



ФОРМИРОВАНИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ В МЕТАЛЛЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МОЛИБДЕНОВЫХ СПЛАВОВ

Б. А. ЗАДЕРИЙ, канд. техн. наук, **С. С. КОТЕНКО**, инж.,
А. Е. МАРИНЧЕНКО, **Е. П. ПОЛИЩУК**, кандидаты техн. наук,
 чл.-кор. НАН Украины **К. А. ЮЩЕНКО** (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследовано влияние высокотемпературных отжигов и нагрева сварочной дугой на процессы формирования кристаллографической текстуры в зоне термического влияния листовых молибденовых сплавов ЦМ-10, ЦМ-12 и МИ-5. Показано, что в низколегированном молибденовом сплаве ЦМ-10 исходная текстура деформации типа (001)[110], (112)[110] и (111)[211] практически сохраняется в металле зоны термического влияния и шва. В легированных молибденовых сплавах ЦМ-12 и МИ-5 исходная текстура деформации типа (001)[110], (001)[100] и (111)[211] в зоне термического влияния постепенно трансформируется в кристаллографическую текстуру типа (111)[112] и [110], и этот тип текстуры сохраняется в металле шва.

Ключевые слова: кристаллографическая текстура, полюсные фигуры, сварные соединения, молибденовые сплавы, температура, отжиг

Температура хладноломкости сварных соединений молибденовых сплавов может изменяться в довольно широких пределах: от 200 (для молибденового сплава ЦМ-6) до более 600 К (для сплава ТСМ-3). Если учесть, что для получения сварных соединений были отобраны листы молибденовых сплавов со строго определенным содержанием легирующих элементов и примесей внедрения, а сам процесс сварки проводили в условиях, исключающих возможность насыщения металла шва примесями из газовой атмосферы, то становится непонятным существование интервала температур хладноломкости сварных соединений для материала одного химического состава.

В этой связи естественно предположить, что низкотемпературная пластичность сварных соединений, выполненных на тонколистовых молибденовых сплавах без присадочного материала, в известной степени определяется структурным состоянием исходного материала. Под структурным состоянием будем понимать не только чисто структурные факторы (размер зерна или ячейки), но и кристаллографическую и механическую текстуры, сформированные в листе в процессе его производства, а также при получении сварного соединения.

У поликристаллических материалов с беспорядочно ориентированными кристаллитами удлинение меньше, а предел текучести выше среднего предела текучести отдельных взятых кристаллитов [1]. Причиной этого является действие различных систем скольжения в отдельных поразному ориентированных кристаллитах. При дефор-

мации без разрушения на границах зерен не всегда могут оказаться действующими самые благоприятные системы скольжения. В результате для возбуждения процесса скольжения необходимы более высокие напряжения. В то же время при одинаковой или близкой ориентировке соседних кристаллитов к направлению действия усилий в них возникают равные напряжения. Поэтому поликристаллические материалы с благоприятной кристаллографической ориентировкой, как правило, будут иметь более высокую пластичность, чем материалы со статическим распределением ориентировок зерен.

При сварке тонколистовых молибденовых сплавов или наплавке небольшими объемами расплавленного материала на узкую поверхность должна реализовываться двумерная схема кристаллизации

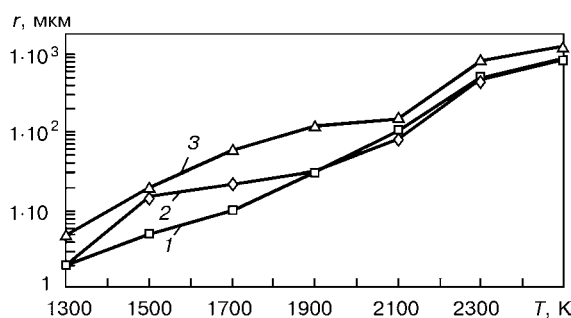


Рис. 1. Изменение размера зерна r молибденовых сплавов в металле ЗТВ в процессе сварки: 1 — сплав МИ-5; 2 — сплав ЦМ-12; 3 — сплав ЦМ-10

