

УДК: 620.18:669.15-194.55:621.78

**А. А. Шацов, С. К. Гребеньков\*, С. К. Лаптев**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
г. Пермь

\**drive@rtural.ru*

## НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫЕ СТАЛИ СО СТРУКТУРОЙ ПАКЕТНОГО МАРТЕНСИТА

Объемное наноструктурирование обеспечивает ранее недостижимые свойства стали. Известные способы объемного диспергирования структуры до наноуровня: интенсивная пластическая деформация, консолидация нанопорошков, кристаллизация аморфных сплавов и т. д. не позволяют получить конкурентоспособные крупногабаритные наноструктурированные материалы с требуемым сочетанием характеристик прочности и надежности. Однако высокие механические свойства возможны у материалов наноструктурированных термической обработкой.

*Ключевые слова:* термоциклическая обработка, низкоуглеродистая сталь, пакетный мартенсит, наноструктурирование.

**A. A. Shatsov, S. K. Grebenkov, S. K. Laptev**

## NANOSTRUCTURED LOW CARBON STEELS WITH THE STRUCTURE OF THE PACKET MARTENSITE

Bulk nanostructuring provides previously unattainable properties of steel. Known methods of volumetric dispersion of the structure to the nanoscale: intensive plastic deformation, consolidation of nanopowders, crystallization of amorphous alloys, etc. do not allow to obtain competitive large-sized nanostructured materials with the required combination of strength and reliability characteristics. However, high mechanical properties are possible in heat-treated nanostructured materials.

*Key words:* thermocyclic treatment, low carbon steel, batch martensite, nanostructuring.

При многократных альфа-гамма-альфа переходах пакетный (реечный) мартенсит позволяет диспергировать характерные элементы структуры при закалке. В качестве объекта исследований выбрана низкоуглеродистая мартенситная сталь (НМС) 15Х2Г2НМФБ со структурой пакетного мартенсита, формирующегося при закалке, в том числе на спокойном воздухе в сечениях более 200 мм [1–4].

Структуру изучали при помощи оптического, просвечивающего и растрового электронно-микроскопического анализов. В исходном горячекатаном состоянии средняя ширина рейки стали составила 250 нм. Рейки объединены в пакеты с различными углами разориентации. Средний размер пакетов составляет 2–3 мкм.

Закалка с температуры 850 °С привела к измельчению зерна ( $d = 5–6$  мкм), но вызвала значительную разнотернистость (степень разнотернистости  $R = 4,10$ ). Увеличение температуры до 950 °С устранило разнотернистость ( $R = 2,78$ ), но размер зерен восстановился до значения, близкого к исходному состоянию. Поэтому для измельчения структуры использовали многоцикловую термическую обработку (МЦТО) с закалкой с 950 °С и последующей закалкой с 850 °С.

При МЦТО происходит образование и фрагментация реечно-пластинчатой (глобулярной) структуры. Образование двух морфологических типов мартенсита предположительно связано с расслоением твердого раствора. При увеличении количества циклов МЦТО рейки и пластинки согласованно разбиваются на фрагменты, которые по форме и размерам напоминают блоки. В результате наноструктурирования стали 15Х2Г2НМФБ прочность составила более 1500 МПа, при ударной вязкости  $KCV = 1,0$  МДж/м<sup>2</sup>. Указанному сочетанию свойств соответствовала фрагментированная реечно-пластинчатая структура со средним размером реек 80–90 нм и пластинок 160–185 нм. Дальнейший рост прочности при измельчении характерной структурной составляющей сопровождается понижением вязкости.

Таким образом, при МЦТО, включающем закалку, возможно наноструктурирование НМС, которое сопровождается значительным повышением характеристик прочности и вязкости.

### Литература

1. Эволюция фазового состава, дефектной структуры, внутренних напряжений и перераспределение углерода при отпуске литой конструкционной стали / Э. В. Козлов [и др.]. Новокузнецк : Изд-во СибГИУ, 2007. 177 с.

2. Формирование зеренной и реечной структуры в низкоуглеродистых мартенситных сталях термоциклированием / И. В. Ряпосов [и др.] // МиТОМ. 2008. № 9. С. 33–39.
3. Концепция карбидного конструирования сталей повышенной хладостойкости / В. И. Горынин [и др.] // МиТОМ. 2014. № 10. С. 32–37.
4. New experimental evidence on the incomplete transformation phenomenon in steel / F. G. Caballero [et al.] // Acta Materialia. 2009. № 57. P. 8–17.