



Научная статья

УДК 903.052

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-265-274>



Получение имитаций самородков золота с использованием медных сплавов

Вера Евгеньевна Сорокина^a, Марина Витальевна Константинова^b

^{a,b}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Сорокина Вера Евгеньевна, vs_kina@mail.ru

Резюме. Имитации самородков золота являются материалом, представляющим в наши дни высокий интерес в области концептуального дизайна ювелирных изделий. Технология получения этого материала основана на литье расплавленной латуни в охлаждающую жидкость. Цель данного исследования заключалась в выявлении наиболее благоприятных технологических процессов для получения качественных имитаций самородков золота. В работе представлены результаты экспериментального исследования с использованием латуни марки Л63. Были установлены наиболее благоприятные технологические параметры: доведение температуры расплава до 970 ± 5 °C и использование в качестве охлаждающей жидкости воды температурой не более 20–25 °C. Соблюдение этих основных условий обеспечивает формирование отливок, внешне схожих с природными самородками золота, встречающимися в россыпных месторождениях. Образование сложных форм и неровного рельефа отливок, обеспечивающих данное сходство, связано со специфическими условиями кристаллизации латуни, отличающимися от условий кристаллизации при традиционном литье. В ходе исследования был проведен анализ химического состава образцов используемого сплава до испытаний и образцов, полученных в результате литья. В сплаве после обработки обнаружено незначительное уменьшение процентного содержания цинка и увеличение примесей, а именно кремния, серы, железа и хрома. Металлографический анализ показал однофазную микроструктуру в исходном образце латуни Л63, представляющую собой твердый раствор замещения цинка в меди. При аналогичном исследовании отливок, полученных в ходе эксперимента, помимо α -твердого раствора в их структуре было обнаружено наличие β -фазы, являющейся твердым раствором на базе химического соединения CuZn, которое положительно влияет на механические свойства латуни. Такая микроструктура характерна для сплавов, претерпевших ускоренное охлаждение, которое качественно меняет процесс превращения расплава в твердое вещество.

Ключевые слова: латунь, кристаллизация сплава, структура, имитации самородков золота

Для цитирования: Сорокина В. Е., Константинова М. В. Получение имитаций самородков золота с использованием медных сплавов // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 3. С. 265–274. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-265-274>.

Original article

Producing gold nugget simulants using copper alloys

Vera E. Sorokina^a, Marina V. Konstantinova^b

^{a,b}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Corresponding author: Vera E. Sorokina, vs_kina@mail.ru

Abstract. Today the imitations of gold nuggets are highly promising materials in conceptual jewelry design. The manufacturing technology of these materials is based on melted brass casting in a cooling liquid. The purpose of this research is to identify the most favorable technological processes to obtaining high-quality simulants of gold nuggets. The article presents the results of the experimental studies of CW508L brass. The most favorable technological parameters have been identified. They include the melt temperature up to 970 ± 5 °C and use of water with the temperature not higher than 20–25 °C as a cooling liquid. Adherence to the specifications allows to obtain the casts, which superficially resemble natural gold nuggets found in alluvial gold deposits. The casts' intricate shape and uneven relief providing this resemblance are due to the specific crystallization conditions of brass that differ from the crystallization conditions under conventional casting. The research involved the analysis of the chemical composition of the alloy samples before tests and the samples obtained after casting. After processing the alloy has featured an insignificant decrease in the zinc percentage, and an increase in the impurity content (silica, sulfur, iron, and chrome). The metallographic analysis of the initial sample of CW508L brass has shown a single-phase microstructure that is a solid solution of zinc substitution by copper. The similar study of the casts obtained in the experiment has shown the presence of a β -phase in their structure (along with an α solid solution)



that is a CuZn-based solid solution having a positive effect on brass mechanical properties. This microstructure is typical of the alloys undergone accelerated cooling that qualitatively changes the process of melt converting into a solid substance.

Keywords: brass, alloy crystallization, structure, gold nugget simulants

For citation: Sorokina V. E., Konstantinova M. V. Producing gold nugget simulants using copper alloys. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(3):265-274. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-265-274>.

