

# НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОМАТЕРИАЛЫ

УДК 621.778.014-426:620.172.242

Г.С. Гун, М.В. Чукин, Д.Г. Емалеева, Н.В. Копцева, Ю.Ю. Ефимова, М.П. Барышников

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ ЕЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ\*

Стальная проволока – один из важнейших видов метизов, повсеместно используемый как конструктивный элемент при производстве стальных канатов, металлокорда, биметаллической проволоки и неизолированных проводов и т. д. Необходимость повышения надежности и долговечности указанных металлоконструкций требует разработки новых технологий, позволяющих управлять их структурой и свойствами. Данным обстоятельством объясняется развитие таких схем интенсивной пластической деформации (ИПД), как равноканальное угловое прессование (РКУП), кручение под высоким давлением [1], многократная всесторонняя ковка [2], пакетная прокатка [3] и т. д. Названные способы, основанные на диспергировании структурных элементов материала, уникальны и позволяют значительно повышать прочностные и пластические свойства металлов [4]. Однако дискретность процесса наноструктурирования и низкая технологичность существующих схем ИПД оставляли актуальной проблему создания альтернативного способа формирования ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры материала, позволяющего управлять свойствами металлов в условиях непрерывности технологического процесса.

Поэтому цель настоящего исследования – экспериментальное обоснование возможности применения новой вы-

сокотехнологичной схемы равноканальной угловой свободной протяжки (РКУ-протяжки), позволяющей формировать субмикроструктурную структуру поверхности стальной низкоуглеродистой проволоки и повышать уровень её механических свойств.

Предлагаемый процесс РКУ-протяжки заключается в многократном протягивании проволоки через специально разработанный инструмент, имеющий в сечении 2 пересекающихся под углом канала. Принципиальная схема процесса представлена на рис. 1.

Технологичность и непрерывность обработки реализуется за счет последовательной установки на волочильном стане необходимого количества инструмента. Высокая практическая ценность РКУ-протяжки заключается в возможности ее сочетания с традиционным способом волочения проволоки (рис. 2).

### 1. Исследование изменения прочностных свойств стальной проволоки в процессе РКУ-протяжки

В ходе исследования стальная проволока из стали 08кп последовательно волочилась по маршруту 6,7→6,0→5,5→5,0→4,5→4,2 до получения образцов соответствующего маршрута диаметра. Полученные образцы подвергались РКУ-протяжке в несколько проходов. В результате эксперимента, проведенного по специально разработанной методике, были определены поэтапные изменения прочностных свойств образцов, подвергшихся

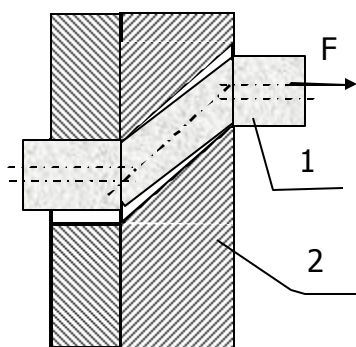


Рис. 1. Принципиальная схема процесса РКУ-протяжки:  
1 – обрабатываемая проволока;  
2 – технологический инструмент

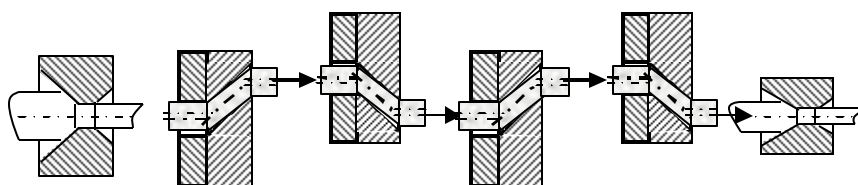


Рис. 2. Возможная схема поточной реализации РКУ-протяжки на шестикратном волочильном стане

\* Работа выполнена в рамках ЦПФ «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007–2012 годы».

ИПД, после  $N=0, 2, 4, 6$  и  $10$  протяжек через инструмент (рис. 3). На этом же рисунке сплошной линией без маркеров показана кривая упрочнения горячекатаной стали 08кп. Штриховая линия, имеющая аналогичный характер, отображает исходный уровень механических свойств образцов различного диаметра (при  $N=0$  проходов) и подтверждает закономерность деформационного упрочнения заготовок при их волочении. Анализ полученных результатов свидетельствует, что у образцов с исходным диаметром  $4,2; 4,5$  и  $5,5$  мм отмечается заметное (до 14%) упрочнение металла при РКУ-протяжке относительно их исходного состояния, зависящее от интенсивности обработки. Для образца с исходным диаметром  $D = 5,0$  мм в результате ИПД наблюдается некоторое (на 18%) разупрочнение металла относительно исходного состояния.

