0,55	0	0,41	0
	650	0,95	40	0,62	0	0,7	0

Как видно из табл. 5, 6, введение алюминия в сталь благоприятно влияет на ударную вязкость при комнатной температуре испытания, значения повышаются по сравнению со сталью 1. При отрицательных температурах (–60 °С) дополнительное легирование алюминием (сталь 2) благоприятно сказывается на ударной вязкости только после режима 2, то есть после указанного выше режима термообработки значения ударной вязкости выше, чем для сталей 1 и 3. Введение в сталь кремния приводит к значительному снижению показателей ударной вязкости, хотя для стали 3 при режиме 1 температура проведения испытаний не сказывается на энергоемкости разрушения.

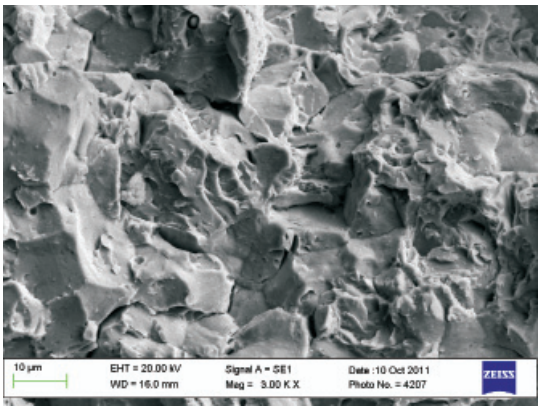
Результаты исследований, полученных в результате испытаний при различных температурах изломов, приведены на рис. 3.

По представленным микрофрактограммам видно, что с понижением температуры испытания от + 20 до –60 °С характер изломов меняется с вязкого на хрупкий. Причем для изломов образцов стали 3 при закалке 920 °С + отпуск 650 °С, характерно смешанное разрушение, поверхность разрушения состоит из фасеток скола с участками межзеренного разрушения.

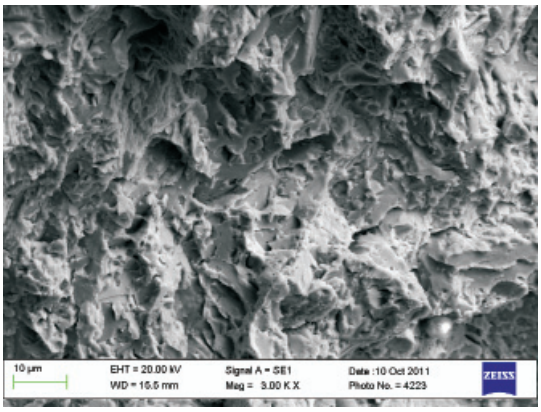
Результаты исследований изломов экспериментальных образцов, обработанных по описанным ранее режимам, при различных температурах испытаний приведены на рис. 3. Можно предположить, что хрупкая трещина в мартенситном зерне тормозится в вязком феррите, образуя на поверхности излома вязкие гребни отрыва. Такая картина разрушения на поверхности излома материала, вероятно, может быть связана с высокой энергоемкостью разрушения двухфазных сталей при отрицательных температурах.



