

УДК 669.018.44:621.791.14

Комплексная технология на основе сварки трением с перемешиванием для восстановления исходной геометрии изношенных медных плит кристаллизаторов МНЛЗ

Лежнин Никита Владимирович^{1(*)}nlezhnin@bk.ru
SPIN-код: 4353-2501Макаров Алексей Викторович¹avm@imp.uran.ru
SPIN-код: 3080-5032Котельников Александр Борисович²kab@mprom.biz
SPIN-код: 8738-4636Вопнерук Александр Александрович²rp.mmp@mprom.biz
SPIN-код: 5447-8809Чалина Марина Андреевна¹

marunetchka93@mail.ru

¹ ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, Россия² АО «НПП «Машпром», Екатеринбург, Россия

Аннотация. Представлена комплексная технология восстановления исходной геометрии плит кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок после критической степени износа. Технология позволяет повторно использовать парк списанных плит МНЛЗ. Метод заключается в нанесении сплошного слоя хромоциркониевой бронзы толщиной до 10 мм на рабочую поверхность плиты выполнением серии швов сваркой трением с перемешиванием. Предложена оснастка для жесткой фиксации плиты и присадочного материала в процессе сварки, позволяющая наносить слои бронзы на всю рабочую поверхность плиты. Разработана и испытана линейка сварочного инструмента.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, хромоциркониевая бронза, медная плита кристаллизатора, оснастка, сварочный инструмент

The recovery of the initial geometry of continuous casting mold copper plates by multi-pass friction stir welding

Lezhnin Nikita Vladimirovich^{1(*)}nlezhnin@bk.ru
SPIN-code: 4353-2501Makarov Alexey Viktorovich¹avm@imp.uran.ru
SPIN-code: 3080-5032Kotelnikov Alexander Borisovich²kab@mprom.biz
SPIN-code: 8738-4636Vopneruk Alexander Alexandrovich²rp.mmp@mprom.biz
SPIN-code: 5447-8809Chalina Marina Andreyevna¹

marunetchka93@mail.ru

¹ Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, IPM, Yekaterinburg, Russia² JSC R&D Enterprise Mashprom, Yekaterinburg, Russia

Abstract. The paper presents a new technology for repairing the geometry of mold plates for a continuous casting machine that has experienced significant wear. This technology

allows for the reuse of previously discarded plates from the casting machine. The method involves applying a layer of chromium-zirconium bronze, up to 10 micrometers thick, to the entire working surface of the plate using a multi-pass friction-stir welding. To ensure a uniform application of the bronze layer, equipment for rigidly fixing the plate and the filler material during the welding process is proposed. A line of specialized welding tools has been designed and tested to ensure efficient and accurate application of the new technology. This innovative approach offers a cost-effective solution for extending the lifespan of the mold plates and reducing waste in continuous casting operations.

Keywords: *multi-pass friction stir welding, chromium-zirconium bronze, mold copper plate, clamping system, welding tool*

Введение. Более 95 % стали в мире производится с использованием процесса непрерывной разливки. Ключевым узлом, обеспечивающим работоспособность и производительность машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) является кристаллизатор, стенки которого изготавливаются из теплопроводных медных сплавов и используются как быстроизнашивающийся инструмент. Стенка кристаллизатора представляет собой медную плиту размерами до 3200 мм в длину, 900 мм в ширину и 50 мм в толщину с сетью щелевых или кольцевых каналов водяного охлаждения и втулками крепления к опорным плитам кристаллизатора. Стойкость комплекта медных плит кристаллизатора МНЛЗ до ремонта, с учетом допустимого износа 1 мм на сторону, составляет 120 тыс. тонн отлитой стали для современными гальванических покрытий и более 500 тыс. тонн — для газотермических покрытий. Далее плиты кристаллизатора передаются в ремонт, где для восстановления рабочей поверхности требуется снятие покрытия и слоя медной основы еще порядка 1 мм. После 5–10 циклов ремонта, медная плита, несмотря на высокую остаточную стоимость, списывается в лом.

