

ВЛИЯНИЕ ЗАКАЛКИ ИЗ МЕЖКРИТИЧЕСКОГО ИНТЕРВАЛА ТЕМПЕРАТУР НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА Cr-Ni-Mo СТАЛИ ДОПОЛНИТЕЛЬНО ЛЕГИРОВАННОЙ Si И Al

Двухфазные стали широко используются в машиностроении в качестве сталей глубокой вытяжки и повышенной прочности. Однако в основном это малоуглеродистые стали с широким межкритическим интервалом, высокой пластичностью и относительно низкой твердостью. Среднеуглеродистые Cr-Ni-Mo стали являются основными для ответственных деталей машиностроения больших размеров. Повышение технологической пластичности для таких сталей не столь важно, как повышение пластичности и ударной вязкости по всему сечению изделия. Особенно важно для таких сталей процессы развития отпускной хрупкости, которые могут существенно уменьшаться после обработки в межкритическом интервале температур.

В работе изучалось влияние формирования гетерофазной структуры на свойства разработанных сталей. Для этого были выплавлены стали на основе конструкционной стали 38Х2НМ с дополнительным легированием Si и Al.

Химический состав плавов приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав исследуемых сталей

Плавка	Химический состав (весовые %)									
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Mo	Ni	Al	Fe
2	0,29	0,53	0,18	0,006	0,014	2,46	0,24	0,83	1,7	остальное
3	0,35	0,54	0,16	0,006	0,014	2,06	0,27	0,75	0,06	остальное
8	0,29	0,57	1,64	0,006	0,014	2,05	0,23	0,75	0,03	остальное

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

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

Таблица 2

Критические точки исследуемых сталей

№ плавки	A _{C1} , °C	A _{C3} , °C	M _H , °C
2	800	860	200
3	760	796	
8	786	875	275

Полученные образцы обрабатывали по режимам, приведенным в табл. 3 и на рис. 1. При температуре аустенитизации образцы выдерживали 20 мин., охлаждение в масле, затем проводили отпуск при температуре 580 °C или 650 °C в течении двух часов с охлаждением на воздухе. Другую часть образцов после закалки нагревали в межкритический интервал, выдерживали в течении 40 мин., затем охлаждали в масле и проводили отпуск при температуре 580 °C или 650 °C в течение двух часов с охлаждением на воздухе.

Таблица 3

Режимы термической обработки исследуемых сталей

Режим	Температура нагрева под закалку, °C/время выдержки, мин./среда охлаждения	Температура нагрева в МКИ, °C/время выдержки, мин./среда охлаждения	Температура отпуска, °C/время выдержки, мин./среда охлаждения	№ плавки
1	880 / 20 / масло	- / - / -	650 / 120 / воздух	3
2	880 / 20 / масло	780 / 40 / масло	650 / 120 / воздух	3
3	880 / 20 / масло	- / - / -	580 / 120 / воздух	3
4	880 / 20 / масло	780 / 40 / масло	580 / 120 / воздух	3
5	920 / 20 / масло	- / - / -	650 / 120 / воздух	2
6	920 / 20 / масло	830 / 40 / масло	650 / 120 / воздух	2
7	920 / 20 / масло	- / - / -	580 / 120 / воздух	2
8	920 / 20 / масло	830 / 40 / масло	580 / 120 / воздух	2
9	920 / 20 / масло	- / - / -	650 / 120 / воздух	8
10	920 / 20 / масло	820 / 40 / масло	650 / 120 / воздух	8
11	920 / 20 / масло	- / - / -	580 / 120 / воздух	8
12	920 / 20 / масло	820 / 40 / масло	580 / 120 / воздух	8