Таблица 1. Химический состав молибденовых сплавов

Сплав	Массовая доля элементов, %								
	Re	Zr	Hf	Al	B	O ₂	N ₂	C	H ₂
ЦМ-12	—	0,12	0,15	—	0,002	0,002	0,0006	0,003	0,0004
МИ-5	4,5	—	—	—	0,002	0,002	0,0004	0,003	0,0004
ЦМ-10	—	—	—	0,007	0,002	0,002	0,0050	0,003	0,0004

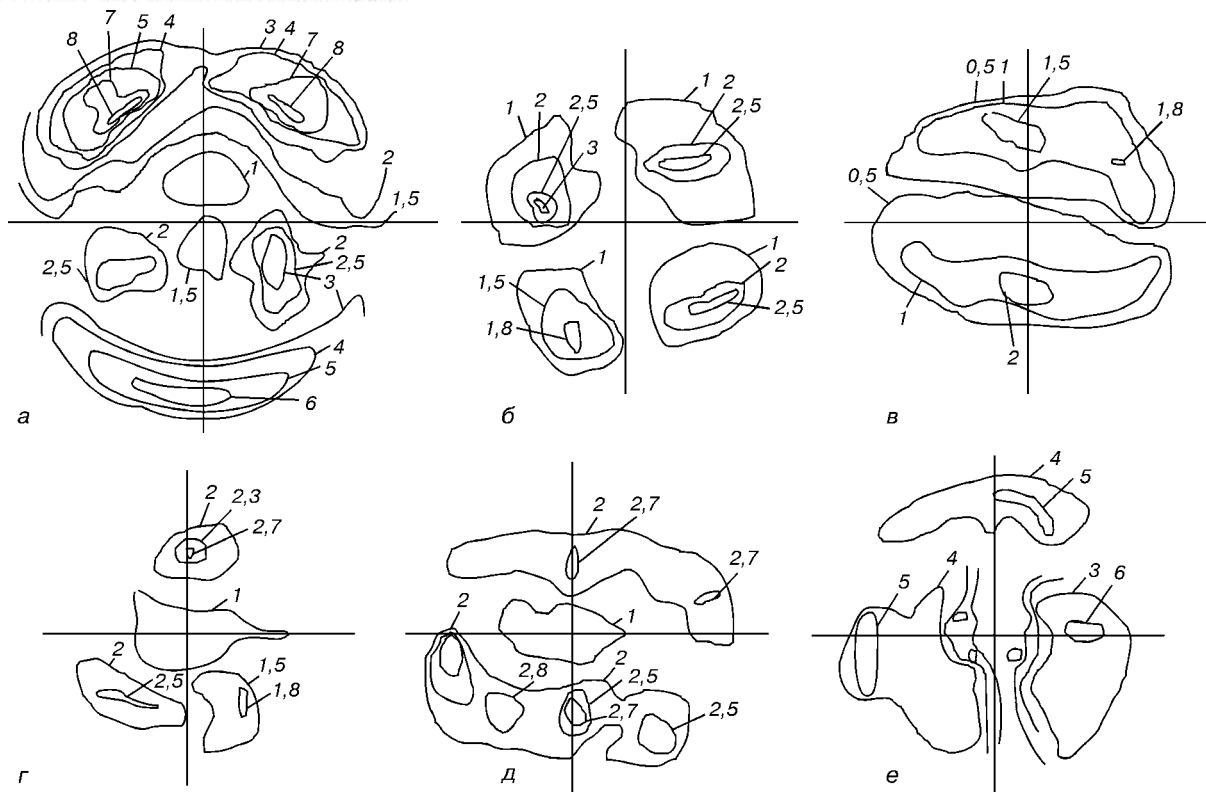


Рис. 2. Полюсные фигуры плоскостей {110} различных сечений ЗТВ сварного соединения сплава МИ-5 с максимальной температурой: а – 1300; б – 1500; в – 1700; г – 1900; д – 2100; е – 2300 К; здесь и далее цифры – интенсивность полюсной плотности

сварочной ванны. В этом случае зародышами кристаллизации являются оплавленные зерна исходного материала. При этом кристаллиты металла сварного шва могут наследовать в той или иной степени кристаллографическую ориентировку тех кристаллов, с поверхности которых начинался их рост. Вот почему наличие различных ориентировок зерен исходного материала будет способствовать формированию различного типа кристаллографических текстур в металле шва и, как следствие, сопровождаться изменением уровня физико-механических характеристик.

