



Investigations on influence of heating temperature, cooling regimes and steady temperature on structure and mechanical characteristics of hot-rolled pipes, produced of steel 32G2, are carried out.

*В. В. ИВАШКО, ФТИ НАН БЕЛАРУСИ, О. М. КИРИЛЕНКО, РУП «БМЗ»,
И. И. ВЕГЕРА, ФТИ НАН Беларуси, Д. А. СЕМЕНОВ, РУП «БМЗ»*

УДК 669.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРЯЧЕКАТАНЫХ ТРУБ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ СТАЛИ 32Г2

Введение

В настоящее время металлургические заводы выпускают широкий ассортимент труб, отличающихся химическим составом, уровнем механических свойств, надежностью и долговечностью в процессе эксплуатации. По химическому составу и уровню прочностных и пластических характеристик стальные трубы условно можно разделить на три группы. К первой группе относятся трубы, изготовленные из низколегированных сталей, содержащих в качестве основных легирующих элементов марганец и кремний, образующие с железом твердые растворы замещения. Трубы, изготовленные из низколегированных сталей, после нормализации имеют прочность 500–520 МПа в сочетании с хорошей пластичностью и ударной вязкостью при температуре минус 40 °С. К таким сталям относятся 17ГС, 09Г2С, 10Г2СД, 12Г2С. Дальнейшее повышение прочности трубных сталей за счет твердорастворного упрочнения оказалось невозможным из-за резкого ухудшения их вязкости и свариваемости [1].

Более высокие характеристики прочности и вязкости без снижения свариваемости получают стали в результате карбидного или карбонитридного упрочнения при введении добавок ванадия, ниобия и азота. Ванадий и ниобий положительно влияют на измельчение зеренной структуры, если находятся в стали в виде высокодисперсных карбидов. Авторами [2] были разработаны стали второй группы с временным сопротивлением 540–600 МПа. Сталь 17Г2СФ мелкозернистая, технологичная, но подвержена разрушению из-за стресс-коррозии. Взамен ее в дальнейшем была разработана сталь

16Г2АФ с карбидо- и нитридообразующими элементами, содержащими ванадий и алюминий. В дальнейшем были разработаны стали 14Г2АФ, 16Г2АФ и 18Г2АФ, которые после нормализации имеют пределы текучести 400, 450 и 500 МПа. Для повышения прокаливаемости разработаны стали 09Г2ФБ, 10Г2ФБ с добавками бора и стали 12Г2СМФ, 14Г2СМФР с добавками молибдена (0,2–0,5%). Эти стали относятся по классификации зарубежных фирм к категории прочности Х65–Х70. Фактическое содержание углерода в них составляет 0,07–0,10%, марганца – 1,1–2,0, кремния – 0,15–0,35%.

С развитием нефтяной и газовой промышленности появилась потребность в высокопрочных обсадных, насосно-компрессорных и буровых трубах с пределом прочности 640–690 МПа (категории прочности Х75–Х80). Для этих целей в настоящее время в промышленности применяют стали 30Г2, 35Г2С, 37Г2С, 40Г и др. [1]. Достижение данного уровня свойств возможно лишь за счет применения упрочняющей термической обработки. Термическая обработка является важнейшей составляющей в современной технологии производства труб. Ее применяют для достижения определенных эксплуатационных свойств, подготовки структуры для определенных деталей в машиностроении (подшипники), восстановления пластичности, выравнивания структуры и свойств сварных и литых труб, а также труб переменной геометрии по длине. Для получения труб группы прочности К и выше (ГОСТ 633–80) и сохранения пластических характеристик их подвергают термической обработке, включающей закалку и высокий отпуск. Применение термоупрочненных труб позво-

ляет повысить их механические свойства или снизить массу металла до 30%. Термическое упрочнение горячекатаных труб включает нагрев в аустенитную область, изотермическую выдержку, закалку в воде и последующий высокий отпуск. Температуру нагрева под закалку и отпуск выбирают в зависимости от химического состава сталей и исходя из необходимого уровня механических свойств регламентированного действующими международными и отечественными стандартами.

