

# СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ КОНСТРУКЦИОННОЙ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПРИ КОМПЛЕКСНОЙ МЕХАНО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ НА ЭТАПЕ ХОЛОДНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТОДОМ РАДИАЛЬНОЙ КОВКИ\*

*А.Н. БАЛАХНИН, аспирант,  
Р.А. ВАГИН, студент  
Д.О. ПАНОВ, ст. преподаватель,  
(ПНИПУ, г. Пермь)  
А.И. СМИРНОВ, канд. техн. наук, доцент  
Н.А. МОРЕВА, аспирант  
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Статья поступила 3 сентября 2011 года

**Балахнин А.Н.** – 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29,  
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: mto@pstu.ru

Исследованы процессы эволюции структуры и анизотропии свойств по сечению низкоуглеродистой стали 10X3Г3МФ при комплексной механотермической обработке на этапе холодной пластической деформации.

**Ключевые слова:** низкоуглеродистая сталь, механотермическая обработка, радиальная ковка, пакетный мартенсит, динамическая рекристаллизация.

## Введение

Успехи машиностроения, строительства и других отраслей промышленности в значительной мере определяются достижениями в области металлургического производства. Одним из приоритетных направлений современного материаловедения является повышение уровня прочности и надежности конструкционных металлических материалов.

Перспективным способом повышения механических характеристик металлов является механотермическая обработка, представляющая собой совокупность операций пластической деформации и термической обработки. Такая обработка позволяет реализовать в материале зерногранично-субструктурный механизм упрочнения, т.е. единственный механизм, одновременно повышающий характеристики прочности и пластичности.

Низкоуглеродистые мартенситные стали в закаленном состоянии характеризуются уникальным сочетанием механических и технологических свойств: наряду с высоким уровнем прочности эти стали обладают хорошей пластичностью при комнатной температу-

ре [1]. Для реализации высоких степеней деформации закаленных низкоуглеродистых сталей необходимо использовать метод, при котором реализуется наиболее мягкая схема деформации – радиальная ковка [2].

Цель данной работы – исследование однородности распределения свойств образцов и процессов структурообразования низкоуглеродистой системнолегированной стали 10X3Г3МФ, подвергнутой комплексной механотермической обработке, на этапе холодной пластической деформации.

## Материалы и методики проведения исследований

В качестве материала исследования выбрана низкоуглеродистая системнолегированная сталь 10X3Г3МФ, имеющая следующий химический состав, % (масс.): 0,09 С; 2,78 Mn; 2,79 Cr; 0,43 Mo; 0,38 Si; 0,17 Ni; 0,13 V; 0,19 Cu; 0,012 S; 0,023 P.

В стали 10X3Г3МФ при охлаждении с температур горячейковки вследствие высокой устойчивости переохлажденного аустенита сформирована структура пакетного мартенсита.

\* Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, соглашение № 14.В37.21.0136.



Далее сталь 10Х3Г3МФ подвергли холодной пластической деформации (ХПД) на радиально-ковочной машине SKK 10 с круга диаметром 19 мм на круг 12 мм, что составляет 60 % деформации. Ковка проходила в три прохода: 20, 40 и 60 % деформации. В качестве степени пластической деформации принимали величину укова  $\epsilon$ , определяемую по результатам изменения площади поперечного сечения образца до и послековки.

Исследования тонкой структуры проводили на тонких фольгах, приготовленных по стандартной методике, с использованием просвечивающего электронного микроскопа Technai G2 FEI. Образцы для исследования тонкой структуры вырезали из сердцевины прутка.

Микродюрметрические исследования проводили в соответствии с ГОСТ 9450-76 на микротвердомере для проведения испытаний по Виккерсу Model 402MVD по методу восстановленного отпечатка вдавливанием четырехгранной алмазной пирамиды с квадратным основанием. Шаг между точками измерений составлял 0,3 мм.

### Результаты исследований и их обсуждение

По результатам исследования распределения микротвердости по сечению образцов стали 10Х3Г3МФ (рис. 1, а) можно сказать о повышении общего уровня твердости при увеличении степени ХПД.

При этом распределение микротвердости по сечению образцов стали 10Х3Г3МФ холоднодеформированных неоднородно: существует относительно однородная сердцевина прутка с максимальным уровнем по твердости и периферия, где твердость плавно убывает от границы с сердцевиной к краю образца (рис. 1, б). При этом снижение твердости идет до уровня исходного закаленного горячекованного состояния.

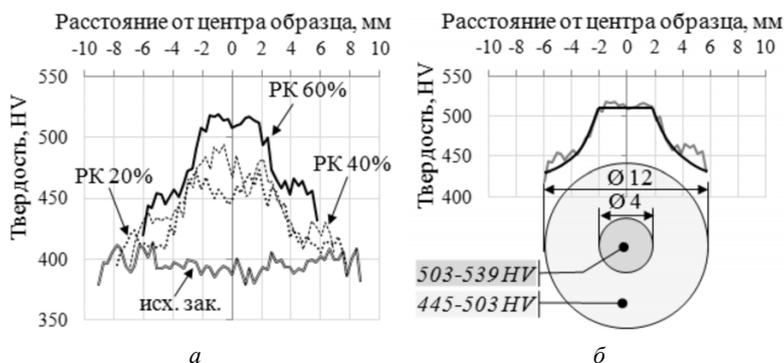


Рис. 1. Распределение микротвердости по сечению прутка (а) стали 10Х3Г3МФ в исходном закаленном состоянии (исх. зак.) и после ХПД методом РК и однородность по сечению прутка, подвергнутого ХПД 60 % методом РК (б)

