

УДК 669.74

ПОЛУЧЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ Cu–Mg-СПЛАВОВ

© 2013 г. Э.Б. Тен, И.Б. Бадмажапова

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

Разработана технология получения литых заготовок из Cu–Mg (0,1–1,0 %) сплавов, в которой процессы непрерывной плавки и непрерывного горизонтального литья реализованы в одном плавильно-литейном агрегате. При этом рафинирующая и гомогенизирующая обработка расплава осуществляется непрерывно в течение всего времени плавки и литья. Принятые для этого технические решения позволяют: преодолеть трудности обеспечения прецизионного содержания магния; устранить сильную ликвацию его в расплаве; нейтрализовать высокую поверхностную активность магния и склонность его к окислению; стабилизировать усвоение магния из лигатуры и минимизировать загрязнение расплава продуктами его окисления; достичь глубокого рафинирования металла от газов и неметаллических включений; гомогенизировать расплав по химическому составу и обеспечить получение высококачественных литых заготовок.

Ключевые слова: Cu–Mg-бронзы, непрерывная плавка, раскисление углеродом, рафинирование и гомогенизация продувкой аргоном, дозирование шихты, непрерывное литье заготовок.

Cu–Mg (0,1–1,0 %) alloy billet production process has been developed where continuous melting and continuous horizontal molding are realized in one melting-casting facility. In this case, the melt refining and homogenizing treatment is carried out continuously during the melting and casting time. The accepted technical solutions allow us to overcome the difficulties in magnesium precise content provision; eliminate high segregation in the melt; neutralize high surface activity of magnesium and its oxidation susceptibility; stabilize magnesium recovery from ligature and minimize the melt contamination with products of its oxidation; reach the deep metal refining from gases and nonmetallic inclusions; homogenize the melt in the chemical composition and provide obtaining high-quality billets.

Key words: Cu–Mg-bronzes, continuous melting, carbon deoxidization, argon blow refining and homogenization, fusion mixture batching, continuous casting of billets.

Низколегированные Cu–Mg-сплавы (магние-вые бронзы), содержащие 0,1–1,0 % Mg, благодаря сочетанию комплекса электротехнических, трибо-технических и механических свойств, используют как проводниковый материал при производстве контактных колец и коллекторных пластин электрических машин, работающих при повышенных тепловых, электрических и механических нагрузках, а также кабельных и контактных проводов. Они являются адекватными заменителями кадмиевой бронзы, причем применение их предпочтительнее по экологическим признакам [1, 2]. Однако они не-технологичны из-за высокой склонности магния к испарению, окислению и ликвации по плотности. С этим связана проблема стабильного обеспечения в заготовках показателей качества в узких регламентируемых пределах как по содержанию магния, так и электропроводности. Кроме того, Cu–Mg-сплавы

из-за активного окисления магния склонны к загрязнению трудноудаляемыми нежелательными оксидными неметаллическими включениями, затрудняющими тонкое волочение. Указанные факторы обуславливают технологические трудности получения качественных заготовок из магниевой бронзы в условиях открытой разливки или наличия перелива открытой струей расплава.

Цель работы — разработка технологии получения высококачественных литых заготовок из Cu–Mg-сплавов. Для этого выполнили анализ процессов, протекающих при плавке и литье этих сплавов, и выявили условия, при которых обеспечивается получение из них качественных заготовок со стабильно высокими и однородными свойствами. Это позволило разработать соответствующие технические решения, реализовать их и получить заготовки, отвечающие высоким требованиям.

Тен Э.Б. – докт. техн. наук, профессор кафедры технологии литейных процессов НИТУ «МИСиС» (119049, г. Москва, В-49, Ленинский пр-т, 4). Тел./факс: (499) 764-52-61. E-mail: edis_ten@mail.ru.

Бадмажапова И.Б. – канд. техн. наук, ст. препод. той же кафедры. Тел./факс: (499) 764-52-61. E-mail: i.badmazhapova@gmail.com.

ПРОБЛЕМЫ И ИХ РЕШЕНИЕ

Ниже рассмотрены выявленные условия получения качественных литых заготовок из Cu—Mg-сплавов и обеспечивающие их технические решения применительно к непрерывному процессу литья.

1. Приготовление исходного расплава меди высокой чистоты. Данное требование обусловлено необходимостью получения литых заготовок с высокими электропроводностью и механическими свойствами, в том числе по пластическим характеристикам. Для этого в качестве исходной шихты следует использовать катодную медь повышенного качества ($\text{Cu} \geq 99,99\%$).

