



УДК 669.187.56.001.3

## ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПОЛЫХ ТИТАНОВЫХ СЛИТКОВ ПРИ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМОЙ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ ПЛАВКЕ\*

И. В. Протокилов

Исследованы особенности формирования кристаллической структуры полых слитков при ЭШП под воздействием внешнего магнитного поля. Показана возможность измельчения структуры слитка за счет гидродинамического воздействия на жидкометаллическую ванну, создаваемого внешним продольным магнитным полем.

Peculiarities of formation of crystalline structure of hollow ingots in ESR under the effect of external magnetic field were investigated. The feasibility of refining the ingot structure due to hydrodynamic effect, generated by external magnetic field, on molten metal pool is shown.

**Ключевые слова:** электрошлаковый переплав; магнитное поле; титан; полый слиток; макроструктура

В работах [1–3] показана возможность измельчения кристаллической структуры и повышения химической и физической однородности слитков титановых сплавов в процессе магнитоуправляемой электрошлаковой плавки (МЭП). Указанные эффекты достигались в результате гидродинамического воздействия на жидкометаллическую ванну, создаваемого током плавки и внешним магнитным полем.

Цель данной работы заключалась в исследовании возможности измельчения в процессе МЭП кристаллической структуры полых титановых слитков, используемых в качестве заготовок для производства бесшовных холодно- и горячекатаных труб. Грубая крупнозернистая структура заготовок, свойственная литому металлу, значительно усложняет или делает невозможной их дальнейшую деформацию. Поэтому структурный фактор, наряду с технико-экономическими показателями, является важнейшей характеристикой, определяющей эффективность производства полых трубных заготовок металлургическими способами.

Опытные плавки выполняли в камерной электрошлаковой печи в аргоне (рис. 1). Расходуемый электрод, сформированный из шести титановых прутков диаметром 35 мм (рис. 2), переплавляли в кристаллизаторе диаметром 160 мм под флюсом АН-Т4. Диаметр внутреннего конического кристаллизатора составлял 40... 50 мм.

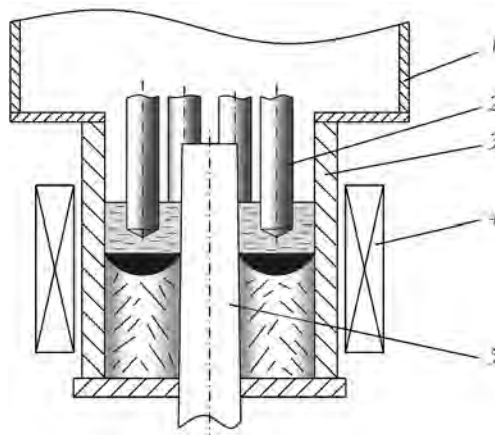


Рис. 1. Схема МЭП полых слитков: 1 — камера печи; 2 — расходуемый электрод; 3 — внешний кристаллизатор; 4 — электромагнитная система; 5 — внутренний кристаллизатор

\*В работе принимали участие инженеры Д. А. Петров и А. М. Белов.



Рис. 2. Внешний вид расходимого электрода после плавки

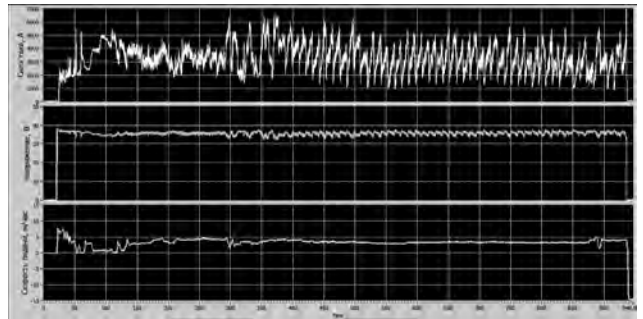


Рис. 4. Регистрограмма режимов плавки при импульсном электромагнитном воздействии

Режимы выплавки полых слитков						
Диаметр полого слитка, мм		U, В	I, А	Параметры электромагнитного воздействия		
наружный	внутренний			B, Тл	t <sub>имп</sub> , с	t <sub>п</sub> , с
160	40...50	36	4500	—	—	—
160	40...50	36	5000 (1200)	0,20...0,28	1	10

Примечание. В скобках указано минимальное значение тока во время импульса магнитного поля; t<sub>имп</sub> — продолжительность импульса электромагнитного воздействия; t<sub>п</sub> — продолжительность паузы между импульсами электромагнитного воздействия.