Кристаллографическая текстура сварных соединений низколегированных сплавов молибдена

МЛТ, ЦМ-6, МЧВП была рассмотрена в работе [2]. Установлено, что для первых двух сплавов основной компонентой текстуры исходного деформированного материала является (001) [110], а для сплава МЧВП – {111} <110> <112>. При переходе от основного металла к металлу ЗТВ текстура типа (001) [110] трансформируется на близкую к (001) [130]. В сварном шве сохраняется текстура оплавленных зерен, от которых идет кристаллизация металла шва. В сплаве МЧВП основные компоненты текстуры {111} <110> <112> сохраняются при переходе от основного металла через металл ЗТВ к металлу шва.

В настоящей работе рассмотрены условия формирования кристаллографической текстуры в легированных сплавах молибдена ЦМ-12 и МИ-5 и наиболее чистом молибденовом сплаве ЦМ-10. Химический состав сплавов приведен в табл. 1.

Непосредственно перед сваркой образцы молибденовых сплавов прогревали дугой до температуры выше температуры рекристаллизации.

Рентгенографический текстурный анализ проводили для тех плоскостей сварного соединения, размер зерен которых отвечал размеру зерен, получаемых на исследуемых сплавах после их отжига при температурах от 1300 до 2300 К (рис. 1). В металле ЗТВ при сварке предварительно отожженного, деформированного прокаткой молибденового сплава ЦМ-10 или предварительно подогретых листов сплавов МИ-5 и ЦМ-12 обнаружено пос-

Таблица 2. Основные компоненты текстур сплавов МИ-5 и ЦМ-12

$T_{отж}$, К	Основной металл	Соответствующая плоскость ЗТВ
Сплав МИ-5		
1300	(011)[100], (111)[211], (001)[110]	(113)[110], (111)[211]
1500	(111)[110], (001)[110], (112)[233]	(001)[110], (111)[110]
1700	(001)[100], (112)[211], (112)[111]	(111)[112]
1900	(111)[211], (111)[110]	(111)[112], (111)[110]
2100	(001)[110], (111)[110], (112)[111]	(111)[112], (113)[110], (001)[110]
2300	(111)[110], (112)[233], (001)[110]	(111)[112], (111)[112], (112)[233]
Сплав ЦМ-12		
1300	(011)[100], (111)[211], (001)[520]	(001)[110], (112)[110]
1500	(001)[110], (111)[110]	(001)[110]
1700	(001)[110], (111)[110]	(001)[110], (112)[110]
1900	(111)[112], (112)[110]	(111)[110]
2100	(111)[112], (112)[233]	(111)[112], (001)[110]
2300	(111)[110], (111)[211], (001)[100]	(111)[112], (111)[110]

