



Researches on influence of high-speed heating temperature, regimes of cooling and temperature of abatement on structure and mechanical properties of pipe steel 32G2 are carried out. Recommendations on the regimes of high-speed thermal processing of steel 32G2 which can be used at manufacturing of seamless pipes are given.

*А. И. ГОРДИЕНКО, ФТИ НАН Беларуси, О. М. КИРИЛЕНКО, ОАО «БМЗ»,
И. И. ВЕГЕРА, ФТИ НАН Беларуси, Д. А. СЕМЕНОВ, ОАО «БМЗ»*

УДК 669

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ СКОРОСТНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТРУБНОЙ СТАЛИ 32Г2

Введение. Постоянное развитие нефтяной и газовой промышленности приводит к повышению требований к механическим и эксплуатационным свойствам обсадных, насосно-компрессорных и буровых труб. В настоящее время актуальными остаются вопросы получения труб категорий прочности X80-X100 с пределом прочности 650–850 МПа и выше при сохранении требуемых характеристик вязкости, пластичности и свариваемости. Для достижения требуемого уровня свойств во многих странах мира проводятся исследования, направленные на совершенствование химического состава трубных сталей, режимов их прокатки и термической обработки. Необходимо отметить, что в настоящее время основной упрочняющей термической обработкой для данной категории сталей является печная закалка и отпуск. Температура нагрева под закалку и отпуск выбирается в зависимости от химического состава сталей и исходя из необходимого уровня механических свойств регламентированного действующими международными и отечественными стандартами.

В последние годы для термообработки трубных сталей начали использовать скоростные методы нагрева, такие, как индукционный нагрев и нагрев токами высокой частоты [1, 2]. Данные методы по сравнению с печным нагревом более экономичны, менее трудоемки, при их применении сокращается длительность процесса термообработки, исключается обезуглероживание и окисление поверхности, снижаются затраты. По качеству упрочнения они не уступают, а в ряде случаев и превосходят процессы печной термообработки. Однако темпы расширения области применения скоростных методов нагрева сдерживаются проблемами выбора оптимальных режимов термооб-

работки, рационального конструирования нагревательных и охлаждающих устройств.

В [3] были рассмотрены вопросы выбора оптимальных режимов термической обработки трубной стали 32Г2 в условиях печного нагрева. Основная цель настоящего исследования заключалась в определении оптимальных режимов скоростной термической обработки трубной стали 32Г2, для этого необходимо было изучить кинетику фазовых и структурных превращений и характер изменения механических свойств в зависимости от температуры нагрева и условий охлаждения.

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

В качестве объекта исследования была выбрана трубная сталь 32Г2, имеющая 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%. Стали данного класса, такие, как 30Г2, 35Г2С, 37Г2С, 40Г и др., широко используются в настоящее время в промышленности [2, 4].

Образцы для исследований размером 10×10×100 мм вырезали из горячекатаных бесшовных труб в продольном направлении и подвергали термической обработке. Скоростная термообработка образцов проводилась с применением специальной установки электроконтактного нагрева, позволяющей моделировать скорости нагрева в пределах 1–1000 °С/с и скорости охлаждения в интервале 1–400 °С/с. Линейность нагрева обеспечивалась при помощи тиристорного регулятора РН-250, включенного в первичную обмотку трансформатора ОСУ-40. Регистрацию температуры осуществ-

вляли ХА-термопарами, зачеканенными в каждый нагреваемый образец, в комплекте с быстродействующим пирометром КСП-4. Отключение нагрева и сброс образцов в закалочную среду осуществляли автоматически по мере достижения заданной температуры или после определенной выдержки при заданной температуре. Нагрев образцов проводили по следующим режимам: нагрев до температур 800–1000 °С, закалка в воде и отпуск при температурах 450–650 °С в течение 2 ч; нормализация при температурах 750–900 °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 оптического микроскопа 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. Механические свойства стали 32Г2 после горячей прокатки находились на уровне: $\sigma_B = 672$ МПа; $\sigma_{0,2} = 428$ МПа; $\delta = 21\%$; $\psi = 65\%$. После скоростного нагрева $V_H = 50^\circ\text{C}/\text{с}$ до температуры 750 °С и закалки в воде были получены следующие механические свойства стали 32Г2: $\sigma_B = 1550$ МПа; $\sigma_{0,2} = 1490$ МПа; $\delta = 1\%$; $\psi = 5\%$ (рис. 1). Дальнейшее повышение температуры нагрева до 850 °С приводит к плавному росту временного сопротивления на разрыв, предела текучести, относительного

