

УДК 669.112.227.1+669.112.227.342:669.15-194.55

И.Д. Романов, А.А. Шацов, М.Г. Закирова

I.D. Romanov, A.A. Shatsov, M.G. Zakirova

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Perm National Research Polytechnic University

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРЯЧЕДЕФОРМИРОВАННОЙ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ

STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES FORMATION OF THE HOT-FORGED LOW-CARBON MARTENSITIC STEEL

Исследовано влияние технологических параметров горячей деформации низкоуглеродистой мартенситной стали 15X2Г2НМФБА на формирование структуры и свойства материала. Высокая устойчивость переохлажденного аустенита в низкоуглеродистой мартенситной стали позволяет проводить закалку без использования жидких охлаждающих сред (на воздухе). Закалка этих сталей со скоростями меньшими, чем скорость охлаждения на воздухе, ранее не изучена. Представлены результаты исследования влияния различных скоростей охлаждения при закалке с температур конца горячей деформации на структуру и свойства.

Ключевые слова: закалка с деформационного нагрева, мартенситное превращение, мартенсит, аустенит, мартенситная сталь.

The influence of technological conditions of hot deformation of low-carbon martensitic steel (LMS) 15Cr2Mn2NiMoVNb on structure formation and properties was investigated. Quenching of LMS can be carried out in air due to high stability of undercooled austenite. Quenching of LMS by cooling with speeds lower than the speed of the air cooling has not been studied previously. This work shows the results of a research dedicated to the effect of different cooling rates during quenching LMS from the end of the hot deformation temperature on structure and properties.

Keywords: quenching from deformation heating, martensitic transformation, martensite, austenite, martensitic steel.

Режимы горячей обработки давлением сталей, совмещенные с упрочняющей термической обработкой, в основном определяются температурой аустенитизации, степенью, скоростью деформации и скоростью охлаждения после окончания деформации. Эти параметры влияют на формирование

микро- и тонкой структуры и, как следствие, на комплекс механических свойств материала. В процессе горячей деформации в структуре сталей протекают процессы наклепа и рекристаллизации. Вклад каждого из этих процессов в формирование конечной структуры зависит от того, какие параметры обработки были применены. Закалка с температур конца горячей деформации сталей с ограниченной прокаливаемостью (типа 12Х2НМФ, 35Х2Н2М, 40ХН) осложняется следующим фактором: вследствие широкого температурно-деформационного интервала и низкой устойчивости аустенита образуется гетерогенная структура с большой степенью разнородности, что является причиной нестабильности и низкого уровня комплекса механических свойств. Это делает невозможным реализацию закалки с температур конца горячей обработки давлением.

В производстве термоупрочненных заготовок широко применяется высокотемпературная термомеханическая обработка. Термомеханическую обработку следует понимать как совокупность операций деформации, нагрева и охлаждения (в различной последовательности), в результате которых формирование окончательной структуры металлического сплава, а следовательно, и его свойств, происходит в условиях повышенной плотности и соответствующего распределения несовершенств строения, созданных пластической деформацией [1].

Низкоуглеродистые мартенситные стали (НМС) обладают высокой устойчивостью переохлажденного аустенита как в области нормального, так и промежуточного превращения [2]. После закалки (в том числе на спокойном воздухе) НМС имеют структуру низкоуглеродистого пакетного мартенсита, характерным элементом структуры которого являются рейки, разориентировка которых не превышает 3° . У сталей со структурой пакетного мартенсита упрочнение от границ реек на 1–2 порядка выше, чем от границ пакетов [3], имеющих большеугловые границы. Примерно 1/3 границ реек является проницаемой для дислокаций [4], что способствует релаксации напряжений в ходе деформации, их равномерному распределению и, следовательно, повышению вязкости и конструкционной прочности. Высокая устойчивость переохлажденного аустенита в НМС позволяет совмещение горячей пластической деформации с закалкой. Охлаждение НМС на воздухе непосредственно с температуры конца горячей деформации обеспечивает высокий комплекс механических свойств ($\sigma_b \geq 1300$ МПа, $KCV \geq 120$ Дж/см²) [5]. Исследование влияния скорости охлаждения с температуры конца горячей деформации представляет особый интерес для производства крупногабаритных изделий, в конструкции которых присутствуют сечения различной величины.

В настоящей работе исследовано влияние скорости охлаждения с температуры конца горячей деформации на структуру и характеристики механических свойств низкоуглеродистой мартенситной стали 15X2Г2НМФБА (C – 0,154 %, Si – 0,26 %, Mn – 2,0 %, Cr – 2,1 %, Ni – 1,2 %, Mo – 0,43, V – 0,09 %, Nb – 0,07 %, Cu – 0,19 %, Al – 0,014 %, Ca – 0,0006 %, N – 0,0123 %, O – 0,0012 %, P – 0,009 %, S – 0,007 %, H – 1,3 ppm).