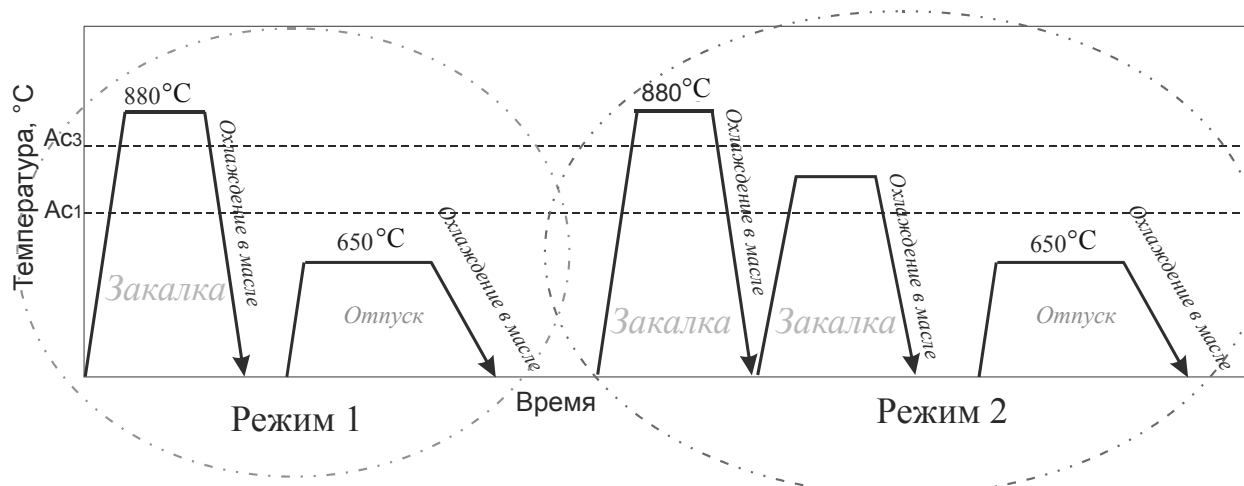


Рис. 1. Схема термической обработки стали плавки № 3

После закалки из аустенитной области структура исследуемых сталей представлена мартенситом. 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 мелкоиглочатый мартенсит с участками феррита, причем выделение феррита начинают от границ зерен.

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.

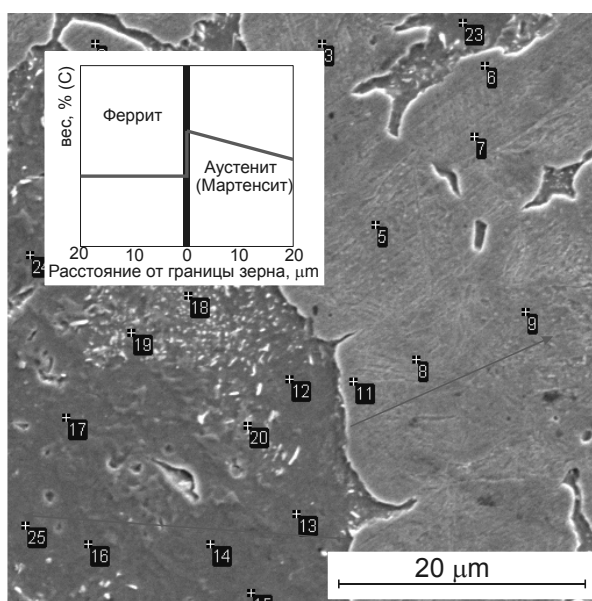


Рис. 2. Перераспределение углерода в исследуемых сталях

Легирование Si и Al 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 °С, стали плавки № 8, показатели прочности близки к значениям полученным после закалки из аустенитной области стали плавки № 3.

Показатели относительного сужения, как видно из рисунка 3 и 4 выше при всех режимах обработки для стали плавки № 2, а относительного удлинения для стали плавки № 3. Для всех исследуемых сталей показатели пластичности выше для гетерофазной структуры.