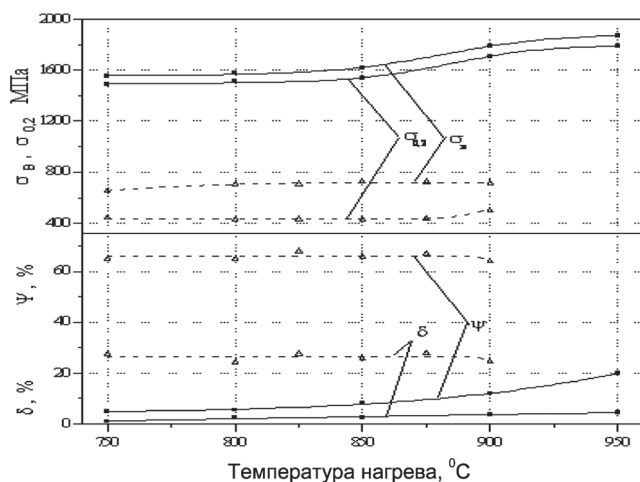


Рис. 1. Механические свойства стали 32Г2 после скоростного нагрева. Скоростной нагрев $V_H = 50^\circ\text{C}/\text{с}$, охлаждение в воде (сплошная линия); охлаждение на воздухе (штриховая линия)

удлинения и относительного сужения закаленной стали до $\sigma_B = 1620$ МПа; $\sigma_{0,2} = 1540$ МПа; $\delta = 2,5\%$; $\psi = 8\%$. Максимальные прочностные и пластические свойства стали 32Г2 ($\sigma_B = 1870$ МПа; $\sigma_{0,2} = 1790$ МПа; $\delta = 4,5\%$; $\psi = 20\%$) были получены после закалки с температуры 950 °С. Необходимо отметить, что данный уровень свойств сопоставим со свойствами, полученными после печной закалки с температуры 850 °С. Кроме того, было установлено, что все процессы, связанные с протеканием фазовых и структурных превращений в стали 32Г2 и формированием определенного уровня свойств в условиях скоростного нагрева, смещаются на 50–100 °С вверх по температурной шкале. На рис. 2 показано изменение твердости стали 32Г2 в зависимости от температуры скоростного нагрева и последующего охлаждения в воде. После закалки с температуры нагрева 750 °С твердость стали составляет 41 HRC, в дальнейшем с ростом температуры она линейно возрастает. Максимальная твердость 52 HRC достигается после закалки с температуры 950 °С, при этом в структуре стали формируется мартенсит.

В том случае если после скоростного нагрева с температур 750–900 °С образцы стали 32Г2 охлаждали на воздухе, то механические свойства во всем температурном интервале незначительно увеличивались с ростом температуры в следующих диапазонах: $\sigma_B = 650$ –720 МПа; $\sigma_{0,2} = 430$ –500 МПа; $\delta = 24$ –27%; $\psi = 64$ –67%. Сравнивая свойства, полученные после нормализации со скоростного нагрева, было установлено, что прочностные свойства стали увеличиваются на 50–80 МПа, а пластические свойства – на 3–5% по сравнению со свойствами после печной нормализации. Данное обстоятельство, по-видимому, связано с получением более мелкой зеренной структуры стали за счет сокращения времени пребывания материала при

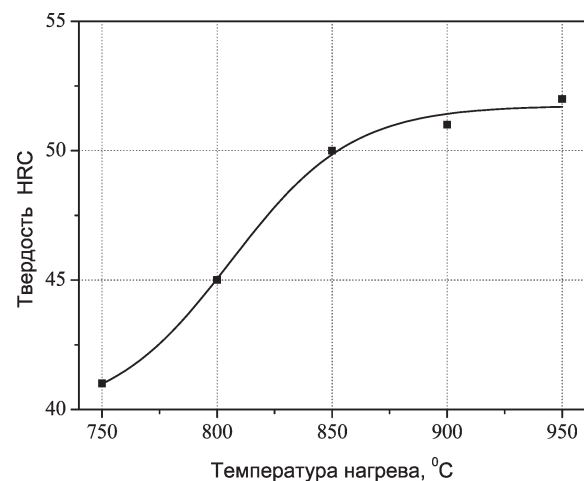


Рис. 2. Влияние температуры скоростной закалки на твердость стали 32Г2

высоких температурах. Микроструктура стали после нормализации со скоростного нагрева существенно не отличалась от полученной после печного нагрева и представляла собой феррито-перлитную смесь.

