



УДК 625.143.2.656.22

Д.П. Марков
Научно-исследовательский институт
железнодорожного транспорта АО «ВНИИЖТ»
г. Москва, Россия
E-mail: dp-markov@yandex.ru
Дата поступления 11.10.2018

ВВЕДЕНИЕ НОРМ ОЦЕНКИ ЗАКАЛИВАЕМОСТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Аннотация

Рассмотрена возможность повышения прочности изделий широкого потребления из низкоуглеродистых сталей обыкновенного качества (изделия из листового и профильного проката, строительные конструкции, крепежные детали, заклепки, трубы, арматура, мосты) сорбитизирующей закалкой без отпуска. Приводится пример такого применения. Препятствием для применения такой технологии является большой разброс твердости и прочности закалённых низкоуглеродистых сталей. С целью устранения этого препятствия предлагается узаконить термин «сорбитизирующая закалка», распространить понятие закаливаемости на низкоуглеродистые стали, разработать методику оценки закаливаемости по ковшевой пробе и ввести нормы закаливаемости.

Ключевые слова: низкоуглеродистые стали; сорбитизация; закалка; закаливаемость; прокаливаемость; разработка методики и норм закаливаемости; стояночные тормозные башмаки.

Введение

Промышленность производит большой объём низкоуглеродистых сталей обыкновенного качества, лишь малая часть которого подвергается термообработке, в основном для снижения хладноломкости. Применение упрочняющей термообработки (сорбитизирующей закалки) для низкоуглеродистых сталей считается нецелесообразным. Между тем, как показывает опыт, широко распространённая сталь Ст3 может упрочняться закалкой (быстрым охлаждением с температур аустенизации) на твердость свыше 350 НВ. После такой обработки сталь приобретает мелкозернистую равноосную структуру, высокую пластичность и прочность. К сожалению, сталь отдельных плавок может не упрочняться вовсе. Причиной такого разброса является большое влияние на закаливаемость элементов, содержание которых невозможно регламентировать. В статье рассматривается возможность определения закаливаемости сталей на стадии их производства с использованием ковшевой пробы, для того, чтобы конструктора и производители

могли "с открытыми глазами" проектировать и изготавливать изделия со свойствами, получить которые другими методами дорого или вовсе невозможно.

Основная часть

Согласно [1] «Закалка – термическая обработка, заключающаяся в нагреве изделия до температуры выше критической (A_{c3} для доэвтектоидной стали и A_{c1} для заэвтектоидной стали), или температуры растворения избыточных фаз, выдержке при этой температуре и последующем охлаждении со скоростью, превышающей критическую», а «Закаливаемость – способность стали приобретать в результате закалки высокую твердость». Согласно принятой классификации [2, 3], углеродистые стали подразделяются на низко- ($C < 0,3\%$) средне- ($C = 0,3-0,7\%$) и высоко-углеродистые ($C > 0,7\%$). Стандарт [1] не допускает использование терминов «закалка» и «закаливаемость» применительно к низкоуглеродистым нелегированным или низколегированным сталям, поскольку на них невозможно достичь критической скорости за-

калки, т.е. «скорости охлаждения, при которой бы аустенит переохладился бы до температурного интервала мартенситного превращения».

Под «закаливаемостью» подразумевается обычно максимальная твёрдость, на которую можно закалить сталь. Закалке, в её академическом значении, подвергаются в основном высокоуглеродистые и высоколегированные стали, твёрдость которых при используемой технологии термообработки обычно известна. Закаливаемость как свойство для этих сталей не имеет практического значения, поэтому методика определения закаливаемости не разрабатывалась. Патенты на методики, определяемые как способы определения закаливаемости [4, 5], являются, по-существу, модификациями способов определения прокаливаемости [6, 7], поскольку определяемая в этих патентах твёрдость на заданном расстоянии от поверхности характеризует, как и расстояние до 50%-ной мартенситной зоны по ГОСТу [6], распределение твёрдости по глубине закаленного слоя, а не максимальную твёрдость на поверхности.

