

УДК 669.15-194:620.18

## ФОРМИРОВАНИЕ СУБЗЁРЕННОЙ СТРУКТУРЫ АУСТЕНИТА В СТАЛИ 10Г2ФБ ВО ВРЕМЯ ПОСЛЕДЕФОРМАЦИОННЫХ ПАУЗ

Д. В. Лаухин, д. т. н.

*ГВУЗ «Приднепровская государственная академия  
строительства и архитектуры»*

Одним из методов повышения механических и эксплуатационных свойств стали 10Г2ФБ является контролирование процесса деформации аустенита с целью достижения высокой плотности центров зарождения ферритной фазы, что обеспечивает значительное измельчение ферритного зерна после  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения. Центры зарождения феррита могут возникать как на границах аустенитных зерен, так и внутри зерна на границах двойников и полосах скольжения, образующихся в результате горячей деформации.

Для проверки теоретических исследований в работе были проведены серии экспериментов основными задачами, которых являлось:

- экспериментально определить влияние условий горячей деформации и длительности последеформационной выдержки на формирование зёрненной и полигонизованной структуры аустенита в высокотемпературной области;

- установить приемлемые параметры горячей прокатки в условиях «ММК им. Ильича», способные в листовом прокате из стали 10Г2ФБ повысить прочность при сохранении высокого уровня пластичности.

В Институте чёрной металлургии НАН Украины им. З. И. Некрасова проведены экспериментальные прокатки по исследованию влияния длительности последеформационных выдержек на развитие рекристаллизационных процессов при горячей деформации аустенита.

Материалом служила листовая сталь 10Г2ФБ, произведенная на «ММК им. Ильича» по ТУ14–100МКИ-02.

Изменение температуры контролировали при помощи оптического пирометра и хромель-алюмелевых термопар, зачеканенных в торцевые части исследуемых образцов.

Эксперимент проводили по следующей схеме: нагрев заготовки до температуры 1 050 °С; прокатка с деформацией, отвечающей суммарной деформации металла в черновой клети при контролируемой прокатке; пауза с охлаждением на воздухе, имитирующая длительность пребывания листового проката на обводном рольганге в течение 5; 15; 30; 60; 90; 120; 180 и 240 с; закалка в соленой воде (рис. 1).

Структуру металла изучали на шлифах, которые после подготовки обычным методом подвергали электрополировке с последующим двойным травлением. Зёрна аустенита выявляли по их ферритной окантовке вокруг мартенситной сердцевинки. Для этого составляли карту-схему расположения границ аустенитных зёрен с учётом расположения прослоек доэвтектоидного феррита.

Светооптические наблюдения показали, что пятисекундная выдержка перед закалкой фиксирует мартенситно-бейнитную структуру с высокой степенью дисперсности (рис. 2 а, б). Малоуглеродистый мартенсит имеет весьма

короткие рейки, что указывает на существование эффективных препятствий в аустенитной матрице, в которой они формируются, то есть межкристаллитных границ различных типов.

Во время охлаждения на воздухе в течение 15 с температура снижается в межкритическую область и, соответственно, по границам аустенитных зёрен появляются прослойки доэвтектоидного феррита (рис. 2 *з*), а после паузы 30 с они выявляются отчётливо (рис. 2 *д*, *е*).

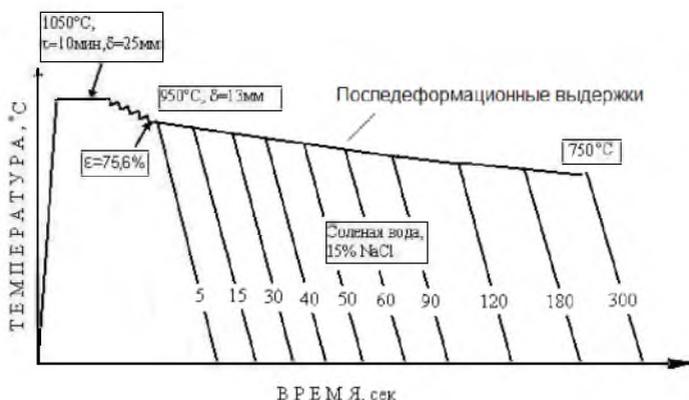


Рис. 1. Влияние длительности последеформационной паузы на формирование структуры и субструктуры стали 10Г2ФБ.

