

В.З.Куцова*, А.Ю.Путноки**, В.Г.Иванченко***, Т.В.Котова *

СПОСОБНОСТЬ К ГЛУБОКОЙ ВЫТЯЖКЕ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА УЛЬТРАНИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ ГОРЯЧЕКАТАНОЙ СТАЛИ

* *Национальная металлургическая академия Украины,*

** *ОАО «Запорожсталь»,* *** *Институт черной металлургии НАН Украины*

Целью данных исследований является установление особенностей формирования микроструктуры и способности к глубокой вытяжке полос ультранизкоуглеродистой стали 01ЮТА, прокатанной в аустенитной области температур. Установлено, что сталь 01ЮТА имеет очень хорошую способность к глубокой вытяжке, что объясняется преобладанием в ее структуре малоугловых границ и формированием двойниковых границ $\Sigma 3$ $60^\circ \langle 111 \rangle$.

Ультранизкоуглеродистая сталь, аустенитной области температур, деформация, ферритная структура, глубокая вытяжка

Состояние вопроса и анализ публикаций. Горячая обработка давлением всегда предшествует холодной и теплой обработке давлением, или является самостоятельной технологической операцией формообразования разных изделий. При горячей обработке разделяют структурные изменения непосредственно в очаге деформации и при выходе из очага, когда металл еще остается горячим. На любой стадии деформации металл имеет повышенную плотность дислокаций и связанную с ней энергию, которая служит термодинамическим стимулом обновляющих процессов после окончания деформации [1]. Пластическое деформирование стали в аустенитном состоянии сопровождается двумя конкурирующими процессами: значительным увеличением плотности дислокаций, которые вызывают упрочнение (горячий наклеп), и перестройкой этих дислокаций (разупрочнение стали). Наклеп возникает в ходе горячей деформации, разупрочнение – при деформации и после нее. Структурные и субструктурные изменения в стали представляют собой сложный комплекс процессов, которые накладываются один на другой [2].

Для получения удовлетворительной структуры необходимо, чтобы в конце прокатки металл находился в области температуры однофазной аустенитной структуры, т.е. выше температуры превращения $A_{\gamma 3}$. Эта температура зависит в основном от химического состава и скорости охлаждения металла, и для низкоуглеродистых сталей находится в пределах $835\text{--}860^\circ\text{C}$. При температурах конца прокатки полос выше температуры $A_{\gamma 3}$ конечная структура металла всегда однородна и состоит из зерен феррита 7,8,9 номеров [3, 4].

IF–сталь (без атомов внедрения) широко применяется в автомобилестроении промышленно развитых стран благодаря высокой штампуемости, которая достигается за счет низкого содержания углерода и азота [5].

На способность стали к глубокой вытяжке, как известно, большое влияние оказывает значение σ_T/σ_B [6].

Межкристаллитные границы являются важной характеристикой поликристаллических материалов, от структуры и свойств которых зависят свойства материала в целом. Границы зерен существенно влияют на структурообразование, способность к деформации, пластичность, и другие свойства, которые отвечают за поведение металла как в процессе технологических переделов, так и в условиях эксплуатации готовых изделий. Внутренние поверхности раздела определяют многие эксплуатационные свойства (механические – прочность, пластичность), играют большую роль при рекристаллизации (увеличении угла разориентировки между субзернами и их превращению в зерна), от них зависит качество материала, его надежность и долговечность. Многие физические свойства зависят от числа и строения межзеренных границ. Важной характеристикой границ является их подвижность, определяющая кинетику рекристаллизации [7, 8].

Известна роль границ зерен в поведении металла при воздействии на него внешних факторов. Граница зерна – тонкий слой с искаженным строением. Приграничные объемы – также искаженные зоны, но имеющие протяженность в глубь зерен, стыкающихся по данной границе. Приграничные объемы оказывают значительное влияние на многие важные свойства металлов и сплавов. Неоднородность по составу, диффузия, рекристаллизация, рост зерен – эти и многие другие явления, обусловленные влиянием приграничных зон, определяют их большую роль в процессах структурообразования и в формировании структурно чувствительных свойств. Строение приграничных объемов определяется углом разориентировки стыкующихся зерен [9].

