

С.Г. АГБАЛЯН, Г.С. ОВСЕПЯН, Г.А. КАРАПЕТЯН, А.Ж. ГАЛСТЯН

ПОВЫШЕНИЕ ЛИТЕЙНЫХ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕДНЫХ СПЛАВОВ

Исследовано влияние легирующих элементов (Al, Mg, Se, Te, Ca, Cr и Cd) на литейные и физико-механические свойства медных сплавов, а также на технические характеристики высокоэлектропроводных медных сплавов при легировании до 1,0%.

Ключевые слова: жидкотекучесть, горячеломкость, усадка, легирование.

Важнейшими задачами любой страны, развивающейся в условиях рыночных отношений, являются рациональное использование запасов местного сырья и в связи с этим разработка инновационных технологий получения новых сплавов. С этой точки зрения разработка новых и более усовершенствованных технологических процессов, основанных на использовании местного сырья, в том числе меди, актуальна и весьма своевременна.

Развитие электротехнической промышленности, машиностроения, металлургии и ряда других отраслей Республики Армения обусловлено также расширением номенклатуры литых изделий, обладающих специальными физико-механическими свойствами, и зависит от обеспечения спроса сложных и фасонных отливок с высокой электропроводностью и улучшенными физико-механическими свойствами.

Известно, что чистая медь совершенно не используется для производства литых деталей ввиду ее низкой жидкотекучести, высокой горячеломкости и большой усадки [1]. Качество отливок, в первую очередь, оценивается по их геометрическим параметрам, а их получение с высокими физико-механическими свойствами обусловлено химическим составом сплава.

С целью повышения литейных и физико-механических свойств меди испытан ряд легирующих элементов, в том числе алюминия, хрома, селена, теллура, кальция, магния и кадмия, которые были введены в состав шихты в виде соответствующих лигатур. Плавку проводили в индукционной печи с использованием графитовых тиглей под защитным слоем. Применяли одинаковые условия испытания сплавов, в том числе температуру формы, металлостатический напор, температуру заливки, длительность охлаждения и т.д. Заливку форм проводили при температуре 1180°C. Показано, что жидкотекучесть сплава меди при 1180°C заметно растет с увеличением содержания Mg до 0,15% ($\lambda = 0,55$ м), что обусловлено раскислительной способностью магния и появлением в малом количестве жидких продуктов раскисления. При перегреве продукты раскисления легко всплывают на поверхности расплава, что увеличивает время их нахождения в жидком состоянии. Дальнейшее увеличение содержания магния способствует монотонному снижению жидкотекучести меди, которая при содержании магния в количестве 0,88% достигает 0,35 м. Такое уменьшение

жидкотекучести обусловлено наличием довольно широкого интервала кристаллизации сплава Cu + 0,88% Mg.

Кальций положительно влияет на жидкотекучесть меди. При содержании кальция до 0,85% жидкотекучесть медных сплавов возрастает от 0,47 до 0,63 м. Это объясняется тем, что в расплаве Cu - Ca присутствуют отдельные мелкие кристаллы, которые вместе с ним свободно перемещаются и не мешают его подвижности.

При легировании кадмием жидкотекучесть меди доходит до наибольшей величины при его содержании 0,45% ($\lambda=0,53$ м), после чего снижается.

Жидкотекучесть сплавов меди, содержащих до 0,02% теллура, резко возрастает, а затем монотонно снижается (рис.1).

