

## ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ УЗЛОВ МЕДНЫХ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ

**Медные материалы для изготовления кристаллизаторов.** В настоящее время общепризнаны че-



Рис. 1. Корпус кристаллизатора готовый для сварки

тыре вида медных материалов для изготовления кристаллизаторов (кокилей). Для кристаллизаторов, изготавливаемых по обычным технологиям, используется высокопроводящая ДНР- и НСР-медь. Благодаря низкому остаточному содержанию фосфора, НСР-медь имеет почти 100%-ную теплопроводность и поэтому ее часто применяют для изготовления фланцев и поддонов кристаллизаторов. Кокиль обычно изготавливают из ДНР-меди из-за ее хорошей свариваемости.

Кокили кристаллизаторов с использованием кованных заготовок изготавливают из НСР-меди или низколегированных медных материалов, таких как медь–серебро (CuAg) или медь–хром–цирконий (CuCrZr) (табл. 1). Так как небольшая добавка серебра (CuAg) хорошо влияет на теплопроводность меди, то кристаллизатор из этого материала обладает 100%-ной теплопроводностью. Добавка серебра повышает температуру рекристаллизации до 360 °С. Холодная формовка сплава CuAg для повышения его механической прочности способствует сохранению его свойств до температуры 360 °С при эксплуатации. В случае требования более высокой механической прочности предпочтительно применять упрочненный старением сплав CuCrZr. Более высокая прочность и температура

**Таблица 1.** Химический состав медных материалов для кристаллизаторов и их применение, мас. %

Сплав	Cu	Ag	Cr	Zr	P	Применение
Cu-DHP (SF-Cu)	> 99,9	–	–	–	0,015...0,04	Кокиль, изготавливаемый по обычной технологии
Cu-НСР (SE-Cu)	> 99,95	–	–	–	0,002...0,007	Кокиль, изготавливаемый ковкой из слитков и по обычной технологии
Cu-Ag 0,1 F 25	Остальное	0,08...0,12	–	–	0,001...0,007 для CuAg0,1P	Кокиль, изготавливаемый ковкой из слитков
CuCrZrF38	Остальное	–	0,3...1,2	0,03...0,3	–	Кокиль, изготавливаемый ковкой из слитков

**Таблица 2.** Физические и механические свойства медных материалов для кристаллизаторов

Сплав	Электропроводность		Теплопроводность, Вт/см·К	$\sigma_{0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_b$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta_5$ , %	НВ 10	Температура рекристаллизации, °С
	%*	м/См·мм <sup>2</sup>						
Cu-DHP (SF-Cu)	≥ 75	≥ 43	≥ 2,95	40	200	35	45	140...200
Cu-НСР (SE-Cu)	≥ 98	≥ 57	≥ 3,86	40	200	35	45	140...200
Cu-Ag 0,1 F 25	≥ 96	≥ 56	≥ 3,86	200...280	250...300	17...20	70...90	360
CuCrZrF38	≥ 78	≥ 45	≥ 3,06	≥ 270	≥ 370	18	125	570

\*По отношению к отожженной меди.



Рис. 2. Кристаллизаторы, изготавливаемые по обычной технологии прямоугольного сечения

рекристаллизации сопровождается уменьшенной на 20 % проводимостью. В табл. 2 представлены физические и механические свойства всех материалов, применяемых для изготовления кристаллизаторов.

Основные стадии изготовления кристаллизатора по обычной технологии всегда начинаются со сгибания горячекатаного медного листа в цилиндрическую или коническую форму (рис. 1). Особое внимание должно уделяться всем сварным швам. Швы длинного сварного корпуса всегда требуют 100%-ного рентгеновского контроля для избежания любых скрытых дефектов. Окончательный гелиевый контроль является наиболее строгим на герметичность кристаллизатора.

Имеется по крайней мере три варианта приварки фланца к корпусу кристаллизатора.



