



УДК. 669.187.2

ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЙ РЕМОНТ СЛЯБОВЫХ МЕДНЫХ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ МНЛЗ. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МЕТАЛЛА В ЗОНЕ СОЕДИНЕНИЯ

Г. М. Григоренко, Л. И. Адеева, А. Ю. Туник, М. А. Полещук,
В. И. Зеленин, Е. В. Зеленин

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.
03680, г. Киев-150, ул. Боженко 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Приведены результаты исследования структуры и свойств сварных соединений медных пластин, полученных внахлест сваркой трением с перемешиванием (СТП). Соединяли пластины из чистой меди (М0) разной толщины: верхние — 2,5...5 мм, нижние — 16...22 мм. При СТП меди в результате пластической деформации металла, нагретого до температуры рекристаллизации, получены качественные сварные соединения без трещин и подрезов между основным металлом и металлом шва, а также пор в зоне соединения. Путем накладывания швов на определенном расстоянии друг от друга можно получить сплошное приваривание более тонкой верхней к массивной нижней пластине (по типу наплавки) с перекрытием зон перекристаллизации при минимальном нагреве и короблении деталей. В процессе деформации и перемешивания металла в твердой фазе создается более плотная микроструктура металла зоны соединения по сравнению с основным материалом. Микротвердость металла швов сопоставима с микротвердостью основного металла, а иногда бывает даже выше за счет измельчения зерна и деформации структуры. Так, при скоростях перемещения 110 мм/мин и вращения инструмента 1400 об/мин образовалось сварное соединение, практически равнопрочное с основным металлом. Проведенные исследования позволяют рекомендовать способ СТП для приварки внахлест медного листа к медной плите кристаллизатора машин непрерывного литья заготовок с целью восстановления его первоначальных размеров. Библиогр. 18, табл. 1, ил. 8.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием; рабочий инструмент; режимы сварки; механическое перемешивание; структура; микротвердость; рентгеноструктурный анализ

Критерием эффективности работы кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) на металлургических заводах является срок службы охлаждаемых медных плит, формирующих прямоугольную полость, в которой происходит затвердевание металла заготовки. Применяются преимущественно медные плиты марки МСр (содержание серебра 0,08...0,12 %), стойкость которых не превышает 100 плавов. В последние годы интенсивно внедряются плиты с покрытиями из никеля, Ni-Co, керамики и других материалов. Применение защитных покрытий в несколько раз повышает стоимость кристаллизаторов, однако снижает потери меди, расходы на переналадку кристаллизаторов, увеличивает их стойкость до 1000 плавов [1–4].

Несмотря на значительные успехи в продлении срока службы медных плит с покрытиями проблемы их ремонта остаются актуальными, а создание технологий восстановления слябовых кристаллизаторов

МНЛЗ является важным направлением в металлургии.

Для ремонта медных плит применяются различные способы (газовая, дуговая, контактная сварка, высоко- и низкотемпературная пайка). Однако получить качественное соединение с помощью традиционных способов сварки плавлением довольно трудно, поскольку медь отличается высокой теплопроводностью — примерно 400 Вт/(м·К). При традиционной сварке плавлением из-за высокой теплопроводности меди требуется большее тепловложение, что может приводить к окислению и короблению медных пластин. Кроме того, после сварки в металле шва и зоны влияния образуется крупное зерно, что вызывает резкое снижение прочности.

Для разрешения указанной проблемы перспективным представляется использование нового сварочного процесса — сварки трением с перемешива-

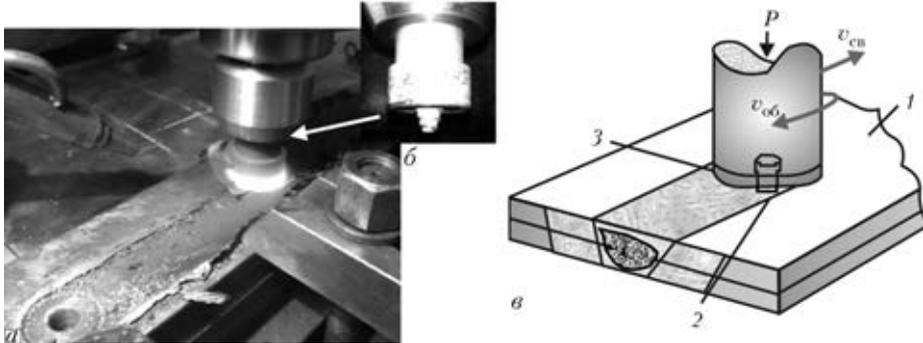


Рис. 1. Общий вид установки (а), рабочий инструмент (б), схема процесса СТП (е): 1 — изделие; 2 — инструмент со специальным профилем; 3 — заплечик

