

УДК 669.112.227.1+ 669.112.227.342:669.15-194.55

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

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ, ЗАКАЛЕННОЙ С КОВОЧНОГО НАГРЕВА**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Исследовали влияние технологических параметров горячей деформации низкоуглеродистой мартенситной стали (НМС) 15Х2Г2НМФБА на формирование структуры и свойства. Высокая устойчивость переохлажденного аустенита в НМС позволяет проводить закалку без использования жидких охлаждающих сред (на воздухе). Закалка горячедеформированных НМС со скоростями меньшими, чем скорость охлаждения на воздухе ранее не изучена. В настоящей работе представлены результаты исследования влияния различных температур нагрева под ковку и скоростей охлаждения при закалке НМС с температур конца горячей деформации на структуру и свойства.

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

**Введение**

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 параметров предшествующей обработки. Закалка с температур конца горячей деформации сталей с ограниченной прокаливаемостью (типа 12Х2НМФ, 35Х2Н2М, 40ХН) осложняется, поскольку вследствие широкого температурно-деформационного интервала и низкой устойчивости аустенита образуется гетерогенная структура с большой степенью разнородности, что является причиной нестабильности механических свойств. Это делает нецелесообразным реализацию закалки с температур конца горячей обработки давлением.

В производстве термоупрочненных заготовок широко применяется высокотемпературная термомеханическая обработка (ВТМО). 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].

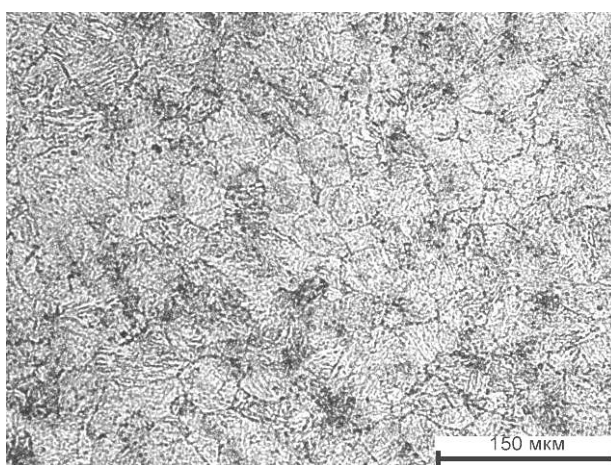
Низкоуглеродистые мартенситные стали (НМС) обладают высокой устойчивостью переохлажденного аустенита как в области нормального, так и промежуточного превращения [2]. После закалки (в том числе на спокойном воздухе) НМС обладают структурой низкоуглеродистого пакетного мартенсита, характерным элементом структуры которого являются рейки, разориентировка которых не превышает трех градусов. У сталей со структурой пакетного мартенсита упрочнение от границ реек на 1-2 порядка выше, чем 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

( $\sigma_{\text{в}} \geq 1300$  МПа;  $KCV \geq 1,20$  МДж/м<sup>2</sup>) [5]. Скорость охлаждения с температуры конца горячей деформации представляет особый интерес для производства крупногабаритных изделий, в конструкции которых присутствуют сечения различной величины.

**Цель работы** – исследование влияния температуры нагрева под горячую деформацию и скорости охлаждения с температуры конца горячей деформации на структуру и характеристики механических свойств низкоуглеродистой мартенситной стали 15Х2Г2НМФБА (С - 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).

### Методика эксперимента

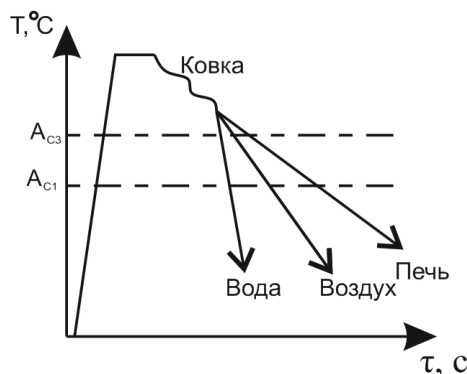
Деформации подвергали сталь со структурой отпущенного мартенсита, закаленную на воздухе с прокатного нагрева (1200°C) и отпущенную при температуре 660°C в течение шести часов (рис. 1).