В связи с этим, важной задачей является создание комплексной технологии восстановления исходной геометрии стенок кристаллизатора с сохранением свойств материала, в первую очередь теплопроводности, для повторного использования. Реализация данной технологии даст возможность практически бесконечного цикла использования уже имеющегося у металлургических комбинатов парка плит кристаллизаторов МНЛЗ [1].

Традиционные способы сварки плавлением имеют ряд ограничений при нанесении слоя меди толщиной около 10 мм на площади около 2 м². Применение лазерных методов сварки ограничено из-за высокого коэффициента отражения медными сплавами лазерного излучения ближнего ИК-спектра, а использование дуговых методов является экономически нецелесообразным [2]. Таким образом, большой интерес представляет развитие технологии сварки трением с перемешиванием (СТП) для получения многопроходной сварки внахлест. В настоящей работе рассмотрена технологическая возможность наращивания сплошного слоя хромциркониевой бронзы методом СТП для восстановления всей площади рабочей поверхности плиты кристаллизатора МНЛЗ.

Аддитивная технология сварки трением с перемешиванием представляет частный случай СТП внахлест. Отличием аддитивной СТП является послой-

ная сварка плоских листов с помощью однопроводной или многопроводной сварки. На рис. 1, а показан принцип и основные параметры процесса СТП. В основе технологии СТП лежит разогрев и механическое перемешивание материала свариваемых заготовок вращающимся инструментом специальной геометрии.

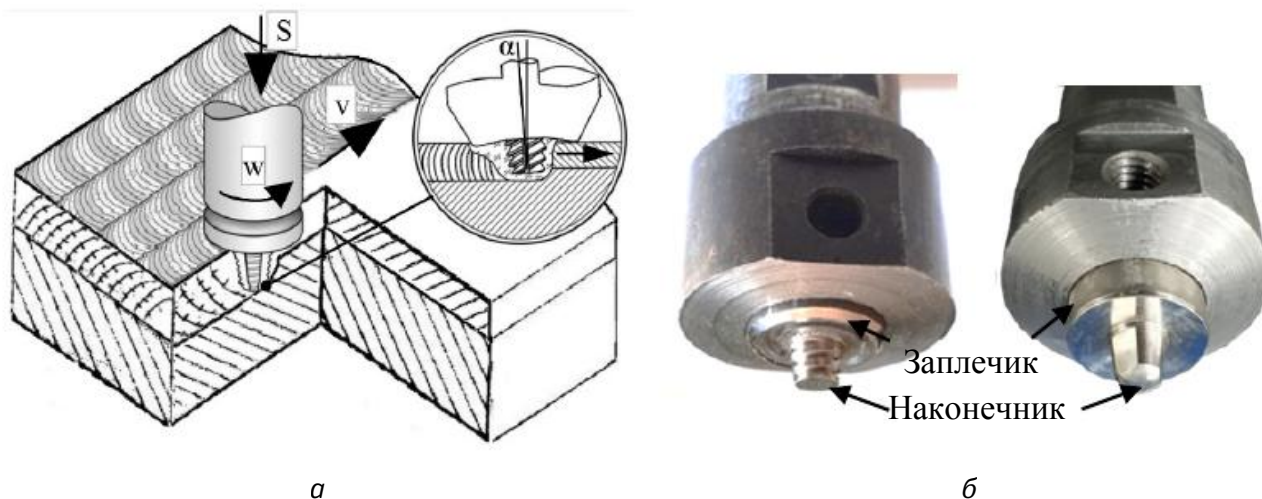


Рис. 1. Схема процесса сварки трением с перемешиванием (а) и сварочный инструмент (б):