Исследование влияния режимов отпуска на структуру и механические свойства закаленной со скоростного нагрева стали 32Г2

Образцы стали 32Г2 для исследований нагревали со скоростью 50 °С/с до температуры 900 °С, закаливали в воде, а затем подвергали отпуску при температурах 450–650 °С в течение 2 ч. Испытания на растяжение образцов стали 32Г2 после скоростной термообработки показаны на рис. 3. Установлено, что после скоростной закалки с 900 °С и отпуска при температуре 450 °С механические свойства стали 32Г2 находятся на уровне: $\sigma_B = 1090$ МПа; $\sigma_{0,2} = 1040$ МПа; $\delta = 16\%$; $\psi = 66\%$. С повышением температуры отпуска до 500 °С прочностные характеристики плавно снижаются до $\sigma_B = 995$ МПа; $\sigma_{0,2} = 920$ МПа, а пластические не изменяются и остаются на прежнем уровне. После отпуска при температуре 600 °С предел прочности и предел текучести снижаются до $\sigma_B = 770$ МПа, $\sigma_{0,2} = 665$ МПа, пластические свойства

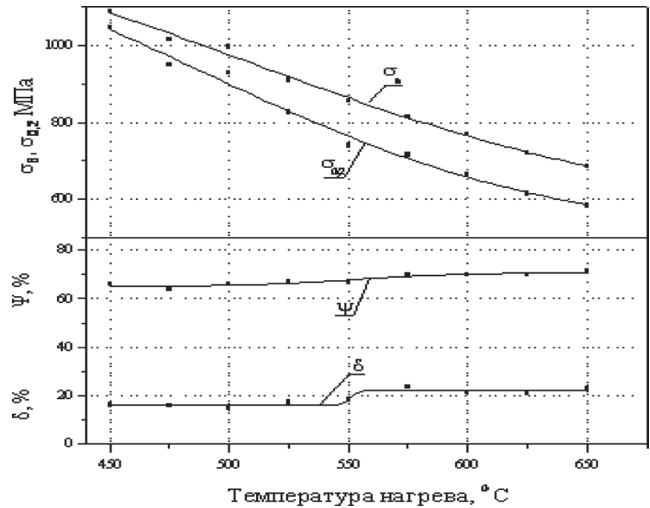
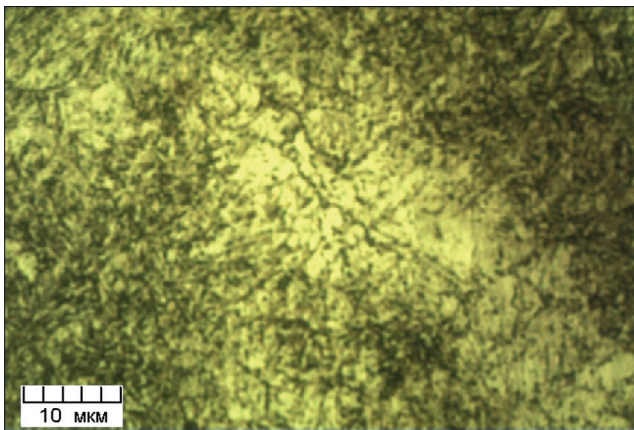
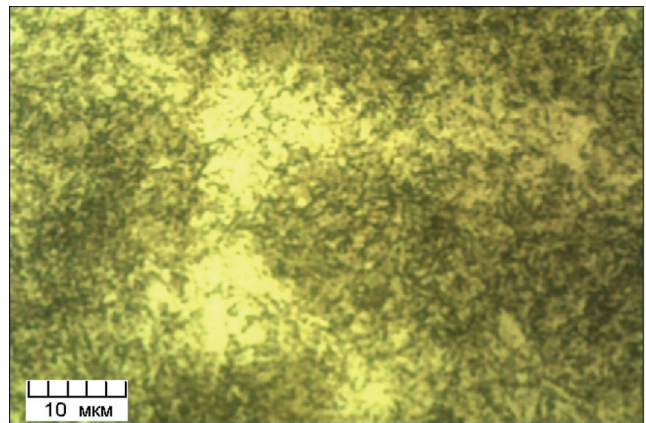