нием (СТП) [5]. Физическая сущность способа СТП заключается в нагреве деталей путем непосредственного преобразования механической энергии в теплоту в результате работы сил трения. В процессе сварки металл не расплавляется, соединение формируется из металла в пластичном состоянии. Благодаря этой особенности достигается ряд существенных преимуществ, основное из которых заключается в получении соединения при пониженном тепловложении. Данная технология хорошо развита и успешно используется для алюминия и его сплавов [6, 7]. Изучаются возможности ее применения для сталей, титановых и магниевых сплавов и т. д. [8–11].

Процесс СТП меди исследовали многие авторы [12–16], однако он еще не достаточно хорошо разработан. Поскольку температура плавления и теплопроводность у меди намного выше, чем у алюминия, а сварка проходит при значительно большем тепловложении, следует использовать инструмент, устойчивый против высоких температур.

Цель настоящей работы заключалась в получении СТП соединений медных пластин внахлест, установлении взаимосвязи между структурными изменениями, микротвердостью образцов и режимами, при которых выполняли сварку.

В качестве исходных материалов применяли пластины из чистой меди (М0) разной толщины: верхние — 2,5...5,0, нижние 16...22 мм. Пластины соединяли путем наложения однопроходных швов на определенном расстоянии друг от друга. Для определения оптимальных режимов для СТП чистой меди сварку выполняли при различных скоростях передвижения инструмента и расстояния между швами. Установка для СТП, рабочий инструмент и схема процесса приведены на рис. 1.

Сварку выполняли торцом вращающегося инструмента (рис 1, б, е), имеющего выступающий стержень (пин), который, проникая сквозь верхнюю пластину при перемещении, смешивает металл обеих пластин, образуя шов [12]. Материал инструмента подбирали жаростойким и жаропрочным, что позволило вести процесс при температурах до 900 °С. В этом температурном интервале медь переходит в пластичное состояние. Сам инструмент, особенно пин, подвергается высоким термомеханическим нагрузкам. На разогретый рабочий стержень одновременно действуют вращающий момент и знакопеременные циклические изгибающие силы. Важным требованием к материалу инструмента при этих

температурах является достаточно высокая прочность на изгиб.

Особое значение имеет и форма инструмента. Наилучшие результаты обеспечивает использование пина конусной формы, поскольку в этом случае изгибающие нагрузки передаются по касательной на основное тело инструмента, что очень важно в случае использования инструмента повышенной хрупкости [4]. Для получения качественного соединения подбирались необходимые скорость вращения и осевое давление на инструмент.

Для СТП меди с толщиной верхней привариваемой пластины от 2,5 до 5,0 мм оптимальной являлась боковая нагрузка $2 \cdot 10^4$ Н при осевой нагрузке до $5 \cdot 10^4$ Н и оборотах примерно 1200 об/мин. Скорость перемещения инструмента составляла 80 мм/мин, температура в зоне перемешивания достигала 900 °С.

Металлографические исследования образцов сварных соединений (полированных и после химического травления в концентрированной 50%-й азотной кислоте) осуществляли на оптическом микроскопе «Неофот-32», дюраметрический анализ — на твердомере М-400 фирмы «Лесо» при нагрузке 0,249 и 0,496 Н. Рентгеноструктурный фазовый анализ выполняли на дифрактометре ДРОН-УМ1 в медном излучении CuK_α .

Металлографические исследования структуры поперечного сечения сварного соединения, полученного при сварке двух медных пластин толщиной 5 и 22 мм, при однопроходном воздействии инструмента показали, что соединение является плотным без трещин и пустот. В соединении зафиксированы зоны, представленные на рис. 2. Основной металл (зона I) показан на рис. 2, б. Структура металла привариваемой пластины (зона II) представляла собой равноосные зерна размером 15...120 мкм с редкими двойниками (рис. 2, в). Микротвердость основного и привариваемого металлов пластины составляла соответственно (1145 ± 60) и (1195 ± 40) МПа.