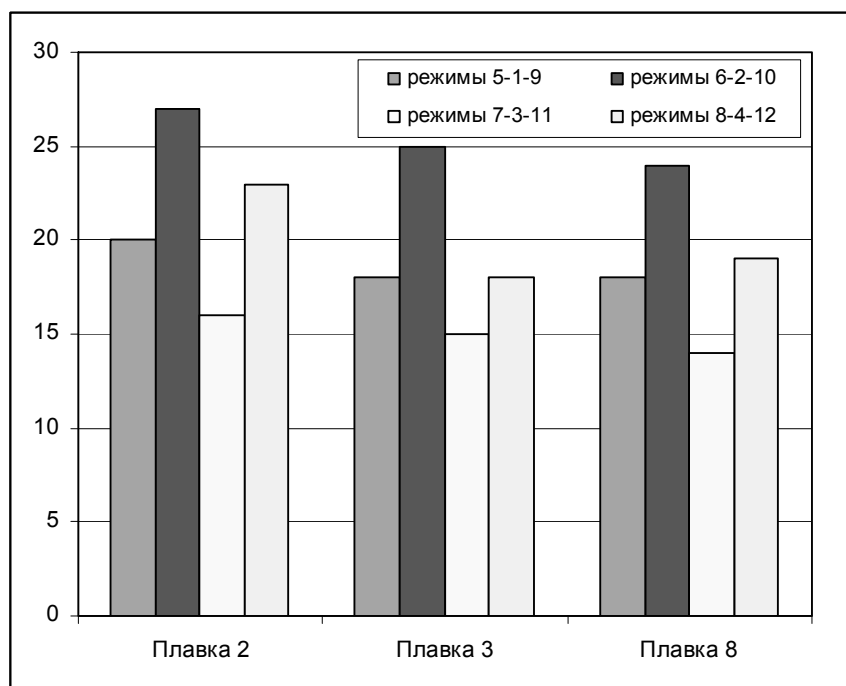


Рис. 3. Зависимость показателей относительного сужения от режимов обработки исследуемых сталей

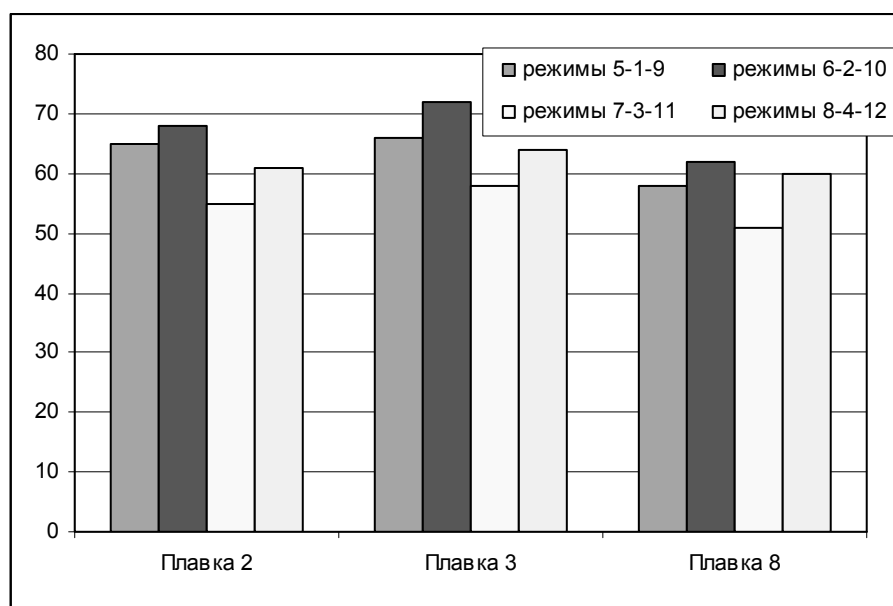


Рис. 4. Зависимость показателей относительного удлинения от режимов обработки исследуемых сталей

Исследование влияние структуры и легирования алюминием и кремнием на ударную вязкость (рис. 3–5), 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°C ударная вязкость выше, чем после отпуска при 580°C. Это характерно для всех рассматриваемых сталей.