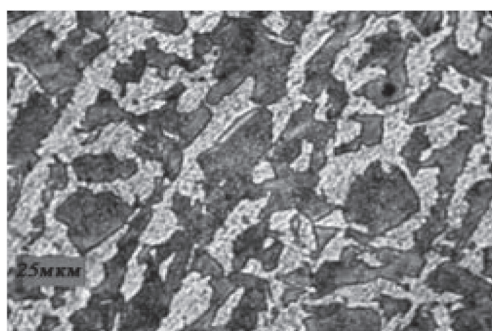
Для правильного выбора оптимальных режимов термической обработки горячекатаных труб, изготовленных из данного рода сталей, необходимо изучить кинетику фазовых и структурных превращений, а также характер изменения механических свойств в зависимости от температуры нагрева и условий охлаждения. В дальнейшем, исходя из результатов исследований, следует выдать рекомендации по режимам термической обработки и вариантам ее реализации в промышленных условиях.

Исследование влияния режимов нагрева и охлаждения на структуру и механические свойства стали 32Г2

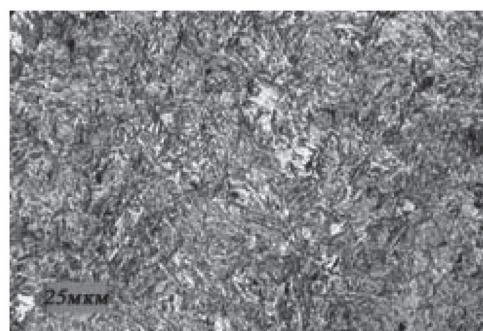
В качестве объекта исследования были выбраны горячекатаные трубы, изготовленные из стали 32Г2, имеющей следующий химический состав: С–0,31%; Si–0,277; Mn–1,295; Cr–0,076; Cu–0,2272; Mo–0,022; V–0,0042; Al–0,0302; Ni–0,1134; P–0,0141; S–0,0117 вес.%. Образцы для исследований размером 10x10x100 мм вырезали из горячекатаных труб в продольном направлении и подвергали термиче-

ской обработке в камерной печи СНОЛ 30/1100 по следующим режимам: нагрев до температур 750–950 °С; закалка в воде и отпуск при температурах 450–700 °С в течение 2 ч; нормализация при температурах 750–950 °С; нормализация и отпуск при температурах 600–700 °С. Из термически обработанных образцов изготавливали образцы для механических испытаний на разрыв. Разрыв образцов проводили на машине ZD 10/90. Скорость нагружения составляла 10 мм/мин. После разрыва определяли предел прочности, предел текучести, относительное удлинение и сужение. Микроструктуру сталей изучали с использованием микроскопа Ver-samet-2 при увеличениях до 2000. Испытание на ударную вязкость при комнатной и пониженной температуре проводили на маятниковом копре PSWO-30.

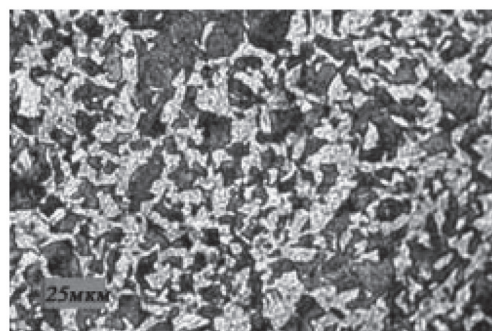
В исходном состоянии микроструктура стали 32Г2 после горячей прокатки представляет собой феррито-перлитную смесь с размерами перлитных зерен 15–20 мкм и выделениями феррита по границам (рис. 1, а). Механические свойства стали 32Г2 после горячей прокатки находились на уровне: $\sigma_B = 672$ МПа; $\sigma_{0,2} = 428$ МПа; $\delta = 21\%$; $\psi = 65\%$. После нагрева стали 32Г2 до температуры 750 °С и закалки в воде были получены следующие механические свойства: $\sigma_B = 1566$ МПа; $\sigma_{0,2} = 1540$ МПа; $\delta = 1\%$; $\psi = 5,4\%$ (рис. 2). Дальнейшее повышение температуры нагрева от 800 до 850 °С приводит к росту временного сопротивления на разрыв, предела текучести, относительного удлинения и относительного сужения закаленной стали от



а



б



в

Рис. 1. Микроструктура стали 32Г2: а – после горячей прокатки; б – 850 °С, охлаждение водой; в – 850 °С, охлаждение на воздухе