2. Глубокое раскисление меди без загрязнения расплава неметаллическими включениями — такое условие необходимо для предотвращения сильного угара магния и образования в расплаве большого количества неметаллических включений. Для этого лучше всего раскислять жидкую медь углеродом, используя в качестве раскислителя графит.

3. Обеспечение согласования требуемой степени раскисленности расплава с производительностью плавильно-литейного агрегата — актуально в связи с тем, что раскисление медного расплава углеродом реализуется замедленно (по кинетическому режиму [3]), поэтому при повышении массовой скорости литья степень раскисленности расплава будет снижаться. Для устранения этого соответственно ускорению процесса литья необходимо эквивалентно увеличивать площадь реакционной поверхности «жидкая медь—графит».

4. Обеспечение высокой чистоты заготовок по содержанию газов и неметаллических включений — направлено на предотвращение образования в литых заготовках дефектов газового происхождения (раковин, пор и трещин). Для этого следует обеспечить рафинирующую обработку расплава путем продувки его инертным газом (аргоном).

5. Устранение ликвации магния — актуально в связи с большой разницей плотностей жидкой меди (8200 кг/м^3) и жидкого магния (1570 кг/м^3) и высокой чувствительностью свойств сплава (электропроводности) к колебанию в нем содержания магния. Для устранения ликвации магния необходимо организовать гомогенизирующую обработку расплава путем его активного перемешивания. При продувке инертным газом (аргоном) (см. п. 4), наряду с рафинированием расплава, достигается и его гомогенизация по химическому составу.

6. Защита расплава от воздействия внешней окислительной атмосферы на стадии приготовления расплава — это необходимо для устранения неконтролируемого угара магния и загрязнения расплава продуктами его окисления. Для этого следует применить комбинированную защиту расплава от окисления путем наведения над расплавом активного покровного слоя из графита и создания над ней атмосферы инертного газа (аргона) под избыточным давлением.

7. Обеспечение получения заготовок с регламентируемым содержанием магния. Актуальность этого условия обусловлена тем, что угар магния имеет место как в момент его ввода в расплав, так и при выдержке расплава в печи до момента следующей присадки шихты. При этом в первом случае угар магния намного выше, чем во втором. Поэтому для предотвращения больших колебаний содержания магния в сплаве во временном аспекте необходимо обеспечить дифференцированный учет угара магния, компенсируя его как при усвоении из присадки шихты, так и при выдержке расплава в печи.

8. Исключение вторичного загрязнения готового сплава на стадии литья — это необходимо для сохранения в литых заготовках качества металла, достигнутого в полости плавильного агрегата. Гарантированно это обеспечивается только при горизонтальном непрерывном литье заготовок, когда расплав в кристаллизатор поступает непосредственно из полости печи.

9. Минимизация колебания химического состава и параметров качества отливаемых заготовок. Нестабильность связана с тем, что сразу после присадки порции шихты содержание магния, водорода и кислорода в расплаве максимально, затем оно вследствие угара, дегазации и раскисления постепенно снижается. При большой длительности цикла присадки шихты колебание содержания магния в расплаве может превысить допустимый интервал. При малой продолжительности цикла не успевают достаточно полно реализоваться процессы удаления водорода и углеродного раскисления жидкой меди после присадки предыдущей порции шихты. Поэтому для максимального снижения колебания содержания магния и параметров качества отливаемых заготовок необходимо скорость литья согласовывать со скоростью протекания рафинирующих процессов, а частоту присадки шихты и массу ее порции — с требованиями к составу сплава и скоростью литья.

10. Обеспечение стабильности параметров качества заготовок в условиях продолжительного осуществления производственного процесса. Продукция в виде литых заготовок должна иметь одинаковые параметры качества независимо от фактора времени. Для этого необходимо совместить непрерывные режимы плавки и литья с непрерывными процессами рафинирования и гомогенизации расплава и обеспечить при этом ритмичную присадку дозированной шихты.

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

С учетом изложенных требований разработана технология, в которой реализованы технические решения 1–10, обеспечивающие получение заготовок из Cu–Mg-сплавов с высокой стабильностью регламентируемых свойств. Она основана на совмещении технологий непрерывной плавки [4] и непрерывного горизонтального литья заготовок [5] с технологией непрерывной рафинирующей и гомогенизирующей обработки расплава. Все эти процессы реализуются в одном плавно-литейном агрегате (рис. 1) со специальным устройством в виде вставного стакана 3, который погружают в полость тигля печи 1 с расплавом 2.