Введение

Благодаря стремительному развитию технологий спектр материалов, применяемых в ювелирном дизайне, становится все шире и часто в украшениях используются такие синтетические материалы, как стекла, пластик, полимерная глина и прочее. Благодаря своим физическим и технологическим свойствам такие материалы пригодны для изготовления из них декоративных вставок: они могут выступать в роли имитаций драгоценных камней или же использоваться как самостоятельный материал. История ювелирного искусства богата примерами, когда в одном изделии классические ювелирные материалы сочетаются с традиционными. Такой контраст характерен для концептуального дизайна¹ [1].

Интерес к новым возможностям нетрадиционных материалов лег в основу серии экспериментов, направленных на разработку технологии получения эстетически привлекательных имитаций самородков золота, изготовленных из медного сплава. Данная технология использует нестандартную обработку, которая заключается в резком охлаждении металлического расплава путем литья в охлаждающую жидкость, в результате чего кристаллизация металла происходит в специфических условиях.

Материалы и методы исследования

Учитывая максимальную схожесть с золотом по физическим свойствам и эстетическим характеристикам для экспериментов по получению имитаций самородков золота была выбрана латунь марки Л63² [2, 3]. Это двухкомпонентный сплав, в основе которого содержится 62–65 % меди, легированной 34,5–37,5 % цинка, а также до 0,5 % примесей³ [4].

Целью проведенных экспериментов являлось выявление условий, позволяющих получить отливки, сходные по форме и внешнему виду с природными золотыми самородками. Предварительно были определены критерии оценки отливок, обеспечивающие ожидаемое сходство [5].

Экспериментальный процесс заключался в плавлении исходного сплава марки Л63 при помощи бензиновой горелки до достижения однородного расплавленного состояния и резком его охлаждении в жидкой среде. В качестве охлаждающей жидкости была использована вода девяти температурных режимов: 0–5, 10–15, 20–25, 30–35 °С и так далее до 80–85 °С. Температура отливаемого расплава была неизменной – 970±5 °С, ее замеры производились при помощи инфракрасного пирометра HoldPeak HP-1300. Количество исходного сплава при каждом плавлении было неизменным и составляло 3 г (±0,1 г).

Результаты исследования и их обсуждение

Литье латунного расплава в воду температурой до 25 °С позволило получить отливки с нужными эстетическими характеристиками: они обладают золотисто-желтым цветом с ярким металлическим блеском, неправильными сложными формами и неровным рельефом (рис. 1, а). Увеличение температуры воды приводит к образованию более простых форм, появлению оксидов на поверхности образцов и потускнению блеска. При повышении температуры охлаждающей жидкости до 80–85 °С образуются почти круглые отливки с относительно ровным рельефом поверхности. Блеск в них практически отсутствует из-за наличия плотной пленки оксидов (рис. 1, б) [6, 7].

¹ Куманин В. И., Лившиц В. Б. Материалы для ювелирных изделий: учебник. М.: Астрель – Кладезь, 2012. 223 с.

² Колачев Б. А., Ливанов В. А., Елагин В. И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учебник. М.: Металлургия, 1981. 416 с.

³ Copper and copper alloys: ASM specialty handbook / ed. J. R. Davis. Russell: ASM International, 2001. 652 p.

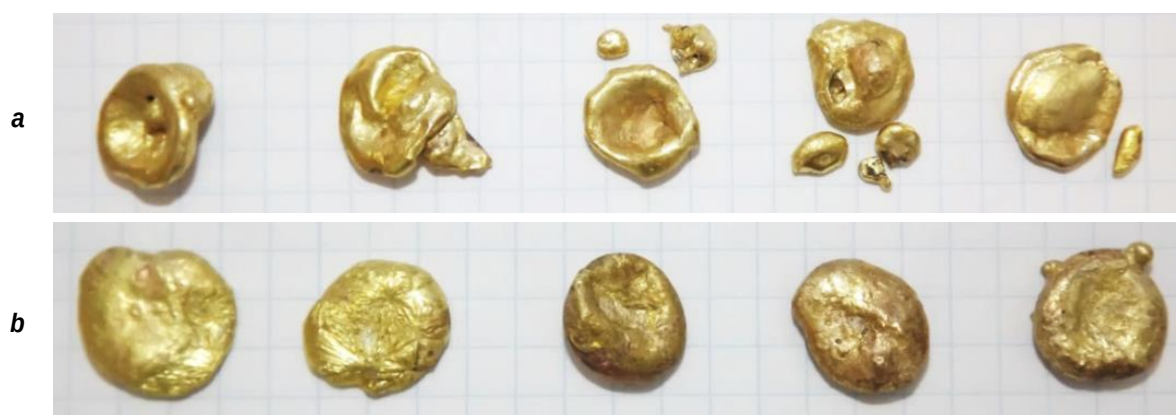


Рис. 1. Образцы, полученные литьем расплавленной латуни в воду температурой 10–15 °С (а) и 80–85 °С (б)
Fig. 1. Samples obtained by brass water casting at the temperature of 10–15 °C (a) and 80–85 °C (b)