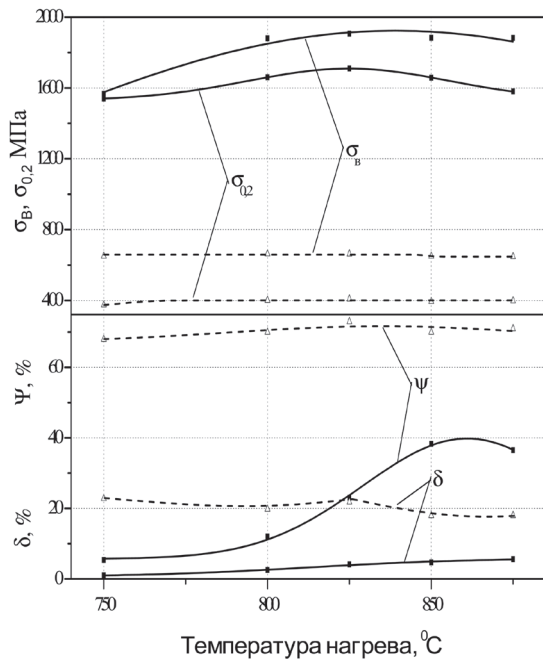


Рис. 2. Механические свойства стали 32Г2: нагрев в печи 1 ч, охлаждение в воде (сплошная линия); охлаждение на воздухе (штриховая линия)

$\sigma_{\text{в}} = 1580$ МПа; $\sigma_{0,2} = 1560$ МПа; $\delta = 2,5\%$; $\psi = 12\%$ до $\sigma_{\text{в}} = 1883$ МПа; $\sigma_{0,2} = 1658$ МПа; $\delta = 4,7\%$; $\psi = 38,3\%$. После закалки с температуры 850–875 °C фиксируется мартенсит твердостью 52 HRC (см. рис. 1, б). Следует отметить, что после закалки в интервале температур 825–875 °C наблюдается повышение относительного сужения от 23 до 36,5%. Данное обстоятельство может быть связано с протеканием процессов рекристаллизации аустенита, измельчением зерен и гомогенизацией твердого раствора.

Если после нагрева до температур 750–850 °C горячекатаные образцы охлаждали на воздухе, то механические свойства стали 32Г2 во всем температурном интервале практически не изменялись и находились на уровне: $\sigma_{\text{в}} = 650$ –660 МПа; $\sigma_{0,2} = 375$ –400 МПа; $\delta = 18$ –22%; $\psi = 67$ –70%. При этом структура стали, нагретой до температуры 850 °C, представляла собой феррито-перлитные зерна размером 8–10 мкм, более мелкие, чем после горячей прокатки (см. рис. 1, в). Данное обстоятельство обусловлено протеканием процессов растворения феррита и последующим распадом аустенита на феррито-цементитную смесь, структура и свойства которых в основном зависят от скоростей охлаждения исследуемых образцов.

Исследование влияния режимов отпуска на структуру и механические свойства закаленной и нормализованной стали 32Г2

Образцы стали 32Г2 для исследований нагревали до температуры 850 °C, закачивали в воде,

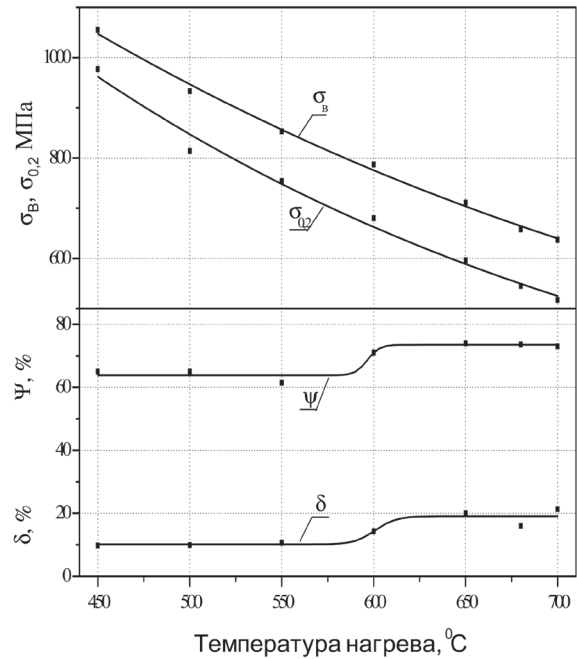


Рис. 3. Механические свойства стали 32Г2 после закалки и отпуска. Режимы термообработки: нагрев 850 °C, 1 ч, охлаждение водой, отпуск 2 ч, охлаждение на воздухе