**Рис. 1. Исходная структура исследуемой стали. x200**  
Средний размер зерна 45 мкм. (6 номер ГОСТ 5639-82)

Ковку заготовок проводили на радиально-ковочной машине SXP-16, производства австрийской фирмы GFM. Заготовки нагревали в индукционной установке до двух разных температур: 1150°C и 1000°C, после чего проводили горячую деформацию с последующей закалкой на воздухе.

Для изучения влияния скорости охлаждения на структуру и свойства НМС заготовки нагревали до 1150°C. Степень деформации составила 70% (исходный диаметр 55 мм, конечный диаметр 30 мм). Последеформационное охлаждение проводили в трех различных средах – вода, воздух, печь (рис. 2).



**Рис. 2. Схема режимов обработки стали**  
Экспериментальная часть

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 к длине как 1:3:15 [6],  $a:b:c = 1:7:30$  [7],  $a:b:c = 1:9:33$  [8], рис. 3.

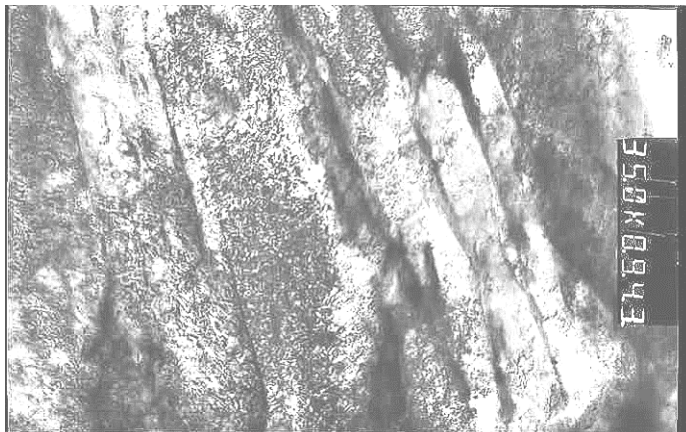


Рис.3. Тонкая структура НМС, x35000

Температурный интервал ковки заметно влияет на комплекс характеристик механических свойств, табл. 1.

Таблица 1

Механические свойства в зависимости от температуры нагрева под ковку

Интервал ковки		$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	KCV <sup>+20</sup> МДж/м <sup>2</sup>
$T_H^0$ , °С	$T_K^0$ , °С					
1150	850	1010	1357	18	65	1,16
1000	800	978	1297	17	66	1,30

Примечание. Исходный диаметр  $D_{исх}=65$  мм, окончательный диаметр  $D_{кон}=30$  мм, уков 4,7, степень деформации  $\varepsilon = 79\%$ , охлаждение на воздухе

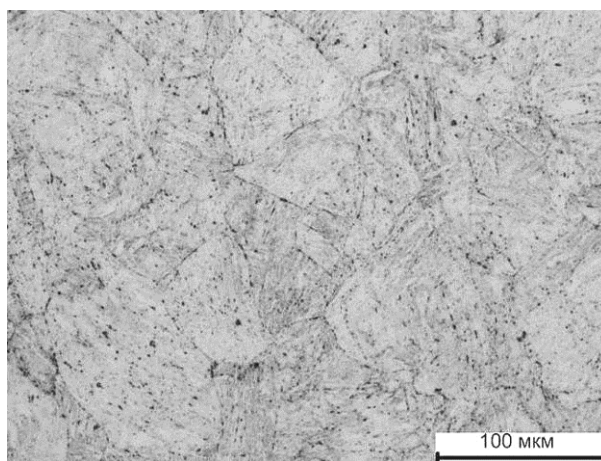


Рис. 4. Микроструктура образца после ковки в интервале температур 1150-850°C, x200