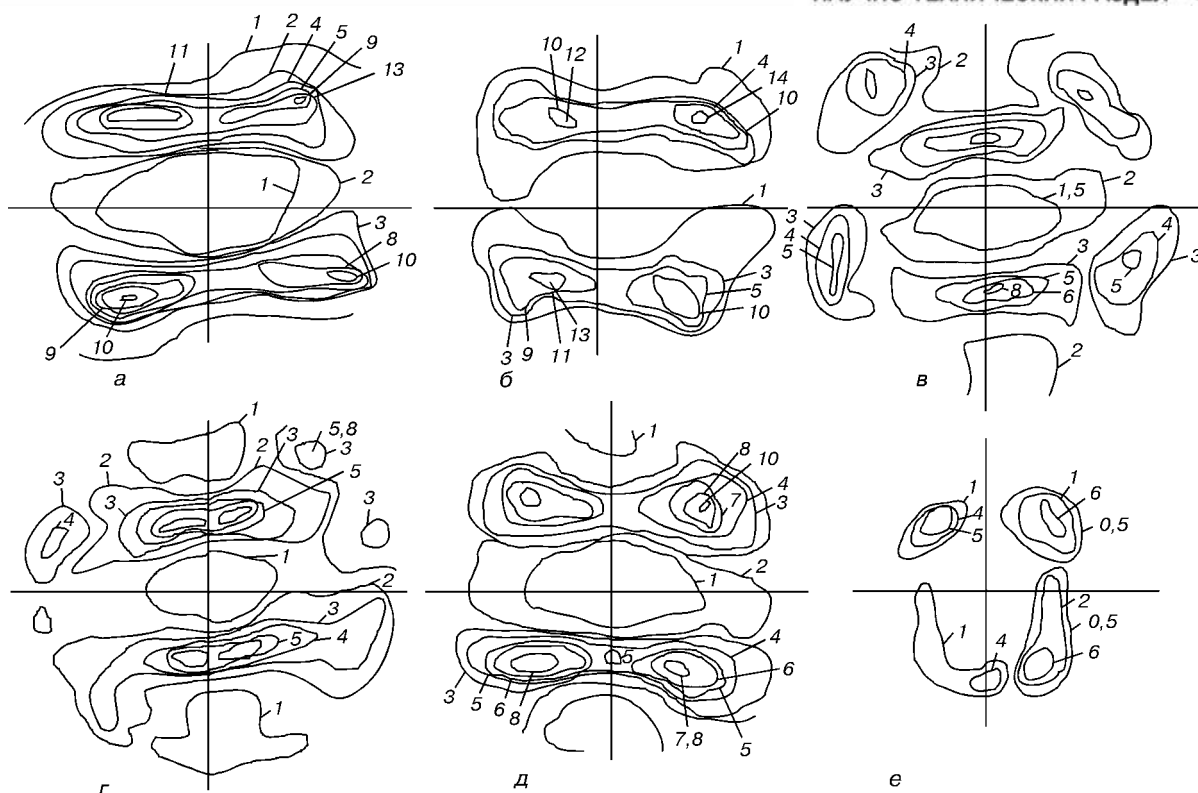


Рис. 3. Полусные фигуры плоскостей {110} различных сечений ЗТВ сварного соединения сплава ЦМ-12 с максимальной температурой: а – 1300; б – 1500; в – 1700; г – 1900; д – 2100; е – 2300 К

тепленное изменение размера структурного элемента от 2...5 мкм в исходном материале до 200... 1100 мкм у линии сплавления.

Полусные фигуры плоскостей {110} различных сечений сварного соединения сплава МИ-5 представлены на рис. 2. В табл. 2 приведены основные компоненты текстур для сплавов, отожженных при

разных температурах, и для металла ЗТВ сварного соединения в сечениях с соответствующим размером зерна.

Как следует из представленных данных, основная компонента текстур молибдена, легированного рением (МИ-5), не претерпевает существенных изменений как в процессе часовых отжигов