С каждым годом увеличивается объём углеродистых сталей, упрочнённых термической обработкой. Изделия, упрочненные термической обработкой, могут работать в более суровых условиях и служат в несколько раз дольше неупрочненных. С развитием технологий термической обработки и увеличением доступности источников энергии, применение сталей без термической обработки становится экономически не выгодно. Упрочнению термообработкой подвергаются, однако, только средне и высокоуглеродистые стали, причём основной объём металла – это нормализованные или сорбитизованные среднеуглеродистые стали, т.е. охлаждённые при скоростях ниже критической. Считается, что для низкоуглеродистых сталей имеет смысл только термическое улучшение, которое эффективно снижает порог хладноломкости и повышает пластические характеристики, тем самым позволяя получать хладостойкую сталь без введения в нее никеля, но прочностные характеристики остаются низкими. Так, например, порог хладноломко-

сти стали СтЗсп, определяемый по хрупкому излому образца, у горячекатаной стали наблюдается при -20°C , у нормализованной – при -60°C , у термически улучшенной – при -100°C [8].

Закалка низкоуглеродистых сталей в её классическом понимании, т.е. с образованием мартенсита, невозможна. Это породило убеждение, что закалку изделий из низкоуглеродистых сталей, таких, как СтЗ, 09Г2, Ст4 по ГОСТ 380 [9], в её бытовом понимании, т.е. быстром охлаждении с температуры аустенизации, применять бессмысленно, поскольку их твердость и прочность при этом не повышаются или повышаются незначительно [10]. На самом деле это не совсем так. Твёрдость изделий из низкоуглеродистых сталей после "закалки" (точнее «сорбитизации» или «сорбитизирующей закалки», если этот термин имеет право на существование), может повыситься, и даже значительно, до твердостей высокого отпуска 350-380 НВ, но при этом наблюдается большой разброс твердости. Так при быстром охлаждении с $920-950^{\circ}\text{C}$ в воде образцов толщиной 4-8 мм из стали СтЗсп нескольких плавов разных производителей наблюдался разброс твердости от 170 до 380 НВ. Если бы была возможность снизить разброс и уверенно получать изделия из низкоуглеродистых сталей твердостью 250-380 НВ, это дало бы не только большую экономию металла, но ещё и возможность конструировать изделия со свойствами, которые невозможно получить другими способами.

Большой разброс твердостей наблюдается не только на низкоуглеродистых сталях, но и на средне и даже на высокоуглеродистых сталях широкого потребления обыкновенного качества, но этот разброс отражается не на максимальной твердости (закаливаемости), а на распределении её по сечению изделий, характеризующейся прокаливаемостью [6]. Чем дальше от охлаждаемой поверхности, тем больше различие твердости сталей одной марки [7]. Максимальный разброс твердости наблюдается на глубине сорбитизации, и по своим параметрам соответствует разбросу твердости при сорбитизирующей закалке низкоуглероди-

стых сталей. Одна из причин разброса состоит в том, что не все элементы, влияющие на прокаливаемость, регламентируются стандартами и техническими условиями. Так в заводских технологических инструкциях ранее рекомендовалось выбирать режимы закалки и отпуска железнодорожных колёс и бандажей исходя из величины «углеродного эквивалента»: $C_{ЭКВ}=[C]+0,25[Mn]$. В 1994 году во ВНИИЖТе было исследовано влияние на прокаливаемость сталей с содержанием углерода 0,55-0,75 примесей Cr, Ni, Cu и V [11]. Оказалось, что каждый из этих элементов оказывает не меньшее влияние на прокаливаемость, чем углерод. Зависимость прокаливаемости от 5 элементов отвечает уравнению с коэффициентом корреляции $k = 0,944$:

$$П = -8,94 + 11,84[C_{ЭКВ} \text{ \%}]$$

где $C_{ЭКВ} = [C + Cr + Ni + Cu + 0,25Mn]\%$ – углеродный эквивалент.