а затем подвергали отпуску при температурах 450–700 °C в течение 2 ч. Результаты испытаний на растяжение приведены на рис. 3. Установлено, что после закалки с температуры 850 °C и отпуска при температуре 450 °C, 2 ч механические свойства стали 32Г2 следующие: $\sigma_{\text{в}} = 1055$ МПа; $\sigma_{0,2} = 977$ МПа; $\delta = 9,8\%$; $\psi = 65\%$. С повышением температуры отпуска от 450 до 550 °C прочностные характеристики плавно снижаются до $\sigma_{\text{в}} = 855$ МПа; $\sigma_{0,2} = 754$ МПа; $\delta = 10,6\%$; $\psi = 61,4\%$. Пластические характеристики в данном интервале температур отпуска не изменяются и составляют $\delta = 9,8$ –10%; $\psi = 61$ –65%. После отпуска при температурах 600–700 °C предел прочности и предел текучести снижаются с $\sigma_{\text{в}} = 787$ МПа, $\sigma_{0,2} = 680$ МПа до $\sigma_{\text{в}} = 637$ МПа, $\sigma_{0,2} = 517$ МПа, пластические свойства повышаются от $\delta = 14,3\%$, $\psi = 71\%$ до $\delta = 20$ –21,3%, $\psi = 74\%$. Микроструктура стали 32Г2 после закалки с температуры 850 °C и отпуска при 650 °C представляет собой ферритную матрицу, внутри которой равномерно распределены мелкодисперсные частицы цементита (рис. 4, а, б).

Механические свойства стали 32Г2 после нормализации с температуры 850 °C и отпуска приведены в табл. 1. С повышением температуры отпуска от 600 до 700 °C временное сопротивление на разрыв и предел текучести снижаются с 646 и 424 МПа до 573 и 350 МПа соответственно, а относительное удлинение возрастает от 21,6 до 26,4%, относительное сужение не изменяется и находится на уровне 71%.

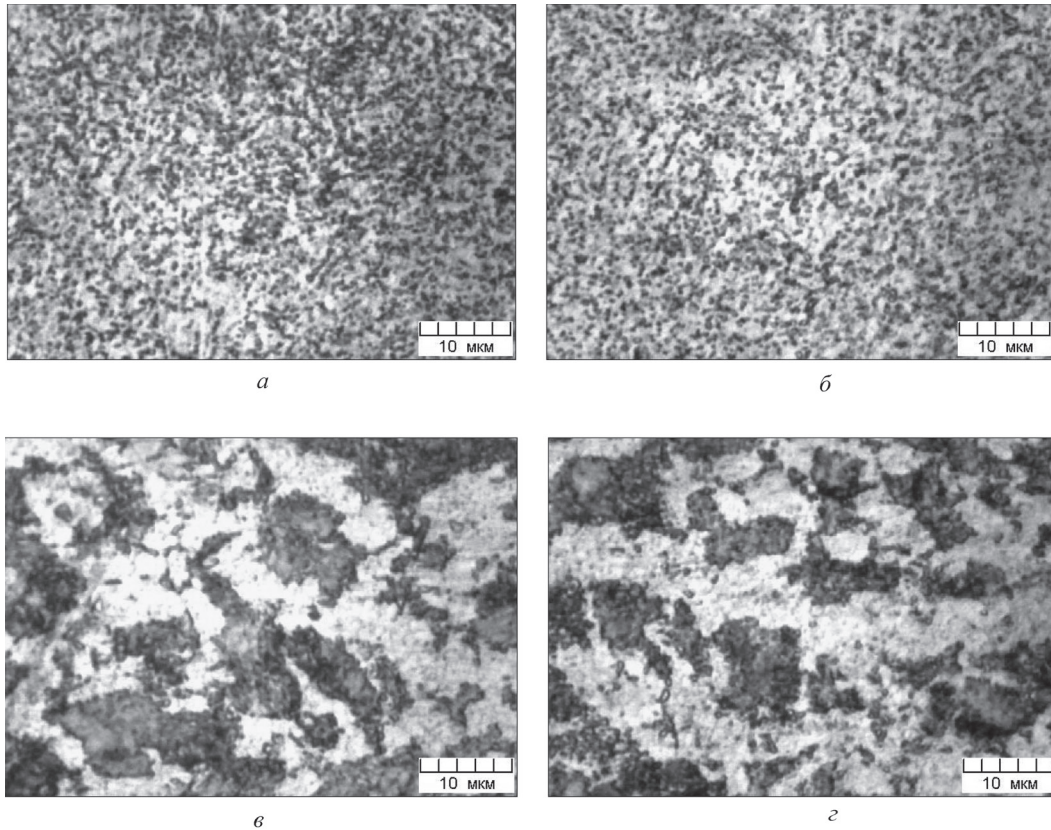


Рис. 4. Микроструктура стали 32Г2 после отпуска: а, б – 850 °С, 1 ч, вода + 650 °С, 2 ч; в, г – 850 °С, 1 ч, воздух + 650 °С, 2 ч

Т а б л и ц а 1. Механические свойства стали 32Г2 после нормализации и отпуска

Температура нормализации	Охлаждающая среда	Температура отпуска	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение/сужение
850	воздух	600	424	646	21,6 / 71
850	воздух	650	382	612	21,1 / 72
850	воздух	700	350	573	26,4 / 71

После нормализации при 850 °С и отпуска при 650 °С в стали формируется феррито-перлитная структура (рис. 4, в, г). Причем внутри ферритных зерен в процессе отпуска происходит выделение мелкодисперсных частиц цементита, а в перлитных объемах их частичная коагуляция.