Типичным для швов, полученных способом СТП как встык, так и внахлест, является наличие ядра, состоящего из овальных концентрических окружностей в виде «годовых» колец. Образование ядра связано с процессами перемешивания металла в пластическом состоянии наконечником рабочего инструмента. Сверху к ядру примыкает перекристаллизованный участок равноосного мелкого зерна верхней пластины, вместе с ядром образующие шов сварного соединения. В центре соединения находится

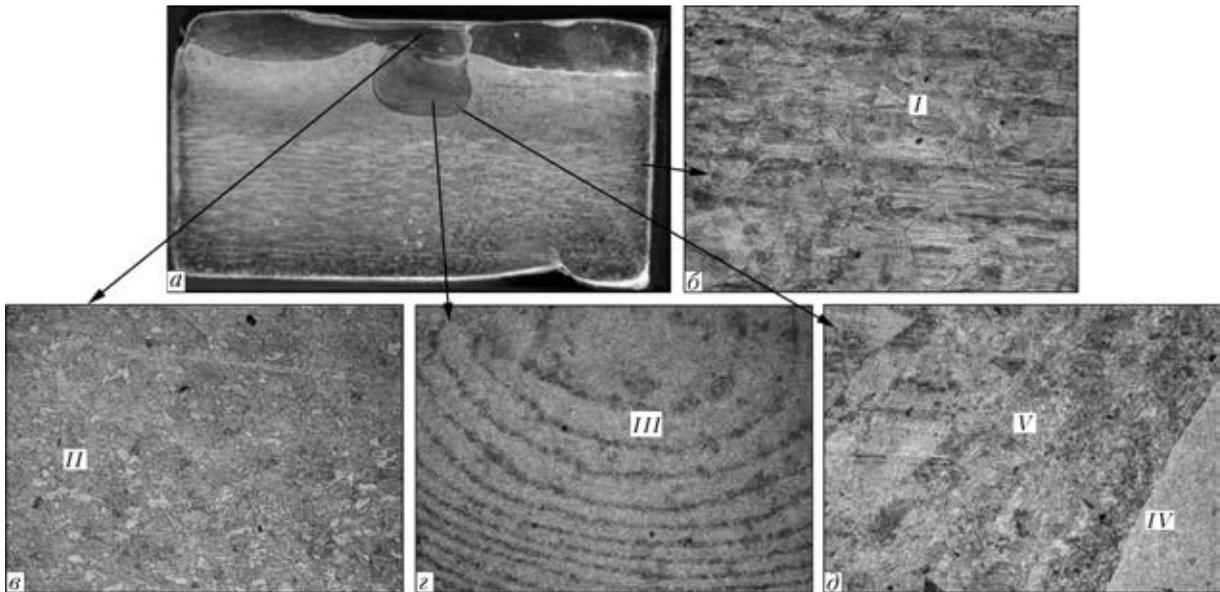


Рис. 2. Структура металла сварного соединения (поперечный разрез), полученного при СТП медных пластин: *a* – общий вид; *b* – основной металл; *c* – металл верхней пластины; *d* – ядро соединения; *e* – зона термомеханического влияния; *f* – зона термического влияния; *g* – зона пластической деформации; *a* – $\times 3$; *b*–*g* – $\times 100$

ся ядро диаметром около 9 мм (зона III) с характерными концентрическими деформационными кольцами (рис. 2, *g*). В зоне III происходит динамическая рекристаллизация перемешиваемых металлов. Структура ее металла состоит из равноосных зерен размером 5...30 мкм, микротвердость – (1157±50) МПа. Вокруг ядра расположены зоны термического (IV) и термомеханического влияния (V) (рис. 2). В зоне IV произошла полная перекристаллизация с образованием зерна такого же размера, как и в ядре. Следы деформации устранены в результате аккумуляции тепла в металле шва. В зоне V металл нагревается и подвергается пластической деформации. Протяженность этих зон – соответственно 300...350 и 400 мкм (рис. 2, *d*). Мик-

ротвердость их составляет соответственно (1145±80) и (1170±30) МПа. На рис. 3 приведена структура металла этого же сварного соединения в продольном сечении шлифа.

