

УДК 621.7

**И.Е. Волокитина, А.В. Волокитин**  
Карагандинский индустриальный университет  
Темиртау, Казахстан

## **ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ УГЛЕРОДИСТЫХ ПРУТКОВ ПОСЛЕ РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ ПРОТЯЖКИ И ВОЛОЧЕНИЯ**

*Аннотация.* В данной работе исследуется изменение микроструктуры прутков из углеродистой стали после радиально-сдвиговой протяжки и волочения. В результате проведенного эксперимента была получена градиентная микроструктура. На поверхности прутка были получены ультрамелкозернистые зерна размером 0,5 мкм, а в центре микроструктура со средним размером зерна 7 мкм.

**I.E. Volokitina, A.V. Volokitin**  
Karaganda Industrial University  
Temirtau, Kazakhstan

## **EVOLUTION OF MICROSTRUCTURE OF CARBON BARS AFTER RADIAL-SHIFT BROACHING AND DRAWING**

*Abstract.* This paper investigates the change in microstructure of carbon steel bars after radial shear broaching and drawing. As a result of the experiment, a gradient microstructure was obtained. Ultra-fine grains of 0.5  $\mu\text{m}$  size were obtained on the surface of the bar, while in the centre of the bar a microstructure with an average grain size of 7  $\mu\text{m}$  was obtained.

Среди всех существующих в настоящее время непрерывных методов наноструктурирования длинномерных заготовок наиболее близкими к практическому применению являются способы равноканальной угловой протяжки, РКУП-волочения и кручения [1]. Первоначально нами было предложено предварительно обрабатывать проволоку методом РКУП, а затем традиционным волочением в одной линии стана, данный совмещенный метод обозначился как РКУП-волочение [2].

Исследователями [3] предложена РКУПротяжка, при которой проволока многократно протягивается через специально разработанный инструмент, с двумя пересекающимися под углом каналами. Непрерывность деформирования реализуется за счет последовательной установки на волочильном стане необходимого инструмента. Обработка заготовки способом РКУПротяжки приводит

к высоким значениям степени деформации сдвига, накапливаемой в металле, а также к заметной немонотонности.

В 2001 году на факультете МГТУ им. Г.И. Носова были начаты прикладные исследования по радиально-сдвиговой протяжке (РСПр) [3]. Ее прототипом является радиально-сдвиговая прокатка. Возможность совмещения процессов поперечно-винтовой прокатки (ПВП) и волочения рассматривалась в работе [4]. Использование традиционного волочения в качестве заключительного процесса после различных процессов ИПД является хорошим вариантом, так как при этом устраняются все недостатки предварительной деформации (например, неоднородность геометрии, пористость и т.д.).

Поэтому мы хотим предложить совмещенную технологию радиально-сдвиговой протяжки и волочения. Целью данной работы является исследование изменения микроструктуры прутков из углеродистой стали после радиально-сдвиговой протяжки и волочения.

Для исследования эффективности разработанной технологии был проведен лабораторный эксперимент на отложенных прутках из углеродистой стали марки 45. Перед деформированием прутки отжигали при температуре 740°C для получения более однородной структуры и устранения влияния остальных переделов производства.

Так как в нашем университете не имеется планетарных клеток для получения длинномерных прутков решено вместо радиально-сдвиговой прокатки осуществить радиально-сдвиговую протяжку прутка на стане РСР-10/30 и совместить этот процесс с традиционным волочением на стане В-І/550 М. Так как за счет протягивания заготовки одновременно через скрецающиеся валки и волоку возникают растягивающие напряжения, которые приводят к уменьшению усилия волочения. За счет растягивающих напряжений вдоль заготовки происходит более равномерное формирования профиля протягиваемой заготовки.

В основе разрабатываемого нами процесса лежит технология радиально-сдвиговой протяжки и волочения, которая позволяет получать длинномерные прутки с повышенными механическими свойствами. При протягивании заготовка деформируется в поперечном сечении за счет протягивания ее через конусные ролики, которые располагаются под углом 120° к друг другу. Поверхностные слои заготовки испытывают радиальное скручивание, что в совокупности с обжатием дает высокую степень деформации, позволяя добиваться лучшей проработки поверхности. А в совокупности с радиально-сдвиговой деформацией большее измельчение структуры.