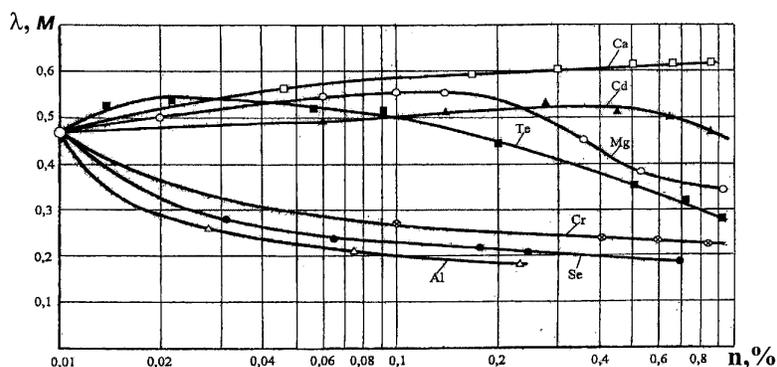


Рис. 1. Влияние легирующих элементов на жидкотекучесть меди

При легировании хромом с содержанием 0,01...0,05% наблюдается значительное уменьшение жидкотекучести меди, которое объясняется появлением на поверхности и в объеме расплава трудноудаляемых твердых окислов хрома (Cr_2O_3), проникающих в сплав в виде оксидной пленки и значительно увеличивающих сопротивление движущегося расплава. Большинство оксидов хрома с плотностью $5,2 \text{ г/см}^3$ не успевают свободно плавать на поверхности расплава и, оставаясь в нем, резко повышают вязкость, то есть уменьшают жидкотекучесть. Наличие твердой оксидной пленки хрома, развивающейся в расплаве, требует большого металлостатического напора для заполнения формы [2]. В сплавах Cu - Cr при дальнейшем повышении содержания хрома жидкотекучесть продолжает снижаться и при 0,85% составляет 0,23 м, то есть уменьшается приблизительно в 2 раза по сравнению с жидкотекучестью чистой меди. Это объясняется тем, что в результате увеличения содержания хрома появляются в большом количестве оксиды хрома.

Se и Al еще больше снижают жидкотекучесть меди по сравнению с хромом. Это объясняется тем, что селен с медью образуют хрупкое химическое соединение Cu_2Se и располагаются на границах зерен, в результате чего механические свойства сплава снижаются, а алюминий,

значительно преобразуя микроструктуру меди, отрицательно влияет на электропроводность и снижает трещиностойкость сплава.

Исследовано также совместное влияние Cd и Mg на жидкотекучесть меди. Выявлено, что наибольшей жидкотекучестью обладает сплав $\text{Cu} + 0,08\% \text{Mg} + 0,45\% \text{Cd}$ ($\lambda = 0,6 \text{ м}$), а при сплаве $\text{Cu} + 0,4\% \text{Mg} + 0,32\% \text{Cd}$ жидкотекучесть уменьшается почти в 3 раза по сравнению с жидкотекучестью чистой меди, то есть чем меньше теплоемкость сплава и больше теплопроводность, тем быстрее он охлаждается и, следовательно, тем меньше его жидкотекучесть.

Таким образом, элементы, имеющие большую раскислительную способность и образующие жидкие или газовые продукты раскисления, повышают жидкотекучесть; элементы, образующие трудноудаляемые оксиды, значительно уменьшают жидкотекучесть; при добавлении Mg, Cd, Te и Ca жидкотекучесть меди увеличивается, что позволяет получить более тонкостенные отливки, а при добавлении Cr, Se и Al - снижается, что затрудняет процесс изготовления тонкостенных фасонных отливок.

Исходя из этого, для повышения жидкотекучести малолегированных медных сплавов в качестве легирующего элемента рекомендуются Ca, Mg, Cd и Te.

Исследовано также влияние легирующих элементов (Mg, Cd, Cr, Ca, Al, Se, Te) на величину линейной усадки меди в температурном интервале $1083^{\circ}\text{C} \dots 20^{\circ}\text{C}$. Выявлено, что во всех температурных интервалах кристаллизации основная сложность точного измерения величины линейной усадки обусловлена тем, что испытание производится в неизотермичных условиях, то есть образец (отливка) непрерывно охлаждается, температура быстро падает, и по сечению и длине создаются значительные температурные градиенты. Линейная усадка может начаться в тот момент, когда сердцевина образца все еще находится в жидком состоянии. Исследования проводились с помощью усовершенствованной нами установки.

Применением математических методов планирования научного эксперимента и обработки экспериментальных данных исследуемых медных сплавов нами получена эмпирическая формула зависимости линейной усадки от температуры, содержания легирующего элемента и времени, которая имеет следующий вид:

$$\varepsilon = 10^{-5} \cdot T (a + b \cdot \tau + c \cdot \tau^2 + d \cdot \tau^3), \quad (1)$$

где a, b, c и d - постоянные коэффициенты, зависящие от легирующего элемента и его количества в медных сплавах; T - температура начала линейной усадки меди, $^{\circ}\text{C}$; τ - время, с.

Путем решения на ЭВМ данного выражения для каждой из исследованных двойных систем определены максимальные количества легирующих элементов, при которых в сплаве не наблюдается предвсадочное расширение.

Отмечено, что добавление в меди Mg, Ca и Cd способствует образованию широкого интервала кристаллизации и появлению предвсадочного расширения, чем и обусловлено снижение линейной усадки сплава. Добавление Al способствует образованию малого интервала кристаллизации, но значительному увеличению линейной усадки; добавление

Cr - образованию малого интервала кристаллизации (всего 6...7°C) и уменьшению линейной усадки, хотя в температурном интервале образования горячих трещин значительно увеличиваются механические свойства. Al увеличивает, а Mg, Ca и Cd уменьшают линейную усадку меди (рис.2).