Рис. 3. Механические свойства стали 32Г2 после скоростного нагрева и отпуска. Режимы термообработки: скоростной нагрев 900 °С ($V_H = 50$ °С/с), охлаждение вода, отпуск 2 ч, охлаждение воздух

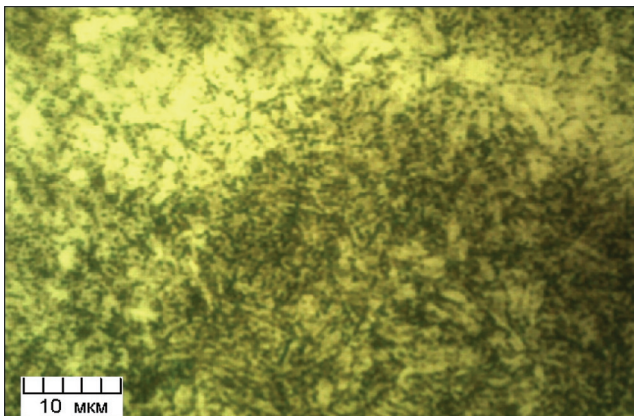
повышаются до $\delta = 22\%$, $\psi = 70\%$. В дальнейшем при повышении температуры отпуска до 650 °С прочностные характеристики стали линейно снижаются до $\sigma_B = 690$ МПа; $\sigma_{0,2} = 585$ МПа, а пластические характеристики увеличиваются до максимального значения $\delta = 23\%$; $\psi = 71,3\%$. Таким об-



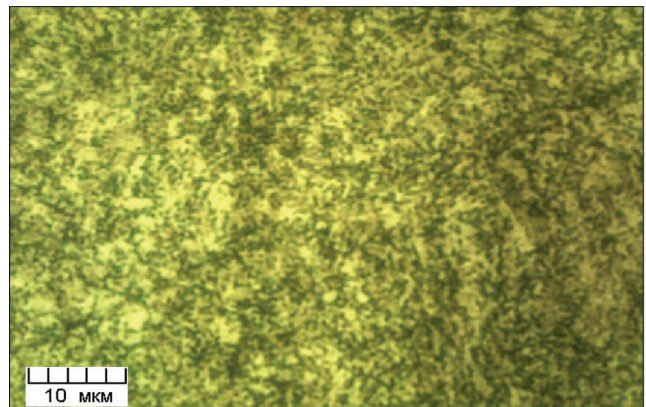
а



б



в



г

Рис. 4. Микроструктура стали 32Г2 скоростного нагрева и отпуска. Скоростной нагрев ($V_H = 50$ °С/с) 900 °С, охлаждение вода, отпуск 2 ч, охлаждение воздух: а – 450 °С; б – 500; в – 550; г – 600 °С