Для совершенствования представлений о некоторых процессах, происходящих в твердых телах, используют новую методику автоматического анализа картин дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD–анализ), позволяющую определять локальные ориентировки кристаллитов, поскольку знания о разориентации зерен, плоскостям прохождения границ являются исходным условием для анализа структуры [10].

В литературе практически отсутствуют данные о существовании специальных границ в дозвлектоидном феррите низкоуглеродистых сталей. Исключением является работа [11], в которой впервые установлено наличие специальных низкоэнергетических границ в ферритной составляющей малоперлитных сталей 12ГФ, 06Х1 и Ст3 на основании исследований их зернограничной структуры методами световой микроскопии. Таким образом, изучение тонкой структуры феррита с целью управления процессами структурообразования для создания металлопроката с высоким комплексом механических свойств является актуальной задачей.

Цель работы – установить особенности формирования микроструктуры по сечению полос ультранизкоуглеродистой стали 01ЮТА, проката-

ной в аустенитной области температур, составить представления о природе границ зерен, а также определить влияние этих факторов на способность данного материала к глубокой вытяжке.

Методика исследования. Объектом исследования являются карточки ультранизкоуглеродистой стали 01ЮТА толщиной 3,5 мм, химический состав которой приведен в таблице 1. Температурно–деформационный режим прокатки стали 01ЮТА представлен в таблице 2. Нагрев металла перед прокаткой проводили в электрической печи ТИП СНОЛ 1,62,51/11–И2 до температуры аустенизации (1000°C) на протяжении 5 минут со скоростью $190^{\circ}\text{C}/\text{мин}$, время выдержки составляло 2–4 сек. Образцы вынимали из печи и осуществляли прокатку на лабораторном одноклетьевом стане ДУО 280 за один проход (скорость прокатки 1,4 м/с). Карточки после обработки охлаждали на воздухе.

Таблица 1. Химический состав стали 01ЮТА

Содержание элементов, % (по массе)											
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	N ₂	Ca
0,002	0,12	0,01	0,006	0,011	0,01	0,01	0,02	0,05	0,062	0,005	0,0002

Таблица 2. Температурно–деформационный режим прокатки стали 01ЮТА

T _{нагр} , $^{\circ}\text{C}$	T _{пр} , $^{\circ}\text{C}$	h ₀ , мм	h, мм	Δh , мм	ϵ , %	$\Sigma\epsilon$, %
1000	970–980	3,5	2,21	1,29	36,8	36,8

Примечания: T_{нагр} – температура нагрева листовой стали; T_{пр} – температура прокатки листовой стали; h₀– исходная толщина образца; h– толщина образца после обжатия металла; Δh – абсолютное обжатие металла; ϵ – относительная степень деформации металла; $\Sigma\epsilon$ – суммарная степень деформации металла.

Размер зерен феррита измеряли с помощью микроскопа «Neophot–21» методом случайных секущих [12], а также с помощью компьютерного обеспечения – программы Adobe Photoshop CS2. Измерение механических свойств осуществляли с помощью универсальной машины «Инстрон» на образцах, вырезанных вдоль направления прокатки.

Пространственное распределение ориентировок элементов структуры проводили в сканирующем растровом электронном микроскопе JEOL JSM–6490 при увеличении 500 крат методом автоматического анализа картин дифракции обратно рассеянного пучка электронов (EBSD–анализ) с использованием Кикучи–линий. Механическая шлифовка и полировка образцов сопровождается пластической деформацией поверхностных слоев. Для устранения деформационного слоя с поверхности образца использовали электролитическую полировку в реактиве: 15% хлорной кислоты + 85% уксусной кислоты при температуре раствора 8–15 $^{\circ}\text{C}$ и напряжении 12,5 V, с последующей промывкой в дистиллированной воде и этиловом спирте.