Исследование тепловых процессов при СТП меди показало [17], что температура вблизи инструмента достигает максимальных значений (850 °С) и удерживается очень короткое время. Температурный интервал, определяющий ЗТВ, также сохраняется в течение нескольких секунд. Деформация в локальном объеме способствует образованию структуры металла, существенно отличающейся от основного металла. Это приводит к возникновению напряжений между отдельными элементами структу-

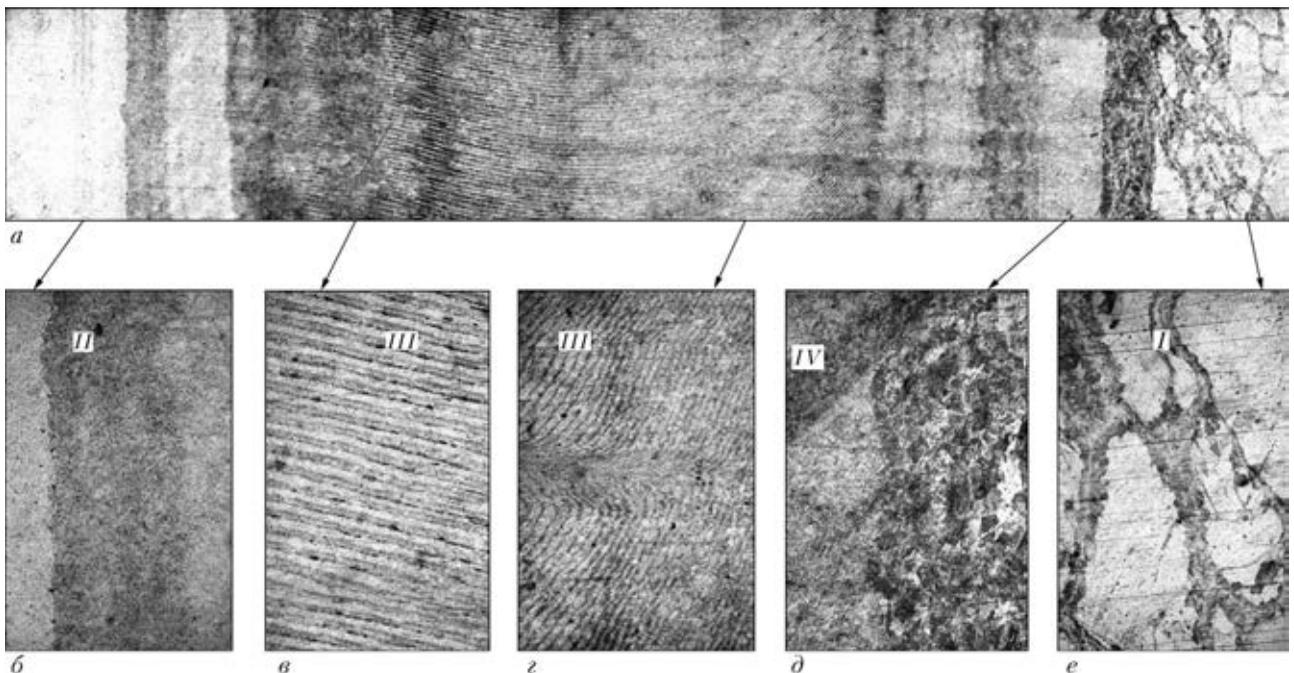


Рис. 3. Структура металла сварного соединения (продольный разрез), полученного при СТП медных пластин: *a* – общий вид; *b* – верхняя пластина; *c*, *e* – ядро соединения; *d* – ЗТВ и ЗТМВ; *e* – основной металл; *a* – $\times 3$; *b*–*d* – $\times 100$

Режимы СТП и характеристики свариваемых материалов

№ шва	Свариваемые слои	Толщина слоев, мм	Скорость перемещения инструмента, мм/мин	Нагрузка, $1 \cdot 10^4$ Н	Расстояние между центрами швов, мм
1	Верхний	2,5	56	Боковая	1-2 – 16
2	медный		80	2	2-3 – 17
3	Нижний	16,0	110	Осевая	3-4 – 19
4	медный		160	5	

Примечание. 1. Глубина проникновения инструмента – 5,5 мм. 2. Скорость вращения инструмента – 1400 об/мин. 3. Сечение шлифов по направлению к сварке – поперечное.

ры (структурными напряжениями), т. е. напряжениям второго рода.