Влияние режимов охлаждения в процессе нормализации на механические свойства и структуру стали 32Г2

Известно, что на формирование зеренной и внутризеренной структуры стали 32Г2 в процессе нормализации, а также на ее механические свойства в большей степени оказывают влияние условия охлаждения. Вследствие этого целесообразно было изучить влияние скоростей охлаждения на структуру и свойства стали 32Г2 после нагрева до температуры нормализации. Для этого образцы размером 10×10×100 мм вырезали из горячекатаных труб в продольном направлении, подвергали

нагреву до температуры 900 °С, а затем охлаждали в интервале температур 850–300 °С на воздухе ($V_{ох} = 10 \text{ }^\circ\text{C/c}$) или со скоростями 5 и 1 °С/с. Скорости охлаждения 1 и 5 °С/с обеспечивали в резуль-

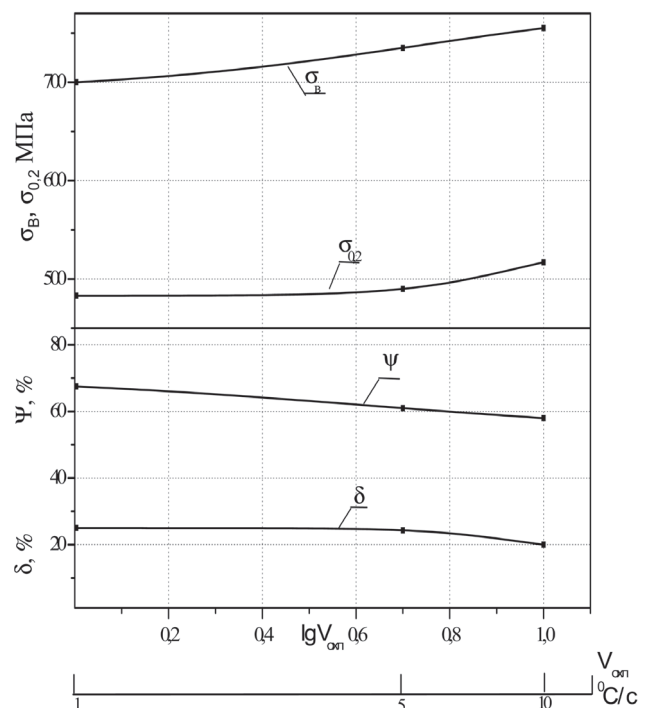


Рис. 5. Механические свойства стали 32Г2 в зависимости от скорости охлаждения. Нормализация 900 °С, $V_{н} = 25 \text{ }^\circ\text{C/c}$

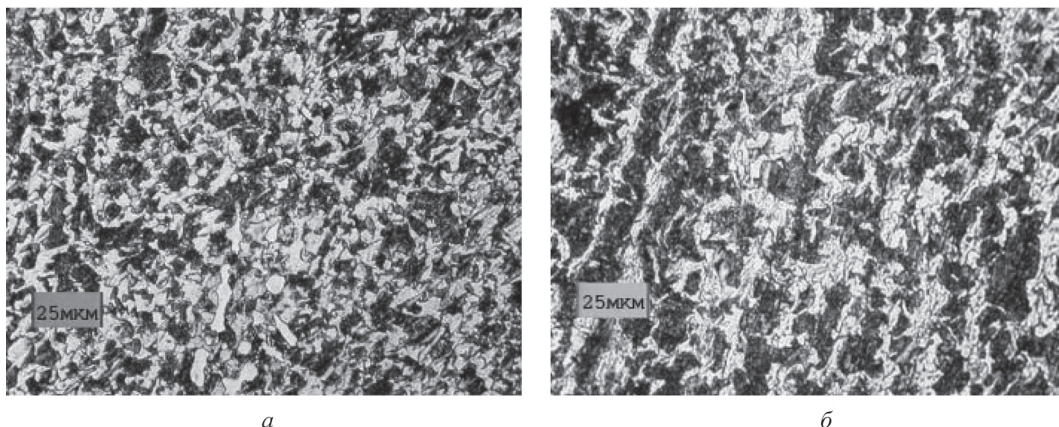


Рис. 6. Микроструктура труб, изготовленных из стали 32Г2 после различных скоростей охлаждения. Нагрев 900 °С, $V_n = 25 \text{ °C/s}$: а – охлаждение 5 °С/с; б – охлаждение 1 °С/с

