

УДК 669.15'.74.-194-15.669.17

Д-р техн. наук Л. С. Малинов, канд. техн. наук Д. В. Булова,
канд. техн. наук И. Е. Малышева

ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ СВОЙСТВ СТАЛИ 10Г2ФБ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПО НОВОМУ НАЗНАЧЕНИЮ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

Приведены данные, показывающие целесообразность использования закалки стали 10Г2ФБ в воде, в том числе из межкритического интервала температур (МКИТ), в качестве заключительной обработки. Это позволяет в небольших сечениях (до 25 мм) получить механические свойства, соответствующие их уровню у среднеуглеродистых сталей после улучшения. При этом сокращаются энергозатраты на термообработку. Установлено, что изотермическая закалка стали 10Г2ФБ может быть альтернативным способом улучшения, которое иногда проводится для этой стали с целью получения хорошего сочетания механических свойств. Приведены данные, показывающие целесообразность использования стали 10Г2ФБ в качестве цементуемой, у которой после науглероживания, закалки и низкого отпуска существенно повышается абразивная износостойкость.

Ключевые слова: закалка, изотермическая закалка, межкритический интервал температур, мартенсит, бейнит, феррит, механические свойства, износостойкость.

Введение

В последние годы в связи с неритмичным приобретением применяемых для ремонта оборудования листовых среднеуглеродистых улучшаемых сталей начали использовать строительные низколегированные стали. Однако в состоянии поставки они не обеспечивают требуемую долговечность деталей машин из-за сравнительно невысоких прочностных свойств. Обычно у потребителя их не подвергают термообработке. В данной работе исследована возможность получения у строительной стали 10Г2ФБ уровня механических свойств, соответствующего среднеуглеродистым сталям после улучшения, при снижении энергозатрат на термообработку.

Обычно закалка доэвтектоидных сталей проводится с температур, несколько превышающих A_{c3} . В работах [1–3] изучено влияние режимов закалки стали 10Г2ФБ, в том числе изотермической, с температур 960–1000 °С на ее структуру и механические свойства. Обнаружены различные морфологические типы мартенсита и бейнита. При этом отмечено, что закалка в воде, существенно повышая прочностные свойства, не позволяет получить требуемый для строительной стали уровень пластичности. В связи с этим такая закалка в качестве заключительной термообработки применена быть не может. Следует подчеркнуть, что нагрев в аустенитную область температур требует значительных энергозатрат. Представляло интерес изучить возможность получения у стали 10Г2ФБ после закалки, в том числе из МКИТ, такого же уровня

механических свойств, как у среднеуглеродистых сталей после улучшения. Закалка из МКИТ используется в основном для низкоуглеродистых низколегированных сталей [4], применяемых для глубокой вытяжки или холодной высадки. Закалка из МКИТ доэвтектоидных сталей является энергосберегающей термообработкой, поскольку температура нагрева в МКИТ ниже, чем обычно принятая, превышающая A_{c3} . Кроме того, при закалке низкоуглеродистых низколегированных сталей используется вода, а не дорогое и неэкологическое масло, как правило, применяющееся при аналогичной термообработке многих среднеуглеродистых сталей. Между тем, публикации по данному вопросу применительно к низколегированным строительным сталям немногочисленны [5, 6], а для стали 10Г2ФБ вообще отсутствуют.

В работе также изучалось влияние изотермической закалки из МКИТ и аустенитной области на механические свойства стали 10Г2ФБ для выяснения возможности замены улучшения, применяемого для нее в ряде случаев.

Строительные стали, к которым относится сталь 10Г2ФБ, обычно не цементируются и не используются для деталей, подвергающихся абразивному воздействию. В работе изучалась возможность цементации этой стали и ее абразивная износостойкость после науглероживания, закалки и низкого отпуска для выяснения возможности ее применения по новому назначению.