Исходная микроструктура после отжига являлась феррито-перлитной, объемная доля перлита составляет  $\approx 58\%$ . Средний размер зерен феррита  $\approx 26$  мкм, расстояние между пластинами перлита  $0,7$  мкм.

Металлографическое исследование на оптическом микроскопе прутка в поперечном сечении показывает, что в результате деформирования методом радиально сдвиговой протяжки и волочения получена градиентная структура (рис. 1). Поэтому разделим пруток на 3 зоны: поверхностная, нейтральная и центральная.

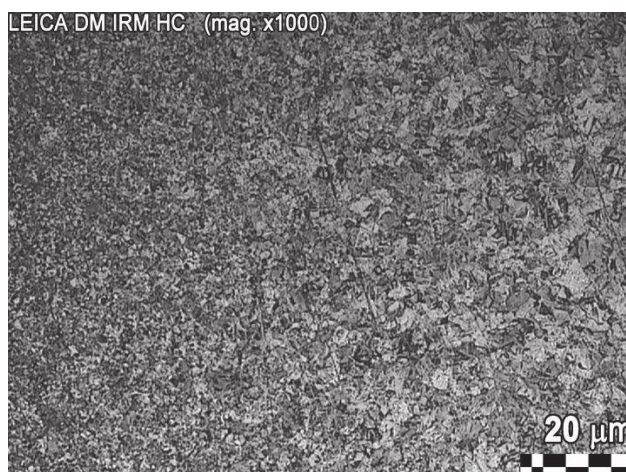
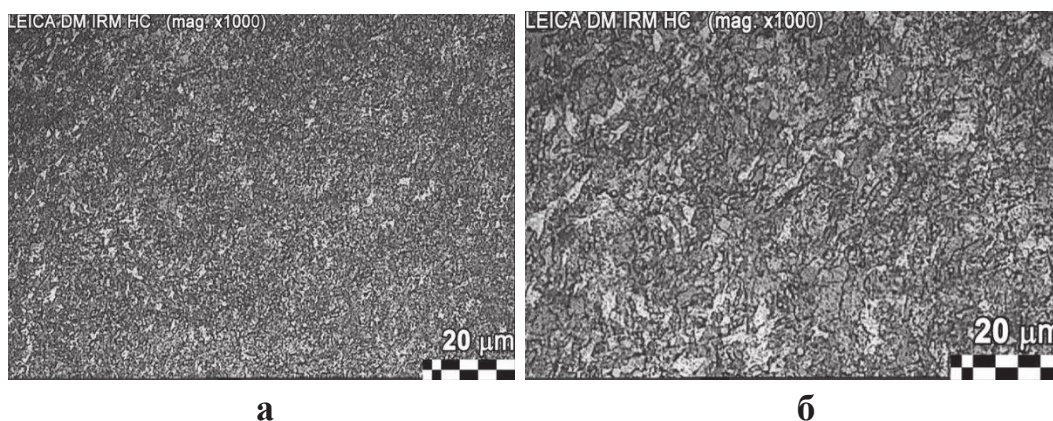


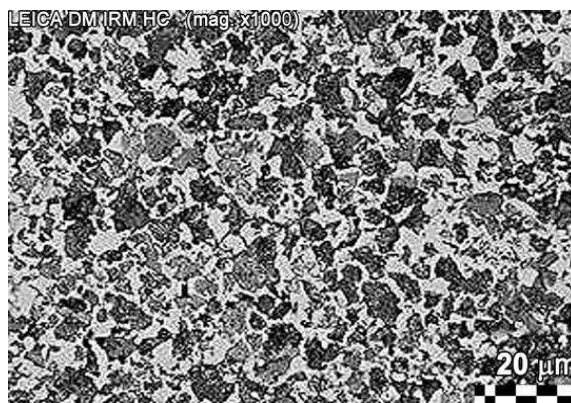
Рис. 1 - Общий вид градиентной микроструктуры прутка (поперечное сечение)

Как видно из рис. 1 поверхностная зона прутка по сравнению с центральной зоной значительно измельчается за 3 цикла деформирования. В нейтральной зоне деформация недостаточно велика, поэтому структура измельчается не так сильно.