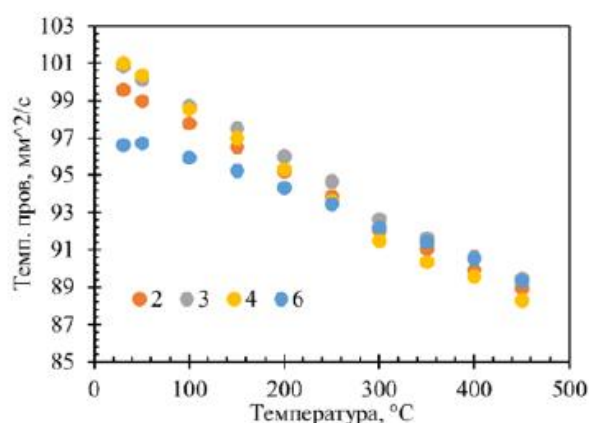
S — нагрузка; ω — скорость вращения; v — скорость сварки; α — угол наклона

Сварочный инструмент состоит из «заплечиков» и «наконечника» и выполняет три основные функции: нагрев материала, перемешивание материала для получения неразъемного соединения, удержание нагретого металла под инструментом. Нагрев металла до $0,5\text{--}0,9T_{\text{пл}}$ происходит благодаря трению заплечиков и наконечника инструмента о заготовку, а также в результате интенсивной пластической деформации материала заготовки вокруг инструмента. Локальный нагрев переводит материал вокруг наконечника инструмента в пластичное состояние и по мере поступательного движения вращающегося инструмента происходит перенос металла от передней к его задней кромке и заполнение сварного соединения. Заплечик удерживает разогретый металл в зоне сварки и ограничивает течение металла примерно на уровне поверхности заготовки. Внешний вид предложенного ИФМ УрО РАН инструмента из сплава ЖС6К для СТП бронзы приведен на рис. 1, б. Выполнение серии последовательных сварных швов с шагом, обеспечивающим достаточное перекрытие, формирует сплошной слой без дефектов [3]. Восстановление толщины можно выполнять в несколько слоев. Поперечное сечение восстановленного слоя приведено на рис. 2, а. Важно отметить, что температуропроводность нанесенного слоя соответствует характеристикам исходного материала восстанавливаемой плиты (рис. 2, б).

Для выполнения многопроводной СТП требуется либо специализированная сварочная машина, либо усиленный фрезерный станок с установленной сварочной головкой, позволяющей прикладывать осевое усилие на сварочный инструмент до 3 тн и осуществлять его автоматический контроль.



а



б

Рис. 2. Макроструктура в поперечном сечении восстановленного слоя (а) и температуропроводность по глубине восстановленного слоя (б): 2, 3, 4 — на глубине 3, 5 и 7 мм, соответственно; 6 — материал восстанавливаемой плиты

Процесс восстановления плиты включает наложение присадочной пластины требуемой толщины на рабочую поверхность плиты кристаллизатора и установку набора технологических планок из того же материала, как показано на рис. 3, а. Роль технологических планок заключалась в выведении наиболее дефектных зон швов за пределы восстанавливаемой поверхности плиты. Оснастка для жесткой фиксации на сварочном столе плиты кристаллизатора в сборе с планками и присадочной пластиной, разработанная в ИФМ УрО РАН, показана на рис. 3, б. При необходимости, оснастка с плитой может помещаться в ванну (рис. 3, в) для выполнения сварки трением с перемешиванием с погружением в охлаждающую жидкость (рис. 3, д) [4].

В процессе сварки из-за заглубления сварочного инструмента в материал происходит потеря порядка 0,3–0,5 мм от толщины присадочной пластины. В результате чего толщина нанесенного слоя сокращается на соответствующую величину. При многопроходной сварке отмечено снижение твердости нанесенного слоя до 85–105 HV1 по сравнению с исходной твердостью бронзы 116–126 HV1. Поскольку хромциркониевая бронза является дисперсионно твердеющим сплавом, уровень механических свойств корректируется двухэтапной термической обработкой, состоящей из закалки и последующего старения. Затем выполняется фрезеровка поверхности и нанесение износостойкого покрытия [5].