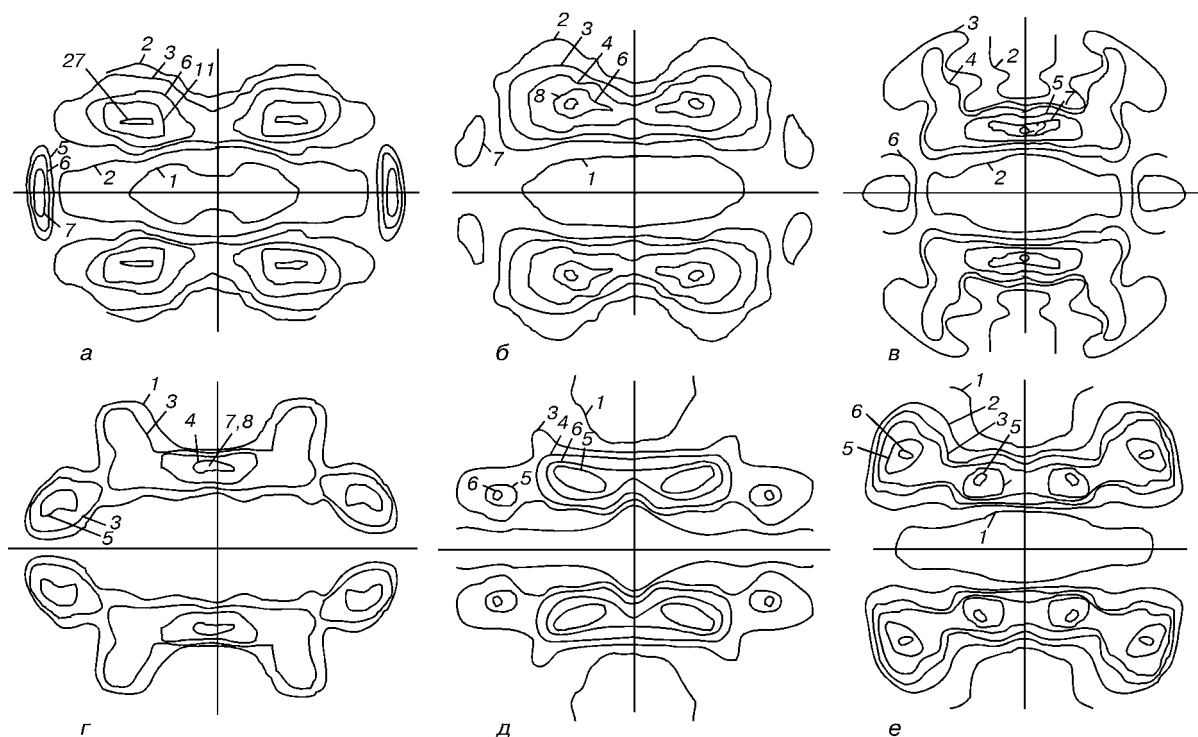


Рис. 4. Полусные фигуры плоскостей {110} молибденового сплава ЦМ-10 после различных температур отжига: а – 1100; б – 1200; в – 1300; г – 1400; д – 1500; е – 1600 К

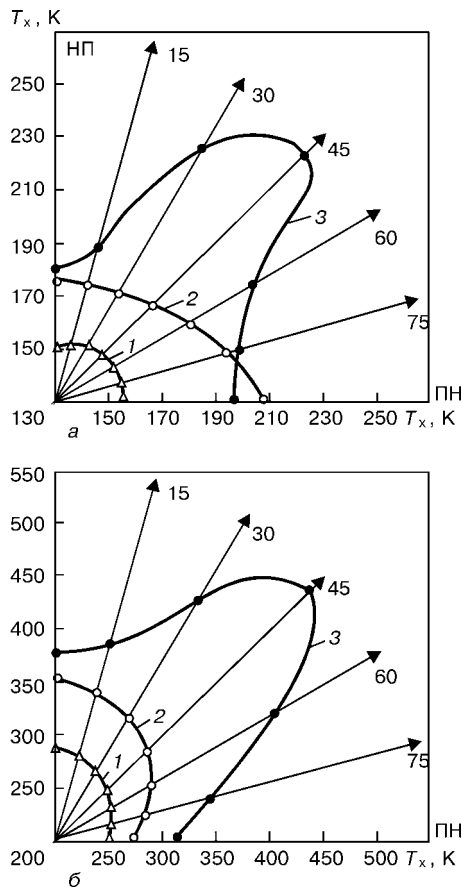


Рис. 5. Зависимость температуры хладноломкости T_x молибденовых сплавов от угла вырезки образцов и направления сварки: *a* — основной металл; *б* — сварное соединение; 1 — МИ-5; 2 — ЦМ-10; 3 — ЦМ-12; НП — направление прокатки; ПН — поперечное направление

в температурном интервале 1300...2300 К, так и в различных участках ЗТВ.

На рис. 3 показаны полюсные фигуры плоскостей $\{110\}$ различных сечений сварного соединения сплава ЦМ-12.

Полюсные фигуры молибденового сплава ЦМ-10 после отжига при различных температурах показаны на рис. 4. Как следует из рисунка, текстура рассматриваемого сплава в исходном состоянии типична для большинства сплавов с ОЦК-решеткой и хорошо совпадает с данными работ [3, 4]. Действительно, текстура исходного состояния характеризуется следующими компонентами (рис. 4, *a*): очень сильной компонентой $(001)[110]$ и менее сильными компонентами $(112)[\bar{1}10]$ и $(111)[uvw]$. После отжига при температуре полной рекристаллизации обработки, при которой ячеистая структура заменяется зеренной с размером зерна 40...100 мкм, вид полюсной фигуры в основном не изменяется, происходит только значительное уменьшение максимумов полюсной плотности и увеличивается рассеяние, т. е. текстура отожженного при температуре 1400 К листа характеризуется набором следующих компонент: $(001)[110] + (112)[\bar{1}10] + (111)[uvw]$.