Деформации подвергали сталь со структурой отпущенного мартенсита, закаленную на воздухе с прокатного нагрева (1200 °C) и отпущенную при температуре 660 °C в течение 6 ч (рис. 1).

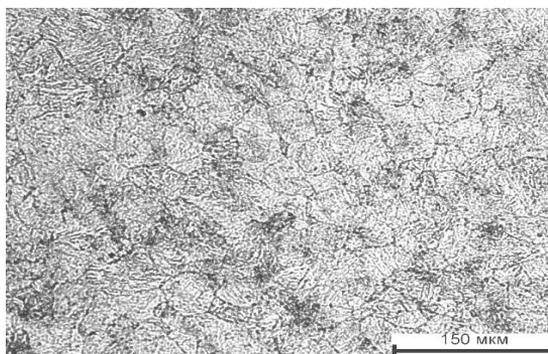


Рис. 1. Исходная структура исследуемой стали.
Средний размер зерна 45 мкм (6-й номер по ГОСТ 5639–82). $\times 200$

Ковку заготовок проводили на радиально-ковочной машине SXP-16 производства австрийской фирмы GFM. Заготовки нагревали в индукционной установке, далее ковали со степенью деформации 70 % (исходный диаметр 55 мм, конечный диаметр 30 мм), после чего охлаждали с различными скоростями. Схема режимов обработки приведена на рис. 2.

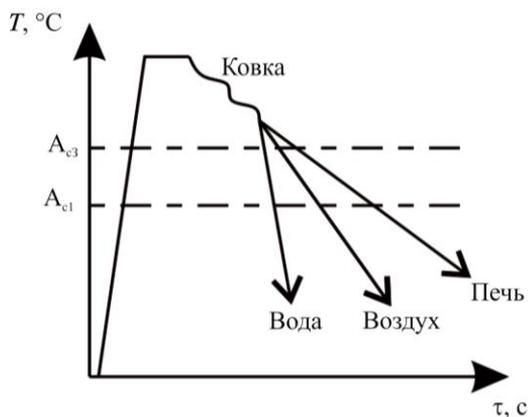


Рис. 2. Режимы обработки стали

Структура речного мартенсита, формирующаяся после закалки НМС 15Х2Г2НМФБА, представляет собой набор параллельных друг другу кристаллов, имеющих форму трехосного эллипсоида с соотношением ширины к толщине и длине как 1:3:15 [6], $a:b:c = 1:7:30$ [7], $a:b:c = 1:9:33$ [8] (рис. 3).



Рис. 3. Тонкая структура НМС. $\times 35\ 000$

Характеристики механических свойств заготовок после охлаждения с различными скоростями приведены в таблице.

Влияние скорости охлаждения послековки на механические свойства стали

Среда охлаждения/скорость охлаждения, °С/с	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	KCV ⁺²⁰ , Дж/см ²
Вода/600	1131	1424	16	62	80
Воздух/3	1015	1338	17,2	65	83
Печь/0,015	950	1284	18	59	123

С уменьшением скорости охлаждения заготовок послековки наблюдается падение прочностных характеристик. Так, разница между пределом прочности после водного охлаждения и пределом прочности после печного охлаждения составляет всего 140 МПа, в то время как ударная вязкость, определенная на образцах с V-образным концентратором, увеличивается на 43 Дж/см² (в 1,5 раза).

Рассмотрим влияние скорости охлаждения послековки на размер зерна стали:

Среда охлаждения/скорость охлаждения, °С/с	Средний диаметр зерна, мкм (номер зерна по ГОСТ 5639–82)
Вода/600	39
Воздух/3	34
Печь/0,015	17

Микроструктура пакетного мартенсита заготовок, охлажденных послековки с различными скоростями, представлена на рис. 4–6.

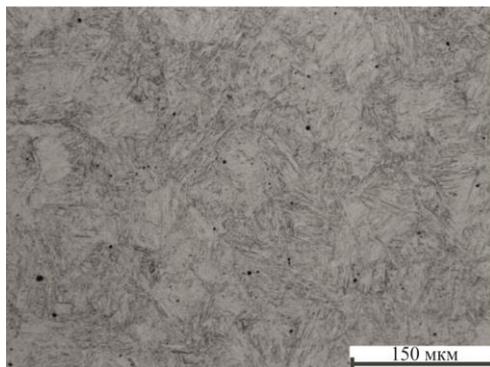


Рис. 4. Микроструктура стали 15X2Г2НМФБА после охлаждения с температуры конца горячей деформации в воде. $\times 200$