Материалы и методика исследований

Объектом исследований служила строительная сталь, широко применяемая в промышленности. Она имеет следующий химический состав: 0,1 % С; 0,4 % Si; 1,6 % Mn; 0,09 % V; 0,04 % Nb; 0,02 % Ti; 0,02 Al; 0,01 % N; 0,2 % Cr; 0,2 % Ni; 0,15 % Cu; 0,015 % P; 0,005 % S. Ее критические точки таковы: $A_{c1} = 720$, $A_{c3} = 865$ °С. Сталь 10Г2ФБ поставляется потребителю после контролируемой прокатки. В соответствии с ТУ 14-3-1573-96 она должна иметь следующие механические свойства: $\sigma_{0,2} = 440$ МПа, $\sigma_B = 590$ МПа, $\delta = 20$ %.

Нагрев стали под закалку проводился в МКИТ на следующие температуры: 760, 800, 840 °С (выдержка 60 мин) и в аустенитную область: на 920 °С, (выдержка 2 мин/мм). Охлаждение осуществлялось в воде. При изотермической закалке стали ее охлаждение до температуры изотермы проводилось не в расплаве неэкологических солей и щелочей, как это обычно принято, а в воде, с выдержкой при заданной температуре в печи [7, 8]. Время пребывания образцов в воде при охлаждении до заданной температуры предварительно определялось на образцах свидетелях с зачеканенной в них термопарой. Такая термообработка названа изотермической закалкой по схеме «вода-печь».

В работе применялись дюрметрический, металлографический, методы исследования. Определялись механические свойства при растяжении (ГОСТ 1497-84) и ударная вязкость (ГОСТ 9454-78).

Анализ полученных результатов

С повышением температуры нагрева в МКИТ и особенно после перехода в аустенитную область, прочностные характеристики после закалки возрастают, а пластичность и ударная вязкость снижаются (табл. 1). Это объясняется увеличением количества аустенита в структуре 3.3 стали при нагреве до все более высоких температур и, соответственно, мартенсита после закалки, несмотря на уменьшающуюся в нем концентрацию углерода. Нагрев с небольшим превышением A_{c1} (760 °С) приводит к получению у стали после закалки сравнительно невысоких значений прочностных свойств и повышенной пластичности (табл. 1) из-за большого количества феррита в структуре. Более низкий уровень ударной вязкости, после закалки с этой температуры, чем с других температур в МКИТ, обусловлен тем, что аустенит перед закалкой, количество кото-

рого невелико и, соответственно, мартенсит после нее, имеет повышенное содержание углерода и образуется по границам зерен феррита. Это согласуется с результатами работ [9, 10].

Хорошее сочетание механических свойств исследованной стали получено после закалки из МКИТ с температуры 840 °С. При этом прочностные свойства несколько ниже, чем после закалки из аустенитной области (920 °С), но пластичность и ударная вязкость выше. Указанные различия обусловлены присутствием в структуре закаленной из МКИТ стали наряду с мартенситом, имеющим различное содержание углерода, небольшого количества феррита (~ 10%). В низкоуглеродистом реечном мартенсите, преобладающем в структуре закаленной стали 10Г2ФБ [1, 2], дислокации не заблокированы атомами углерода и обладают высокой подвижностью. Такая структура обеспечивает повышенные прочностные свойства и достаточный уровень пластичности и ударной вязкости. В работе [2] установлено, что после закалки из аустенитной области в структуре стали 10Г2ФБ наряду с реечным мартенситом может образоваться мартенсит с микродвойниками (J 5 %), содержащий ~ 0,5 % углерода. Тем более вероятно его присутствие после закалки из МКИТ. Не исключено образование остаточного аустенита по границам микродвойникового мартенсита, который может повысить пластичность. Определенную роль в свойствах исследованной стали играет феррит. При его равномерном расположении в структуре в виде небольших участков он повышает пластичность и несколько снижает прочность по сравнению с их уровнем после закалки из аустенитной области.

