

$a/2[01\bar{1}] + a/2[101] = a/2[110]$, сопровождающейся выигрышем упругой энергии. Из рис. 4 видно, что в местах пересечения трех параллельных плоскостей (011) (на фотографии расположены горизонтально) с дислокациями других систем обнаруживаются скопления хаотически расположенных дислокаций, которые по мере увеличения деформации расширяются к поверхности пластинки и формируют упорядоченный устойчивый к отжигу ансамбль сидячих дислокаций [12], занимающий практически весь объем продеформированного кристалла. Эффективности протекания дислокационных реакций в кристаллах типа D по сравнению с деформированными сжатием монокристаллами, на наш взгляд, их меньшей подвижностью, в результате чего дислокационные реакции между непараллельными дислокациями успевают произойти. Можно сделать вывод, что при анализе возможности протекания дислокационных реакций кроме энергетического критерия Франка [1] и гибкости дислокационных линий необходимо учитывать ещё и временной фактор.

Список литературы

1. Дж. Фридель. Дислокации // М.: Мир.-1977, 644 с.
2. Ф.Р.Н.Набарро, З.С.Базинский, Д.Б.Холт. Пластичность чистых монокристаллов // М.: Металлургия.- 1967, 214 с.
3. В.В.Демченко, Я.А.Струк, А.А.Урусовская // Кристаллография.- 1990.-Т.35.- С.1187.
4. V.P.Matsokin, V.I.Kibets, A.B.Maznichko // Functional Materials.- 1994.- V. 1, N.1.- P.68.
5. D.V.Matsokin, I.N.Pakhomova, V.P.Matsokin // Functional Materials.- 2005.- V. 12, N.4.- P. 652.
6. G.N.Ahlquist, W.D.Nix // Acta Metallurgica.- 1971.- V.19.-P. 373.
7. В.М.Розенберг // Металловедение и термическая обработка.- 1973.- Т.6.- С. 89.
8. J.J.Gilman // Acta Metallurgica.- 1959.- V.7.- P. 608.
9. В.Ф.Гайдученя, О.С.Горбач, М.П.Шаскольская // Сб.: Динамика дислокаций. 1968.- Харьков, ФТИИТ.- С. 129.
10. V.P.Matsokin, I.N.Pakhomova, // Functional Materials.- 2006.- V. 13, N.4.- P. 600.
11. Д.В.Мацоккин, И.Н.Пахомова // Вісник Харківського національного університету.- 2005.- № 651, Серія "Фізика", в. 8.- С. 136.
12. В.П.Мацоккин // УФЖ.- 1969.- Т.14.- С. 431.

УПРОЧНЕНИЕ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПУТЕМ СОЗДАНИЯ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ АККУМУЛИРУЕМОЙ ПРОКАТКОЙ С СОЕДИНЕНИЕМ

Рудской А. И., Коджаспиров Г. Е., Сосин Д. В., Сосин С. В.

Развитие нефтегазовой отрасли увеличивает требования к прочности трубопроводов для транспортировки нефти и газа, что определяет приоритетное направление развития отечественной металлургии. На сегодняшний день наибольшее применение, для изготовления нефте- и газопроводов, получили высокопрочные низколегированные малоуглеродистые стали типа HSLA. На протяжении многих лет наблюдается постоянный рост требований к комплексу механических и технологических свойств труб и соответственно стали для их изготовления. Одним из наиболее перспективных путей повышения качества листовой стали, предназначенной для изготовления газо- и нефтепроводных труб, является создание ультрамелкозернистой структуры готового проката, кото-

рая обеспечивает достижение сочетания высокой прочности и сопротивления хрупкому разрушению.

На сегодняшний день наиболее развитыми способами изготовления листовой стали являются высокотемпературная термомеханическая обработка (ВТМО) и контролируемая прокатка (КП) [1,2].

В настоящей работе рассматривали возможность получения ультрамелкозернистой структуры в листе с помощью аккумулируемой прокатки с соединением – accumulative roll-bonding – ARB (разновидности многопроходной пакетной прокатки – МПП). Применение данного метода позволило получить ультрамелкую, вплоть до нанокристаллической, структуру на алюминиевых, медных сплавах, а также сверхмалоуглеродистой стали типа IF [3].

В качестве исходного материала при проведении исследований использовали заготовку из стали марки 09Г2С промышленной выплавки производства ОАО «Северсталь». Химический состав стали (масс.%) приведен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав стали 09Г2С (масс. %)

C	Si	Mn	S	P	N ₂	Ti	V	Nb	Mo
0,10	0,64	1,53	0,005	0,01	0,009	0,004	0,003	-	0,005

Исходные заготовки для пакетной прокатки получали путем предварительного переката листа толщиной 8 мм до толщины 1 мм с последующим их отжигом при $T = 1000^{\circ}\text{C}$.

Пакетную прокатку образцов проводили на лабораторном однокательном двухвалковом прокатном стане с диаметром валков 210 мм при скорости прокатки 0,3 м/с.