Но прокаливаемость зависит не только от химического состава, но и от содержания в аустените зародышей кристаллизации, количество которых уменьшается с повышением температуры нагрева. Большое и трудно предсказуемое влияние на прокаливаемость оказывают элементы, образующие в сталях тугоплавкие карбиды и нитриды V, Nb и Al. Прокаливаемость в этом случае зависит не только от содержания самих элементов, но и от содержания азота и температуры нагрева под закалку. Ванадий сам по себе как карбидообразующий элемент повышает прокаливаемость, рисунок 1.

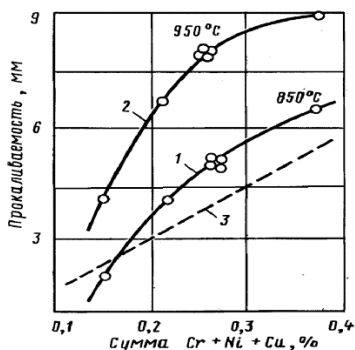


Рисунок 1. Зависимость прокаливаемости стали легированной феррованадием (0,6% C, 0,62% Mn, 0,32% Si, 0,2% V) от суммы $[Cr + Ni + Cu]\%$ при температурах: 1 – 850 °C; 2 – 950 °C; 3 – сравнительная сталь без ванадия при 850-950°C

Чем больше температура, тем полнее растворяются карбиды ванадия и тем выше прокаливаемость. Но если сталь содержит даже сотые доли процента тугоплавких карбонитридов ванадия и ниобия или нитридов алюминия, то её прокаливаемость резко снижается, рисунок 2.

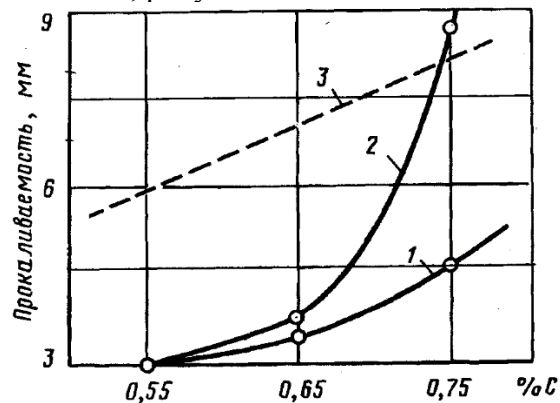


Рисунок 2. Зависимость прокаливаемости стали легированной азотированным феррованадием (0,1%V, 0,04% N), от содержания углерода при температурах: 1 – 850 °C; 2 – 950 °C; 3 – сравнительная сталь без ванадия при 850-950 °C

Таким образом, прокаливаемость углеродистых сталей может зависеть не только от содержания регламентированных ГОСТом элементов, но и от содержания примесей, и от технологии раскисления, и от температуры нагрева под закалку, что делает её прогноз совершенно непредсказуемым. Вследствие перечисленных причин, даже регламентировав содержание 5-6 элементов в сталях широкого потребления обыкновенного качества (что повысит их стоимость), регламентировать их свойства после сорбитизирующей закалки не удастся.

Диапазон твёрдостей 250-400 НВ является самым востребованным в технике. В этом диапазоне достигается оптимальное соотношение прочности и пластичности большинства изделий и их максимальная эксплуатационная стойкость. На крупных изделиях из среднеуглеродистых сталей сорбитную структуру с такой твердостью получают охлаждением потоками воды. При этом не допускается образования в поверхностном слое мартенсита, поскольку даже после отпуска на поверхности сохра-

няется игольчатая структура, имеющая пониженную износо- и контактно-усталостную прочность [12, 13]. Операцию сорбитизации в заводской практике называют закалкой, хотя в академическом смысле она таковой не является. Такой "закалке" подвергается много изделий, работающих на износ и контактную усталость, таких, как, рельсы, железнодорожные бандажи и цельнокатаные колёса.

