

PACS: 61.72.Bb, 62.20.Fe

А.В. Завдоев

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПРИ ТЕПЛОЙ ВИНТОВОЙ ЭКСТРУЗИИ

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины  
ул. Р. Люксембург, 72, г. Донецк, 83114, Украина

Статья поступила в редакцию 22 октября 2013 года

*Рассмотрены особенности формирования структуры и свойств малоуглеродистой стали, подвергнутой тепловой винтовой экструзии (ВЭ). Методом дифракции обратнорассеянных электронов показано, что теплая ВЭ малоуглеродистой стали приводит к увеличению изотропности структуры, к значительной фрагментации и активации механизмов полигонизации, динамической рекристаллизации и зернограничному проскальзыванию. Данные структурные особенности позволили повысить прочность материала в 1.5 раза с сохранением высокого уровня пластичности.*

**Ключевые слова:** дифракция обратнорассеянных электронов, структура, текстура, высокоугловые границы, винтовая экструзия, динамическая рекристаллизация, механические свойства

*Розглянуто особливості формування структури та властивостей малоуглецевої сталі при теплій гвинтовій екструзії (ГЕ). Методом дифракції зворотнорозсіяних електронів показано, що тепла ГЕ малоуглецевої сталі призводить до збільшення ізотропності структури, значної фрагментації та активації механізмів полігонізації, до динамічної рекристалізації та зернограничного прослизання. Дані структурні особливості дозволили підвищити міцність матеріалу в 1.5 рази із збереженням високого рівня пластичності.*

**Ключові слова:** дифракція зворотнорозсіяних електронів, структура, текстура, висококутові границі, гвинтова екструзія, динамічна рекристалізація, механічні властивості

### Введение

Получение объемных субмикро- и нанокристаллических материалов, обладающих уникальными эксплуатационными и физико-механическими характеристиками [1–4], становится одной из важнейших задач физики твердого тела. Прежде всего, это касается малоуглеродистых сталей, широко используемых для изготовления различных изделий и деталей в строительстве

и промышленности. Перспективными средствами формирования субмикронных нанокристаллических материалов на сегодня являются методы интенсивной пластической деформации (ИПД), в частности винтовая экструзия [5]. Применение ВЭ к обработке сталей, в отличие от равноканального углового прессования [4], носит единичный характер [6]. Ранее было показано [7–9], что теплая ВЭ приводит к снижению текстурированности в поперечном сечении, формированию мелкодисперсной структуры с преимущественно равноосными зёрнами и выраженной разнотекстурностью, однако анизотропия структуры в продольном сечении не исследовалась.

Целью работы является изучение особенностей формирования структуры, текстуры и свойств малоуглеродистой стали марки 20Г2С в различных направлениях относительно оси деформации при теплой ВЭ.