Применение вставного стакана позволяет разделить рабочую полость печи на три части: верх-

нюю, среднюю и нижнюю камеры. Верхняя камера 7 представляет собой полость между поверхностью покровного слоя 9 и крышкой 5, средняя камера 10 — это полость между верхней границей покровного слоя 9 и дном вставного стакана 3, а нижняя камера 12 — полость в тигле печи 1 под дном стакана 3. Средняя и нижняя камеры заполнены расплавом и имеют сообщение через боковые и донные проточные каналы 11. Верхнюю и среднюю камеры разделяет покровный слой 9, который представляет собой пористую среду. Поэтому он проницаем как для жидкого металла, так и для газа: капельки и струйки расплавленной катодной меди просачиваются через него сверху вниз, как через насыпной зернистый фильтр, а пузырьки рафинирующего газа (аргона) также проходят этот слой, но снизу вверх и под избыточным давлением. Аргон заполняет полость верхней камеры, вытесняя из нее воздух ввиду большей плотности.

В устройстве реализована комбинированная рафинирующая обработка расплава путем продувки его инертным газом через фурму 4, воздействия на него покровным слоем 9 и фильтрования через покровный слой и проточные каналы 11 в дном вставного стакана 3.

В верхней камере 7 происходят подогрев, прокаливание и расплавление шихты 8, загружаемой через окно 6. В ней формируется атмосфера защитного газа (аргона). В процессе расплавления шихты и просачивания капель жидкого металла через покровный слой достигается его предварительное рафинирование.

В средней камере 10 осуществляется рафинирование расплава от растворенных газов (водорода) и неметаллических включений за счет вдувания аргона, а также происходит углеродное раскисление за счет контакта расплава 2 с выполненными из графита покровным слоем 9 и стенками вставного стакана 3. Процесс углеродного раскисления расплава меди протекает быстрее и полнее, если тигель 1 также изготовить из графита. Рафинирующие процессы в средней камере реализуются в непрерывном режиме с формированием циркуляционного потока, кото-

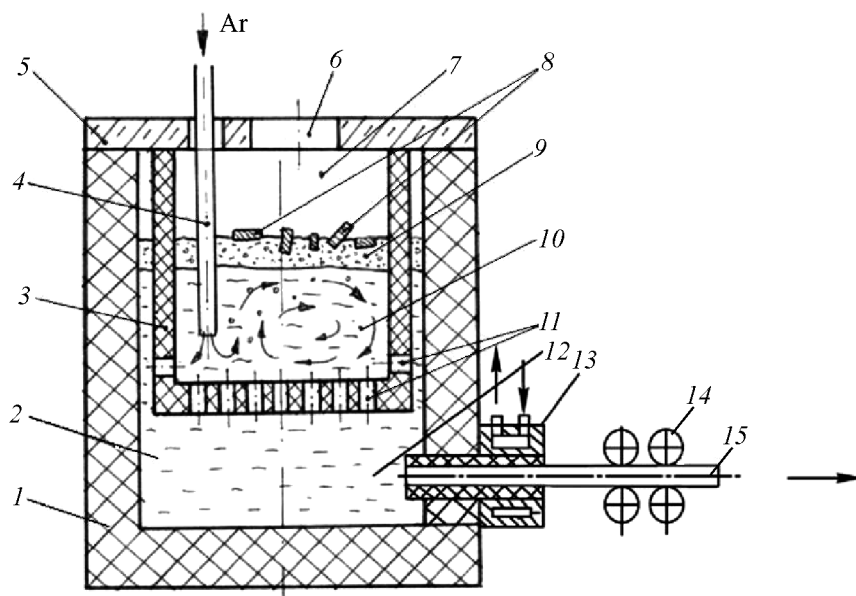


Рис. 1. Устройство агрегата для непрерывной плавки и литья заготовок

1 — тигель печи, 2 — расплав, 3 — стакан вставной, 4 — фурма, 5 — крышка, 6 — загрузочное окно, 7 — верхняя камера, 8 — шихта, 9 — покровный слой, 10 — средняя камера, 11 — проточные каналы, 12 — нижняя камера, 13 — кристаллизатор, 14 — тянущие ролики, 15 — заготовка

рый генерируется струей вдуваемого через фурму 4 инертного газа.

В нижней камере 12 за счет воздействия циркуляционного потока происходит непрерывное смешивание расплава, находящегося в нижней камере, с порциями расплава, поступающими из средней камеры 10. Из нижней камеры рафинированный и гомогенизированный расплав подается в кристаллизатор 13, из которого сформированные заготовки 15 извлекаются тянущими роликами 14.

Разработанная технология отработана в промышленных условиях на одном из южнокорейских меднолитейных заводов на установке горизонтального непрерывного литья английской компании «Rautomead», которая оснащена печью-миксером с графитовым тиглем вместимостью 650 кг.