Рассмотрим каждую зону более подробно (рис. 2).







В

а – поверхностная зона, б – нейтральная зона, в – центральная зона

Рис. 2 - Микроструктура стали марки 45

Как видно из рис. 2а поверхностная зона прутка по сравнению с центральной зоной значительно измельчается за 3 цикла деформирования. Так средний размер феррита составляет 0,5 мкм, здесь прослеживаются ультрамелкие зерна почти равноосной формы. Также наблюдается разбиение зерен феррита на более мелкие. Зерна имеют тонкие прямолинейные границы чистые от дислокаций. В нейтральной зоне деформация недостаточно велика, поэтому структура измельчается не так сильно, зерна феррита уменьшаются до 2 мкм. Здесь сформирована бимодальная структура, объемная доля фрагментированного феррита не высока. Наблюдаются как крупные зерна с развитой субструктурой, так и мелкие зерна, имеющие тонкую структуру с наличием большого количества дислокаций. Разнозернистость в структуре можно было бы объяснить наличием процессов рекристаллизации, но в нашем случае деформирование протекает при комнатной температуре, а нагрев в волоке не превышает 150-165°C, поэтому процесс рекристаллизации может протекать только по бездиффузионному механизму. В связи с этим увеличение зерен происходит не за счет диффузионных процессов, а за счет текстурного слияния зерен. Как мы знаем при волочении образуется аксиальная текстура при котором определенное кристаллографическое направление оказывается параллельным направлению волочения, и такая ориентация зерен иногда приводит к тому, что отпадает необходимость в сосуществовании отдельных границ между такими одинаково ориентированными зернами и они начинают объединяться в одно большое зерно. Полученные дислокации выстраиваются в субграницы, в результате чего появляются области относительно чистые от дислокаций.

В центральной зоне микроструктура состоит из крупных зерен со средним размером 7 мкм. Структура представляет собой ячеистую дислокационную структуру деформационного происхождения, наблюдаются как крупные зерна с небольшим количеством субграниц, а также зерна, содержащие большое количество субграниц.

### **Вывод**

Разработана новая совмещенная технология обработки прутков из углеродистой стали. Полученная градиентная микроструктура создает перспективу для использования этих прутков в машиностроении и строительстве, так как при таком распределении микроструктуры создается повышенный запас пластичности по сравнению с традиционным процессом волочения, что позволяет проводить ее дальнейшую переработку с большими степенями деформации без проведения промежуточных отжигов. Образование градиентной микроструктуры можно объяснить совмещением двух технологий.

*Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (Грант № AP19678974).*

### **Список использованных источников**

1. G.V. Shimov, A.A. Bogatov, D.S. Kovin, FEM Simulation of Copper Busbar Pressing on the Continuous Extrusion Line "Conform" // Solid State Phenomena. - 2018. – P. 547-551.
2. Naizabekov A., Volokitina I., Volokitin A., Panin E. Structure and mechanical properties of steel in the process "pressing-drawing" // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2019. – Vol. 28. – P. 1762-1771.
3. В.А. Харитонов, М.А. Полякова, М.Ю. Усанов. Радиально-сдвиговая протяжка как эффективный способ повышения качества круглой проволоки // Труды научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР». Т.2. Екатеринбург: УрО РАН - 2011. - С. 521-532.
4. Е.Б. Блондинская, И.Г. Шубин. Исследование возможностей технологии комбинирования поперечно-винтовой прокатки и волочения при изготовлении длинномерных изделий на основе моделирования в программном комплексе Deform-3D // Материаловедение. – 2013 – С.16-18.