Таблица 4

Ударная вязкость исследуемых сталей

Плавка/режим	Температура испытаний		
	+20	-40	-60
	КСУ, МДж/м ²		
2/7	1,14	0,49	0,32
2/5	2,1	1,01	0,44
2/8	1,5	0,95	0,81
2/6	2,91	1,52	2,42
3/3	1,02	1,17	0,94
3/1	1,32	1,54	1,31
3/4	1,29	1,26	1,27
3/2	2,01	2,09	1,7
8/11	0,41	0,09	0,42
8/9	0,46	0,39	0,45
8/12	0,66	0,55	0,41
8/10	0,95	0,62	0,70

При отрицательных температурах исследования значения ударной вязкости также зависят от структуры, и от температуры отпуска. Сравнительный анализ влияния легирования кремнием и алюминием (рис. 6–9) на ударную вязкость показал, что введение кремния значительно снижает показатели ударной вязкости.

Как видно из табл. 4 введение алюминия в сталь благоприятно влияет на ударную вязкость при комнатной температуре испытания, значения повышаются по сравнению со сталью плавки № 3. При отрицательных же температурах ($-60\text{ }^{\circ}\text{C}$) дополнительное легирование алюминием благоприятно сказывается на ударной вязкости только после обработки по режиму 6, когда значения выше, чем для плавок 3 и 8. Введение в сталь кремния приводит к значительному снижению показателей ударной вязкости, хотя для плавки № 8 обработанной по режиму № 9 температура проведения испытаний не сказывается на энергоемкость разрушения.

Результаты исследований полученных в результате испытаний при различных температурах (табл. 5) изломов приведены на рис. 5.

По представленным микрофрактограммам видно, что с понижением температуры испытания от $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ вид изломов меняется с вязкого на хрупкий. Причем для изломов образцов обработанных по режиму 9 (табл. 3) характерно смешанное разрушение, поверхность разрушения состоит из фасеток скола с участками межзеренного разрушения.

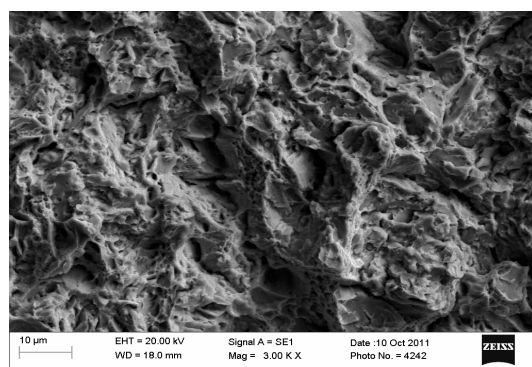
Сравнение фасеток скола с размером зерен феррита и аустенита в исследуемых сталях говорит об их соответствии. Хрупкая трещина в мартенситном зерне тормозится в вязком феррите, образуя на поверхности излома вязкие гребни отрыва. Это может объяснять высокую энергоемкость разрушения двухфазных сталей при отрицательных температурах.

В целом можно заключить, что дополнительное легирование Si и Al является перспективным для Cr-Ni-Mo среднеуглеродистых сталей, т.к. для них можно использовать закалку из межкритического интервала температур из-за существенного расширения температурного интервала. Варьируя температуру отпуска можно добиться получения более высокой ударной вязкости при сохранении высоких прочностных свойств.