Рис. 3. Круглые кристаллизаторы, изготовленные по обычной технологии с одним продольным швом: материалы — Cu-DHP (SF-Cu) (а), Cu-HCP (SE-Cu) (б); размеры — Ø 536×3000 мм (а), Ø 1200×3800 мм (б); вес — 1316 кг (а), 3800 кг (б)

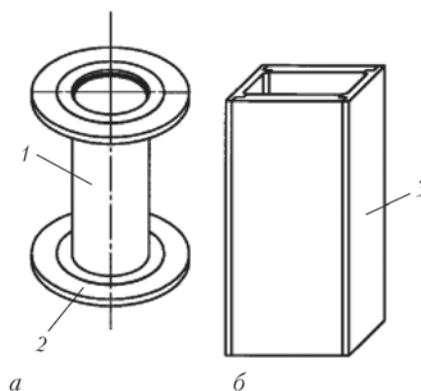


Рис. 4. Конструкции кристаллизаторов, изготовленных ковкой из слитков: а — кованый бесшовный (1) с приваренным фланцем (2); б — состоящий из четырех отдельных листов (3)



Рис. 5. Поковки для кристаллизаторов: а — изготавливаемых ковкой из слитка с прикованным фланцем (3,5 т); б — бесшовный кованый корпус (6,8 т)



Рис. 6. Основные стадии производства круглых кристаллизаторов, изготавливаемых ковкой из слитков



Рис. 7. Бесшовный медный кристаллизатор, изготовленный ковкой из слитка с окончательной обработкой

Так как для кристаллизаторов, изготавливаемых по обычной технологии, требуется довольно небольшой расход медного материала, то они гораздо дешевле в изготовлении по сравнению с бесшовными, изготавливаемыми методомковки из слитков. Так как внутренняя поверхность сварного кокиля кристаллизатора совсем не обрабатывается, то надо придерживаться допуска в диаметре приблизительно 3...5 мм в зависимости от размера кристаллизатора. Проблемы деформации кристаллизаторов, изготовленных по обычной технологии, за многие годы эксплуатации решены передовыми способами сварки, исключающими остаточные напряжения путем понижения температуры предварительного нагрева перед сваркой. Толщина медной стенки кокиля в настоящее время увеличилась от 2...20 до 16...40 мм.



Рис. 8. Фиксация поддона к нижней части кокиля с помощью сварки

Медные кристаллизаторы прямоугольного сечения требуют сварку двух разрезанных секций (рис. 2).

Размер бесшовных кристаллизаторов, изготавливаемых методомковки из слитков, ограничивается имеющимися размерами заготовок. Большие и сверхбольшие кристаллизаторы должны изготавливаться конструктивно по обычной технологии, потому что трудно выплавить слитки необходимых размеров и изготовление их становится слишком дорогим (рис. 3).

**Примеры конструкций кристаллизаторов для печей ВДП, ЭШП, ЭЛ, ПД и гарнисажной плавки.** Основные конструкции кристаллизаторов, изготовленных ковкой из слитков показаны на рис. 4. Они могут состоять из четырех отдельных медных листов прямоугольной формы. Кристаллизаторы, изготовленные ковкой из слитков круглого сечения, имеют всегда бесшовный кованый кокиль. Может ли фланец быть выкован вместе с кокилем зависит от диаметра фланца (рис. 5). Кри-



Рис. 9. Кокили для ЭШП: а — с прикованным фланцем; б, в — цельнокованые



Рис. 10. Подвижные кристаллизаторы прямоугольного сечения  
сталлизаторы с большим фланцем требуют его приварку.

На рис. 6 показаны основные стадии производства круглого кристаллизатора с бесшовным кокилем, изготовленным ковкой из слитка. Бесшовный кованный кокиль имеет всегда однородную структуру меди и самый низкий риск деформации при эксплуатации. Отсутствие сварного шва исключает возможность появления дефектов. Так как кристаллизатор, изготовленный ковкой из слитков, нуждается в механической обработке, то могут даваться небольшие допуски при производстве (рис. 7). Основным недостатком кристаллизатора, изготовленного ковкой из слитков — это более высокая стоимость из-за большего расхода медного материала и времени на обработку.