Кроме того, после выдержки на воздухе в течение 15 и более секунд наряду с указанными прослойками наблюдаются многочисленные мелкие, до 3 мкм в поперечнике отдельные зародыши ферритных кристаллов, располагающиеся группами по несколько десятков (пауза 15 с) и даже сотен (пауза 60 с) единиц. Можно полагать, что эти кристаллы-зародыши возникают на полигональных дислокационных границах, формирующихся во время динамической и статической полигонизации [1, 2, 3].

Более длительное (3 и 4 минуты) охлаждение на воздухе перед закалкой приводит к образованию более крупных, до 10...15 мкм в поперечнике, ферритных зёрен, являющихся избыточной фазой при распаде аустенита во время сравнительно медленного охлаждения на воздухе. Остаточный аустенит при закалке превращается в среднеуглеродистый мартенсит, содержащий до 0,5...0,8 % С, как показывает анализ относительного количества ферритной составляющей (рис. 3 *а*, *б*).

На основании количественного анализа определён размер зерна аустенита, которое формируется при динамической и последеформационной статической рекристаллизации после горячей прокатки доэвтектоидной малоуглеродистой стали при температурах аустенитной области выше точки  $A_{c3}$  (980...920 °С), а также при последующем частичном распаде аустенита в межкритическом интервале температур (рис. 4).

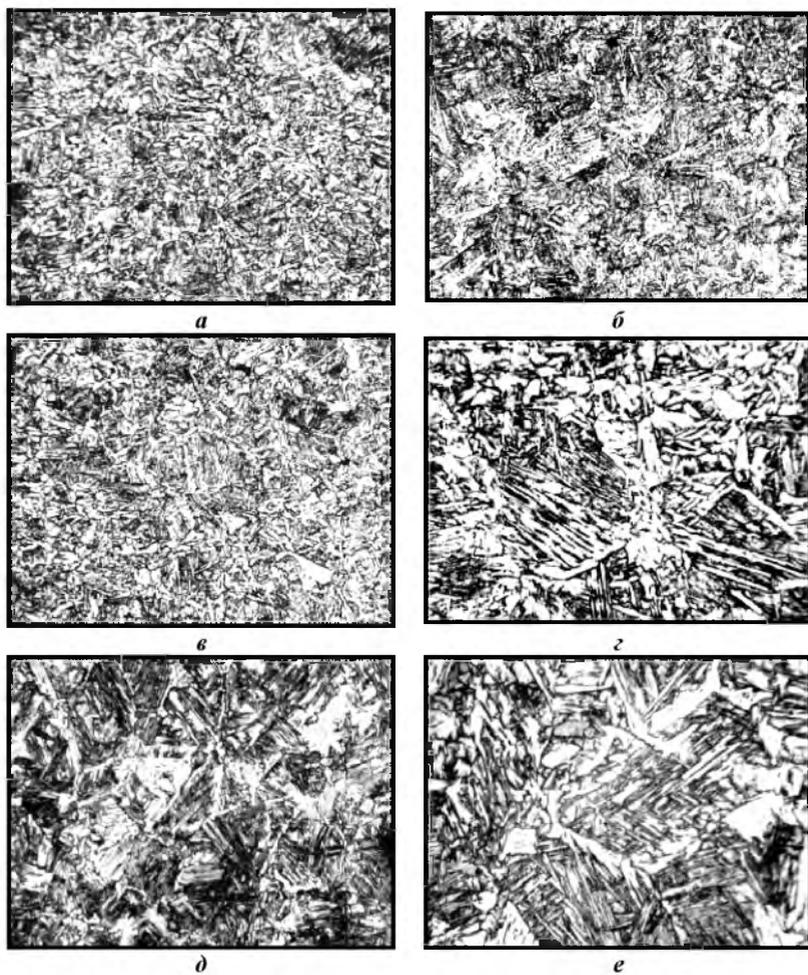


Рис. 2. Структура стали 10Г2ФБ после экспериментальной прокатки и закалки с предварительными выдержками на воздухе в течение:

*a, б* – 5 с; *в, г* – 15 с; *д, е* – 60 с;

*a, в, д*, –  $\times 500$ ; *б, г, е*, –  $\times 1250$ .