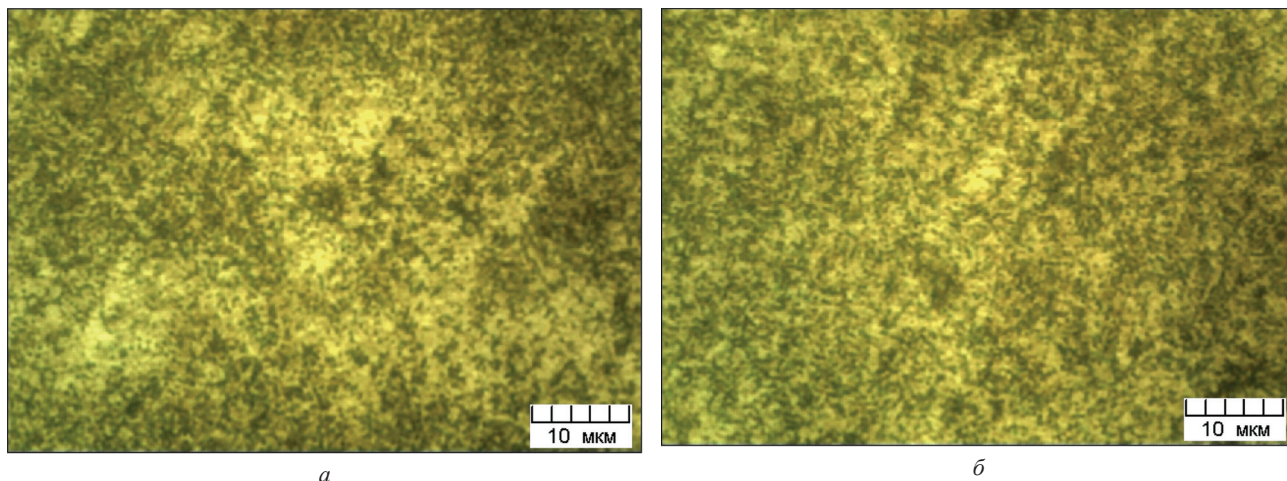


Рис. 5. Микроструктура стали 32Г2 скоростного нагрева и отпуска. Скоростной нагрев ($V_n = 50 \text{ }^\circ\text{C/c}$) $950 \text{ }^\circ\text{C}$, охлаждение вода, отпуск 2 ч, охлаждение воздух: *a* – $600 \text{ }^\circ\text{C}$; *б* – $625 \text{ }^\circ\text{C}$

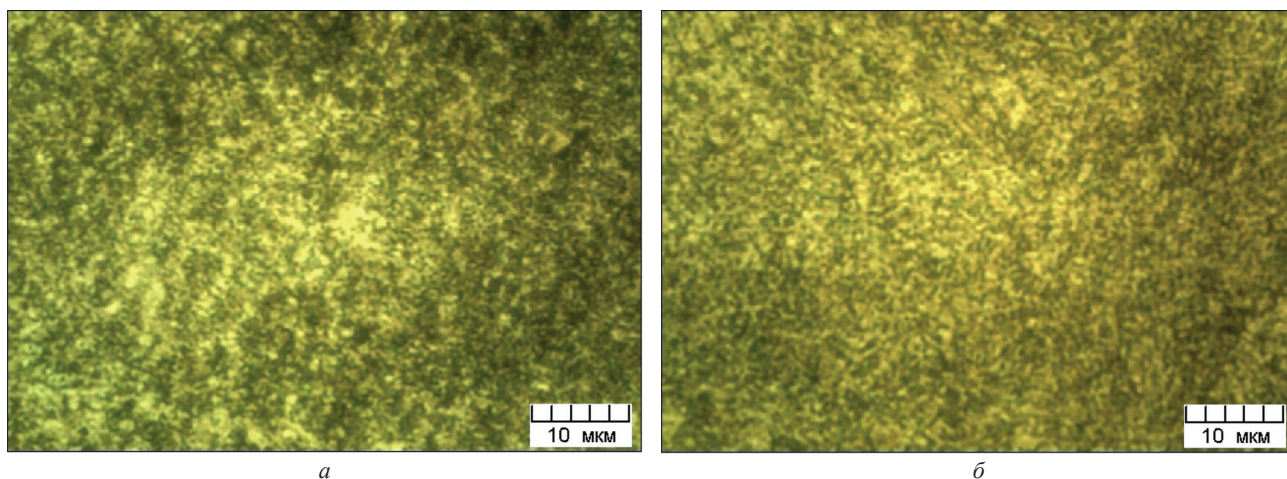


Рис. 6. Микроструктура стали 32Г2 скоростного нагрева и отпуска. Скоростной нагрев ($V_n = 50 \text{ }^\circ\text{C/c}$) $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, охлаждение вода, отпуск 2 ч, охлаждение воздух: *a* – $600 \text{ }^\circ\text{C}$; *б* – $625 \text{ }^\circ\text{C}$

разом, показано, что после закалки стали 32Г2 со скоростного нагрева и отпуска механические свойства стали повышаются по сравнению с печным нагревом.