В табл. 2 приведены механические свойства стали 10Г2ФБ после закалки из МКИТ с 800 и 840 °С и различных выдержек. Указанные температуры были выбраны, поскольку обеспечивали наиболее высокий уровень прочностных свойств. Увеличение времени пребывания стали 10Г2ФБ при температурах 800 и 840 °С несколько снижает прочностные свойства. При этом пластичность и ударная вязкость возрастают после выдержки 60 мин. Чем больше выдержка при одной и той же температуре в МКИТ, тем полнее протекают диффузионные процессы в аустените, приближающие его химический состав к равновесному состоянию [11]. Соответственно, снижается микрон неоднородность распределения углерода в мартенсите после закалки. Важно подчеркнуть, что после всех выдержек в МКИТ при

Таблица 1 – Влияние температуры нагрева под закалку в МКИТ (выдержка 60 мин) и в аустенитную область (920 °С, выдержка 10 мин) на свойства стали 10Г2ФБ

Температура t , °С	Механические свойства				
	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, МДж/м ²
760	685	785	23	67	0,61
800	937	1059	12	55	1,2
840	1026	1140	11	53	1,0
920	1214	1287	9	47	0,6

800 и 840 °С, в том числе самой небольшой из выбранных 10 мин (1–2 мин/мм), обычно применяемой на практике, обеспечиваются механические свойства, соответствующие требованиям, предъявляемым к среднеуглеродистым сталям, закаленным из аустенитной области и опущенным на 550–650 °С ($\sigma_{0,2} = 750\text{--}950$ МПа, $\sigma_{\text{в}} = 900\text{--}1100$ МПа, $\delta = 10\text{--}12$ %, $\psi = 45\text{--}55$ %, КСУ = 0,5–1,0 МДж/м² [12]. Это следует отметить в связи с тем, что в справочной и учебной литературе вообще не рассматривается возможность существенного повышения прочностных свойств исследуемой стали проведением закалки из МКИТ для получения в них мартенситно-ферритной структуры.

Между тем, такая закалка позволяет использовать низколегированную строительную сталь по новому назначению, а именно вместо улучшаемых сталей для деталей небольшого сечения (до 25 мм). Эти результаты согласуются с данными работ [5, 6], полученными для других строительных сталей.

Преимущества закалки из МКИТ по сравнению с такой же обработкой после высокотемпературной аустенитизации (980–1000 °С), используемой в работах [1–3], с точки зрения энергосбережения не вызывают сомнений. Варьируя температурно-временной режим нагрева в МКИТ, можно управлять количественным соотношением структурных составляющих, их химическим составом, характером распределения в структуре после закалки. Это позволяет в зависимости от требований в нужном направлении изменять механические свойства исследованной стали. Закалка стали 10Г2ФБ из МКИТ в воде по сравнению с улучшением среднеуглеродистых сталей является энергосберегающей обработкой, т. к. снижаются энергозатраты на нагрев.

Обычно изотермическая закалка проводится для получения структуры нижнего бейнита, обеспечивающего в конструкционных среднеуглеродистых, инструментальных сталях с повышенным содержанием углерода и в высокопрочных чугунах хорошее сочетание повышенного уровня прочностных свойств, пластичности и ударной вязкости. Для строительных сталей такая обработка на практике не применяется.

В работах [2, 3] построена диаграмма изотермического распада переохлажденного аустенита у стали 10Г2ФБ, установлен интервал бейнитного превраще-

ния (450–600 °С), приведены результаты исследований влияния изотермической закалки из аустенитной области на структуру и механические свойства этой стали. Показано, что после аустенитизации исследуемой стали при повышенных температурах (980–1000 °С), переохлаждения образцов до 500–550 °С и выдержки при этих температурах 20–60 мин, получены следующие механические свойства: $\sigma_{0,2} = 650\text{--}670$ МПа, $\sigma_{\text{в}} = 708\text{--}713$ МПа, $\delta = 19\text{--}21$ %, $\psi = 65\text{--}70$ %. Они превышают уровень, соответствующий классу прочности Х70 ($\sigma_{0,2} = 500\text{--}600$ МПа, $\sigma_{\text{в}} = 600\text{--}700$ МПа, $\delta = 19\text{--}20$ %, $\psi \geq 70$ %) [2, 3].