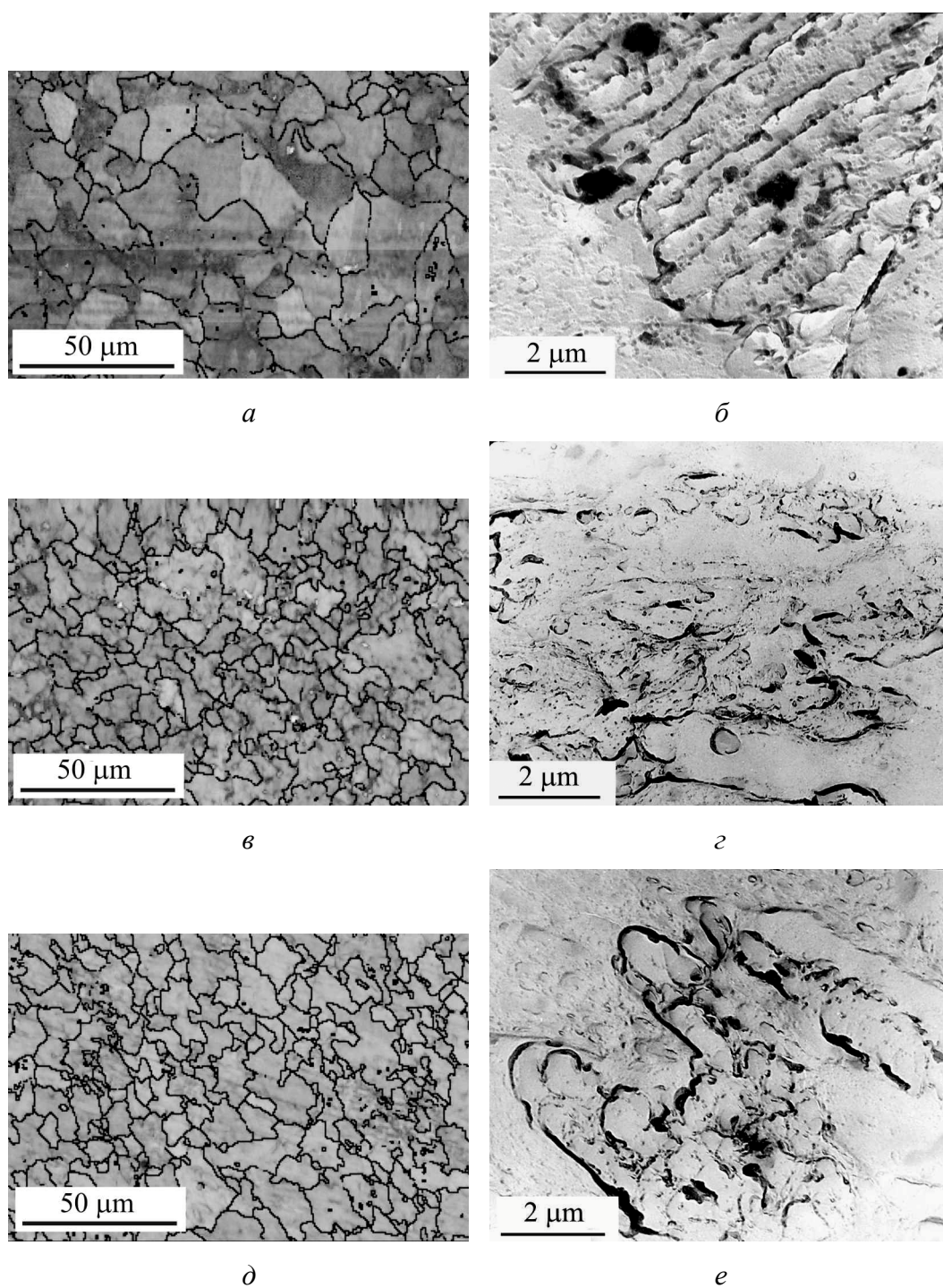
### Методика эксперимента

В качестве материала для исследований использовали малоуглеродистую сталь 20Г2С конструкционного назначения (% по массе: 0.24 С; 1.66 Мп; 1.2 Si; 0.14 Cr; 0.24 Ni; 0.01 Al; 0.06 Cu; 0.04 S; 96.41 Fe), отожженную при 900°C (1 h), подвергнутую тепловой ВЭ. Метод деформации ВЭ заключается в том, что призматический образец продавливается через матрицу с винтовым каналом [5]. При этом размеры образца не изменяются, что позволяет накапливать значительные степени деформации. ВЭ осуществляли при температуре заготовки 400°C и температуре оснастки 320°C. Давление прессования не превышало 1200 МПа, приложенное противодействие составляло 100 МПа. Величина единичной степени деформации за один проход  $e \approx 2$ , а накопленная деформация за три прохода –  $e \approx 6$ . Детальное описание режима деформирования представлено в [7].

Механические испытания были проведены методом осадки. Микроструктурный анализ выполнен методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) углеродистых реплик и дифракции обратнорассеянных электронов (ДОЭ). Подготовка образцов для ДОЭ-исследований детально описана в [7].