Весь технологический процесс можно во временном аспекте разделить на три периода: *I* — приготовление исходного расплава меди, *II* — легирование его магнием и *III* — стабильный режим литья (рис. 2).

В период *I* осуществляется подготовка исходного расплава, не содержащего магния. На этой стадии обеспечивается получение из медных катодов жидкой меди и ее последующее углеродное раскисление [3] до достижения в расплаве содержания кислорода $\leq 7\div 10$ ppm. Это необходимо для уменьшения в последующем угара магния. Наряду с этим в период *I* расплав меди рафинируется от растворенного водорода и неметаллических включений, что создает предпосылки для получения бездефектных заготовок.

В период *II* выполняется легирование исходного расплава магнием. В течение этого периода имеет

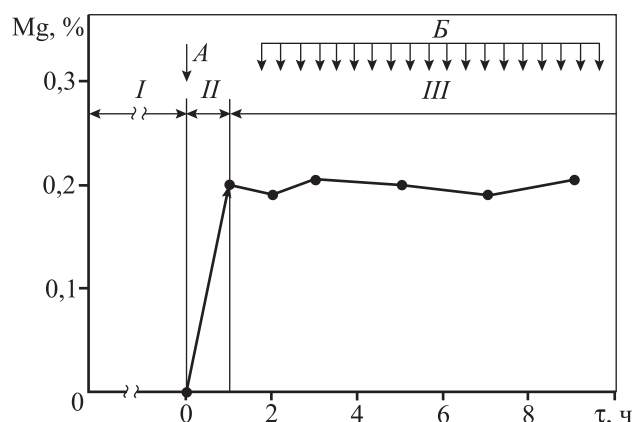


Рис. 2. Изменение содержания магния в медном расплаве на различных стадиях плавки и литья Cu—Mg-сплава

I–III — соответственно стадии приготовления исходного расплава меди, легирования и литья заготовок; *A* — стартовое легирование; *Б* — текущая присадка дозированной порции шихты

место угар магния, который необходимо компенсировать. При этом следует иметь в виду, что угар магния происходит как при усвоении шихты, так и при последующей выдержке расплава. Поэтому при расчете начальной дозы легирующей присадки Cu—Mg-лигатуры угар магния необходимо учитывать дважды:

а) угар магния (Y_{Mg}) на стадии ввода лигатуры Cu—Mg в расплав и усвоения им магния;

б) интенсивность угара магния ($Y_{Mg,t}$) в течение периода *II* (начальной стадии гомогенизации и выдержки расплава).

В соответствии с этими требованиями масса лигатуры Cu—Mg в начальной дозе присадки равна

$$M_{Cu-Mg}^{нач} = M_{пл} \frac{\%Mg_{спл}}{100} \frac{100}{\%Mg_{лиг}} \times \left(\frac{100}{100 - Y_{Mg}} + \frac{100}{100 - Y_{Mg,t} t_{нач}} \right),$$

где $M_{Cu-Mg}^{нач}$ — масса лигатуры Cu—Mg в начальной дозе присадки, кг; $M_{пл}$ — масса расплава в тигле печи, кг; $\%Mg_{спл}$ и $\%Mg_{лиг}$ — содержание магния соответственно в сплаве и в Cu—Mg-лигатуре соответственно, %; $t_{нач}$ — продолжительность начальной стадии гомогенизации и выдержки расплава, мин.

Применительно к рассматриваемым условиям непрерывной плавки и литья Cu—Mg-сплавов с массой расплава в печи-миксере $M_{пл} = 500\div 600$ кг экспериментально установили, что угар магния на стадии усвоения лигатуры Cu—Mg составляет $Y_{Mg} = 13\div 15$ %, а на стадии гомогенизации и выдержки расплава его интенсивность $Y_{Mg,t} = 0,08$ %/мин. Продолжительность начальной стадии гомогенизации и выдержки расплава составляет $t_{нач} \approx 30$ мин.