Дальнейшее повышение температуры отжига сопровождается изменением вида полюсных фигур — происходит раздвоение максимумов, изменяется соотношение ориентировок. Конечная текстура ха-

рактеризуется очень сильными компонентами: $(001)[110]$; $(112)[\bar{1}10]$; $(111)[\bar{1}10]$; $(111)[\bar{2}11]$ и $(112)[\bar{2}33]$. При этом обнаружено увеличение интенсивности текстурных экстремумов, что обусловлено, скорее всего, снижением количества несовершенств кристаллографической решетки. Следует также отметить, что при высокотемпературных отжигах ориентировка $(111)[\bar{1}10]$ развивается значительно сильнее, чем $(111)[\bar{1}12]$.

Из приведенных на рис. 2, 3 и в табл. 2 данных следует, что и отжиг при разных температурах, и соответствующие этим температурам размеры зерна на плоскости в ЗТВ при сварке молибденового сплава сопровождаются аналогичным характером изменения кристаллографической текстуры.

Если в исходном состоянии основными компонентами текстуры являются $(001)[112]$ и $(001)[110]$, то после отжига при 1900 К, приводящего к полной рекристаллизации, эта текстура превращается в текстуру типа $(111)[110]$. При дальнейшем повышении температуры отжига или переходе в ЗТВ с более высокой температурой нагрева данный тип кристаллографической текстуры сохраняется.

Исследование текстуры столбчатых кристаллитов в литом металле шва, выполненное на различных материалах [5, 6], показало, что столбчатые кристаллиты формируются нормально к фронту изотерм охлаждения расплавленного металла сварочной ванны и их рост совпадает преимущественно с направлением $[100]$. В молибдене поверхностная энергия плоскости (001) минимальна и это, в частности, приводит к тому, что хрупкий скол кристаллов происходит по плоскостям (001) . Поэтому в случае кристаллизации сварочной ванны в условиях ограниченного объема расплавленного металла и реализации двумерного фронта кристаллизации на подложке оплавленных зерен исходного молибденового сплава следует ожидать преимущественного роста столбчатых кристаллов по направлению $[100]$. Это и зафиксировано для относительно чистого по примесям внедрения и низколегированного молибдена (сплав ЦМ-10).

Однако в молибденовых сплавах, легированных рением (сплав МИ-5) или цирконием и гафнием (ЦМ-12), где в металле ЗТВ формируется структура с плоскостью (111) , вследствие кристаллизации на подложке оплавленных зерен по линии сплавления эта текстура сохраняется в металле шва. Направление формирования кристаллитов металла шва в соответствии с формой изотерм охлаждения повернуто на 20...30° от нормали к оси сварного шва. Фронту изотерм перпендикулярно направление $[\bar{2}11]$ или $[011]$, а ближайшее направление $\langle 100 \rangle$ составляет сравнительно большой угол (соответственно 35 или 45°) с направлением роста кристаллитов и не лежит в плоскости листа. В этих условиях столбчатые кристаллиты металла шва наследуют кристаллографическую текстуру оплавленных зерен линии сплавления, т. е. растут вдоль направления $[211]$ или $[110]$.



Таким образом, отжиг деформированных прокаткой молибденовых листов или их предварительный нагрев перед сваркой способствуют формированию в процессе сварки в металле ЗТВ кристаллографической текстуры с основной компонентой $\{111\}[110]$ и $[112]$, которая сохраняется в металле шва. Из полученных экспериментальных данных становится понятным влияние предварительных термической обработки и нагрева на механические характеристики сварных соединений молибденовых сплавов.

При высокотемпературном отжиге в основном металле формируется текстура типа $\{111\}\langle 110 \rangle$ и $\langle 112 \rangle$, которая в полной мере наследуется металлом шва. Предварительный нагрев и тепловое воздействие дуги в процессе сварки на ЗТВ также приводят к формированию в ней вблизи линии сплавления кристаллографической текстуры $\{111\}\langle 110 \rangle$ и $\langle 112 \rangle$ и, как следствие, текстур этого же типа в металле шва. Другими словами, вне зависимости от исходной кристаллографической текстуры ($(001)[112]$ и $(111)[211]$ — сплав ЦМ-12 или $(001)[110]$, $(001)[100]$ и $(111)[112]$ — сплав МИ-5) в процессе отжига при температурах выше 1900 К и в ходе сварки с предварительным подогревом формируется один тип кристаллографической текстуры — $\{111\}\langle 110 \rangle$ и $\langle 112 \rangle$.