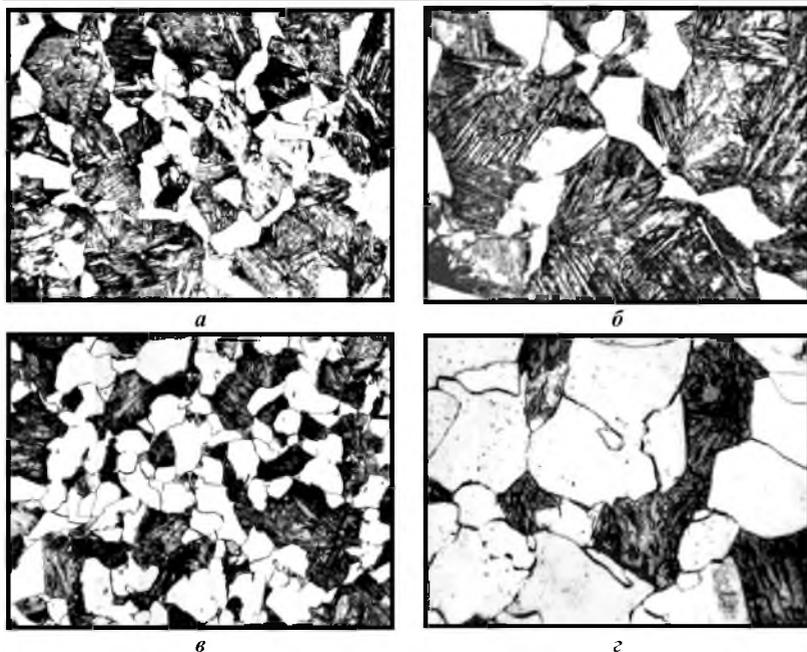


Рис. 3. Структура стали 10Г2ФБ после экспериментальной прокатки и закалки с предварительными выдержками на воздухе в течение: *а, б* – 120 с; *в, г* – 240 с; *а, в* –  $\times 500$ ; *б, г* –  $\times 1\ 250$ .

Анализ этих данных показывает, что новообразовавшиеся после окончания горячей деформации аустенитные зерна растут медленно и в течение первой минуты достигают среднего размера 20...30 мкм.

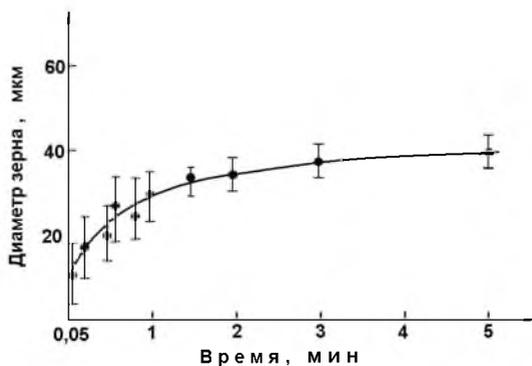


Рис. 4. Изменение размеров аустенитного зерна при различных последеформационных выдержках в аустенитной и двухфазной областях.

После двухминутной паузы средний размер зерна достигает 40 мкм и в дальнейшем остается на этом уровне. При этом следует учитывать, что рост зерен аустенита происходит под действием натяжения полигональных границ, разориентация которых с течением времени снижается. В результате понижается поверхностное натяжение и уменьшается движущая сила процесса роста зерен [4]. Дальнейшая стабилизация и прекращение роста  $\gamma$ -зерна связана с тем, что при снижении температуры до верхней критической точки начинается выделение доэвтектоидного феррита, который блокирует границы аустенита, препятствуя их перемещению и, таким образом, тормозит рост зерна.

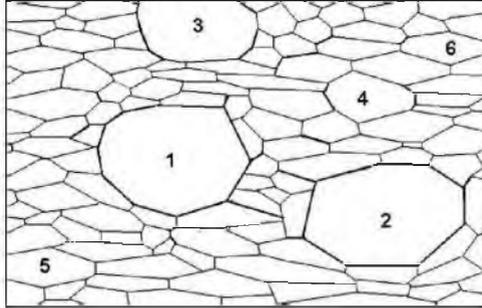


Рис. 5. Схематическое представление процесса полигонизации и последовательного роста рекристаллизованных зерен аустенита.