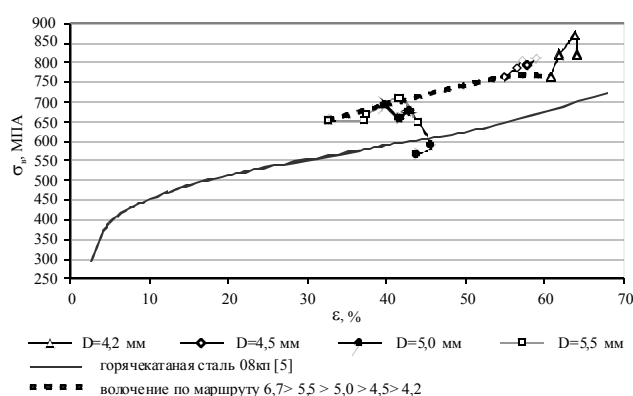
Следует отметить незначительное, но стабильное уменьшение поперечного сечения проволоки при ИПД. Исключение составляет 10 протяжек для образца с  $D=5,0$  мм.

Выявленный характер изменения механических свойств низкоуглеродистой стали 08кп, подвергнутой ИПД, вызвал необходимость проведения детального металлографического анализа.

## 2. Металлографические исследования изменения структуры и твердости проволоки, подвергнутой РКУ-протяжке

Оценка характера изменения структуры металла в ходе обработки производилась на микроскопе «ЭПИКВАНТ» с использованием системы компьютерного анализа изображений SIAMS. Микроструктура исходного образца приведена на рис. 4, а после РКУ-протяжки – на рис. 5.

Проведенный анализ показал, что РКУ-протяжка привела к значительному изменению структуры всех исследуемых образцов. Уже после 2 проходов и вплоть до 10 проходов наблюдается



**Рис. 3. Упрочнение образцов разного диаметра в исходном состоянии (после волочения) и в ходе их обработки РКУ-протяжкой после 2, 4, 6 и 10 проходов**

интенсивное диспергирование структурных составляющих поверхностных слоев, в то время как структура центральной части остается неизменной (сравнить рис. 4 и 5, г). При этом процесс наноструктурирования носит кумулятивный характер, т.е. толщина измельченного слоя и дисперсность структуры от прохода к проходу непрерывно возрастают. Так, например, для образца  $D=5,5$  мм после  $N$  проходов средняя толщина измельченного поверхностного слоя  $h_N$  составляет:  $h_2 \approx 118$  мкм;  $h_4 \approx 141$  мкм;  $h_6 \approx 150$  мкм;  $h_{10} \approx 184$  мкм.

В ходе исследования ориентировочно были выделены следующие стадии формирования ультрамелкозернистой структуры (УМЗ-структуры) в поверхностном слое:

- формирование равномерного УМЗ-слоя (с 1-го по 4-й проходы) (рис. 5, а);
- развитие УМЗ-слоя в глубину материала (с 4-го по 7-й проходы) (рис. 5, б);
- стадия накопления дефектов (с 7-го по 9-й проходы);
- частичное разрушение и отслоение поверхностного наноструктурированного слоя (9-й и последующие проходы) (рис. 5, в).

Распределение микротвердости по сечению образцов оценивалось методом вдавливания алмазной пирамиды на твердомере ПМТ-3 в соответствии с ГОСТ 9475-76. Замеры производились с шагом  $0,1$  мм от поверхности к центру заготовок. Анализ результатов исследования (рис. 6) показывают, что образованный при РКУ-протяжке наноструктурированный слой обеспечивает значительное повышение значений микротвердости на поверхности заготовок и, следовательно, общее улучшение прочностных свойств материала.

При этом наблюдается прямая зависимость между интенсивностью обработки проволоки (т.е. количеством протяжек образца через инструмент) и уровнем значений микротвердости ее поверхности. В то же время ни интенсивность деформации, ни геометрические показатели за-