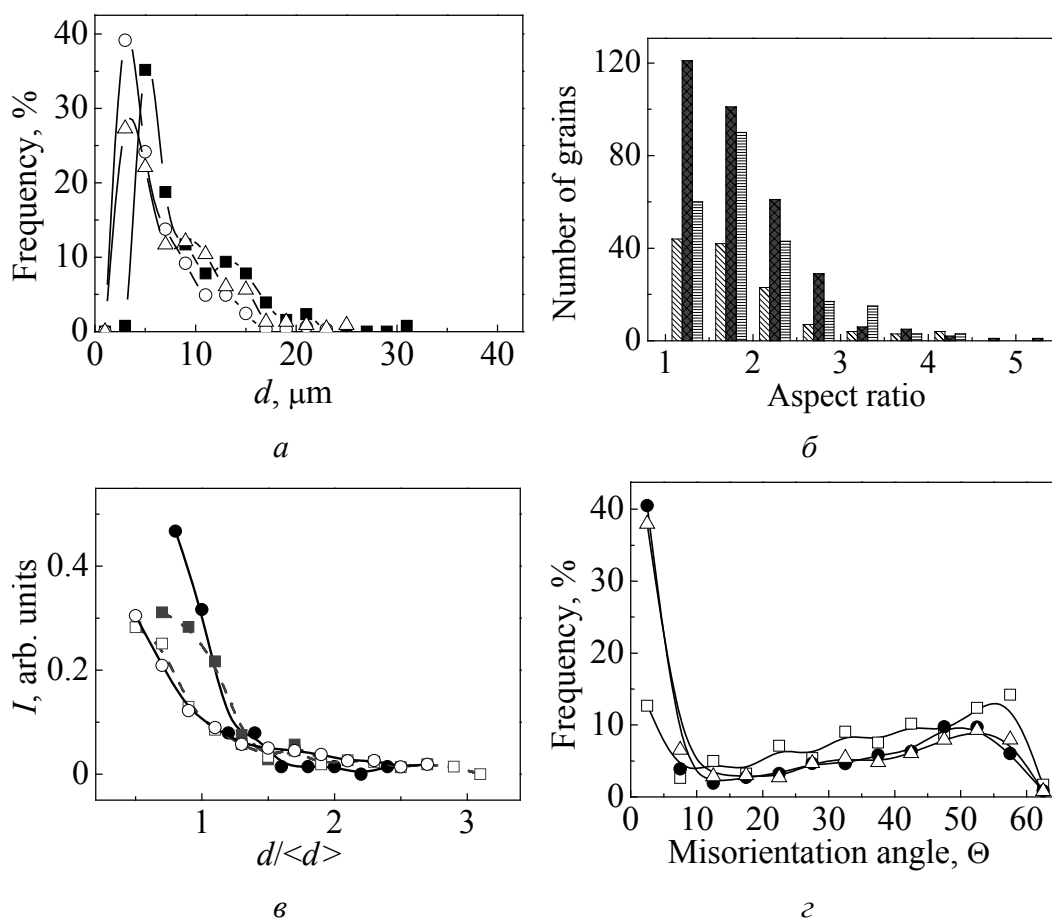
### Результаты и обсуждение

Анализ изменения структуры, представленной на рис. 1, показывает, что теплая ВЭ приводит к значительной фрагментации структурных составляющих как феррита, так и перлита. Средний размер зерна феррита после деформации уменьшается от 15 до 5  $\mu\text{m}$ . Карты контрастов, полученные методом ДОЭ (рис. 1,а,в,д), подтверждают, что микроструктура после теплой ВЭ измельчается в несколько раз. При этом наряду с мелкими наблюдаются и крупные равноосные зёрна как в поперечном, так и в продольном сечении. Данные ПЭМ (рис. 1,б,г,е) показывают, что теплая ВЭ приводит к смене морфологии перлита. Цементитные пластинки после деформации существенно фрагментируются (рис. 1,б), и в продольном сечении (рис. 1,е) наблюдается направленность остатков пластин вдоль полос скольжения.



**Рис. 1.** Микроструктура стали 20Г2С: *а, в, д* – ДОЭ-карты контрастов; *б, г, е* – ПЭМ,  $\times 5000$ ; *а, б* – исходное состояние; *в, г* – теплая ВЭ, поперечное сечение; *д, е* – теплая ВЭ, продольное сечение

Количественный анализ распределения ферритных зерен по размерам, представленный на (рис. 2,*а*), показал наличие зерен двух типов – крупных (10–30  $\mu\text{m}$ ) и мелких (1.5–10  $\mu\text{m}$ ) в обоих сечениях. При этом в продольном сечении число зерен, превосходящих 10  $\mu\text{m}$ , больше, чем в поперечном сечении.



**Рис. 2.** Количественные данные структурного анализа стали 20Г2С: *а* – частота распределения зерен по размерам: ■ – исходное состояние, ○ – ВЭ, поперечное сечение, Δ – ВЭ, продольное сечение; *б* – частота распределения фактора формы: ▨ – исходное состояние, ■ – ВЭ, поперечное сечение, ▩ – ВЭ, продольное сечение; *в* – распределение зерен по размерам в нормированных координатах: ■, □ – исходное состояние, зерна крупные и мелкие соответственно; ●, ○ – ВЭ, зерна крупные и мелкие соответственно; *з* – распределение углов разориентировок границ зерен: □ – исходное состояние, ● – ВЭ, поперечное сечение, Δ – ВЭ, продольное сечение

Анализ фактора формы также показал, что в продольном сечении преобладают вытянутые зерна (с фактором формы, равным 2), в то время как в поперечном сечении – равноосные (рис. 2,б). Это свидетельствует о неоднородности структуры в обоих сечениях образцов малоуглеродистой стали, подвергнутых тепловой ВЭ, которая должна сказаться на механических характеристиках при дальнейшей деформации.