Низкоуглеродистые стали также позволяют получать твердость в диапазоне 250-380 НВ, причем мартенситная фаза в них не образуется даже при максимальных скоростях охлаждения, поэтому для получения оптимальной зернистой структуры не требуется какого-то специального режима охлаждения и/или отпуска. Такой термообработке могут подвергаться изде-

лия из низкоуглеродистых сталей толщиной не более 8-12 мм. Это может быть различный крепеж (болты, винты, гайки и т.д.), строительные скобы и арматура. В настоящее время такие ответственные изделия, как рельсовые скрепления (подкладки, накладки, противоугоны) изготавливаются из низколегированных сталей и подвергаются закалке с отпуском, но в принципе, так же могут изготавливаться из стали Ст3 и иметь при этом даже более высокие свойства.

В 2015-2016 г. во ВНИИЖТе были разработаны и успешно прошли испытания стояночные тормозные башмаки, показавшие превосходные служебные свойства [14, 15]. Новые башмаки, рисунок 3, при весе 4 кг, по сравнению с весом старых 7,4 кг, показали в десятки раз более высокую эксплуатационную стойкость.



Рисунок 3. Инновационный тормозной стояночный башмак во время испытаний на станции Лосиноостровская Московской железной дороги

И малый вес, и высокие эксплуатационные свойства инновационных башмаков были обеспечены применением Ст3, которая сочетает в себе хорошую свариваемость, достаточно высокую твердость, зернистую структуру после закалки, возможность закалки (сорбитизации) готового изделия на твердость 250-370 НВ с минимальным короблением и, в случае необходимости, возможность правки. Казалось бы, вы-

бор стали Ст3сп был превосходным новаторским решением, если бы не одно но: если бы сталь Ст3, как и все углеродистые стали, не имела такого большого разброса закаливаемости и, соответственно, большого разброса твердости после сорбитизирующей закалки. Фактически в настоящее время нет стали, которая бы стабильно обеспечила необходимую структуру и твердость новых башмаков: сталь Ст3 может дать твердость после закалки в диапазоне от 170 до 380 НВ, сталь Ст4 в настоящее

время не производится и не испытывалась, а Ст5 может в отдельных случаях закалиться на твердость свыше 500 НВ с образованием мартенсита в поверхностном слое, что недопустимо.

В таблице 1 приведены данные по химическому составу и твердости ползьев новых стояночных башмаков (толщина 4 мм) и упорных колодок (толщина 8 мм) из низкоуглеродистых сталей СтЗсп и 09Г2С производства ПАО «Северсталь» после их

заковки в воду с 920 °С без отпуска, показывающие, что на этих сталях вполне можно получать требуемую твердость. Особенность исследованных сталей состоит в том, что они практически не содержат элементов, образующих тугоплавкие карбиды и нитриды V, Ti, Nb, N (при повышенном содержании этих элементов температуру нагрева под закалку необходимо увеличивать, чтобы получить необходимую твердость).

Таблица 1

Химический состав и твердость деталей стояночных тормозных башмаков из сталей СтЗсп и 09Г2С

№ образца	Толщина образца	Химический состав, %									НВ Завод/ ВНИЖТ	
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Al	Ti, Nb, V, W	Mo		N
Сталь СтЗсп												
-		Химический состав по ГОСТ 380 (в скобках для скрап процесса)										
		0,14- 0,22	0,15- 0,30	0,40- 0,65	<0,30 (<0,35)	<0,30 (<0,35)	<0,30 (<0,40)	Не регламентируются		<0,010	-	
-		Химический состав по заводскому сертификату										
		0,17	0,19	0,32	0,04	0,02	0,02	-		0,003	-	
-		Химический состав по данным ВНИИЖТ (спектрометр MAGELLAN)										
2	(4 мм)	0,140	0,247	0,381	0,029	0,0094	0,017	0,027	<0,004 % каждого	0,006	302/365	
3	(4 мм)	0,136	0,246	0,381	0,029	0,0098	0,017	0,028	<0,004 % каждого	0,004	321/365	
6	(8 мм)	0,153	0,218	0,500	0,040	0,020	0,049	0,047	<0,004 % каждого	0,001	286/245	
8	(8 мм)	0,142	0,211	0,501	0,039	0,020	0,048	0,047	<0,004 % каждого	0,000	286/279	
Сталь 09Г2С												
-		Химический состав по ГОСТ 19281-2014										
		<0,12	0,50- 0,80	1,30- 1,70	<0,30	<0,30	<0,30	Не регламентируются		<0,12	<0,01	-
-		Химический состав по заводскому сертификату										
		0,11	0,69	1,34	0,04	0,03	0,04	0,03	<0,004 % каждого		-	
		Химический состав по данным ВНИИЖТ (спектрометр MAGELLAN)										
1	(4 мм)	0,099	0,680	1,426	0,036	0,024	0,042	0,029	<0,004 % каждого	0,001	293/354	
4	(4 мм)	0,095	0,683	1,475	0,037	0,025	0,042	0,029	<0,004 % каждого	0,001	321/351	
5	(8 мм)	0,096	0,712	1,455	0,067	0,037	0,055	0,039	<0,004 % каждого	0,0006	269/321	
7	(8 мм)	0,088	0,720	1,477	0,068	0,039	0,056	0,039	<0,004 % каждого	0,0001	293/321	