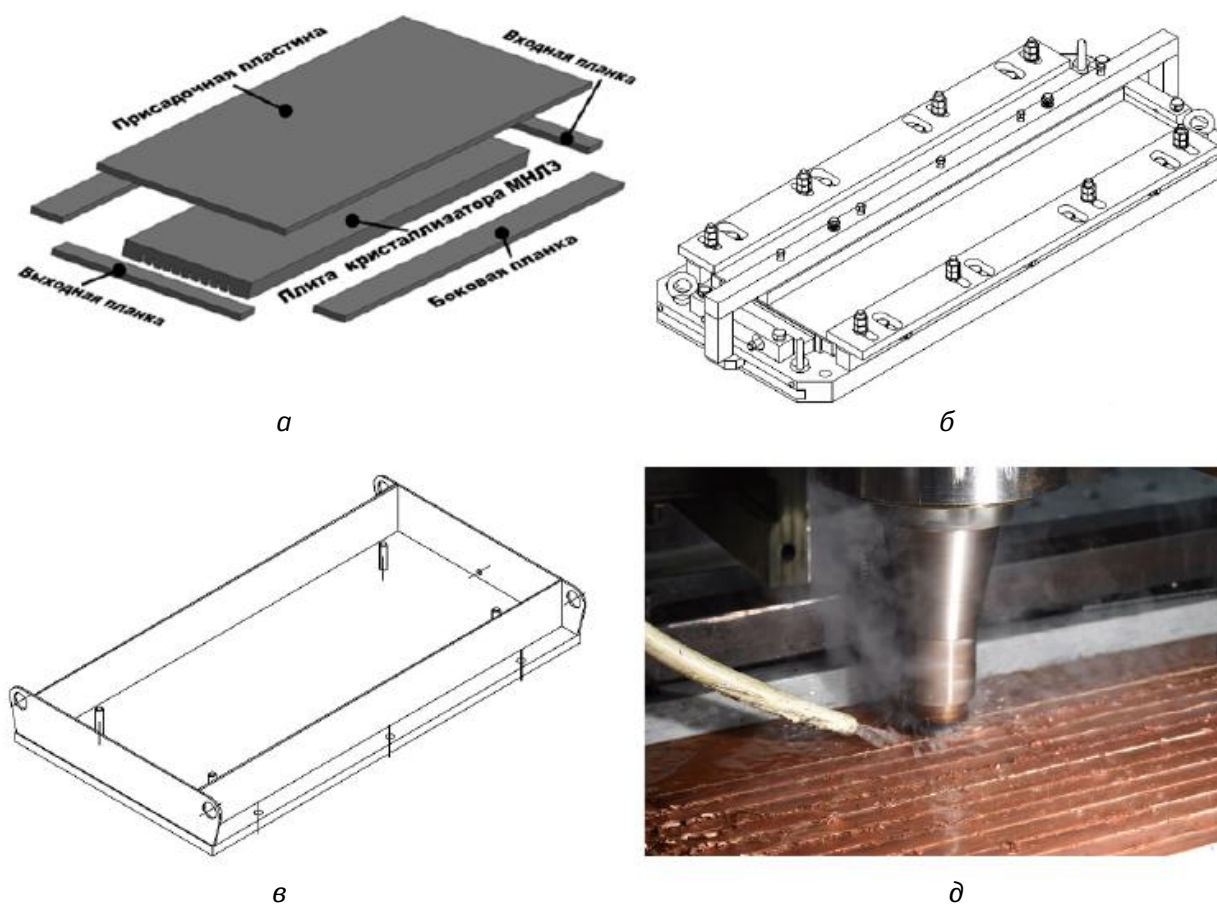


Рис. 3. Схема сборки фрагмента стенки кристаллизатора с присадочными планками (а), система фиксации сборки (б), ванна с охлаждающей жидкостью (в), выполнение СТП бронзы с водяным охлаждением (д)