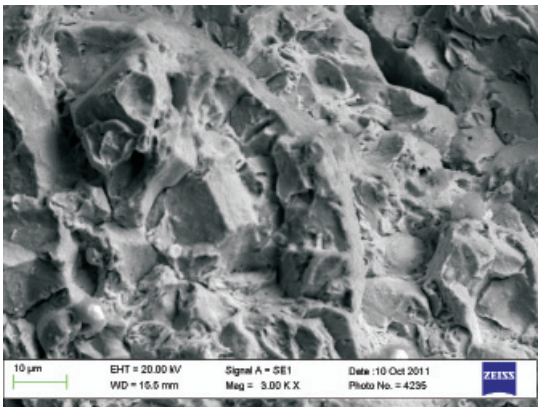
а



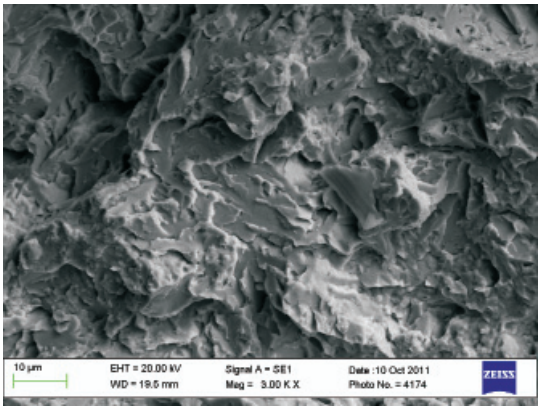
б



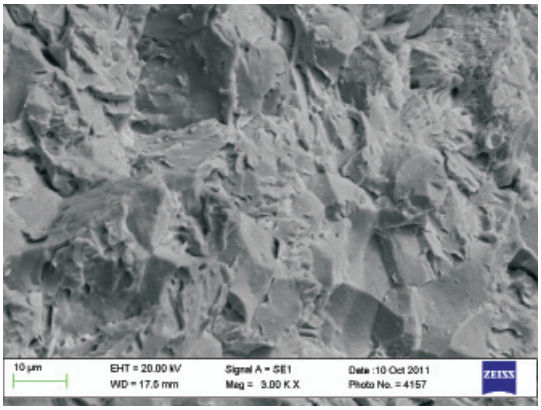
в



г



д



е

Рис. 3. а – закалка 920 + 820 °C + отпуск 650 °C, температура испытания + 20 °C; б – закалка 920 + отпуск 650 °C, температура испытания + 20 °C; в – закалка 920 + 820 °C + отпуск 650 °C, температура испытания –40 °C; г – закалка 920°C + отпуск 650 °C, температура испытания –40 °C; д – закалка 920 + 820°C + отпуск 650 °C, температура испытания –60 °C; е – закалка 920 °C + отпуск 650 °C, температура испытания –60 °C

Выводы

Таким образом, проведенные исследования показали принципиальную возможность расширения межкритического интервала температур для среднеуглеродистых среднелегированных сталей путем их дополнительного легирования алюминием и кремнием. Закалка из двухфазной области позволяет существенно повысить пластичность и ударную вязкость сталей. Однако влияние алюминия и кремния на механические свойства Cr–Ni–Mo сталей противоположно: алюминий повышает пластичность и снижает прочность сталей, кремний существенно повышает прочностные свойства и снижает пластичность и особенно ударную вязкость исследованных сталей.

В дальнейшем необходимо рассмотреть их комплексное влияние на свойства и оптимизировать их процентное содержание в стали.

Полученные результаты позволяют говорить о возможности использования среднеуглеродистых среднелегированных сталей в качестве материалов для изделий, изготавливаемых методом холодной штамповки, которые сочетают высокую прочность и пластичность.

Список литературы

1. Особенности формирования структуры и свойств сталей с гетерогенной бейнитно-мартенситной структурой для газонефтетрубопроводов / С.В. Беликов, К.И. Сергеева, О.Ю. Корниенко, И.Н. Ашихмина, А.И. Степанов // МиТОМ. – 2010. – № 12. – С. 9–14.

2. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали: учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1985. – 408 с.

3. Хотинов В.А., Ощуков С.В., Фарбер В.М. Структура и механические свойства среднеуглеродистых сталей после нагрева в межкритический интервал // МиТОМ. – 2011. – № 11. – С. 31–35.

4. Nouri A., Saghafian H., Kheirandish Sh. Effects of Silicon Content and Intercritical Annealing on Manganese Partitioning in Dual Phase Steels. Journal of Iron and Steel Research, International, 2010, Vol. 17, Issue 5, pp. 44–50.

5. Bhadeshia H.K.D.H.; Edmonds D.V. Bainite in silicon steels: new composition–property approach Part 1. Melal Science. – 1983. – № 17. – P. 420–425.

References

1. Belikov S.V., Sergeeva K.I., Kornienko O.Yu. Ashikhmina I.N., Stepanov A.I. Osobennosti formirovaniya strukturi i svoistv s geterogennoi beinitno- martensitnoi strukturoi dlya gazoneftetruboprovodov // MiTOM. 2010. no. 12. pp. 9–14.

2. Golshtein M.I., Grachev S.V. Veksler Yu. G. Spesialnie stali. Uchebnik dlya vuzov M.: Metallurgia. 1985. 408 p.

3. Khotinov V.A., Oschukov S.V., Pharber V.M. Struktura i mekhanicheskie svoistva sredneuglerodistikh stalei posle nagreva v mezhkriticheskii interval // MiTOM. 2011. no. 11. pp. 31–35.

4. Nouri A., Saghafian H., Kheirandish Sh. Effects of Silicon Content and Intercritical Annealing on Manganese Partitioning in Dual Phase Steels. Journal of Iron and Steel Research, International, 2010, Volume 17, Issue 5, pp. 44–50.

5. Bhadeshia H.K.D.H.; Edmonds, D.V. Bainite in silicon steels: new composition–property approach Part 1. Melal Science, 1983, № 17, pp. 420–425.

Рецензенты:

Филиппов М.А., д.т.н., профессор, кафедра металловедения Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург;

Потехин Б.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Технология металлов», Уральский государственный лесотехнический университет, г. Екатеринбург.

Работа поступила в редакцию 14.02.2013