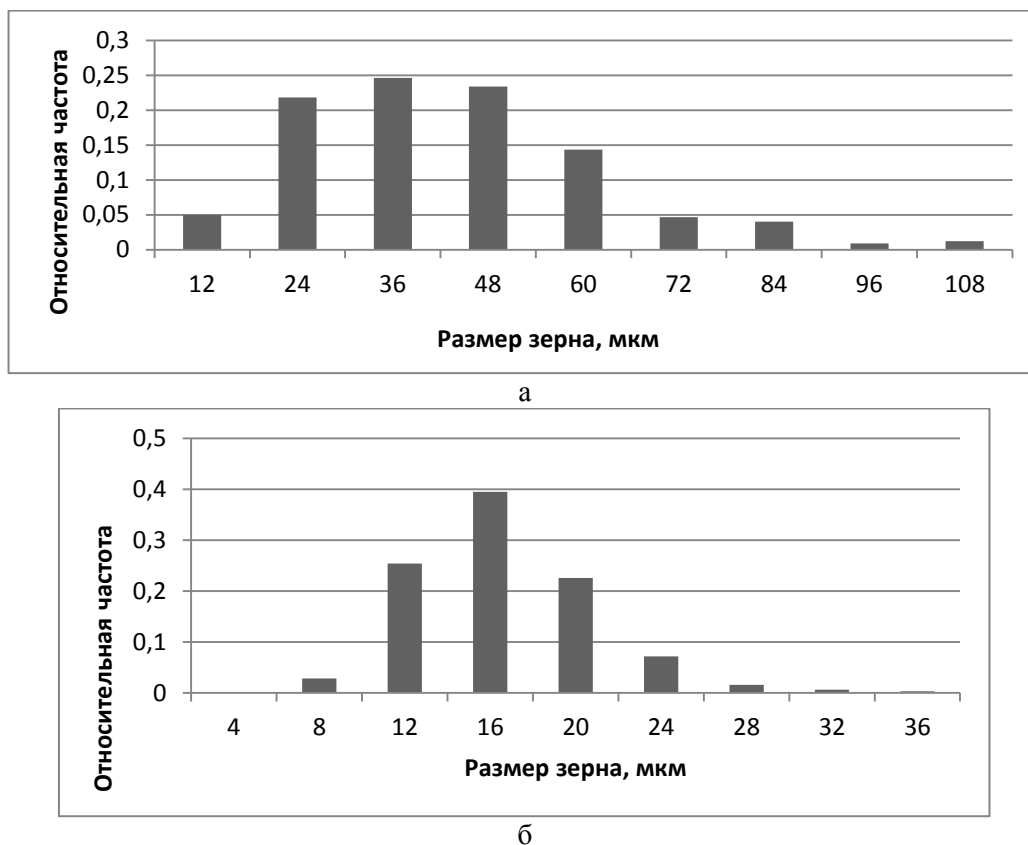
Характеристики прочности (предел текучести, предел прочности) незначительно выше после ковки с температуры 1150°C. Относительное удлинение немного выше у образцов кованных с температуры 1000°C, относительное сужение образцов кованных с разных темпера-

тур слабо отличаются. Значения ударной вязкости выше у образцов кованных с более низкой температуры, что связано с меньшим размером действительных зерен аустенита.

Средний размер действительного зерна аустенита, рис. 4, послековки со степенью деформации 79% в интервале температур 1150-850°C и охлаждения на воздухе составляет 38 мкм.

Средний размер действительного зерна аустенита послековки со степенью деформации 79% в интервале температур 1000-800°C и охлаждения на воздухе составляет 15 мкм.

Распределения по размерам зёрен аустенита НМС 15Х2Г2НМФБА для различных температур нагрева под ковку представлены на рис. 5.



**Рис. 5. Распределения по размерам зерен стали 15Х2Г2НМФБА:**

а – температура нагрева под ковку 1150°C; б – температура нагрева под ковку 1000°C

Независимо от температуры нагрева (1150°C или 1000°C) распределение размеров зерен было одномодальным с правой асимметрией и подчинялось логнормальному закону. Степень разнотерности послековки с температуры 1150°C составляет  $R = 3,75$  и уменьшается с понижением температуры нагрева под ковку до  $R = 2,33$  (1000°C).