Анализ характера распределения и размеров ферритных зёрен показывает, что они выделяются в виде мельчайших кристалликов, размеры которых составляют около 2 мкм. Они располагаются группами, в виде протяжённых зон, вытянутых в направлении прокатки. Это позволяет предположить, что их зарождение происходит одновременно как на бывших и новообразовавшихся большеугловых границах, так и на дислокационных субграницах, сформировавшихся во время горячей деформации аустенита [5].

К моменту начала охлаждения (закалки) структура аустенита может быть представлена как скопление многочисленных субзёрен, разделённых полигональными границами, среди которых располагаются отдельные, сравнительно крупные кристаллиты зёрна (№ № 1, 2, 3 на рис. 5), ограниченные большеугловыми границами. Они являются субзёрнами, укрупнившимися путём коалесценции по механизму Ли [6]. Некоторые из них (№ № 4, 5, 6 на рис. 5) являются потенциальными зародышами феррита, поскольку имеют повышенное количество граней (более шести), что является условием для увеличения размеров таких субзёрен.

Результаты показывают, что в аустените после горячей деформации некоторое время существует высокодисперсная субструктура в виде полигональных малоугловых границ, служащая основой для гетерогенного зарождения зёрен доэвтектоидного феррита.

Если создать условия для сохранения такой полигонизованной субструктуры, то она может способствовать общему измельчению конечной

$\alpha$ -зёрной структуры и повышению как прочностных, так и пластических свойств готового проката.

Основной идеей, которая может быть положена в основу разработки технологического режима, повышающего прочностные свойства готового проката без существенного понижения пластических характеристик, является принцип сохранения тонкой структуры горячедеформированного аустенита, формирующейся к моменту окончания процесса деформации в черновой клетке прокатного стана.

Это может быть осуществлено путём регулируемого охлаждения после деформации в черновой клетке, так как в дальнейшем мелкая структура полигонизованного аустенита порождает во время  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения мелкое ферритное зерно, с которым металл поступает на последующую горячую деформацию в чистовой клетке. Во время чистовой прокатки формируется новая, еще более дисперсная окончательная структура и субструктура деформированного феррита, ответственного за прочностные и пластические характеристики готового изделия.

Другой путь измельчения и фиксации субструктуры аустенита – снижение температуры прокатки путём увеличения количества проходов в черновой клетке. Это позволит, с одной стороны, увеличить количество дефектов кристаллической решётки аустенита при горячей деформации, а с другой – зафиксировать требуемое структурное состояние снижением температуры конца прокатки, и удержать это состояние вплоть до начала выделения доэвтектоидного феррита.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Бернштейн М. Л. Термомеханическая обработка стали / М. Л. Бернштейн, В. А. Займовский, Л. М. Капусткина. – М. : Metallurgia, 1983. – 480 с.
- 2 Мак Лин Д. Границы зерен в металлах. / Мак Лин Д. [пер. с англ. М. Л. Бернштейна, А. Г. Рахштадта]. – М. : Metallurgizdat, 1960. – 322 с.
- 3 Wang J. P. Grain refinement and microstructural evolution of grain boundary allotriomorphic ferrite/granular bainite steel after prior austenite deformation / J. P. Wang, Z. -G. Yang, B. Z. Bai, H. S. Fang // Materials Science and Engineering A. – 2004. – Vol. 369. – P. 112–118.
- 4 Исследование влияния предварительной аустенитизации, горячей деформации и последующего охлаждения на структурообразование игольчатого феррита и механические свойства толстолистного проката из сталей 09Г2С и 10Г2ФБ / В. И. Большаков, Г. М. Ворбьев, Г. Д. Сухомлин та ін. // Новини науки Придніпров'я. – 2003. – №6. – С. 11–19.
- 5 Зеренная и субзеренная структура аустенита, формирующаяся в толстолистовом прокате из стали 10Г2СФБ при высокотемпературной деформации / В. И. Большаков, Д. В. Лаухин, А. В. Мурашкин та ін. // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Днепропетровск, 2006. – Вып. 36, Ч. 1. – С. 96–103.
- 6 Li J. C. M. Possibility of subgrain rotation during recrystallization / J. C. M. Li // Journal of Applied Physics. – 1962. – V. 33(10) – P. 2958–2965.