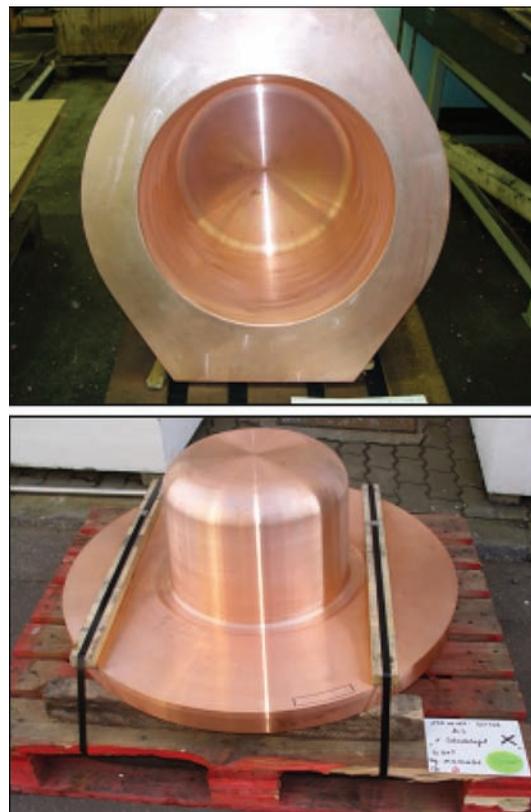


Рис. 12. Кристаллизаторы для печей гарнисажной плавки ВДП

На рис. 8 показана нижняя часть кристаллизатора, состоящая из медного поддона и опорной плиты из нержавеющей стали, прикрепленной зажимной системой.

В установках ЭШП часто используются подвижные кристаллизаторы вместо неподвижных (рис. 9, 10). Подвижные кристаллизаторы всегда имеют бесшовный кованный корпус. В некоторых случаях один фланец может приковываться (рис. 9, а).

Медные кристаллизаторы для печей гарнисажной плавки ВДП обычно цельнокованные. В случае, если медный фланец слишком большой, он должен привариваться к медной чаше (рис. 11, 12).

Довольно малые подвижные кристаллизаторы для электронно-лучевой (ЭЛ) плавки изготавливаются цельнокованными бесшовными, т.е. фланец



Рис. 11. Кристаллизаторы для печей гарнисажной плавки



Рис. 13. Бесшовные кованные кристаллизаторы для ЭШП (а, б — см. в тексте)



Рис. 15. Ремонт кокилей путем увеличения корпуса (удлинения)

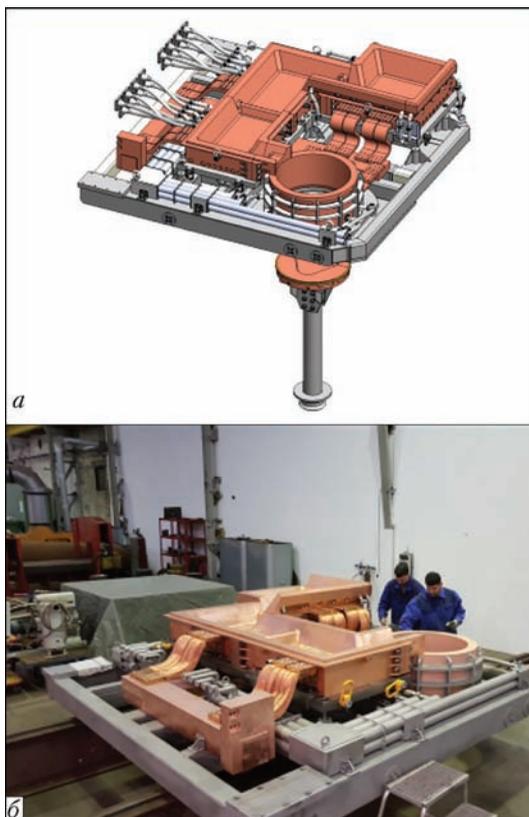


Рис. 14. Конструкция кристаллизатора с холодным подом для ПД печей: а — схема; б — внешний вид