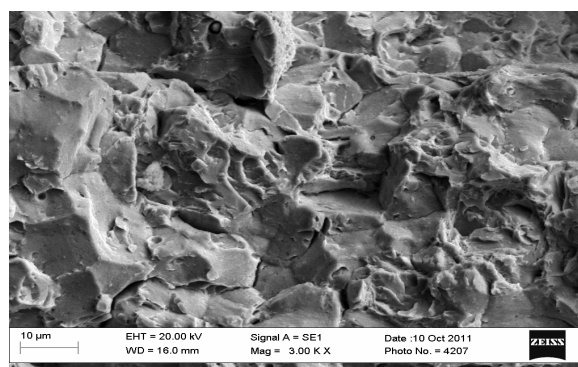
Таблица 5

Режимы испытания ударной вязкости стали плавки № 8

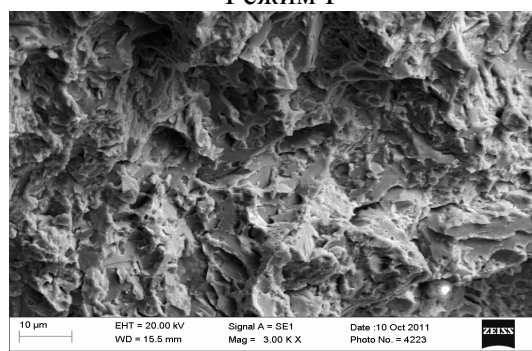
Режим	Температура испытания, °С	Температура нагрева под закалку, °С/время выдержки, мин. / среда охлаждения	Температура нагрева в МКИ, °С/время выдержки, мин./среда охлаждения	Температура отпуска, °С/время выдержки, мин./среда охлаждения
I	+20	920 / 20 / масло	820 / 40 / масло	650 / 120 / воздух
II	+20	920 / 20 / масло	- / - / -	650 / 120 / воздух
III	-40	920 / 20 / масло	820 / 40 / масло	650 / 120 / воздух
IV	-40	920 / 20 / масло	- / - / -	650 / 120 / воздух
V	-60	920 / 20 / масло	820 / 40 / масло	650 / 120 / воздух
VI	-60	920 / 20 / масло	- / - / -	650 / 120 / воздух



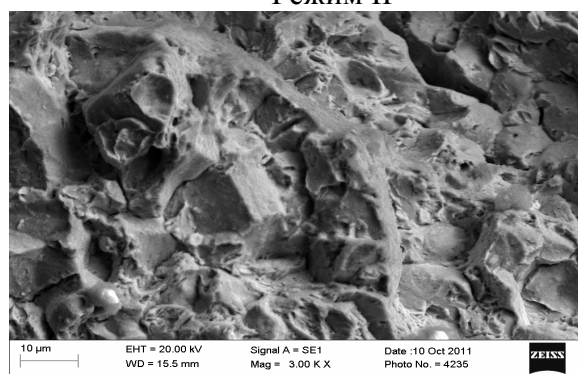
Режим I



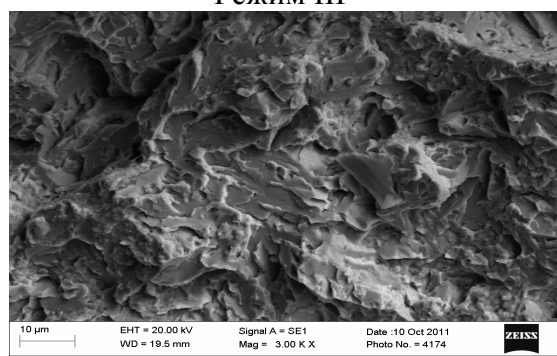
Режим II



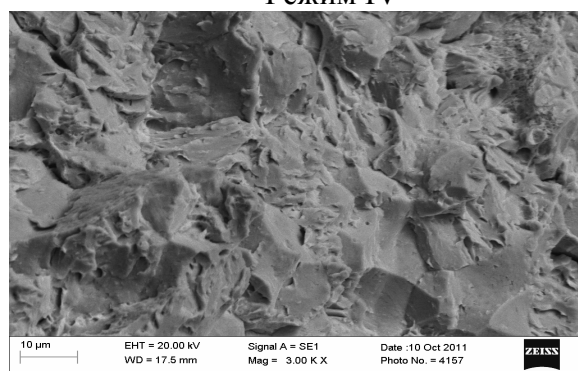
Режим III



Режим IV



Режим V



Режим VI

Рис. 5. Изломы стали плавки № 8 полученные при различных температурах испытания