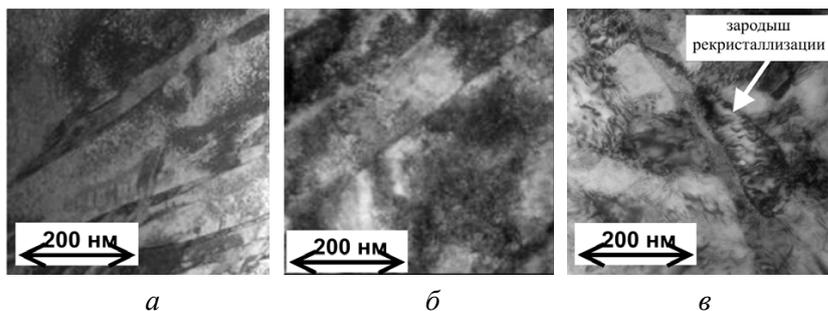


Рис. 2. Тонкая структура стали 10Х3Г3МФ в исходном закаленном с температур горячейковки состоянии (а), после ХПД методом РК со степенями 20 % (б) и 60 % (в) деформации

ного состояния. У боковой поверхности прутка наблюдается падение твердости, что, по-видимому, связано с наличием обезуглероженного слоя.

Исследование тонкой эволюции структуры стали 10Х3Г3МФ при ХПД методом РК выявило, что в исходном состоянии после закалки на воздухе с температуры горячейковки (рис. 2, а) в исследуемой стали наблюдается пакетно-реечное строение с высокой плотностью однородно распределенных дислокаций.

Анализ тонкой структуры образцов после ХПД методом РК при 20 % деформации показал, что в материале формируются дислокационные границы внутри реек, что приводит к их фрагментации, т.е. образованию дислокационных ячеек (рис. 2, б). При этом средний поперечный размер реек в плоскости фольги составляет 257 нм, а средний размер деформационных ячеек равен 216 нм.

Увеличение степени деформации закаленной стали 10Х3Г3МФ до 60 % приводит к уменьшению среднего поперечного размера рейки мартенсита в плоскости фольги до 194 нм, что сопровождается уменьшением размера ячеек деформации до 163 нм (рис. 2, в). В обоих случаях уменьшение составило 25 %.

При исследовании тонкой структуры образцов, подвергнутых холодной РК со степенью деформации 60 %, на границах мартенситных реек были обнаружены области (рис. 2, в) с низкой плотностью дислокаций и высокоугловой границей, которые, по-видимому, являются зародышами динамической рекристаллизации [3]. Факт обнаружения зародыша рекристаллизации является признаком мегапластической деформации [4] в стали 10Х3Г3МФ при ХПД методом РК.

Гистограмма распределения среднего поперечного размера рейки в плоскости фольги после деформации со степенями 20 и 60 % носит логнормальный характер и приведена на рис. 3.

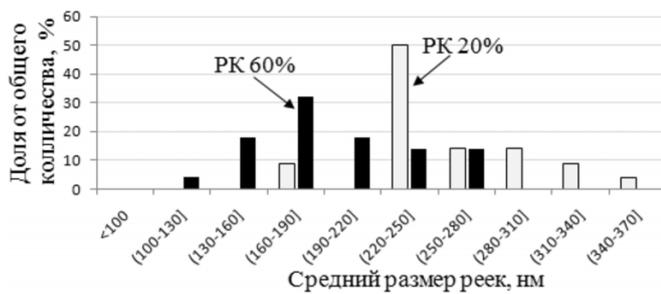


Рис. 3. Гистограмма распределения ширины реек мартенсита в плоскости фольги для стали 10Х3Г3МФ после ХПД методом РК со степенями деформации 20 и 60 %

### Выводы

Комплексная механотермическая обработка, заключающаяся в холодной пластической деформации методом радиальнойковки предварительно закаленных низкоуглеродистых мартенситных сталей, позволила уменьшить размер рейки стали 10Х3Г3МФ до 160...190 нм и увеличивать общий уровень твердости, однако при этом формируется неоднородность ее распределения по сечению. После ХПД методом РК со степенью деформации 60 % в структуре наблюдаются признаки динамической рекристаллизации – образование зародышей рекристаллизации на границах мартенситных реек.

Возможным перспективным направлением для дальнейшего диспергирования структуры и увеличения уровня механических свойств стали 10Х3Г3МФ является термическая обработка для развития процесса первичной рекристаллизации холоднодеформированного металла.

### Список литературы

1. Митрохович Н.Н., Симонов Ю.Н., Клейнер Л.М., Швецов В.В. Технологичность и конструкционная прочность низкоуглеродистых сталей с мартенситной структурой: учеб. пособие / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2004. – 123 с.
2. В.А. Тюрин, В.А. Лазоркин, И.А. Поспелов. Ковка на радиально-обжимных машинах. – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.
3. Быков В.М., Лихачев В.А., Никонов Ю.А. и др. Фрагментирование и динамическая рекристаллизация меди при больших и очень больших пластических деформациях // ФММ. – 1978. – Т. 45. – Вып. 1. – С. 163–169.
4. Глезер А.М., Метлов Л.С. Физика мегапластической (интенсивной) деформации твердых тел // Физика твердого тела. – 2010. – Т. 52. – Вып. 6. – С. 1090 – 1096.

### Research of structure formation of constructional low carbon steel by integrated thermo-mechanical method in the radial forging machine's deformation stage

A.N. Balakhnin, R.A. Vagin, D.O. Panov, A.I. Smirnov, N.A. Moreva

In this study processes of structure evolution and properties anisotropy of low carbon steel 10Cr3Mn3MoV by integrated thermo-mechanical method in the radial forging machine's deformation stage were introduced.

**Key words:** low carbon steel, thermo-mechanical treatment, radial forging, batch martensite, dynamical recrystallization.