В период *III* реализуются в непрерывном режиме процессы плавки, раскисления, рафинирования, гомогенизации и литья. Заготовки разных размеров вытягивают с различной скоростью в переменное количество ручьев. При этом в процессе литья периодически, в циклическом режиме, осуществляют присадку шихты. Периодичность присадки шихты ($t_{тек}$) и ее массу ($M_{пр}$) согласовывают с массовой скоростью литья (Q_L). Эти параметры связаны между собой простым соотношением:

$$t_{тек} = M_{пр}/Q_L,$$

где $t_{тек}$ — интервал времени между присадками шихты, мин; $M_{пр}$ — масса текущей порции присадки катодной меди, кг; Q_L — массовая скорость литья, кг/мин;

Доза лигатуры Cu—Mg в текущей присадке шихты составляет

$$M_{\text{Cu-Mg}}^{\text{тек}} = M_{\text{пр}} \frac{\% \text{Mg}_{\text{спл}}}{100} \frac{100}{\% \text{Mg}_{\text{лиг}}} \frac{100}{100 - Y_{\text{Mg}}} + M_{\text{пл}} \frac{\% \text{Mg}_{\text{спл}}}{100} \left(\frac{100}{\% \text{Mg}_{\text{лиг}}} \frac{100}{100 - Y_{\text{Mg}, t}^{\text{тек}}} \right),$$

где $M_{\text{Cu-Mg}}^{\text{тек}}$ — масса лигатуры Cu—Mg в текущей присадке, кг.

Как видно из рис. 2, реализация разработанных технических решений обеспечивает получение заготовок из Cu—Mg-сплавов с прецизионным содержанием легирующего элемента. Так, среднее содержание магния в заготовках составило 0,198 % при расчетном его значении 0,200 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана технология получения высококачественных заготовок из Cu—Mg-сплавов в режиме непрерывной плавки и непрерывного горизонтального литья. Принятые технические решения

позволяют: преодолеть трудности обеспечения прецизионного содержания магния; устранить сильную ликвацию его в расплаве; нейтрализовать высокую поверхностную активность магния и склонность его к окислению; стабилизировать усвоение магния из лигатуры и минимизировать загрязнение расплава продуктами его окисления; достичь глубокого рафинирования металла от газов и неметаллических включений; гомогенизировать его по химическому составу и снизить дефектность конечной продукции, в том числе и на стадии тонкого волочения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирягин А.П., Смирягина Н.А., Белова А.В. М.: Металлургия, 1974.
2. Николаев А.К. // Цв. металлы. 2001. № 6. С. 109.
3. Тен Э.Б., Бадмажапова И.Б., Киманов Б.М. // Изв. вузов. Чер. металлургия. 2008. № 7. С. 41.
4. Тен Э.Б., Нам Ч.У. // Изв. вузов. Цв. металлургия. 2000. № 6. С. 22.
5. Тен Э.Б. // Литейн. пр-во. 2003. № 7. С. 7.

УДК 669.2/.8.017.11 : 669.065.5

О ДИАГРАММЕ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ Cu—Ni—Mn

© 2013 г. В.Е. Баженов

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

С помощью теоретического анализа и на основании экспериментальных данных уточнена часть диаграммы состояния Cu—Ni—Mn от 0 до 20 % Ni и от 30 до 50 % Mn. Показано, что содержащееся в ряде работ предположение о существовании в тройной системе Cu—Ni—Mn линии, по которой располагаются сплавы с нулевым интервалом кристаллизации, неверно. Нулевой интервал кристаллизации имеют лишь сплавы в двойных системах Cu—Mn и Ni—Mn. Высказанное первоначально предположение о невозможности представить неравновесную кристаллизацию по Петрову–Шейлю при отсутствии линии минимума в системе Cu—Ni—Mn не подтвердилось, так как прежде исследования выполнялись на модельной системе, в которой на политермическом сечении, соединяющем минимумы в двойных системах, имела выпуклая линия ликвидуса. В настоящей работе показано, что эта линия вогнута в сторону понижения температуры.

Ключевые слова: диаграмма Cu—Ni—Mn, твердые растворы, неравновесная кристаллизация.

By means of the theoretical analysis and based on the experimental data, the part of the Cu—Ni—Mn structural diagram from 0 to 20 % Ni and from 30 to 50 % Mn has been specified. The supposition, which is contained in a number of works, of the existence in the ternary Cu—Ni—Mn state diagram of the line, along which the zero crystallization range alloys are arranged, is shown to be incorrect. The alloys in the double Cu—Mn and Ni—Mn systems have the zero crystallization range only. The primary supposition of impossibility to present nonequilibrium crystallization according to Petrov–Scheil with lacking of the minimum line in the Cu—Ni—Mn system has not been confirmed because formerly the investigations were carried out with a model system in which there observed a convex line of the liquidus curve on the polythermal cross-section joining the minima in the double systems. The present work shows this line that is concave towards the temperature decrease.

Key words: Cu—Ni—Mn state diagram, solid solutions, nonequilibrium crystallization.

Баженов В.Е. – ассистент кафедры технологии литейных процессов НИТУ «МИСиС» (119049, г. Москва, В-49, Ленинский пр-т, 4). E-mail: V.E.Bazhenov@misis.ru.