Данные о влиянии изотермической закалки из МКИТ при охлаждении в воде и изотермической выдержки в интервале 450–550 °С в печи (схема «вода-печь») на механические свойства стали 10Г2ФБ приведены в табл. 3

Из этих данных следует, что, чем выше температура нагрева в МКИТ в выбранном интервале, тем выше прочностные свойства и ниже пластичность. Это обусловлено увеличением количества аустенита при нагреве и, соответственно, бейнита после термообработки. При одном и том же режиме нагрева в МКИТ снижение температуры изотермической выдержки повышает прочностные и снижает пластические свойства, что объясняется увеличением содержания углерода в бейните. Рациональные режимы изотермической закалки с нагревом на 760 °С и выдержкой при 450 °С и на 780 °С и выдержкой при 500–550 °С позволяют достичь у стали 10Г2ФБ уровня механических свойств, соответствующего классу прочности Х70. Он может быть получен улучшением с предварительной закалкой из аустенитной области при больших энергетических затратах. Полученные данные подтверждают приведенные в работе [6] результаты для строительных сталей 09Г2С и ЕНЗ6 о возможности получения изотермической закалкой из МКИТ по схеме «вода-печь» хорошего сочетания механических свойств. Следует отметить, что закалка из аустенитной области с изотермической выдержкой 60 мин при 500 °С позволяет получить наиболее высокие прочностные свойства ($\sigma_{0,2} = 704$ МПа, $\sigma_{\text{в}} = 780$ МПа), но сравнительно более низкие значения пластичности ($\delta = 12$ %, $\psi = 56$ %).

Таблица 2 – Влияние выдержки при температурах нагрева в МКИТ 800 и 840 °С на механические свойства стали 10Г2ФБ после закалки

Сталь	Температура нагрева t , °С	Выдержка, τ , мин	Механические свойства				
			$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, МДж/м ²
10Г2ФБ	800	10	980	1099	11	53	1,0
		30	960	1059	11	53	1,0
		60	937	1040	12	55	1,2
		90	916	1025	14	64	1,4
	840	10	1076	1185	10	51	0,8
		30	1031	1154	10	52	0,8
		60	1026	1140	11	53	1,0
		90	980	1090	12	54	1,0

Таблица 3 – Механические свойства стали 10Г2ФБ после изотермической закалки с различных температур из МКИТ (10 мин) и изотермической выдержки 60 мин

Температура выдержки, t_v , °С	Температура изотермы $t_{из}$, °С	Механические свойства			
		$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{в\gamma}$, МПа	δ , %	ψ , %
760	450	560	671	20	71
	500	488	652	21	72
	550	459	616	22	73
780	450	590	693	18	70
	500	553	667	19	70
	550	512	622	20	70
800	450	674	743	16	66
	500	664	728	17	68
	550	589	644	18	68