Послековки при температуре 1000°C формируется зерно более мелкое, чем послековки при температуре 1150°C, однако предпочтительной температурой нагрева под ковку является температура 1150°C, поскольку при более низких температурахковки сталь менее технологична. Согласно [9], предел прочности конструкционной стали с содержанием углерода 0,18% при температуре 1000°C составляет порядка 50 МПа, и при снижении температуры ниже 800°C (температура концаковки) предел прочности увеличивается более чем в 10 раз. Увеличение прочности обуславливает повышенный износ инструмента и увеличивает вероятность образования трещин во времяковки.

Скорость охлаждения послековки существенно повлияла на механические свойства заготовок, табл. 2.

Таблица 2

## Влияние скорости охлаждения послековки на механические свойства

Среда охлаждения/скорость охлаждения, °/с	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КСV <sup>+20</sup> , МДж/м <sup>2</sup>
Вода/90	1131	1424	16	62	0,80
Воздух/1,5	1015	1338	17,2	65	0,83
Печь/0,015	950	1284	18	59	1,23

С уменьшением скорости охлаждения заготовок послековки наблюдается падение прочностных характеристик, так разница между пределом прочности после охлаждения в воде и пределом прочности после охлаждения с печью составляет всего 140 МПа, в то время как ударная вязкость, определенная на образцах с V-образным концентратором, увеличивается на 0,43 МДж/м<sup>2</sup> (в 1,5 раза). Причина роста ударной вязкости – уменьшение размера зерна аустенита, табл. 3, и диспергирование формирующихся в пределах зерен аустенита пакетов и реек мартенсита.

Таблица 3

## Зависимость величины зерна от скорости охлаждения.

Среда охлаждения/скорость охлаждения, °/с	Средний диаметр зерна, мкм
Вода/90	39
Воздух/1,5	34
Печь/0,015	17

Микроструктура пакетного мартенсита заготовок, охлажденных послековки с различными скоростями, представлена на рис. 6–8.

Как видно из табл. 3 и рис. 6–8, 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 и на воздухе.

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

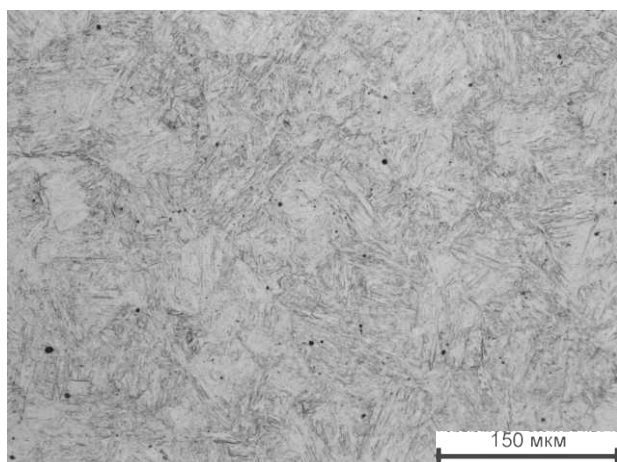


Рис. 6. Микроструктура стали 15X2Г2НМФБА после охлаждения с температуры конца горячей деформации в воде, x200

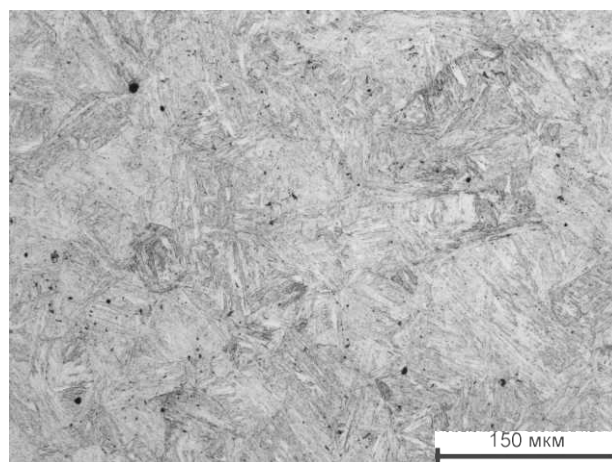
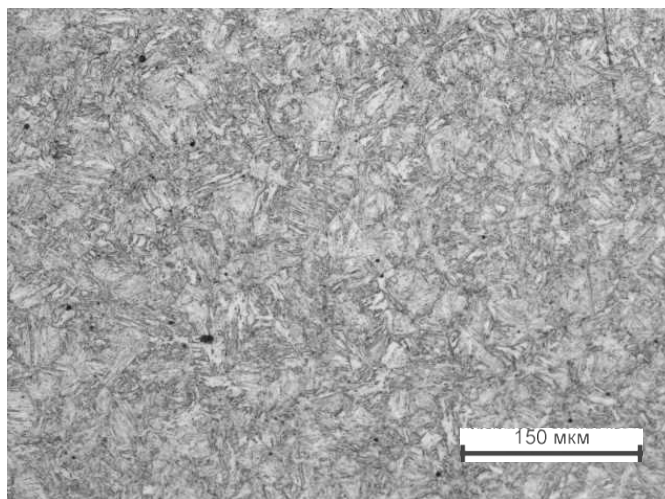