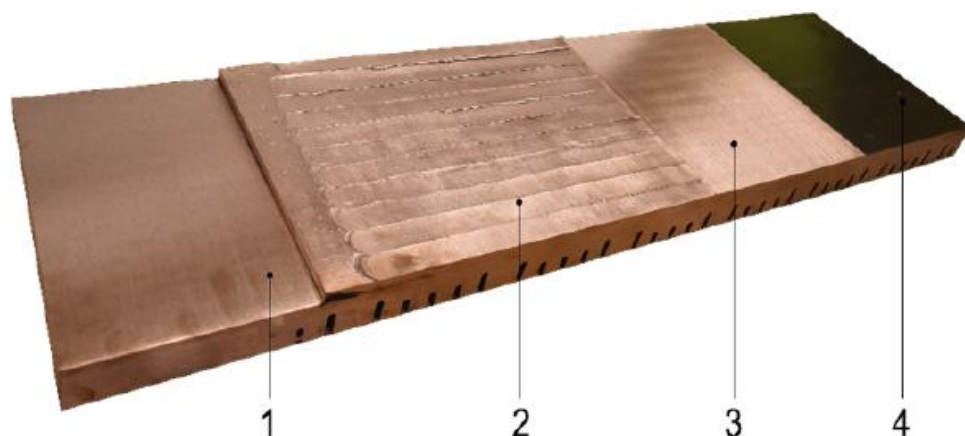


Рис. 4. Образец стенки МНЛЗ, демонстрирующий стадии восстановления плиты:
1 — изношенная плита; 2 — восстановленный слой со следами СТП; 3 — восстановленный слой после фрезерования следов СТП; 4 — износостойкое газотермическое покрытие

Образец узкой стенки кристаллизатора МНЛЗ, изготовленной из хром-циркониевой бронзы марки БрХ1Цр, размером 900×250 мм, на котором представлены все стадии восстановления, показан на рис. 4. Образец и технология

восстановления плит экспонировались на международной выставке ИННОПРОМ-2025, г. Екатеринбург.

Заключение. В рамках реализации комплексного проекта УМНОЦ «Передовые производственные технологии и материалы» разработана и реализована технология восстановления изношенных медных плит кристаллизаторов МНЛЗ методом многопроходной плоскостной сварки трением с перемешиванием при наложении присадочной пластины из аналогичного сплава. Соединение материалов происходит в твердой фазе, что исключает появление дефектов характерных для традиционной сварки плавлением медных сплавов, вызывающих недопустимое падение теплопроводности. Реализация технологии позволит возвращать в оборот медные плиты кристаллизаторов МНЛЗ, выведенные после эксплуатации до минимально допустимой толщины, и практически полностью отказаться от их импорта.

Список источников

- [1] Макаров А.В., Иноземцев А.А., Дегтярь В.Г., Харанжевский Е.В., Котельников А.Б., Вопнерук А.А. Обеспечение технологического суверенитета России в металлургии и машиностроении. *Вестник РАН*, 2024, т. 94, № 3, с. 232–245.
- [2] Макаров А.В., Лежнин Н.В., Котельников А.Б., Вопнерук А.А., Коробов Ю.С., Валиуллин А.И., Волкова Е.Г. Восстановление стенок кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок из хромциркониевой бронзы методом многопроходной сварки трением с перемешиванием. *Известия вузов. Цветная металлургия*, 2023, т. 29, № 6, с. 66–83.
- [3] Лежнин Н.В., Макаров А.В., Валиуллин А.И., Котельников А.Б., Вопнерук А.А. Применение аддитивной технологии на основе сварки трением с перемешиванием для восстановления исходной геометрии изношенных плит кристаллизаторов МНЛЗ. *Тяжелое машиностроение*, 2023, № 11–12, с. 26–33.
- [4] Макаров А.В., Лежнин Н.В., Котельников А.Б., Вопнерук А.А. *Способ восстановления плиты кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок*. Патент № 2826836 РФ, бюл. № 26, 2024, 16 с.
- [5] Коробов Ю.С., Котельников А.Б., Певзнер Б.В., Девятьяров М.С. *Стенка кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок*. Патент № 228903 РФ, бюл. № 26, 2024.