Обычно строительные стали не цементируют. В работе цементацию стали 10Г2ФБ проводили в твердом карбюризаторе при 930 °С 8 ч. Концентрация углерода в поверхностном слое составляла 1,25 %, а глубина слоя ~ 1,20 мм. Закалка цементированных образцов проводилась с температур 900, 950, 1000 1100 °С, после чего осуществлялся отпуск при 200 °С 1 ч. Абразивная износостойкость определялась по схеме Бринелля-Хаурота [13]. Абразивом служил речной песок с размером частиц 0,8 мм. При определении относительной абразивной износостойкости эталоном служили образцы после закалки и низкого отпуска без цементации. Результаты исследований показывают, что с повышением температуры нагрева под закалку с 900 до 1100 °С и низкого отпуска твердость снижается с 59 до HRC 48. Согласно данным рентгеновского анализа, это обусловлено увеличением в структуре количества остаточного аустенита (с 10 до 25 %) в результате растворения в аустените карбидов при нагреве до все более высокой температуры аустенитизации. Важно подчеркнуть, что относительная абразивная износостойкость после закалки с 1100 °С возрастает ~ в 3 раза. Это обусловлено превращением метастабильного остаточного аустенита при абразивном изнашивании в мартенсит деформации и присутствием в структуре не растворившихся карбидов (V, Nb)C высокой твердости. Приведенные результаты показывают, что сталь 10Г2ФБ может быть использована в качестве цементуемой, обеспечивающей после закалки с повышенной температуры аустенитизации и низкого отпуска высокую абразивную износостойкость. Полученные данные согласуются с результатами других исследований по повышению абразивной износостойкости различных сталей за счет получения в их структуре метастабильного остаточного аустенита [14].

Выводы

1. Закалка в воде из аустенитной области и МКИТ позволяет получить у стали 10Г2ФБ в небольших сечениях механические свойства, соответствующие среднеуглеродистым улучшаемым сталям. Это дает возмож-

ность использовать исследованную строительную сталь вместо них.

2. Изотермическая закалка из МКИТ по схеме «вода-печь» при рациональных режимах ее проведения обеспечивает у стали 10Г2ФБ уровень механических свойств, соответствующий классу прочности X 70, получаемый в ней после улучшения, проводимого для нее в ряде случаев, что позволяет снизить энергозатраты на термообработку.

3. Цементация и последующая термообработка дают возможность существенно повысить абразивную износостойкость исследованной стали, особенно при получении в структуре наряду с отпущенным мартенситом и карбидами метастабильного остаточного аустенита, превращающегося в мартенсит деформации при абразивном воздействии.

4. После закалки или дополнительного низкого отпуска (в случае предварительной цементации), являющихся заключительной термообработкой, сталь 10Г2ФБ, может быть применена по новому назначению и обеспечить энергосбережение.

Список литературы

1. Морфология и тонкая структура продуктов распада аустенита при ускоренном охлаждении стали 10Г2ФБ / В. И. Большаков, Г. Д. Сухомлин, Д. В. Лаухин, В. И. Куксенко // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. трудов. – Днепропетровск, ПГАС и А. – 2003. – Вып. 22. – Ч. 1. – С 78–87.
2. Большаков В. И. Использование высокопрочных сталей бейнитного класса в строительных металлоконструкциях / В. И. Большаков // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. трудов. – Днепропетровск : ПГАС и А. – 2002. Вып. 15. – Ч. 1. – С. 27–37.
3. Бекетов О. В. Особливості процесів структуроутворення і розробка параметрів зміцнення сталі 10Г2ФБ / О. В. Бекетов. – автореф. дис. ... канд. техн. наук (05.02.01). – Днепропетровск. – 2004. – 20 с.
4. Голованенко С. А. Двухфазные низколегированные стали / С. А. Голованенко, Н. М. Фонштейн. М. : Металлургия, 1986. – 207 с.
5. Малинов Л. С. Повышение свойств строительных сталей нетрадиционной для них термообработкой /