тате дозированного пропуска тока через образец. После термической обработки проводили механические испытания образцов, результаты которых приведены на рис. 5. Из рисунка видно, что с уменьшением скорости охлаждения с 10 до 1 °С/с временное сопротивление на разрыв снижалось с 755 до 698 МПа, предел текучести – с 517 до 460 МПа, а относительное удлинение повышалось от 20 до 24%. Анализ микроструктуры показал (рис. 6), что с уменьшением скорости охлаждения с 5 и 1 °С/с наблюдается увеличение среднего размера ферритной составляющей от 5 до 7 мкм.

Рекомендации по режимам термообработки и механическим свойствам обсадных и насосно-компрессорных труб, изготовленных из стали 32Г2

По результатам проведенных исследований были сделаны рекомендации по режимам термической обработки стали 32Г2 для различных групп прочности труб в соответствии с действующей нормативной документацией. Рекомендуемые режимы термической обработки и механические свойства, которые они обеспечивают для их достижения (по ГОСТ 633-80), приведены в табл. 2.

Таблица 2. Режимы термической обработки, механические свойства стали 32Г2 и классы прочности по ГОСТ 633-80

Температура нагрева	Охлаждающая среда	Температура отпуска	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение/сужение	Класс прочности по ГОСТ 633-80
860	вода	450	977	1055	9,8 / 65	Р
860	вода	500	814	933	9,9 / 65	М
860	вода	550	754	853	10,6 / 61,4	М
860	вода	600	680	787	14,3 / 71	Л
860	вода	650	596	711	20,0 / 74	К, Е
860	вода	680	545	658	16 / 73,6	Д исп А, Б
825	воздух	–	663	408	21,8 / 73	Д исп А, Б

Таблица 3. Механические свойства стали 32Г2 и рекомендуемая термическая обработка в соответствии со стандартом API 5CT

Класс	Группа прочности	Предел текучести, МПа		Предел прочности, МПа	Термическая обработка (ориентировочная)
		мин.	макс.		
1	H40	276	552	414	Норм. 860 °С
	J55	379	552	517	Норм. 860 °С
	K55	379	552	655	Норм. 860 °С
	N80	552	758	689	Зак. 860 °С, отп. 650 °С
2	T95	655	758	724	Зак. 840 °С, отп. 570–600 °С
3	P110	758	965	862	Зак. 860 °С, отп. 550 °С
4	Q125	862	1034	931	Зак. 860, отп. 450 °С

Рекомендуемые режимы термической обработки, обеспечивающие достижение соответствующих групп прочности по стандарту API 5CT, приведены в табл. 3.

Опытно-промышленное опробование процессов термической обработки труб в условиях РУП «БМЗ»

На РУП «БМЗ» для нагрева под закалку или нормализацию используется проходная газовая печь с шагающими балками. Печь оснащена входным и выходным рольгангами. Транспортная ширина печи – 15040 мм, расстояние между балками – 216 мм, максимальное количество труб, загружаемых в печь – 47 шт. Цикл перемещения балок задается в зависимости от наружного диаметра, толщины стенок трубы, марки стали и составляет не менее 26 с. Печь позволяет нагревать трубы длиной 6–15 м, диаметром от 32 до 168,3 мм с толщиной стенки 2,5–19 мм. Трубы подаются в печь поштучно через печной рольганг в автоматическом или ручном режиме. Разделение труб одной плавки от другой осуществляется через четыре холодных шага балок. Контроль загрузки и выгрузки

труб осуществляется по телемонитору. Закалочная печь обогревается природным газом, теплота сгорания которого составляет 8200 ккал/ч. Температуру нагрева труб в печи можно регулировать в пределах 700–1050 °С. Контроль температуры осуществляется платино-платинородиевыми термопарами. Соотношение расхода газа и воздуха устанавливается в диапазоне от 1:9 до 1:10. Избыточное давление в печи должно поддерживаться на уровне 5–10 Па.