**Рис. 4. Микроструктура исходного образца,  $\times 200$**

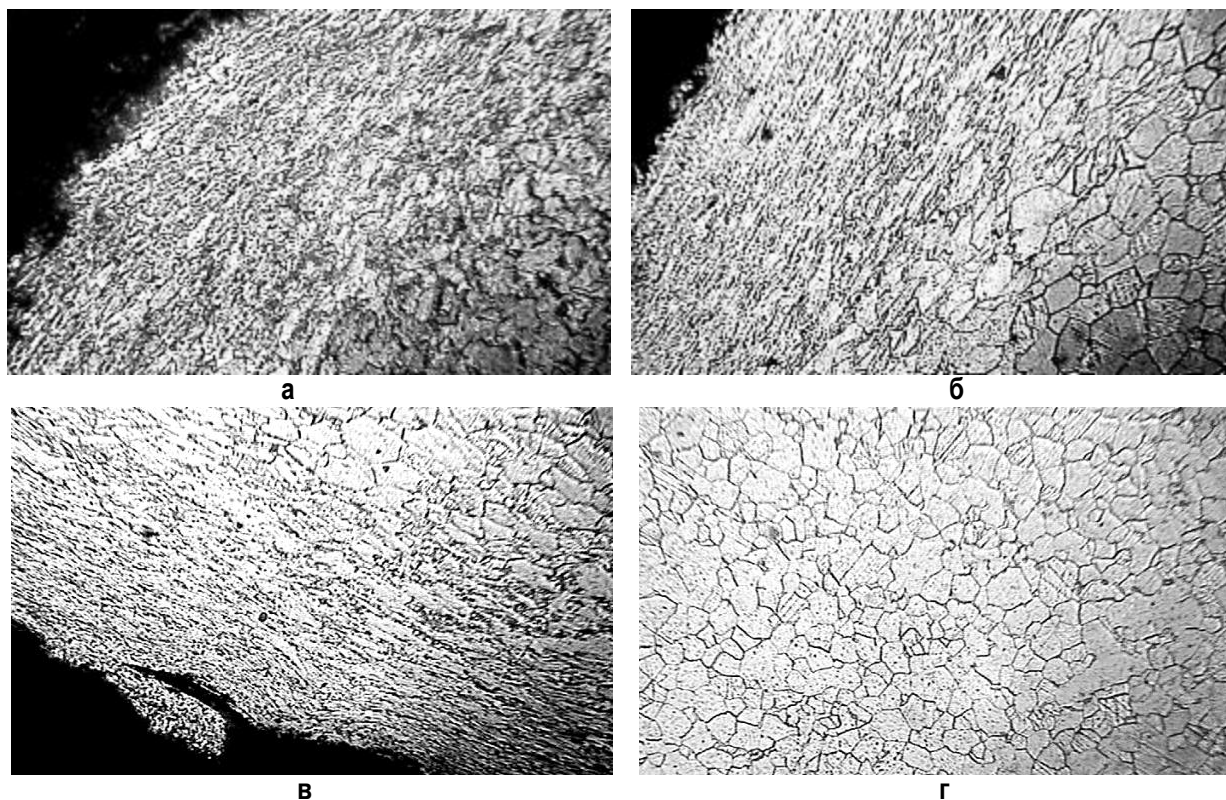


Рис. 5. Микроструктура образца  $D=4,5$  мм после  $N=2$  прохода (а),  $N=6$  проходов (б) и  $N=10$  проходов (в, г) на поверхности (а–г) и в центре (д);  $\times 200$

готовок существенным образом не влияют на упрочнение их центральной части.

**Выводы.** Проведенные исследования подтверждают возможность и высокую эффективность предлагаемого высокотехнологичного способа формирования ультрамелкозернистой структуры поверхностного слоя стальной проволоки. Внедрение результатов теоретических исследований на существующем производстве и позволит достигать высоких качественных показателей конечной продукции широкого спектра использования.

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 гг.» лот № 2007-3-1.3-00-04 (контракт № 02.513.11.3196).

#### Библиографический список

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: Логос, 2000. 272 с.
2. Валитов В.А., Салищев Г.А., Мухтаров Ш.Х. Сверхпластичность жаропрочного никелевого сплава с субмикроструктурной структурой // Металлы. 1994. № 3. С. 127.
3. Saito Y., Tsuji N., Sakai T. // Acta mater. 1999. V. 47. P. 579.
4. Процессы структурообразования при пластической деформации металлов / Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И. и др. Минск: Наука и техника, 1994. 221 с.
5. Кроха В.А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации: Справочник. М.: Машиностроение, 1980. 157 с.

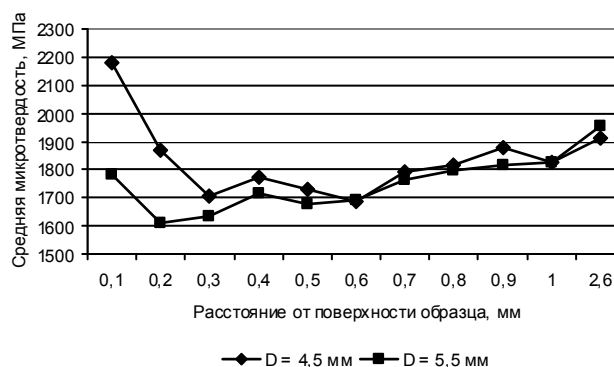


Рис. 6. Распределение микротвердости по сечению образцов разных исходных диаметров после 10 проходов РКУ-протяжки