Изложение основных материалов исследования

Микроструктура стали 01ЮТА после обработки по режиму с выдержкой при 1000°C) и прокаткой в области однофазной аустенитной структуры со степенью деформации 36,8% (рисунок 1, а, б) характеризуется наличием островной разноструктурности: отдельные очень крупные зерна или группы очень крупных зерен неупорядоченно расположены по объему полосы; величина зерна феррита вдоль направления прокатки составляет 40–160 мкм по всему сечению полосы, поперек направления прокатки размер зерна феррита 30–240 мкм. Некоторые зерна имеют вытянутую форму с соотношением осей 1:3 (1: 2) (рис. 1, в, г).

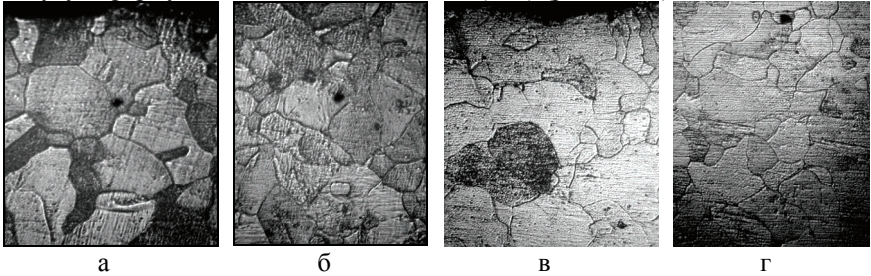


Рис. 1. Микроструктура стали 01ЮТА в поверхностной (а, в) и центральной (б, г) зонах полосы, вдоль (а, б) и поперек (в, г) направления прокатки, $\times 200$

После прокатки по указанному режиму сталь 01ЮТА приобретает следующие механические свойства: предел прочности составляет 240 МПа, предел текучести 140 МПа, твердость 62 HRF. Низкое значение отношения $\sigma_T/\sigma_B \sim 0,6$ говорит о том, что сталь имеет значительный ресурс пластичности и лист при штамповке будет хорошо пластически деформироваться. Согласно данным работы [6], значения отношения $\sigma_T/\sigma_B \approx 0,65$ можно практически достигнуть лишь в дрессированных листах толщиной более 0,8 мм (после холодной прокатки). Данными исследованиями показано, что значения отношения $\sigma_T/\sigma_B \approx 0,65$ можно достигнуть при прокатке листовой ультранизкоуглеродистой стали 01ЮТА толщиной 2,2 мм в области температур аустенитного состояния.

В результате сканирования исследуемой поверхности пучком электронов и формирования дифракционной Кичучи–картины с каждой из точек сканирования получена информация о распределении границ зерен по углам разориентировки, выявлены содержание и номенклатура специализированных границ. Гистограмма распределения границ зерен по углам разориентировки в структуре образца стали 01ЮТА (рис.2) характеризуется наличием острого пика в районе угла разориентировки около 2° и свидетельствует о безусловном преобладании малоугловых границ, содержание которых в структуре составляет $\sim 90\%$.

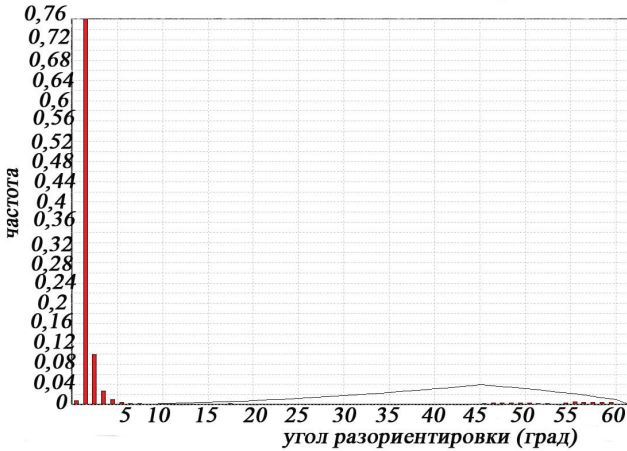


Рис.2. Гистограмма распределения границ зерен по углам разориентировки в структуре центральной зоны образца стали 01ЮТА. Распределение приведено по длине границ