После скоростного нагрева до $900 \text{ }^\circ\text{C}$ с последующим охлаждением в воде и отпуском при $450 \text{ }^\circ\text{C}$ микроструктура стали 32Г2 представляет собой отпущенный мартенсит с выделениями мелкодисперсных частиц цементита (рис. 4, *a*). Кроме того, необходимо отметить, что в результате кратковременного пребывания стали в области закалочных температур в условиях скоростного нагрева полной гомогенизации стали не происходит, поэтому в структуре стали отмечаются участки с не полностью протекшими фазовыми превращениями. Данные участки в структуре особенно четко проявляются на бывших границах зерен аустенита. При повышении температуры отпуска в структуре стали происходит дальнейший распад мартенсита с выделением карбидной фазы и ее коагуляция (рис. 4, *б*, *в*). После отпуска при температуре выше $600 \text{ }^\circ\text{C}$ формируется ферритная структура

с равномерно распределенными в ней мелкодисперсными частицами цементита (рис. 4, *з*).

С целью гомогенизации структуры стали 32Г2 образцы нагревали со скоростью $50 \text{ }^\circ\text{C/c}$ до температуры $950\text{--}1000 \text{ }^\circ\text{C}$, закачивали в воде, а затем подвергали отпуску при температурах $600\text{--}650 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 2 ч. Результаты исследований показали, что после закалки стали с температуры $950 \text{ }^\circ\text{C}$ и отпуска 600 и $625 \text{ }^\circ\text{C}$ процессы фазовых превращений и перераспределения углерода проходят более полно (рис. 5, *a*, *б*). При этом свойства стали остаются на уровне: $\sigma_B = 730\text{--}770 \text{ МПа}$; $\sigma_{0,2} = 630\text{--}660 \text{ МПа}$; $\delta = 22\text{--}23\%$; $\psi = 70\text{--}71\%$ для температур отпуска 600 и $625 \text{ }^\circ\text{C}$ соответственно.

Дальнейшее повышение температуры закалки до $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ приводит к более полной гомогенизации структуры стали, однако ее свойства несколько снижаются: $\sigma_B = 720\text{--}750 \text{ МПа}$; $\sigma_{0,2} = 600\text{--}630 \text{ МПа}$; $\delta = 20\text{--}22\%$; $\psi = 69\text{--}70\%$ для температур отпуска 600 и $625 \text{ }^\circ\text{C}$ соответственно (рис. 6, *a*, *б*). В связи с этим были сделаны выводы о том, что оптимальная температура скоростного нагрева под закалку

находится в интервале 920–950 °С. Кроме того, для получения гомогенной структуры стали рекомендуется делать изотермические выдержки при закалочной температуре. Для этих целей в промышленных индукционных установках применяются индуктора-термостаты [2].

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 скоростной 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 таблице. Температура нагрева для всех групп прочности составляла 920–950 °С, скорость нагрева 20–50 °С/с, охлаждение в воде, отпуск 2 ч.

Выводы. Проведены исследования по влиянию температуры скоростного нагрева, режимов охлаждения и температуры отпуска на структуру и механические свойства трубной стали 32Г2. По-

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

Температура отпуска	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение/сужение	KCV-60, Дж/см ²	Доля вязкой составляющей В, %	Класс прочности по ГОСТ 633-80
450	1090	1045	16 / 65	41	42	Р
500	1000	930	16 / 65	65	56	Р
550	860	745	18 / 67	62	60	М
600	770	665	21 / 71	138	60	Л
625	730	630	22 / 71	120	60	Е
650	690	580	23 / 72	128	65	К

казано, что применение скоростного нагрева для термообработки стали 32Г2 позволяет получить более высокие свойства по сравнению с аналогичной печной термической обработкой при сокращении времени нагрева, исключении окисления, угара и обезуглероживания металла. Даны рекомендации по режимам скоростной термической обработки для стали 32Г2, которые могут использовать при изготовлении бесшовных труб в соответствии с действующими отечественными и международными стандартами.

Литература

1. Заявка на изобретение РФ 2006101482/02. Способ термической обработки труб.
2. Заявка на изобретение 2007103426/02. Способ производства бесшовных горячекатаных обсадных хладостойких труб.
3. Ивашко В. В., Кириленко О. М., Вегера И. И., Семенов Д. А. Исследование влияния режимов термической обработки на структуру и механические свойства горячекатаных труб, изготовленных из стали 32Г2 // *Литье и металлургия*. 2011. № 4. С. 108–114.
4. Тухбатуллин Ф. Г., Галлиулин З. Т. и др. Низколегированные стали для магистральных газопроводов и их сопротивление разрушению М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2001.