Для измерения уровня этих напряжений применяли способ рентгеновской дифрактометрии [18]. Исследовали металл шва сварного соединения, полученного при СТП пластин меди одинаковой толщины (по 5 мм). Для сравнения изучали исходную медную пластину после термообработки (650°C). По рентгенограммам образцов основного металла (рис. 4, а) и металла шва (рис. 4, б) определены области когерентного рассеивания (ОКР) и напряжения второго рода в относительных единицах ($\Delta\alpha/\alpha$). Область ОКР для основного металла составляет 73 нм, что больше, чем для металла шва (30 нм). Это свидетельствует о том, что металл шва под воздействием термодеформационного цикла имеет большее количество несовершенств кристаллической решетки и, следовательно, кристаллизуется в более мелкозернистую структуру. Напряженное состояние в металле шва в относительных единицах составляет 0,0008, в основном металле – 0,0003. Несмотря на то, что напряжения второго рода в металле швов в 2,5 раза больше, чем в отожженном основном металле, по уровню эти напряжения незначительны. Еще одна существенная особенность СТП – данный способ сварки позволяет накладывать последующий шов на каком угодно расстоянии от предыдущего.

На рис. 5 представлены три сварных шва, расположенных на расстоянии 21...25 мм друг от друга без перекрытия зон приварки и ЗТВ (режимы сварки аналогичны приведенным). При определенных условиях можно получить сплошную приварку одной пластины к другой по типу наплавки при минимальном нагреве и короблении детали. Таким образом, как показывают наши исследования и приведенные в работах [6, 9, 11–14], при правильно подобранных режимах СТП статическая прочность в испытаниях на растяжение и изгиб, относительное удлинение, ударная вязкость, усталостная прочность, т. е. почти все механические параметры металла соединения, находятся на уровне, соответствующем основному металлу или близкому к нему.

При сварке способом СТП двух медных пластин различной толщины изучали влияние скорости сварки и расстояния между центрами швов на структуру и микротвердость металла полученных соединений. Пин-инструмент проходил сквозь тонкую верхнюю пластину, погружаясь в нижнюю за линию

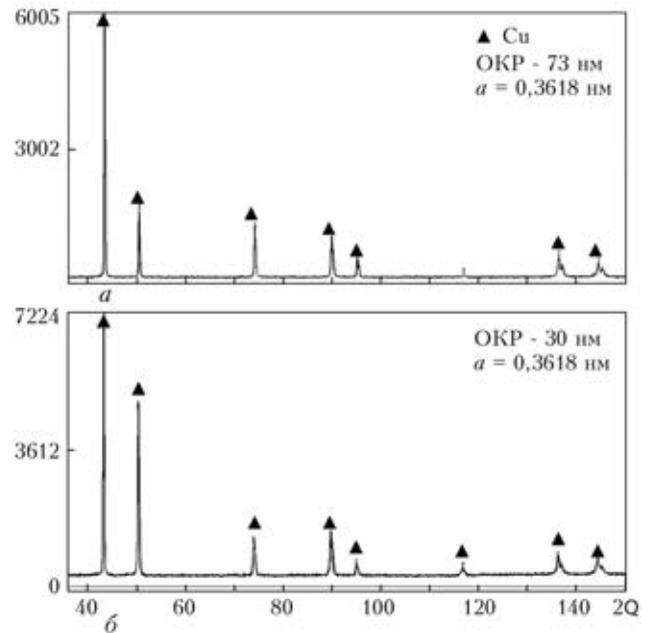


Рис. 4. Рентгенограмма основного металла (а) и металла шва сварного соединения Cu/Cu (б), полученного способом СТП

раздела двух свариваемых деталей. Режимы СТП приведены в таблице. Получено четыре сварных шва при разных скоростях продольного перемещения (56...160 мм/мин) и постоянной скорости вращения инструмента (1400 об/мин). Расстояние между центрами швов изменялось от 16 до 19 мм (рис. 6). Диаметр запящника составлял 31 мм, инструмент изготовлен из WC-Co.

Макроструктура поперечного сечения сварных швов, выполненных при различных скоростях перемещения инструмента, представлена на рис 6. Установлено, что в процессе СТП получены качественные соединения двух медных пластин разной толщины (2,5 и 16,0 мм). Пор и непроваров в зоне сварных соединений не обнаружено.

При металлографическом исследовании микроструктур обнаружено, что структура основного металла состоит из крупных (100...1000 мкм) зерен с двойниками. Изменение скорости перемещения инструмента (от 56 до 160 мм/мин) не оказывает существенного влияния на структуру металла сварных соединений. Во всех случаях в результате прохождения инструмента в верхнем наплавленном слое происходит динамическая перекристаллизация и образуется мелкозернистая структура с размером равноосных зерен от 20 до 100 мкм. Глубина этой зоны составляет 3...5 мм.