Плавки осуществляли как без, так и с электромагнитным воздействием аксиальным (продольным) магнитным полем, созданным соленоидом, охватывающим кристаллизатор. Электромагнитное воздействие производили отдельными импульсами постоянного магнитного поля, чередующимися с паузами. Режимы плавки приведены в таблице.

Механизм гидродинамического воздействия при выплавке полых слитков состоит во взаимодействии аксиальной составляющей внешнего магнитного поля B<sub>z</sub> с радиальной составляющей тока плавки I<sub>r</sub> в металлургической ванне. В результате такого взаимодействия в токонесущем расплаве формируется

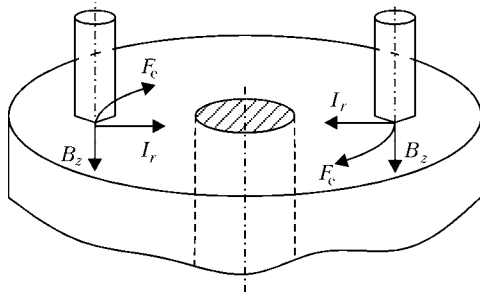


Рис. 3. Направление электромагнитной силы при МЭП полых слитков: B<sub>z</sub> — осевая составляющая индукции внешнего магнитного поля; I<sub>r</sub> — радиальная составляющая тока плавки; F<sub>e</sub> — электромагнитная сила

азимутальная электромагнитная сила  $F_e = I_r \times B_z$ , приводящая к вращению и вибрации ванны вокруг оси симметрии (рис. 3). При этом эффективность электромагнитного воздействия при выплавке полых слитков увеличивается за счет использования внутреннего токоведущего кристаллизатора, в результате чего увеличивается радиальная составляющая тока в металлургической ванне I<sub>r</sub>, а соответственно, и уровень электромагнитной силы F<sub>e</sub>.

Эксперименты с импульсным воздействием продольного магнитного поля при выплавке полых слитков показали, как и при МЭП цельных слитков титановых сплавов [1], наличие закономерного явления, когда импульсное воздействие магнитного поля вызывает периодическое изменение тока плавки (рис. 4). Во время импульса магнитного поля ток плавки снижается, а во время паузы — восстанавливается до исходного значения. Такое снижение тока во время импульса магнитного поля вызвано прежде всего деформацией свободной поверхности шлаковой ванны под действием вращения шлака и снижением глубины погружения расходимых электродов в шлак. В этом случае при магнитной индукции в зоне плавки до 0,28 Тл процесс