Рис. 7. Микроструктура стали 15X2Г2НМФБА после охлаждения с температуры конца горячей деформации на воздухе, x200



**Рис. 8. Микроструктура стали 15X2Г2НМФБА после охлаждения с температуры конца горячей деформации в печи,  $\times 200$**

### Выводы

Деформированные с  $\varepsilon=70\%$  заготовки, закаленные с различными скоростями охлаждения на структуру пакетного мартенсита, имели прочность до 1420 МПа, а ударная вязкость до  $KCV = 1,20$  МДж/м<sup>2</sup>.

Распределение зерен по размерам после закалки с ковочного нагрева во всех исследованных режимах подчинялось логарифмически нормальному закону.

Охлажденная с ковочного нагрева с печью НМС 15X2Г2НМФБА имела наиболее дисперсные характерные элементы структуры и лучшее сочетание характеристик прочности, пластичности и ударной вязкости.

### Библиографический список

1. **Бернштейн, М.Л.** Термомеханическая обработка стали / М.Л. Бернштейн, В.А. Займовский, Л.М. Капуткина. – М.: Metallurgy, 1983. – 480 с.
2. **Клейнер, Л.М.** Конструкционные высокопрочные низкоуглеродистые стали мартенситного класса / Л.М. Клейнер, А.А. Шацов. – Пермь: Перм. гос. тех. ун-т, 2008. – 303 с.
3. **Штремель, М.А.** Прочность сплавов. Часть II. Деформация / М.А. Штремель. – М.: МИСИС, 1997. – 527 с.
4. **Андреев, Ю.Г.** Границы и субграницы в пакетном мартенсите. I. Границы между кристаллами в пакете / Андреев, Е.И. Заркова, М.А. Штремель // Физика металлов и материаловедение. 1990. Т. 69. № 3. С 161–167.
5. **Романов, И.Д.** Структура и свойства низкоуглеродистых мартенситных наносталей, закаленных с деформационного нагрева / И.Д. Романов, Л.М. Клейнер // Материаловедение. 2013. №5. С. 18–21.
6. **Андреев, Ю.Г.** Упаковка кристаллов мартенсита в псевдомонокристалле / Ю.Г. Андреев [и др.] // ДАН СССР. 1977. Т. 237. Вып. 3. С. 574–576.
7. **Изотов, В.И.** Морфология и кристаллогеометрия речного мартенсита // Физика металлов и материаловедение. 1972. Т. 34. № 1. С. 123–132.
8. **Wakasa, K.** The crystallography and morphology of lath martensite / K. Wakasa, C.M. Wayman // Proc. Int. Conf. Martensite Transformations, ICOMAT-79, Cambridge, Mass, 1979. V. 1. P.3 4–39.
9. **Третьяков, А.В.** Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением / А.В. Третьяков, В.И. Зюзин. – 2-е изд. – М.: Metallurgy, 1973. – 224 с.

Дата поступления  
в редакцию 01.04.2014

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

**STRUCTURE AND PROPERTIES OF LOW-CARBON MARTENSITIC STEEL  
HARDENED FROM FORGING HEATING**

Perm national research polytechnic university

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.

*Key words:* quenching from deformation heating, martensitic transformation, martensite, austenite, martensitic steel.