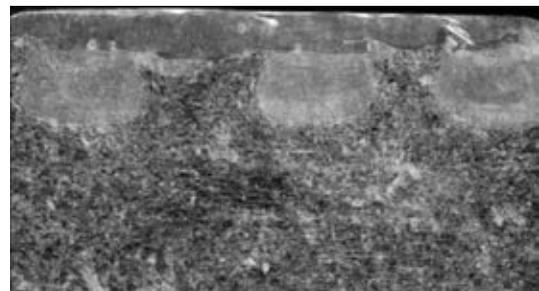


Рис. 5. Макроструктура (x3) металла трехшовного сварного соединения, полученного внахлест способом СТП

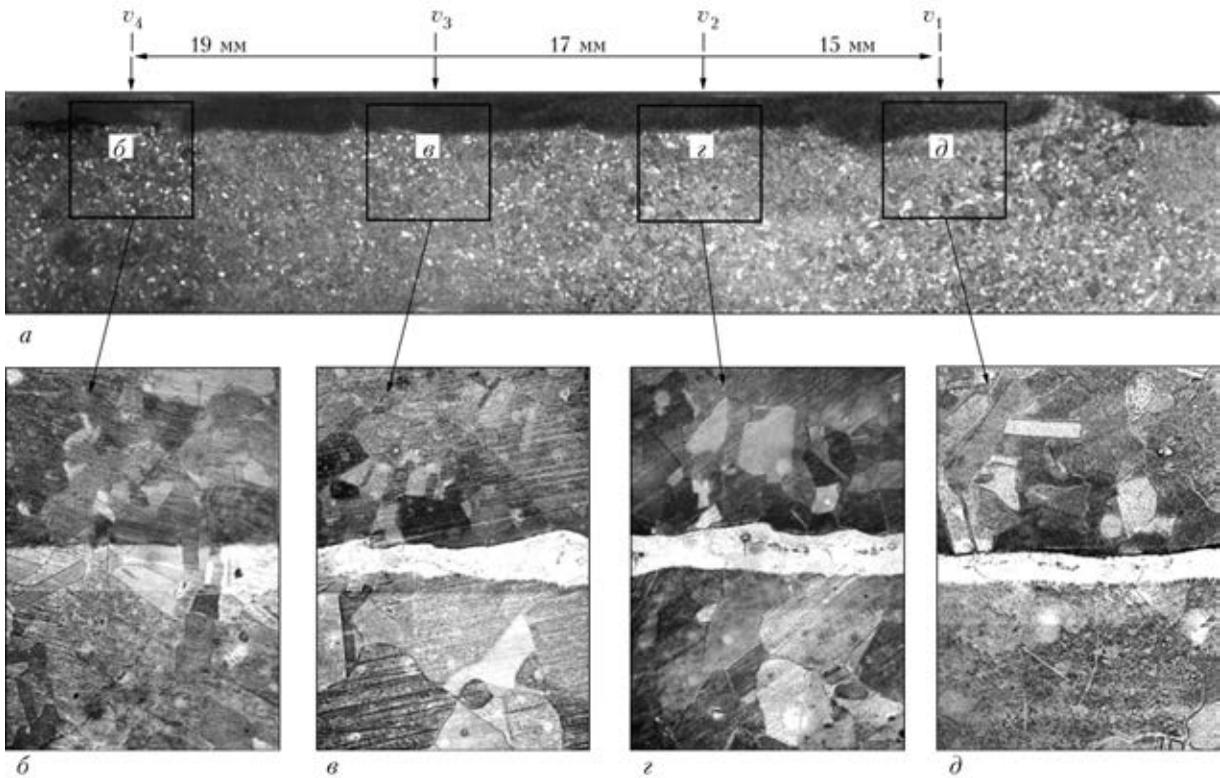


Рис. 6. Макро- (а) и микроструктура (б-д) металла сварных соединений, полученных при различных скоростях передвижения инструмента, об/мин: д - $v_1 = 56$; г - $v_2 = 80$; в - $v_3 = 110$; б - $v_4 = 160$; а - $\times 3$; б-д $\times 200$



Рис. 7. Структура областей перекрытия между швами: а - 1 и 2; б - 2 и 3; в - 3 и 4, $\times 15$