Рис. 5. Полый слиток сплава ВТ1

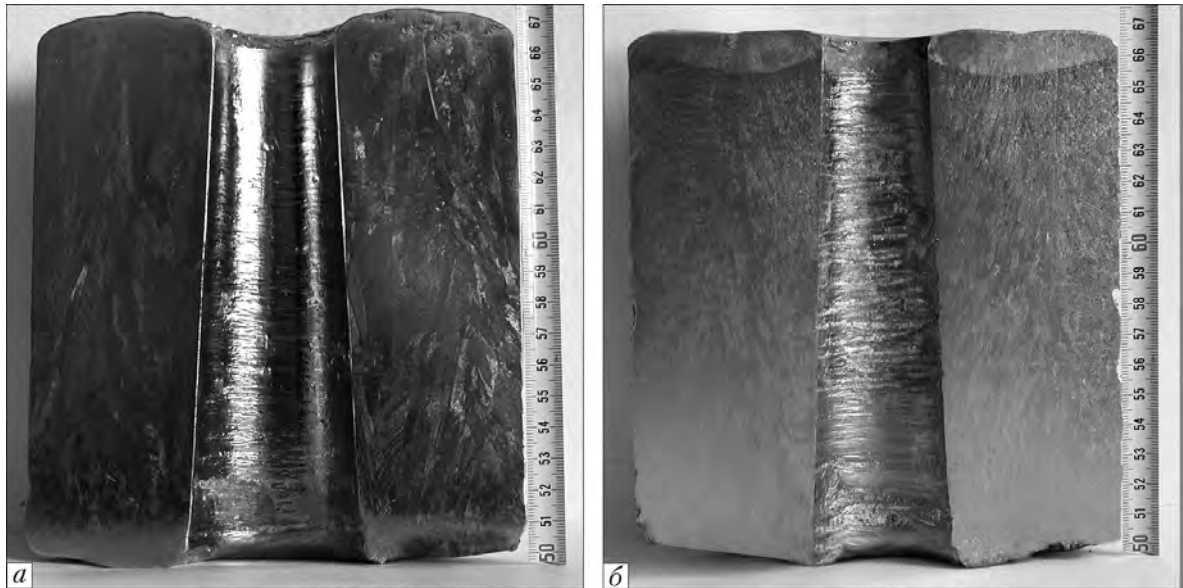


Рис. 6. Макроструктура полых титановых слитков, выполненных без (а) и с электромагнитным воздействием (б)

носил квазистационарный характер и не приводил к заметному ухудшению стабильности электрошлакового переплава и качества формирования слитка. Грубых дефектов на внутренней и наружной поверхностях слитков не выявлено (рис. 5).

Макроструктура слитков, выплавленных без и с электромагнитным воздействием, приведена на рис. 6. В обоих случаях структура металла плотная, без пор, шлаковых включений и прочих дефектов. Слитки, полученные без внешнего воздействия, характеризуются наличием крупных столбчатых кристаллов, ориентированных преимущественно параллельно оси слитка (рис. 6, а). Продольный размер кристаллов составляет 20... 50 мм, поперечный — 3... 7 мм.

При электромагнитном воздействии структура металла более однородная и мелкозернистая, состоящая из вытянутых в направлении теплоотвода кристаллов со средним размером 2×10 мм и равноосных кристаллов размером 2... 4 мм (рис. 6, б).

Механизм измельчения структуры заключается в разрушающем действии на растущие кристаллы электромагнитной вибрации частотой 50 Гц, вызванной взаимодействием постоянного магнитного поля с переменным током плавки, а также гидродинамическими «ударами», происходящими в момент включения и выключения магнитного поля.

Следует отметить, что импульсное воздействие магнитным полем вызывает циклические изменения

тока плавки и, соответственно, порционное тепловыделение в шлаковой ванне. В результате к гидродинамическим механизмам измельчения структуры металла добавляются механизмы теплового воздействия на его кристаллизацию.

Таким образом, показана возможность измельчения кристаллической структуры полых титановых слитков при МЭП путем импульсного электромагнитного воздействия на расплавы шлаковой и металлической ванн продольным магнитным полем. Гомогенизация и измельчение структуры металла трубной заготовки позволят повысить стабильность процесса ее термомеханической обработки и качество изготовленной продукции.

1. *Компан Я. Ю., Назарчук А. Т., Протоковилов И. В.* К вопросу интенсификации электромагнитного воздействия при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке титановых сплавов // Современ. электрометаллургия. — 2007. — № 4. — С. 3–7.
2. *Протоковилов И. В.* Магнітокервана електрошлакова плавка багатоконпонентних титанових сплавів: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / НАН України; Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона. — Київ, 2006. — 22 с.
3. *Компан Я. Ю., Протоковилов И. В.* Некоторые технологические аспекты магнитоуправляемой электрошлаковой плавки (МЭП) титановых сплавов // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Специальная металлургия: вчера, сегодня, завтра» (Київ, 8-9 октября 2002 г.) — Киев, 2002. — С. 256–262.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 22.09.2011