Существующая классификация углеродистых сталей ориентирована на изготовителя. Потребитель до настоящего времени удовлетворяется низкими прочностными свойствами горячекатаных заготовок,

но современность требует для новых изделий новых дешевых технологичных материалов с повышенной прочностью. Решение проблемы применения закалки изделий из низкоуглеродистых сталей можно пере-

ложить на потребителя, предлагая ему самому выбирать плавки с необходимой закаливается, а можно обязать производителей дополнительно классифицировать низкоуглеродистые стали по твердости, как это уже делается для арматурных сталей по прочности [16]. По большому счёту потребителю нет дела до состава углеродистых сталей, если только они не работают в агрессивных средах. Его первым делом интересует их прочность, которая при регламентированной технологии выплавки и закалки хорошо коррелирует с твёрдостью. Определение твердости можно производить на образцах из ковшевых проб и включать в сертификат плавки. Такое нововведение позволит более целенаправленно использовать низкоуглеродистые стали, расширить ассортимент изделий, изготавливаемых из них, позволит решать многие технические задачи более простым и эффективным способом.

Выводы и предложения

1. "Закалка" (сорбитизация) низкоуглеродистых сталей быстрым охлаждением в воде без последующего отпуска даёт большие возможности для значительного повышения их прочностных свойств и получения изделий с принципиально новыми потребительскими свойствами без существенных затрат. Примером служат новые тормозные стояночные башмаки из Ст3сп, почти в 2 раза более легкие и в десятки раз более стойкие и безопасные, чем используемые до настоящего времени башмаки из нормализованной Ст5сп.
2. В пределах регламентированного ГОС-Тами химического состава при нерегламентируемом содержании примесей, таких как Cr, Ni, Cu, V, Al, N, закаливаемость низкоуглеродистых сталей или прокаливаемость средне- и высокоуглеродистых сталей может варьироваться в больших пределах (до 300%). В отличие от средне и высокоуглеродистых сталей, разброс прокаливаемости которых обычно компенсируется режимами закалки и отпуска, разброс твердости низкоуглеродистых сталей, возникающий вследствие разброса их закаливаемости, требует принятия специальных мер по её регламентированию.
3. Закаливаемость и прокаливаемость углеродистых сталей, содержащих тугоплавкие карбиды и нитриды, могут сильно зависеть от температуры. Твердость низкоуглеродистых сталей, содержащих тугоплавкие включения, можно увеличить, подняв температуру нагрева под "закалку" до 950-960 °С, не увеличив при этом существенно зерно.
4. Для создания предпосылок упрочнения низкоуглеродистых сталей термической обработкой, предлагается:
 - 4.1. Узаконить термин «сорбитизирующая закалка», определив его как термообработку на сорбит со скоростью охлаждения ниже критической мартенситного превращения;
 - 4.2. Распространить понятие «закаливаемость» на низкоуглеродистые стали;
 - 4.3. Предлагается профильным институтам разработать методику определения закаливаемости низкоуглеродистых сталей по ковшевой пробе с включением данных по закаливаемости в сертификат плавки, а также разработать нормы закаливаемости для включения их в соответствующие стандарты.