Под перекристаллизованным металлом верхнего слоя образуется зона ядра овальной формы со слабо очерченными прерывистыми «годовыми» кольцами, глубина которой колеблется от 2 до 5 мм. Размер зерна в ней соизмерим с размером зерна перекристаллизованного металла верхней пластины. В зоне перехода от перекристаллизованного металла ядра к основному металлу обнаружена плохо травящаяся

$HV/HV_{0,м} \%$

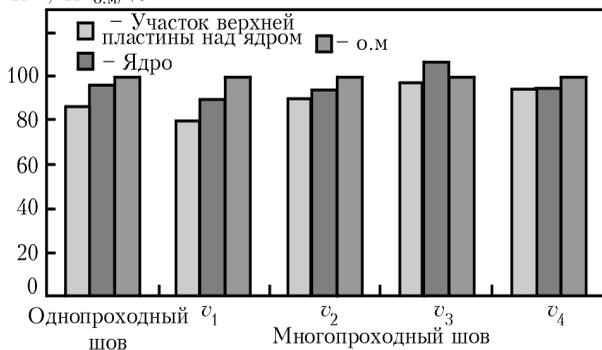


Рис. 8. Отношение микротвердости различных участков шва HV к микротвердости основного металла $HV_{0,м}$

полоса. Очевидно, ее образование связано с деформационными процессами, которые происходят на границе двух зон — зоны перемешивания и ЗТВ. В этой полосе регистрируются цепочки дисперсных оксидных включений (рис. 6).

Как показывают исследования, при СТП внахлест легкоплавких металлов расстояние между швами, равное $1/2$ диаметра заплечика, обеспечивает приварку пластин между собой. При сварке меди зоны перемешивания металла швов перекрывают друг друга (рис. 7). Даже максимальное расстояние между центрами швов (19 мм) при данном диаметре заплечика (31 мм) позволяет получить сплошную линию приварки верхней пластины и нижней. Таким образом, при использованных режимах сварки выделялось количество тепла, необходимое для пластификации и перемешивания материала свариваемых деталей и образования качественного сварочного соединения по типу наплавки.

При СТП достигается высокое качество сварки. В процессе деформации и перемешивания металла в твердой фазе создается более плотная микроструктура зоны соединения, сопоставимая с основным



материалом. Микротвердость металла швов достигает 80...90 % микротвердости основного металла, а иногда даже выше из-за измельчения зерна (рис. 8). Так, при скорости перемещения 110 мм/мин и скорости вращения инструмента 1400 об/мин образовалось сварное соединение, практически равнопрочное с основным металлом. Микротвердость металла участков шва (металла верхней пластины и ядра) по отношению к основному металлу составляет соответственно 98 и 107 %.

Выводы

1. Процесс СТП меди, проводимый без расплавления основного металла за счет пластической деформации металла, нагретого до температуры рекристаллизации при оптимальных режимах сварки, позволяет получить качественное сварное соединение.
2. Путем наложения параллельных швов на определенном расстоянии друг от друга можно получить сплошное приваривание более тонкой верхней к массивной нижней пластине (по типу наплавки) при минимальном нагреве и короблении деталей.
3. В процессе деформации и перемешивания металла в твердой фазе создается более плотная микроструктура зоны соединения по сравнению с основным материалом.
4. Проведенные исследования позволяют рекомендовать способ СТП для приварки внахлест медного листа к медной плите кристаллизатора МНЛЗ с целью восстановления его первоначальных размеров.

1. *Радиальный* слябовый кристаллизатор со шелевыми каналами и никелевым покрытием стенок / А. А. Макрушин, А. В. Куклев, Ю. М. Айзин и др. — М.: Металлургия, 2005. — С. 38–41.
2. *Masato T.* Кристаллизаторы установок непрерывной разливки стали от «Mashima Kosan». Электролакирование и термическое напыление: Междунар. науч.-практ. семинар. — Екатеринбург, 2009. — С. 1–19.
3. *Improvement in continuous casting mold technology the first fully ceramic E coated molds* / K. Goode, D. Preshaw, B. Stalker et al. // *Iron & Steel Technology*. — 2008. — 7, № 2. — С. 74–76.
4. *Упрочнение* наплавкой трением с перемешиванием никелем медных стенок кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок / Г. М. Григоренко, В. И. Зеленник, П. М. Кавуненко и др. // 36. науч. ст. за результатами, отриманими в 2010–2012 рр., цільової комплексної прог-