Статистический анализ данных по размерам зерен двух групп (менее 10 и более 10  $\mu\text{m}$ ) в нормированных координатах дает представление о механизмах формирования структуры при тепловой ВЭ (рис. 2,в). Выбор такого разделения зерен по размерам обусловлен тем, что по результатам работы [10] для развития механизма зернограницного проскальзывания необходимым критерием является

наличие равноосных зерен, не превосходящих 10  $\mu\text{m}$ . Из рис. 2,б видно, что в исходном состоянии крупные и мелкие зерна имеют схожее распределение. После деформации в отличие от распределения мелких зерен таковое для крупных зерен изменяется существенно, так как возрастает удельная доля зерен с размером меньше среднего, что свидетельствует о протекающем процессе фрагментации больших зерен. Неизменность характеристик распределения мелких зерен свидетельствует о зернограницном проскальзывании в ходе теплой ВЭ.

На рис. 2,г представлено распределение углов разориентировок границ зерен, из которого видно, что при теплой ВЭ, наряду с формированием высокой удельной доли малоугловых границ зерен, также формируется значительная доля большеугловых границ. Из рисунка видно, что количество последних при теплой ВЭ практически сравнимо с их долей в отожженном состоянии. Эти данные свидетельствуют об активных процессах как фрагментации, так и полигонизации. Метод ДОО позволяет провести количественный анализ распределения рекристаллизованных зерен [7]. Так, их доля в исходном состоянии составляет 30%, а после теплой ВЭ – 7.5% (поперечное сечение) и 5% (продольное сечение). В силу того, что деформацию осуществляли при температуре гораздо ниже порога рекристаллизации в стали, наличие рекристаллизованных зерен после теплой ВЭ свидетельствует о протекании динамической рекристаллизации [9].

Согласно данным работы [8] теплая ВЭ приводит к снижению интенсивности текстурных максимумов и размытию текстуры в поперечном сечении. Результаты исследования текстурированности в продольном сечении показали, что теплая ВЭ вызывает снижение интенсивности текстурных пиков. В целом это позволило провести реконструкцию структуры в объеме и установить, что при теплой ВЭ формируются вытянутые мелкодисперсные зерна, расположенные под углом 30–60° к оси экструзии.

Обнаруженные структурные особенности позволили повысить прочность материала в 1.5 раза с сохранением высокого уровня пластичности (рис. 3). Установлено, что при последующем деформировании методом осадки вдоль направления экструзии наблюдается традиционное поведение кривой упрочнения, в то время как при деформации поперек направления экструзии кривая упрочнения идет более полого (рис. 3, кривая 2). Этот факт обусловлен, вероятно, проявлением эффекта Баушингера, а также особенностями структуры, сформированной при ВЭ.

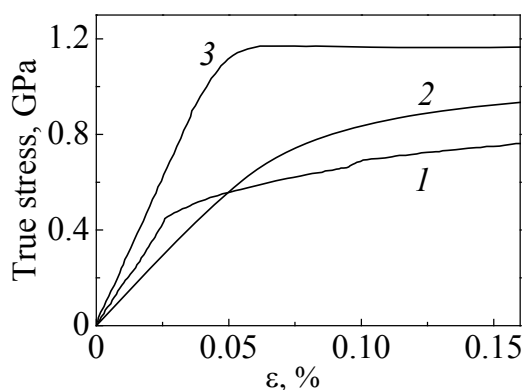


Рис. 3. Зависимость напряжения от деформации стали 20Г2С при испытаниях на осадку: 1 – исходный образец; 2, 3 – ось ВЭ соответственно перпендикулярна и параллельна оси осадки

### Выводы

В работе показано, что теплая ВЭ приводит к фрагментации структурных составляющих малоуглеродистой стали: феррита и перлита. Зерна феррита после деформации измельчаются в 3 раза (с 15 до 5  $\mu\text{m}$ ) и характеризуются значительной удельной долей большеугловых границ. Структура отличается разнотельностью, т.е. наличием зерен двух типов – крупных (10–30  $\mu\text{m}$ ) и мелких (1.5–10  $\mu\text{m}$ ). При этом наблюдается неоднородность структуры, в продольном сечении преобладают вытянутые зерна (с фактором формы, равным 2), в поперечном – равноосные.

Показано, что в процессе деформации теплой ВЭ структура малоуглеродистой стали формируется под действием поэтапного развития механизмов динамической рекристаллизации и полигонизации, зернограничного проскальзывания, фрагментации.

Установлено, что повышение прочности материала в 1.5 раза (с сохранением высокого уровня пластичности) связано со структурными особенностями, сформированными теплой ВЭ.