- Л. С. Малинов, А. С. Рубец // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2004. – № 2. – С. 79–81.
6. Малинов Л. С. Нетиповая термообработка сталей 09Г2С и ЕН36, в том числе с выдержкой в межкритическом интервале температур (МКИТ) / Л. С. Малинов, Д. В. Бузова // *Вісник Приазовського держ. техн. ун-ту: зб. наук. праць*. – Мариуполь : ДВНЗ «ПДТУ», 2013. – №2. – (27). – С. 73–82.
 7. Пат. 87940 на винахід. Україна МПК С21D 1/78 (2006.01) Спосіб термообробки сталі / Л. С. Малинов, В. Л. Малинов. – № а 200807554 ; заявл. 02.08.2009 ; опубл. 25.08.2009, Бюл. № 16.
 8. Пат. 87468 на корисну модель. Україна МПК С21D 1/78 (2006.01) Спосіб термообробки низьколегованих сталей / Л. С. Малинов, Д. В. Бузова. № u 201309757 ; заявл. 05.08.2013 ; опубл. 10.02.2014, Бюл. № 3.
 9. Дьяченко С. С. Особенности структур неполной перекристаллизации их влияние на свойства сталей / С. С. Дьяченко, О. П. Фоменко // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1970. – № 1. – С. 9–11.
 10. Маковецкий А. Н. Влияние термической обработки на хладостойкость стали для нефтяных трубопроводов / А. Н. Маковецкий, Д. А. Мирзаев // *Физика металлов и металловедение*. – 2010. – Т. 110. № 4. – С. 417–423.
 11. Дьяченко С. С. Образование аустенита в железоуглеродистых сплавах / С. С. Дьяченко. М. : *Металлургия*, 1982. – 127 с.
 12. Гольдштейн М. И. Специальные стали / М. И. Гольдштейн, С. В. Грачев, Ю. Г. Векслер. – М. : *МИСИС*, 1999. – 408 с.
 13. Тененбаум М. М. Износостойкость конструкционных материалов / М. М. Тененбаум. – М. : *Машиностроение*, 1966. – 331 с.
 14. Малинов Л. С. Ресурсосберегающие экономнолегированные сплавы и упрочняющие технологии, обеспечивающие эффект самозакалки / Л. С. Малинов, В. Л. Малинов. – Мариуполь : *Рената*, 2009. – 567 с.
- Одержано 08.12.2017*

Малинов Л.С., Бузова Д.В., Малишева І.Е. Способи підвищення властивостей СТАЛІ 10Г2ФБ, що забезпечують її вживання за новим призначенням і енергозбереженням

Наведено дані, що показують доцільність використання гарту сталі 10Г2ФБ у воді, у тому числі з міжкритичного інтервалу температур (МКИТ) як завершальної обробки. Це дозволяє в невеликих перетинах (до 25 мм) набутти механічних властивостей, що відповідають їх рівню в середньовуглецевих сталях після поліпшення. При цьому скорочуються енерговитрати на термообробку. Встановлено, що ізотермічний гарт сталі 10Г2ФБ може бути альтернативним способом поліпшення, яке інколи проводиться для цієї сталі з метою здобуття гарного поєднання механічних властивостей. Наведені дані, що показують доцільність використання сталі 10Г2ФБ як цементованої, в якій після навуглицювання, гарту і низького відпуску істотно підвищується абразивна зносостійкість

Ключові слова: *загартування, ізотермічне загартування, міжкритичний інтервал температур, мартенсит, бейніт, ферит, механічні властивості, зносостійкість*

Malinov L., Burova D., Malysheva I. A method for improving the properties of steel 10G2FB, providing its application for a new purpose and energy saving

Data showing the practicability of using quenching of 10G2FB steel in water, including from inter-critical temperature interval (ICTI), as a final treatment are presented. This makes it possible to obtain mechanical properties in small sections (up to 25 mm) corresponding to their level for mildly-carbon steels after improvement. At the same time, energy spending for heat treatment are reduced. It is established that isothermal quenching of 10G2FB steel can be an alternative improvement method, which is sometimes carried out for this steel in order to obtain a good combination of mechanical properties. Data are presented showing the practicability of using 10G2FB steel as cemented, which after carburization, quenching and low tempering significantly increases abrasive wear resistance.

Key words: *quenching, isothermal quenching, inter-critical temperature interval, martensite, bainite, ferrite, mechanical properties, wear resistance.*