Прокатку осуществляли по следующей схеме: два исходных образца, толщиной 1 мм каждый, складывали в двухслойный пакет, который нагревали при 600°C в течение 5 мин и далее прокатывали с обжатием $\epsilon = 50\%$. Прокатанную полосу разрезали пополам, затем складывали новый пакет, состоящий уже из 4 слоев. Полученный пакет вновь нагревали при 600°C и вновь прокатывали с тем же – 50%-ным обжатием. Далее вышеописанную процедуру повторяли до 5 проходов. В результате была получена полоса, состоящая из 32 слоев.

Во время прокатки, с помощью месдоз (номинальное значение усилия обеих – 30 тс, напряжение питающего тока $5,0 \pm 2,5$ В (1); $10,0 \pm 0,5$ В (2) измеряли давление прокатки в зависимости от числа проходов и, соответственно, количества слоев образца. Для снятия показаний с месдоз использовали цифровой двухканальный осциллограф Tektronix TDS 210, работающий в режиме реального времени.

На полученных образцах измеряли ушрение и вытяжку. Далее определяли средние значения микротвердости в разных частях по сечению полосы и производили оценку свариваемости слоев по сечению прокатанного образца.

Микроструктуру полученных в процессе МПП полос по мере увеличения количества слоев при фиксированной степени обжатия оценивали с помощью оптического микроскопа Zeiss[®] Axiovert 200MAT, оснащенного цифровой камерой PixeLINK с 1.9Мп матрицей. С помощью анализатора изображения Thixomei[®] Standard определяли размеры зерен по сечению образца*).

В табл. 2 приведены значения давления металла на валки, микротвердости, среднего размера зерна в зависимости от количества слоев образца. Установлено, что на первой стадии по мере увеличения количества слоев (от 2 до 4) происходит резкое возрастание давления прокатки. Дальнейшее возрастание числа слоев (от 4 до 8) приводит

*) Выполнено О.Е.Бодровой

к постепенному увеличению, а с 4 прохода (16 слоев), происходит незначительное уменьшение давления прокатки.

Таблица 2. Размер зерна, давление прокатки и механические свойства стали 09Г2С при аккумулируемой прокатке с соединением

Количество проходов	Количество слоев в образце	Микротвердость, НВ	Давление прокатки, МПа	Средний размер зерна, мкм
Исходное состояние		123		6,28
1-й проход	2 слоя	232	73,2	5,72
2-й проход	4 слоя	236	165,8	5,1
3-й проход	8 слоев	240	184,5	2,57
4-й проход	16 слоев	240	181,7	3,34
5-й проход	32 слоя	167	174,8	2,35

Аналогичная зависимость прослеживается и в изменении микротвердости по сечению образца (см. табл.2).

Структура образцов в исходном состоянии состоит из зерен со средним размером 6,28 мкм.

В результате экспериментов установили, что по мере увеличения числа проходов до трех происходит постепенное измельчение зерна, после 4-го прохода наблюдается небольшое увеличение размеров зерна, а в заключительном – 5-м проходе имеет место дальнейшее измельчение зерна (см. табл.2). Следует отметить, что уже в результате прокатки за 1 проход полученная структура имеет вытянутые вдоль направления прокатки зерна. По мере увеличения числа проходов вытянутость зерен возрастает. При этом в результате реализации прокатки за 5 проходов зерна измельчаются в 2,7 раза по сравнению с исходным состоянием и достигают размера 2,35 мкм (см. табл. 2). Судя по данным табл. 2 изменение давления прокатки хорошо коррелирует с изменением твердости. Однозначной зависимости вышеупомянутых характеристик от размера зерна не наблюдается, что можно объяснить протеканием сложных процессов эволюции в дислокационной субструктуре стали при различных режимах МПП.

Выводы

1. Аккумулируемая прокатка с соединением позволяет получить ультрамелкозернистую структуру в малоуглеродистой низколегированной стали.
2. Прочность листа из малоуглеродистой низколегированной стали возрастает в 1,9-2,0 раза в результате АПС с деформацией за 5 проходов.

Список литературы

1. Рудской А.И., Коджаспиров Г.Е. Перспективные технологии изготовления ультрамелкозернистого листа из малоуглеродистых низколегированных сталей типа HSLA и IF. В тр. 7-й Международной научно-технической конференции «Современные металлургические материалы, технологии и их использование в технике». С.-Петербург, 2006, с.53-63.
2. Коджаспиров Г.Е., Рудской А.И., Рыбин В.В. Физические основы и ресурсосберегающие технологии изготовления изделий пластическим деформированием. С.-Петербург, Наука, 2006, 350 с.
3. G.E.Kodjaspirov, A.I.Rudskoy, A.A.Naumov Application of accumulative rollbonding process for production ultra-fine grained IF steel sheets. Proc. of the 7-th International conference "High Technologies in Advanced Metal Science and Engineering", St.Petersburg, 2006, p.66-71.