Для закалки труб на РУП «БМЗ» разработано специальное закалочное устройство, в котором в качестве охлаждающей среды используют воду. Нагретая труба из печи по рольгангу подается в закалочное устройство. В процессе закалки внешнюю сторону труб охлаждают водой через спрейер, расположенный по всей длине трубы. С целью достижения равномерного охлаждения и уменьшения коробления нагретую трубу в процессе охлаждения вращают вокруг продольной оси. Результаты исследований показывают, что при закалке водой в спрейерных устройствах равномерность структуры и свойств, а также минимальное изменение геометрических размеров труб достигается при 15–25 оборотах трубы [3]. Внутреннюю поверхность трубы также охлаждают водой, подаваемой через форсунки. Диаметр форсунок зависит от наружного диаметра трубы. Форсунки для внутреннего охлаждения расположены на одной оси, соответствующей центральной оси трубы. Скорость охлаждения труб нефтяного сортамента обычно составляет 40–100 °С/с. Процесс закалки и нормализации труб запрограммирован и управляется с помощью компьютера. Подача воды через спрейер и форсунки, скорость вращения труб регулируются в зависимости от диаметра и толщины стенки трубы.

Отпуск закаленных или нормализованных труб на РУП «БМЗ» производят в проходной газовой печи с шагающим подом. Отпускная печь имеет аналогичные технические характеристики, как и закалочная, а температура нагрева труб на выходе из печи может регулироваться в пределах 350–800 °С.

С целью промышленного опробования разработанных режимов горячекатаные бесшовные трубы размерами 89,9×6,5; 101,0×6,5; 114,3×8,5; 127,0×8,5; 152,0×8,5; 168,3×8,5 мм подвергали термической обработке (закалка + отпуск) в закалочной и отпускной печи. Температура нагрева в закалочной печи составляла 830–870 °С (температура труб на выходе из печи – 830–840 °С). Цикл шага балок с увеличением диаметра труб от 89,9×6,5 до 168,3×8,5 мм изменяли от 42 до 62 с. Для получения свойств $\sigma_B = 700$ МПа, $\sigma_{0,2} = 560$ МПа темпера-

тура в отпускной печи составляла 610–650 °С (температура труб на выходе из печи – 610–625 °С). Механические свойства труб после данной термической обработки соответствовали требованиям группы прочности Е по ГОСТ 633-80. На рис. 7 представлены усредненные значения механических свойств труб в зависимости от их диаметра. Одновременно для временного сопротивления на разрыв и для предела текучести приведены интервалы с минимальными и максимальными значениями. Установлено, что усредненные значения предела прочности и предела текучести для труб диаметрами 89,9×6,5; 152×8,5 и 168,3×8,5 мм составляли: $\sigma_B = 720$ –740 МПа, $\sigma_{0,2} = 650$ –660 МПа. Разброс значений по пределу текучести составил 90–100 МПа, по пределу прочности – 70–80 МПа. Установлено, что при нагреве температура в закалочной и отпускной печи колебалась в пределах плюс-минус 20 °С. Данное обстоятельство может быть вызвано следующими причинами: колебанием температур, связанным с открытием и закрытием печи в процессе подачи холодных труб в печь и выгрузкой нагретых труб из печи; недостаточным предварительным прогревом печи; неправильной настройкой горелок. Если при нагреве под закалку такие колебания температур на свойства закаленной стали влияют несущественно, то в процессе отпуска при средней температуре 650 °С и колебаниях плюс-минус 20 °С значения предела прочности и предела текучести могут изменяться соответственно в интервале 675–740 и 562–630 МПа. В связи с этим были сделаны рекомендации, что при существенных колебаниях температуры в отпускной печи в процессе выбора режимов для получения требуемых механических свойств необхо-

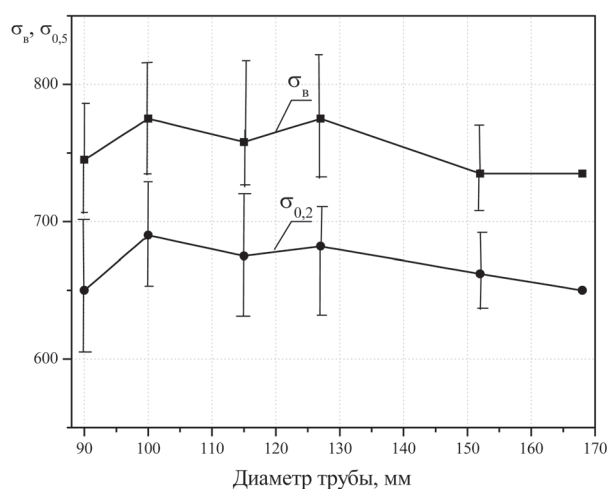


Рис. 7. Механические свойства термически упрочненных труб стали 32Г2 в зависимости от их диаметра. Режимы термической обработки: температура закалки 830–870 °С, температура отпуска 610–650 °С