Установлено, что чистая медь обладает сравнительно большой объемной усадкой, которая располагается в отливках в виде централизованных усадочных раковин (5,8%) и незначительно рассеянной пористости (0,5%), а также имеет заметную линейную усадку, которая описывается сложной кривой и протекает неравномерно как по температуре, так и по времени. При легировании меди до 1,0% Al или Cr в отливке преобладают централизованные усадочные раковины, а при легировании Te, Mg, Cd и Ca - рассеянная пористость.

На рис. 3 приведены характеристики влияния исследуемых легирующих элементов на электропроводность меди. Как видно, все легирующие элементы с содержанием до 1,0% по-разному снижают электропроводность. Наибольшее снижение заметно при легировании Al, а наименьшее - при Cd и Cr. В сплавах Cu-Mg при 0,06% Mg электропроводность уменьшается на 18...20%, а при 0,15% Mg - на 48...50%. В сплавах Cu - Al при 0,43% Al электропроводность меди уменьшается на 43...47%, а при 0,97% Al - на 60...65%

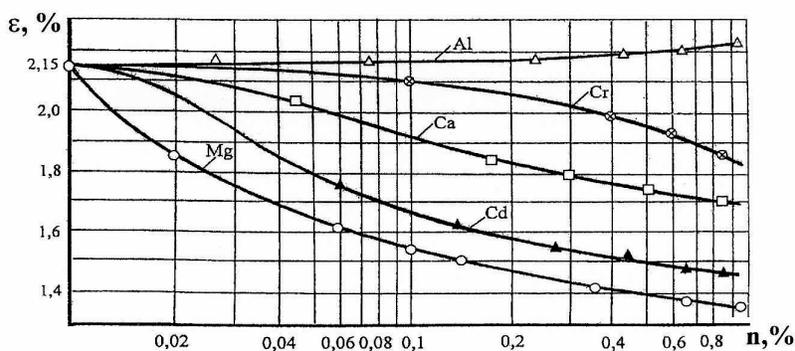


Рис. 2. Влияние легирующих элементов на линейную усадку меди

Результаты экспериментов свидетельствуют, что Se и Te одинаково влияют на электропроводность меди. В сплавах, содержащих до 0,2% Se или Te, почти незаметно изменение электропроводности меди, а при содержании больше 0,2% электропроводность резко снижается. При легировании меди 0,51% Ca электропроводность сплава составляет 72%.

Показано, что сплавы с содержанием Cd до 0,6...0,7% обладают сравнительно высокой электропроводностью, составляющей, как минимум, 88% электропроводности меди, а при содержании Cr до 0,85% - 78...80%. Из этих сплавов можно получить высококачественные фасонные электропроводные отливки.

Как показали результаты исследования, в сплавах до 0,85% Cd заметно повышение прочности меди. В этом случае предел прочности возрастает от 225 до 460 МПа. В сплавах Cu - Mg и Cu - Ca наибольшая величина предела прочности составляет 360...375 МПа, а в сплаве Cu + 0,88% Cr - до 420 МПа. Сравнительно низкие результаты наблюдаются при легировании меди с Al, Se и Te. При содержании Te до 0,7% определенно увеличивается предел прочности меди, а при еще большем количестве изменений незаметно.

Наиболее сильное понижение относительного удлинения образцов заметно при легировании меди с Se, Te и Cr. При легировании Cd до 0,66% относительное удлинение меди снижается до 17...18%, а при 0,66...0,85% Cd оно достигает 12...13%. При легировании 0,1...0,6% Cr относительное удлинение снижается от 18 до 10%. При легировании Te и Se до 1,0% величина относительного удлинения снижается до 6...7%, а в сплавах Cu-Mg - до 30...32%. Аналогичные результаты получены также в сплавах, легированных до 1,0% Al, где относительное удлинение составляет 37...38%. В сплавах Cu - Ca относительное удлинение снижается до 17...18%. Легирующие элементы влияют на твердость меди по аналогии с относительным удлинением. На твердость меди в большей степени влияет Cr, а в меньшей - Cd и Al.

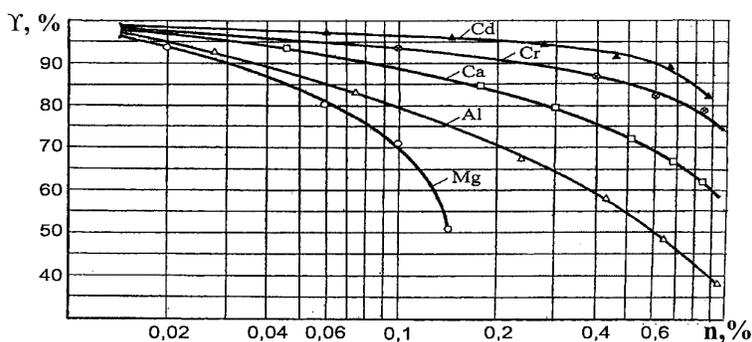


Рис. 3. Влияние легирующих элементов на электропроводность меди

Резкое повышение пористости меди заметно при легировании Ca и Mg. Это обусловлено появлением широкого интервала кристаллизации. Al и Cr почти незаметно увеличивают пористость меди, поскольку сплавы Cu + 1% Al и Cu + 1,0% Cr имеют сравнительно малый интервал кристаллизации.