Автор выражает глубокую благодарность д.т.н. Е.Г. Пашинской, к.ф.-м.н. Н.Н. Белоусову, В.В. Бурховецкому, Ф.И. Глазунову за помощь в проведении экспериментов и обсуждение результатов и отдельную благодарность – д.т.н. С.В. Добаткину за предоставленный материал для исследований.

Работа выполнена при поддержке гранта НАН Украины для молодых ученых «Особенности формирования субмикроструктурной структуры, текстуры и свойств малоуглеродистой стали, полученной винтовой экструзией» № 0113U003684.

1. Р.З. Валиев, И.В. Александров, Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией, Логос, Москва (2000).
2. Е.Г. Пашинская, Физико-механические основы измельчения структуры при комбинированной пластической деформации, Вебер, Донецк (2009).
3. Y. Estrin, A. Vinogradov, Acta Mater. **61**, 782 (2013).
4. С.В. Добаткин, П.Д. Одесский, Р. Пиппан, Г.И. Рааб, Н.А. Красильников, А.М. Арсенкин, Металлы № 1, 110 (2004).
5. Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин, Д.В. Орлов, С.Г. Сынков, Винтовая экструзия – процесс накопления деформаций, ТЕАН, Донецк (2003).
6. Е.Г. Пашинская, М.М. Мышляев, С.Ю. Миронов, В.Н. Варюхин, ФММ **105**, № 1, 86 (2008).
7. Е.Г. Пашинская, В.Н. Варюхин, А.В. Завдоев, В.В. Бурховецкий, В.А. Глазунова, Деформация и разрушение материалов № 6, 35 (2012).
8. Е.Г. Пашинская, А.В. Завдоев, Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. Сборник научных трудов **13**, № 1, 134 (2012).

9. E. Pashinska, V. Varykhin, S. Dobatkin, A. Zhdovtsev, Emerging Materials Research 2, issue EMR3, 139 (2013).
10. О.А. Кайбышев, Ф.З. Утяшев, Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка труднодеформируемых сплавов, Наука, Москва (2002).

A.V. Zhdovtsev

## FEATURES OF FORMATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF LOW-CARBON STEEL AFTER WARM TWIST EXTRUSION

The new developing technologies of metal formation based on simple shear are called severe plastic deformation (SPD). Their advantage is that they allow obtaining materials with unique complex properties combining high strength and plasticity as distinct from classical methods of metal forming. Numerous structural studies have been carried out for SPD-processed materials, such as Al, Ti, Cu and their alloys. Such complex systems as steels have not been adequately investigated because of labor intensive deformation processes. However, the studies are in progress. Due to insufficient knowledge of the structural changes occurring in low-carbon steels during SPD, there is a need for a more detailed consideration by modern methods. Thus, electron backscattered diffraction is a relatively new method, which allows a detailed study of the structure of metals. The paper discusses the characteristics of the formation of structure and texture of low-carbon steel subjected to warm twist extrusion (TE).

As the SPD, warm TE was applied at the temperature of 400°C. It should be noted that after warm deformation of low carbon steel, recrystallized ferrite grains are observed in the material. Qualitative and quantitative analysis of statistics shows effective influence of the twist extrusion on the structure of steel. Electron backscattering diffraction demonstrates that the warm TE increases the structure isotropy, results in significant fragmentation and activation of the mechanisms of dynamic polygonisation and recrystallization, grain boundary sliding. These structural features have led to hardening of the material in 1.5 times, with maintaining a high level of plasticity.

**Keywords:** electron backscattering diffraction, structure, texture, high angle boundaries, twist extrusion, dynamical recrystallization, mechanical properties.

**Fig. 1.** Microstructure of low-carbon steel 20G2S: *a, e, d* – EBSD maps of band contrast; *b, z, e* – TEM,  $\times 5000$ ; *a, b* – the initial state; *e, z* – warm TE, cross section; *d, e* – warm TE, longitudinal section

**Fig. 2.** Data of the structure analysis of low-carbon steel 20G2S: *a* – size distribution of grains: ■ – initial state, ○ – TE, cross section, △ – TE, longitudinal section; *b* – aspect ratio of grains: ▨ – initial state, ■ – TE, cross section, ▨ – TE, longitudinal section; *e* – size distribution of grains in normalized coordinates: ■, □ – initial state, big and small grains accordingly; ●, ○ – TE, big and small grains, respectively; *z* – misorientation angle distribution of grain boundaries: □ – initial state, ● – TE, cross section, △ – TE, longitudinal section

**Fig. 3.** Stress-strain curve for low-carbon steel 20G2S, upsetting tests: 1 – initial state; 2, 3 – TE axis is perpendicular and parallel to the axis of upsetting, respectively