Наследование кристаллографической текстуры основного металла в процессе сварки металлом сварного соединения в случае, когда не происходит заметного изменения химического состава сплава, сопровождается взаимосвязью физико-механических характеристик исходного материала и сварного соединения. На рис. 5, а показана зависимость температуры хладноломкости основного материала, определенная на образцах, вырезанных под различными углами к направлению прокатки листов молибденовых сплавов, а на рис. 5, б — такие же зависимости для сварных соединений.

Поскольку образцы основного металла и образцы под сварку вырезали из одного листа, можно полагать, что химический состав, содержание примесей внедрения и структурное состояние у них оставались постоянными, а изменялась только кристаллографическая ориентировка приложения внешнего напряжения при испытаниях на изгиб с целью определения температуры хладноломкости.

В случае, когда низкотемпературная пластичность (исходного основного металла) текстурированных молибденовых сплавов определяется типом

кристаллографической структуры, а металл сварного соединения наследует кристаллографическую ориентировку оплавленных зерен зоны сплавления, следует считать, что минимальной температуре хладноломкости основного металла будет соответствовать минимальная температура хладноломкости сварного соединения. Однако, как показывает сравнительный анализ полученных результатов (рис. 5), минимальная температура хладноломкости основного металла соответствует продольным образцам, а минимальная температура хладноломкости сварных соединений получена на образцах, сваренных под углом 90° к направлению прокатки. Это несоответствие обусловлено тем, что при сварке поперечных образцов в кристаллизующемся металле сварочной ванны формируются кристаллографические ориентировки продольных образцов.

Выводы

1. Установлено, что при высокотемпературной обработке и сварке плавлением низколегированного молибденового сплава ЦМ-10 в металле ЗТВ у линии сплавления формируется сильная кристаллографическая $(001)[110]$ и более слабые $(112)[110]$ и $(111)[211]$ текстуры, которые наследуются кристаллами металла шва.

2. Определено, что в легированных молибденовых сплавах ЦМ-12 и МИ-5 исходная текстура деформированного листа $(001)[112]$ и $(001)[110]$ в процессе высокотемпературной обработки или сварки трансформируется в текстуру типа $\{111\}\langle 110 \rangle$ и $\langle 112 \rangle$, которая в полной мере наследуется металлом сварного шва.

1. Пальме Р. Влияние текстур деформации на свойства тугоплавких металлов // Новые тугоплавкие металлические материалы. — М.: Мир, 1971. — С. 39–43.
2. Связь кристаллографических текстур основного металла и сварного шва на низколегированных сплавах молибдена / М. М. Нероденко, Е. П. Полищук, Ю. В. Мильман и др. // Автомат. сварка. — 1978. — № 12. — С. 12–15.
3. Брюханов А. А. Общие закономерности анизотропии кубических кристаллов и текстуры металлов кубической системы. 1. Текстура прокатки // Изв. вузов СССР. Физика. — 1977. — № 4. — С. 153–158.
4. Браун Х., Семмишен М., Барр Р. Последние достижения в технологии обработки литого молибдена // Тугоплавкие металлические материалы для космической техники. — М.: Мир, 1966. — С. 316–339.
5. Savag W. F., Lundin D. D., Aronson A. N. Weld metal solidification // Welding J. — 1965. — № 4. — P. 175–178.
6. Роттер Дж. Структурные несовершенства, возникающие в процессе кристаллизации. — М.: Металлургиздат, 1962. — С. 272–306.

Investigated is the effect of high-temperature annealing and heating by the welding arc on processes of formation of crystallographic texture in the HAZ of plate molybdenum alloys TsM-10, TsM-12 and MI-5. It is shown that the initial deformation texture of the type of $(001)[110]$, $(112)[\bar{1}10]$ and $(111)[\bar{2}11]$ persists in the HAZ and weld metal of the low-alloyed molybdenum alloy TsM-10. In the alloyed molybdenum alloys TsM-12 and MI-5 the initial deformation texture of the type of $(001)[110]$, $(011)[100]$ and $(111)[211]$ in the HAZ is gradually transformed into the crystallographic deformation texture of the type of $(111)[112]$ and $[110]$, and then this type of the texture persists in the weld metal.

Поступила в редакцию 15.12.2001,
в окончательном варианте 12.03.2002