- рами НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин». — Киев: ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, 2012. — С. 369–372.
5. *Pat.* 9125978.8 GB, МПК РСТrGB92. Friction stir butt welding / W. M. Thomas. — Publ. 01.12.91.
 6. *Ищенко А. Я., Лабур Т. М.* Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов. — Киев: Наук. думка, 2013. — 415 с.
 7. *Карманов В. В., Каменева А. Л., Карманов В. В.* Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов: сущность и специфические особенности процесса, особенности структуры сварного шва // *Аэрокосмическая техника*. — 2012. — № 32. — С. 67–80.
 8. *Эрикссон Л. Г., Ларссон Р.* Ротационная сварка трением, научные исследования и новые области применения // *Технология машиностроения*. — 2003. — № 6. — С. 81–84.
 9. *Kwon Y. J., Shigematsu I., Saito N.* Dissimilar friction stir welding between magnesium and aluminum alloys // *Materials Letters*. — 2008. — 62. — P. 3827–3829.
 10. *Zhou L., Liu H. J.* Effect of 0.5 wt.% hydrogen addition on microstructural evolution of Ti–6Al–4V alloy in the friction stir welding and post-weld dehydrogenation process // *J. Materials characterization*. — 2011. — 62. — 1036–1041.
 11. *Ueji R., Fujii H. b, Cui L.* Friction stir welding of ultrafine grained plain low-carbon steel formed by the martensite process // *J. Mater. Sci. and Eng.* — 2006. — A 423. — P. 324–330.
 12. *Технология* восстановительного ремонта слябовых кристаллизаторов МНЛЗ наплавкой трением с перемешиванием / Ю. Н. Никитюк, Г. М. Григоренко, В. И. Зеленник и др. // *Современ. электротехнология*. — 2013. — № 3. — С. 51–55.
 13. *Microstructure and mechanical properties of friction stir welded pure Cu plates* / Y. Sun, N. Xu., Y. Morisada, H. Fujii // *Transaction of JWRI*. — 2012. — 41, № 1. — P. 53–58.
 14. *Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the dissimilar Al–Cu joints* / P. Xue, D. R. Ni, D. Wang et al. // *Mater. Sci. and Eng.* — 2011. — 528. — P. 4683–4689.
 15. *Sun Y. F., Fujii H.* Investigation of the welding parameter dependent microstructure and mechanical properties of friction stir welded pure copper // *Ibid.* — 2010. — 527. — P. 6879–6886.
 16. *Hwang Y. M., Fan P. L., Lin C. H.* Experimental study on Friction Stir Welding of copper metals // *J. of materials processing technology*. — Sun Yat-Sen University No. 70, Lien-Hai Rd., Kaohsiung 804, Taiwan-210, (2010). — P. 1667–1672.
 17. *Savolainen K.* Friction stir welding of copper and microstructure and properties of the welds // *Doctoral dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology*. — Espoo, Finland: Aalto University School of Engineering, 2012. — 174 p.
 18. *Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия* / Я. С. Уманский, Ю. А. Скаков, А. Н. Иванов, Л. Н. Расстригов. — М.: Металлургия, 1982. — 632 с.

Given are the results of investigation of structure and properties of welded joints of copper plates, produced by overlap friction stir welding (FSW). The plates of pure copper (M0) of different thickness were joined: upper ones were 2.5...5.0 mm. lower ones — 16...32 mm. In FSW of copper, as a result of plastic deformation of metal, heated up to the temperature of recrystallization, the quality welded joints were produced without cracks and undercuts between the base metal and weld metal, as well as pores in the joining zone. By laying out of welds at a definite distance from one another it is possible to produce the full welding-on of thinner upper to massive lower plate (similar to surfacing) with overlapping the zones of recrystallization at minimum heating and distortion of parts. During the process of deformation and stirring of metal in solid state the more dense microstructure of metal of joining zone is created as compared with the base metal. Microhardness of metal of welds is comparable with hardness of base metal, and sometimes being higher due to refining of grain and deformation of structure. Thus, at rates of displacement 110 mm/min and tool rotation 1400 rpm the welded joint was formed almost equal by strength to the base metal. The carried out investigations can recommend the FSW method for overlap welding of copper sheet to copper plate of moulds of the machines for continuous casting of billets to restore their initial sizes. 18 Ref., 1 Table, 8 Figures.

Key words: friction stir welding; working tool; welding modes; mechanical stirring; structure; microhardness; X-ray diffraction microanalysis

Поступила 30.12.2014