Если два зерна, разориентированные по отношению к общим для обоих зерен кристаллографическим осям поворота, образуют границу, то часть атомов этих зерен может оказаться на общей «сверхрешетке» – решетке совпадающих узлов (PCY). Большеугловые границы с определенным количеством мест совпадения являются специальными. Они имеют упорядоченную структуру со своим периодом и особыми свойствами, характеризуются высокой плотностью совпадающих узлов и пониженной энергией. Строение специальных границ фасетчатое, фасетки имеют определенную ориентировку вдоль зернограничных плоскостей с низкой энергией [2].

Двойниковые границы наиболее известны среди высокоугловых специальных границ. Двойниковая граница $\Sigma 3$ – уникальный тип PCY. Она не только характеризуется максимальной плотностью совпадающих узлов (каждый третий узел является общим) и минимальной энергией высокоугловых границ, но и созданными своими собственными механизмами деформации или двойникового роста. Двойниковые границы, наряду с границами зерен, влияют на предел текучести и предел прочности. Двойниковые границы имеют совершенное строение. Такая граница обеспечивает значительное сцепление кристаллов (имеет низкую энергию). Чем более часто встречаются такие места в границе, тем ниже ее энергия [13].

Ориентация между двумя кристаллографическими координатными системами может быть определена парной системой обозначений угло–ось θ [uvw]. Одна координатная система может быть наложена на другую путем поворота на угол θ вокруг общей оси [uvw], т.к. ось поворота и направление [uvw] совпадают в обеих координатных системах. Парную

систему обозначений угол–ось используют при разориентации границы зерна. Две взаимопроникающие решетки могут быть выравнены путем единственно возможного поворота вокруг общей оси $[uvw]$ на угол θ . На рисунке 3 двойниковые границы представлены общим $[111]$ направлением и углом вращения 60° .

Анализ рис.3 показывает, что после прокатки в аустенитной области температур в структуре образца стали 01ЮТА сформировались специальные двойниковые границы $\Sigma 3 \ 60^\circ \langle 111 \rangle$, концентрация которых составляет 0,813%.

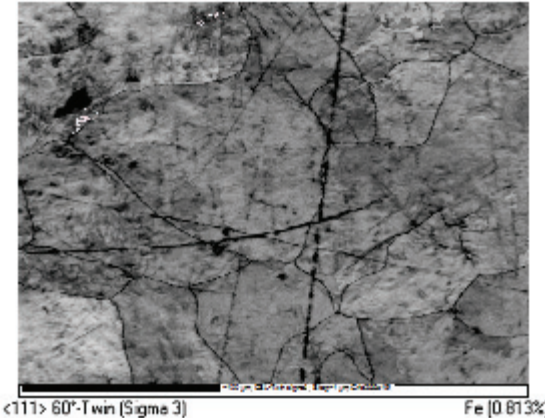


Рис. 3. Специальные границы зерен (двойниковые границы) $\Sigma 3 \ 60^\circ \langle 111 \rangle$, которые накладываются на изображение структуры центральной зоны образца стали 01ЮТА

Выводы.

1. Структура исследованных горячекатаных образцов стали 01ЮТА характеризуется наличием островной разнотерности, данные EBSD-анализа свидетельствуют о доминировании в структуре образца малоугловых границ и формировании специальных двойниковых границ $\Sigma 3 \ 60^\circ \langle 111 \rangle$, содержание которых составляет 0,813%.