Библиографический список

1. ГОСТ 33439-2015 Металлопродукция из черных металлов и сплавов на железоникелевой и никелевой основе. Термины и определения по термической обработке, М.: Стандартинформ, 2016, 40 с.
2. Материаловедение и технология конструкционных материалов. Под ред. В.Б. Арзамасова и А.А. Черепихина. М.: «Академия», 2007, 446 с.
3. Кушнер В. С. Материаловедение. Омск, изд-во ОмГТУ, 2008, 232 с.
4. Патент РФ Способ определения закаливаемости. Класс C21D1/55. Опубликовано 10.04.1999.

5. T. Filetin, B. Liscie, J. Galinec. New computer aided method for steel selection based on hardenability. Heat Treat. Metals. 1996, 23, N 3, p. 63-66.
6. ГОСТ 5657-69 Сталь. Метод испытания на прокаливаемость, М.: Изд-во стандартов, 1990, 13 с.
7. Герасимова Н.С., Головачева Ю.Г. Определение прокаливаемости сталей. Методические указания по выполнению лабораторной работы по курсу «Специальные главы материаловедения». Калуга, КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017, 28 с.
8. URL: http://metallicheckiy-portal.ru/articles/chermet/termo_uprochn_prokata/svoistva_termicheski_uprochnennoi_stali/ Дата обращения 05.09.2018
9. ГОСТ 380-2005. Межгосударственный стандарт. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки. М.: Стандартинформ, 2009.
10. URL: <https://www.chipmaker.ru/forum/20/> Дата обращения 05.09.2018.
11. Марков Д. П. Влияние легирующих элементов на прокаливаемость колесной стали. Вестник ВНИИЖТ, N7, 1994, с. 18-21.
12. Ларин Т. В. Износ и пути продления службы бандажей железнодорожных колес. М., Трансжелдориздат. Труды ВНИИЖТ вып. 165, 1958. 168 с.
13. Ларин Т. В., Девяткин В. П., Кривошеев В. Н. Наумов И. В., Чалых В. И. Цельнокатаные железнодорожные колеса. Тр. ЦНИИ МПС, М.: Трансжелдориздат, вып. 124, 1956, 187 с.
14. Марков Д. П., Воронин И. Н., Маршев В. И., Сухов А. В., Забавина М. В., Шипулин Н. П., Гузанов В. В., Куминов А. В. Стояночные тормозные башмаки для закрепления подвижного состава на станционных путях. Полигонные испытания. Вестник ВНИИЖТ, Том 75, №5, 2016, с. 308 – 317.
15. Марков Д. П., Воронин И. Н., Шипулин Н. П., Маршев В. И., Сухов А. В., Гузанов В. В., Куминов А. В. Стояночные тормозные башмаки. Эксплуатационные испытания. Вестник ВНИИЖТ, Т. 76, № 3, 2017, с. 153-158.
16. ГОСТ 5781-82. Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций. Технические условия. М.: Изд-во стандартов.

Information about the paper in English

D.P. Markov

Joint Stock Company Research Institute of Railway Transport VNIIZhT,
Moscow, Russian Federation
E-mail: dp-markov@yandex.ru

Received 11.10.2018

INTRODUCING NORMS FOR ASSESSING THE HARDENING CAPACITY TO IMPROVE
THE QUALITY OF LOW-CARBON STEEL PARTS

Abstract

The paper studies the possibility of increasing strength of low-carbon, commercial quality steel consumer goods (parts from sheets and shaped sections, building structures, fasteners, rivets, pipes, rebars, bridges) by sorbitizing without tempering. It contains an example of such application. The application of such technique is hindered by a wide variation of hardness and strength of tempered low-carbon steels. To eliminate this issue, it is suggested that the term “sorbitizing” be adopted, the concept of hardening capacity be expanded to low-carbon steels, an evaluation method for hardening capacity by a ladle sample be developed, and hardening capacity norms be introduced.

Keywords: low-carbon steels, sorbitizing, hardening, hardening capacity, depth of hardening, development of a method and norms of hardening capacity, parking brake shoe holders.