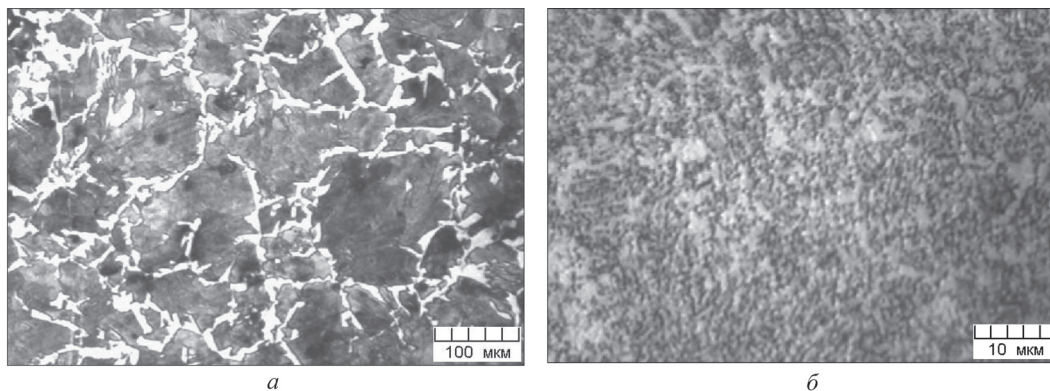


Рис. 8. Микроструктура стали 32Г2 до и после термической обработки в условиях РУП «БМЗ»: *а* – горячекатаная; *б* – закалка + отпуск ($\sigma_b = 697$ МПа, $\sigma_{0,2} = 553$ МПа, $\delta = 22\%$, $\psi = 71\%$)

димо ориентироваться не на среднюю температуру нагрева в отпускной печи, а на максимальную, которая достигается в печи при колебаниях температур в процессе отпуска.

Для получения механических свойств труб, отвечающих классу прочности К по ГОСТ 633-80, термообработке подвергали горячекатаные трубы размером 108×19 мм по следующим режимам: температура нагрева под закалку составляла 850–870 °С, а температура отпуска – 660–680 °С. Цикл шага балок в закалочной печи составлял 102 с, в отпускной – 100 с. После термической обработки изучали микроструктуру стали и оценивали механические свойства: предел текучести, предел прочности, относительное удлинение, ударную вязкость при комнатной температуре и температуре минус 60 °С, долю вязкого излома.

В исходном горячекатаном состоянии сталь 32Г2 имела феррито-перлитную структуру (рис. 8, *а*), а после закалки и отпуска по указанным режимам в структуре стали формируется сорбит (рис. 8, *б*).

Результаты механических испытаний показали, что разброс значений предела текучести термически упрочненных труб составлял 545–611 МПа, предела прочности – 691–723 МПа, относитель-

го удлинения – 17,6–29,6%, ударной вязкости при минус 40 °С – 74–119 Н/см². Проведенные исследования показывают, что термическая обработка, проведенная по данным режимам, обеспечивает получение механических свойств, соответствующих требованиям групп прочности К, Е.

Выводы. Проведены исследования по влиянию температуры нагрева, режимов охлаждения и температуры отпуска на структуру и механические свойства горячекатаных труб, изготовленных из стали 32Г2. По результатам исследований показано, что трубы, изготовленные из стали 32Г2, после закалки и отпуска обеспечивают необходимый уровень механических свойств в соответствии с требованиями стандартов ГОСТ 633–80 и API 5CT. С использованием заводских нагревательных печей проведено опытно-промышленное опробование режимов термической обработки горячекатаных труб, изготовленных из стали 32Г2 и термически обработана опытная партия труб. По результатам исследований разработаны технологические карты режимов термической обработки труб, изготовленных в соответствии с действующими отечественными и международными стандартами.

Литература

1. Тухбатуллин Ф. Г., Галлиулин З. Т. и др. Низколегированные стали для магистральных газопроводов и их сопротивление разрушению. М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2001.
2. Абабков В. Т., Матросов Ю. И., Насибов А. Г. Улучшение качества нормализованных листов из стали 17Г2АФ // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». М., 1974. № 8. С. 43–45.
3. Металловедение и термическая обработка стали / Под ред. М. Л. Бернштейна и А. Г. Рахштадта. М.: Металлургия, 1983. Т. 3.