Дана оценка горячеломкости малолегируемых медных сплавов, основываясь на трещиностойкости отливок. Выявлено, что низкой трещиностойкостью обладают сплавы Cu - Al и Cu - Ca с содержанием Al и Ca до 1,0%, а высокой трещиностойкостью - сплавы Cu - Cr и Cu - Mg. Показано, что сплавы Cu - Mg непригодны для изготовления ответственных

фасонных электропроводных отливок ввиду их сравнительно низкой электропроводности, высокой пористости, низких механических свойств.

Сплавы меди, легированные Cd, имеют сравнительно высокую электропроводность (82...97% электропроводности меди), достаточные механические свойства и некоторые литейные свойства, однако склонны к образованию горячих трещин.

При легировании меди Se и Te, ввиду высокой горячеломкости и низкой жидкотекучести сплавов, получение качественных отливок представляет довольно сложный процесс, следовательно, их применение нецелесообразно.

Сплавы меди, содержащие до 1,0% Al, обладают достаточными физико-механическими и низкими литейными свойствами, в том числе имеют высокую горячеломкость, высокую электропроводность и сравнительно дешевые. Сплавы Cu - Ca имеют достаточные физико - механические свойства, высокую жидкотекучесть и малую трещиностойкость, что объясняется их редким использованием при получении сложных фасонных отливок. Сплавы Cu - Cr обладают высокими физико-механическими свойствами, малой жидкотекучестью и сравнительно дешевые. Установлено, что при получении малолегированных медных сплавов хромом в открытых плавильных печах происходят значительные потери хрома, связанные с его активностью по отношению к кислороду, находящемуся в расплаве. В этом случае в расплаве образуются трудноудаляемые твердые оксидные включения (Cr_2O_3), которые, проникая в отливки, резко снижают их физико-механические свойства. Образование оксидных включений предотвращается при совместном стехиометрическом добавлении хрома вместе с бором в виде лигатуры Cu-B. Оптимальное количество бора составляет 0,05...0,06%.

По результатам исследования приняты следующие оптимальные технологические режимы изготовления малолегированных медных сплавов с высокими литейными и физико-механическими свойствами: при монолегировании - содержание легирующих элементов 0,85%, плавка под защитным слоем флюса, температура заливки - 1180°C; при совместном легировании - содержание легирующих элементов - (0,15...0,45)%Cr и (0,05...0,06)%B, плавка под защитным слоем флюса, температура заливки 1180°C.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чуркин Б. С.** Теоретические основы литейных процессов.- Свердловск, 1991. - 200 с.
2. **Курдюмов А.В., Пикунов М.В., Чурсин В.М.** Литейное производство цветных и редких металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 352 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 16.02.2004.

**Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Գ.Ս. ՀՈՎՍԵՓՅԱՆ, Հ.Ա. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ,
Հ.Ժ. ԳԱԼՍՏՅԱՆ**

**ՊՂՆՁԻ ՀԱՄԱՁՈՒՎԱԾՔՆԵՐԻ ՁՈՒՄԱՆ ԵՎ ՖԻԶԻԿԱՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ
ԲԱՐՁՐԱՑՈՒՄԸ**

Հետազոտված են այլումինի, մագնեզիումի, սելենի, թելուրի, կալցիումի, քրոմի և կադմիումի ազդեցությունները դրանցով լեգիրված պղնձի ձուլման և ֆիզիկամեխանիկական հատկությունների վրա: Բացահայտված է մինչև 1,0%-ով լեգիրման դեպքում այդ տարրերի տարաբնույթ ազդեցությունը պղնձի հիմքով բարձր էլեկտրահաղորդիչ համաձուլվածքների տեխնիկական բնութագրերի վրա:

**S.G. AGHBALYAN, G.S. HOVSEPYAN, H.A. KARAPETYAN,
H.ZH. GALSTYAN**

**IMPOVEMENT OF MOULDING AND PHYSICAL-MECHANICAL COPPER ALLOY
PROPERTIES**

The influence of doped elements (Al, Mg, Se, Te, Ca, Cr and Cd) on moulding and physical - mechanical properties of copper alloys, as well as on technical characteristics of high electric conductive copper alloys is studied.