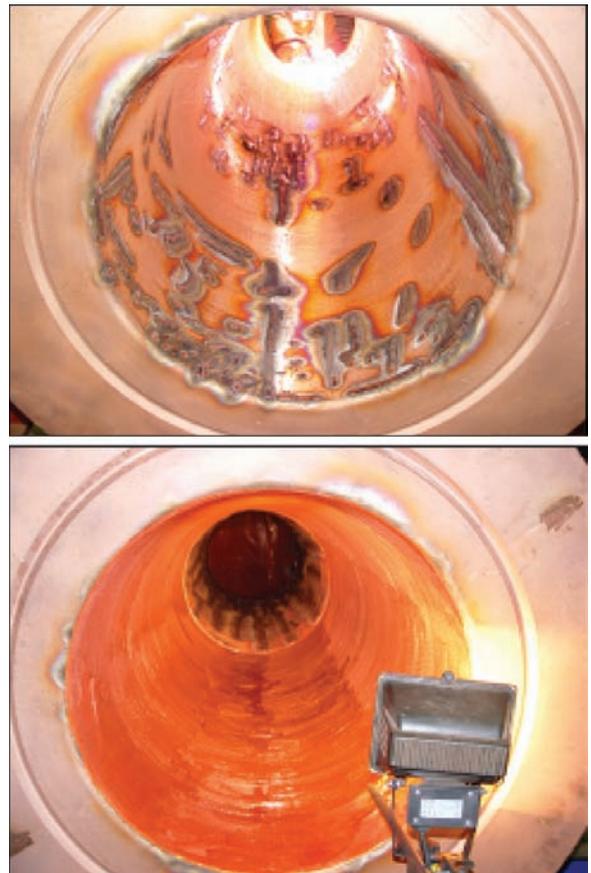


Рис. 16. Ремонт поверхности кокилей точечной сваркой



Рис. 17. Ремонт кокилей путем замены дефектных участков

всегда прикован. На рис. 13 показаны поковки (а) и готовый механически обработанный медный подвижной кокиль (б).

Специальные сплавы, такие как титановые, отливаются по каскадной системе, состоящей из плавильного и рафинирующего подов, до разлива в медную изложницу прямоугольного или круглого сечения. На рис. 14 показана современная система подов плазменно-дуговой (ПД) печи, которая предотвращает загрязнение примесями (окислы, включения и др.), оставшимися в подовой системе. Таким образом, они не могут ухудшить литой слиток. Высокие температуры жидкого металла, который непрерывно нагревается ЭЛ или ПД пушками, требуют всестороннее CFD-моделирование (Computational Fluid Dynamic Modeling) для хорошо сбалансированного охлаждающего потока воды через все секции подовой системы для избежания нежелательных тепловых напряжений и деформаций довольно мягкой меди.

#### Технологии для ремонта кристаллизаторов.

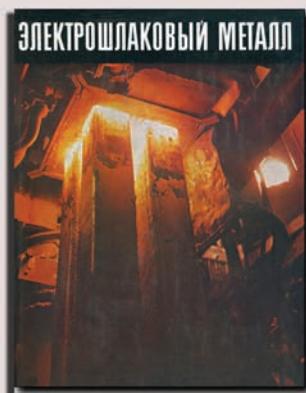
Наиболее распространенными дефектами медных кристаллизаторов при эксплуатации являются деформации и повреждение поверхности. Деформации можно снять путем применения гидравлических прессов, а в более трудных случаях путем вставки оправки в корпус кристаллизатора. Во всех случаях кристаллизатор должен соответственно нагреваться. В случае, если фланец можно снять, возможна повторная калибровка на гибочной машине.

Ремонт кокилей и при необходимости их удлинение может осуществляться дуговой сваркой в защитных газах (рис. 15).

Простые дефекты поверхности легко ремонтируются путем точечной дуговой сварки в защитных газах, а в случаях серьезного повреждения, необходимо заменить все дефектные участки (рис. 17).

*Кристиан Ейлер*

*Саар-Металлверке ООО, Саарбрюккен, Германия*



**ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫЙ МЕТАЛЛ** / Под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1981. — 680 с.

Монография посвящена вопросам качества электрошлакового металла, т. е. металлических материалов и заготовок из них, получаемых методами электрошлаковой технологии: электрошлаковым переплавом, электрошлаковым литьем, электрошлаковой обработкой и всеми способами укрупнения заготовок.

Приведены сведения о химическом составе, структуре, механических, физико-механических и технологических свойствах электрошлакового металла: сталей практически всех существующих классов, жаропрочных сплавов, чугунов, ряда цветных, высокорекреационных и тяжелых металлов и сплавов.

Изложены данные о технико-экономической эффективности производства и применения электрошлакового металла.

Книга содержит справочные материалы, которые будут полезными специалистам-металлургам и машиностроителям, конструкторам, студентам технических вузов и многим другим специалистам, связанным с производством, потреблением и обработкой металлов.