2. Проведенные испытания механических свойств показали, что сталь 01ЮТА, деформированная в аустенитной области температур, имеет очень хорошую способность к глубокой вытяжке, что объясняется преобладанием в ее структуре малоугловых границ и формированием двойниковых границ.

1. *Новиков И.И.* Металловедение, термическая обработка и рентгенография. [учеб. для вузов] / И.И.Новиков, В.Б.Строганов, А.И.Новиков – М.: МИСИС, 1994. – 480 с.
2. *Губенко С.И.* Деформация металлических материалов / С.И.Губенко, В.В.Парусов – Днепропетровск: Арт-пресс, 2006. – 316 с.
3. *Иванченко В.Г.* Температурно-деформационные режимы окончания прокатки, охлаждения и смотки горячекатаных полос / В.Г.Иванченко // В сб. науч. труд. «Технология прокатки и отделки широкополосной стали». – М.: Металлургия. (МЧМ СССР). – 1981. – № . – С.29–31.

4. *Оптимизация* технологии производства стали 08Ю с содержанием углерода менее 0,03% / Г.А.Куницын, А.П.Буданов, В.Л.Корнилов [и др.] // *Металлург.* – 2007. – №1. – С.57–59.
5. *Титов В.* Стальной прокат для автомобильной промышленности за рубежом / В. Титов // *Национальная металлургия.* – 2004. – №5. – С. 84–89
6. *Дедек Вл.* Полосовая сталь для глубокой вытяжки / В.Дедек. – М.: Металлургия, 1970. – 208 с.
7. *Структура* межкристаллитных и межфазных границ / [В.М.Косевич, В.М.Гевлев, Л.С.Палатник, А.И.Федоренко]. – М.: Металлургия, 1980. – 256 с.
8. *Копецкий Ч.В.* Границы зерен в чистых материалах / Ч.В.Копецкий, А.Н.Орлов, Л.К.Фионова. – М.: Наука, 1987. – 160 с.
9. *Грабский М.В.* Структура границ зерен в металлах / М.В.Грабский. – М.: Металлургия, 1972. – 160 с.
10. *Анализ* пространственного распределения ориентировок элементов структуры поликристаллов, получаемого методами просвечивающей электронной микроскопии и обратно рассеянного пучка электронов в сканирующем электронном микроскопе / С.Ю.Миронов, В.Н.Даниленко, М.М.Мышляев [и др.] // *Физика твердого тела.* – 2005 – Т.47, Вып. 7. – С.1217–1225.
11. *Специальные* границы и множественные стыки в дозвектоидном феррите низкоуглеродистых сталей / В.И.Большаков, Г.Д.Сухомлин, Д.В.Лаухин. // *Theoretical Foundation of Civil Engineering: Polish–Ukrainian–Lithuanian Transactions.* – Warsaw, 2007. – V.15. – P.73 – 80.
12. *Салтыков С.А.* Стереометрическая металлография / Саркис Андреевич Салтыков. – [3-е изд.]. – М.: Металлургия, 1970. – 376 с.
13. *Русаков Г.М.* Трансляционная симметрия и энергия специальных границ зерен / Г.М. Русаков // *Фазовые и структурные превращения в сталях: Сб. научных трудов.* – 2001. – Вып. 2. – С. 242–290.

*Статья рекомендована к печати
докт.техн.наук И.Ю.Приходько*

В.З.Куцова, О.Ю.Путнокі, В.Г.Іванченко, Т.В.Котова

Здатність до глибокого витягання, структура та властивості ультранізьковуглецевої гарячекатаної сталі

Метою дослідження є встановлення особливостей формування мікроструктури, властивостей, та на здатність до глибокого витягання штаб ультранізьковуглецевої сталі 01ЮТА, що прокатана в аустенітній області температур. Встановлено, що сталь 01ЮТА має дуже добру здатність до глибокого витягання, що пояснюється переважним вмістом в її структурі малокутових границь, та формуванням двійникових границь $\Sigma 360^\circ \langle 111 \rangle$.