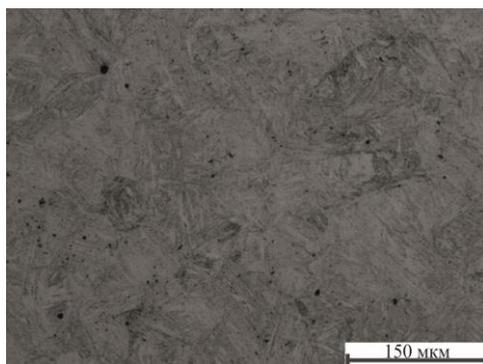


Рис. 5. Микроструктура стали 15X2Г2НМФБА после охлаждения с температуры конца горячей деформации на воздухе. $\times 200$

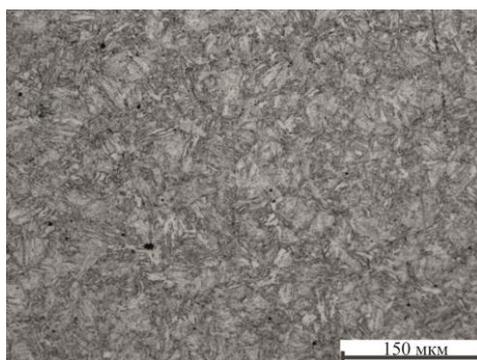


Рис. 6. Микроструктура стали 15X2Г2НМФБА после охлаждения с температуры конца горячей деформации в печи. $\times 200$

Как видно из соотношения скорости охлаждения и величины зерна и рис. 4–6, с уменьшением скорости охлаждения происходит измельчение зеренной структуры материала. Так, после охлаждения с печью размер зерна составил 17 мкм. Измельчение зеренной структуры при медленном охлаждении, по-видимому, связано с протеканием процессов рекристаллизации в широких температурных интервалах, которые были подавлены в случае охлаждения заготовки после горячей деформации в воде.

Высокая прочность в сочетании с высокой ударной вязкостью в широком интервале скоростей охлаждения обусловлены особенностями структуры речного мартенсита и отсутствием продуктов промежуточного превращения благодаря высокой устойчивости переохлажденного аустенита.

Сделаем следующие выводы. В деформированных со степенью деформации 70 % заготовках, закаленных охлаждением с различными скоростями, структура – пакетный мартенсит, прочность с уменьшением скорости охлаждения снижается до 1284 МПа, а ударная вязкость достигает высоких значений ($KCV = 123 \text{ Дж/см}^2$) после охлаждения со скоростью $0,015 \text{ }^\circ\text{C/с}$.

Низкоуглеродистая мартенситная сталь 15X2Г2НМФБА с высокой устойчивостью аустенита при охлаждении с ковочного нагрева с низкой скоростью (с печью) имеет более мелкие характерные элементы структуры и благодаря этому достигнуты высокие характеристики прочности, пластичности и ударной вязкости.

Список литературы

1. Бернштейн М.Л., Займовский В.А., Капуткина Л.М. Термомеханическая обработка стали / под ред. М.Л. Бернштейна. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.

2. Клейнер Л.М., Шацов А.А. Конструкционные высокопрочные низкоуглеродистые стали мартенситного класса. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 303 с.

3. Штремель М.А. Прочность сплавов. Ч. 2. Деформация. – М.: Изд-во МИСиС, 1997. – 527 с.

4. Андреев Ю.Г., Заркова Е.И., Штремель М.А. Границы и субграницы в пакетном мартенсите. I. Границы между кристаллами в пакете // Физика металлов и металловедение. – 1990. – Т. 69, № 3. – С 161–167.

5. Романов И.Д., Клейнер Л.М. Структура и свойства низкоуглеродистых мартенситных наносталей, закаленных с деформационного нагрева // Материаловедение. – 2013. – № 5. – С. 18–21.

6. Упаковка кристаллов мартенсита в псевдомонокристалле / Ю.Г. Андреев, Л.Н. Девченко, Е.В. Шелехов, М.А. Штремель // ДАН СССР. – 1977. – Т. 237, вып. 3. – С. 574–576.

7. Изотов В.И. Морфология и кристаллогеометрия реечного мартенсита // Физика металлов и металловедение. – 1972. – Т. 34, № 1. – С. 123–132.

8. Wakasa K., Wayman C.M. The crystallography and morphology of lath martensite // Proc. Int. Conf. Martensite Transformations, ICOMAT–79, Cambridge, Mass, 1979. – Vol. 1. – P. 34–39.

Получено 6.02.2014

Романов Илья Дмитриевич – аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: i-romanov@ro.ru).

Шацов Александр Аронович – доктор технических наук, профессор, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: shatsov@pstu.ru).

Закирова Мария Германовна – кандидат технических наук, доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: marusia-art@mail.ru).

Romanov Iliya Dmitrievich – Graduate Student, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: i-romanov@ro.ru).

Shatsov Aleksandr Aronovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: shatsov@pstu.ru).

Zakirova Mariia Germanovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: marusia-art@mail.ru).