

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МАРТЕНСИТНО-АУСТЕНИТНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ Х65 ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ И СВАРКЕ \*

А.И. Гордиенко, М.Н. Волочаев, А.Г. Маликов, А.Д. Панюхина

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия*

С помощью просвечивающей электронной микроскопии исследованы особенности формирования мартенситно-аустенитной (М-А) составляющей в структурах стали Х65 после поперечно-винтовой прокатки и лазерной сварки. Выделены четыре основных типа М-А-составляющей в структурах. После термомеханической обработки в условиях малых скоростей охлаждения в стали Х65 формируется преимущественно островковый тип М-А-составляющей со сложной внутренней многофазной структурой (тип I и III) или структурой, состоящей полностью из двойникового мартенсита (тип II). После лазерной сварки тип М-А-составляющей изменяется. Вместо островковых многофазных участков М-А-составляющей в зонах термического влияния (ЗТВ) формируются дисперсные удлиненные участки, состоящие из остаточного аустенита (тип IV) или двойникового мартенсита. Обнаружено появление сателлитных пятен на микродифракционных картинах, снятых с областей М-А-составляющей в ЗТВ сварного шва стали Х65. Сделано предположение, что их образование связано с локальным пересыщением углеродом М-А-составляющей и его неоднородным распределением вследствие ограничения процессов диффузии при ускоренном охлаждении после лазерной сварки.

**Ключевые слова:** низкоуглеродистая сталь, термомеханическая обработка, лазерная сварка, микроструктура, мартенситно-аустенитная составляющая, остаточный аустенит, сателлиты.

### Введение

Ускоренное охлаждение после термомеханической обработки (ТМО) и сварки низкоуглеродистых малолегированных сталей приводит к протеканию бейнитно-мартенситных превращений и формированию разнообразных микроструктур [1–5]. При меньших скоростях охлаждения превращение протекает при более высоких температурах и формируется гранулярный и верхний бейнит. При увеличении скорости охлаждения формируется нижний бейнит и мартенсит. Условия охлаждения определяют морфологию и размеры вторых фаз, в качестве которых могут быть цементит, остаточный аустенит, мартенсит или мартенситно-аустенитная (М-А) составляющая [4, 6].

В работе [4] отмечали, что классификация бейнитных структур, полученная для сталей после ТМО, не может быть использована для описания структур, полученных при сварке. Это связано с тем, что в деформированном аустените устойчивость переохлажденного аустенита снижается, интервал распада смещается в область более высоких температур [7], стимулируются процессы ферритного и бейнитного превращений. При сварке высокая температура нагрева металла способствует росту зерна и повышению устойчивости аустенита при последующем охлаждении. В результате более высоких скоростей нагрева и охлаждения аустенит характеризуется неоднородным распределением углерода, что также влияет на кинетику его распада [8]. Эти факторы приводят к формированию сложной смеси микроструктурных составляющих в металле шва и зонах термического влияния (ЗТВ). Однако, несмотря на различие процессов, протекающих при распаде переохлажденного аустенита после ТМО и сварки, в обоих случаях наблюдается формирование М-А-составляющей. Пристальное внимание исследователей к М-А-составляющей обусловлено тем, что ее доля, форма и размеры оказывают большое влияние на сопротивление материала распространению трещин [9]. Было показано [4, 6], что при малых скоростях охлаждения после ТМО в интервале температур 600–550 °С формируются крупные участки М-А-составляющей. При больших скоростях охлаждения и низких температурах превращения (500–450 °С) формируется остаточный аустенит в виде прослоек между бейнитными рейками. В условиях сварки наблюдали похожую тенденцию в изменении морфологии М-А-составляющей. При увеличении скорости охлаждения М-А-составляющая изменялась с массивной формы на удлиненную, либо на форму, близкую к точечной (типа «ожерелье» по границам зерен) [10]. В М-А-составляющей массивной формы остаточный аустенит был обнаружен в центре, а мартенсит – на периферии [11], либо наоборот [12]. В ряде случаев было обнаружено, что М-А-составляющая имеет сложное строение без упорядоченного расположения мартенсита и остаточного аустенита [11].

\* Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект FWRW-2021-0009.

Уважаемые читатели!

Доступ к полнотекстовой версии журнала  
**«Известия высших учебных заведений. Физика»**  
осуществляется на платформе  
Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU  
на платной основе:

<https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>