В образцах, полученных в холодной воде (до 20–25 °С), следы оксидов отсутствуют либо наблюдаются в небольшом количестве лишь на обратной стороне отливки. Текстура поверхности достаточно ровная, без мелких макроскопических выпуклостей или углублений, сохраняется яркий металлический блеск. Именно такие образцы по внешнему виду имеют максимальную схожесть с золотыми самородками, а потому соответствуют критериям заявленной цели (рис. 2). Характер рельефа поверхности таких отливок разительно отличается от образцов, полученных в горячей воде, поверхность которых имеет лишь несколько крупных выступов и вмятин [8].

Время нахождения латуни в расплавленном состоянии должно быть минимальным, поскольку цинк в ее составе является летучим металлом. В случае продолжительного нагрева расплава наблюдается интенсивное испарение этого металла, что легко определяется визуально благодаря появлению пламени синего цвета и образованию белого налета на стенках тигля. Испарение цинка наблюдается

при достижении сплава жидкого состояния и происходит более интенсивно при повышенной температуре (больше 950 °С) [9]. Количество потерь летучих компонентов в сплаве зависит от продолжительности его нахождения в жидком состоянии и от площади свободной поверхности металлического расплава. В качестве защитного покрова, уменьшающего свободную поверхность расплава, в процессе плавления необходимо использовать буру [10].

Чтобы проконтролировать, как изменялся состав латуни в процессе расплавления и литья и насколько велики потери цинка, был произведен химический анализ сплава с использованием рентгенофлуоресцентного анализатора металлов и сплавов S1 Titan, который применяется в различных отраслях промышленности для неразрушающего химического анализа. Оценивалось содержание меди, цинка и прочих элементов, среди которых кремний, сера, железо и хром. Результаты химического анализа образцов латуни приведены в таблице.



Рис. 2. Сравнение внешнего вида природного золотого самородка (а) и его имитации из расплавленной латуни, отлитой в холодную воду (б)
Fig. 2. Comparison of the natural gold nugget (a) and its brass simulant obtained by casting in cold water (b)



Результаты химического анализа образцов латуни марки Л63 при разных условиях экспериментов Results of the chemical analysis for CW508L brass samples under different experimental conditions

Состояние	Состав латуни, %		
	Cu	Zn	Прочее
Исходное состояние сплава до испытаний	63,63	35,92	0,45
Сплав, отлитый в воду температурой 0–5 °С	65,02	33,39	1,59
Сплав, отлитый в воду температурой 10–15 °С	65,02	33,37	1,61
Сплав, отлитый в воду температурой 70–75 °С	65,65	33,49	0,86
Сплав, отлитый в воду температурой 80–85 °С	65,43	33,52	1,05

Сравнение полученных результатов позволяет сделать вывод, что во всех случаях происходило изменение состава сплава в сторону уменьшения содержания цинка. Максимальные потери цинка и увеличение процентного содержания примесей наблюдались при литье латуни в холодную воду. В среднем потери цинка при таком способе плавления и литья латуни составляли не более 3 % от общего объема. Такое количество потерь не имеет большого значения: оно существенно не влияет ни на прочность полученных образцов, ни на их цвет [11].

Структура двухкомпонентных латуней отвечает равновесной диаграмме состояния «медь – цинк» (рис. 3).

В отличие от большинства сплавов, в которых, как правило, увеличение прочности сопровождается уменьшением пластичности, в ряде медных сплавов при увеличении концентрации цинка в меди примерно до 30 % одновременно увеличивается и прочность, и пластичность⁴. Структура латуни при этом является твердым раствором замещения цинка в меди [12, 13]. Латунь в данной ситуации имеет однофазную структуру твердого раствора замещения цинка в меди (α -фаза) с кубической гранецентрированной решеткой. Если содержание цинка превышает 39 %, в структуре появляется хрупкая β -фаза – упорядоченный твердый раствор на основе электронного соединения типа 3/2 CuZn с объемно-центриро-

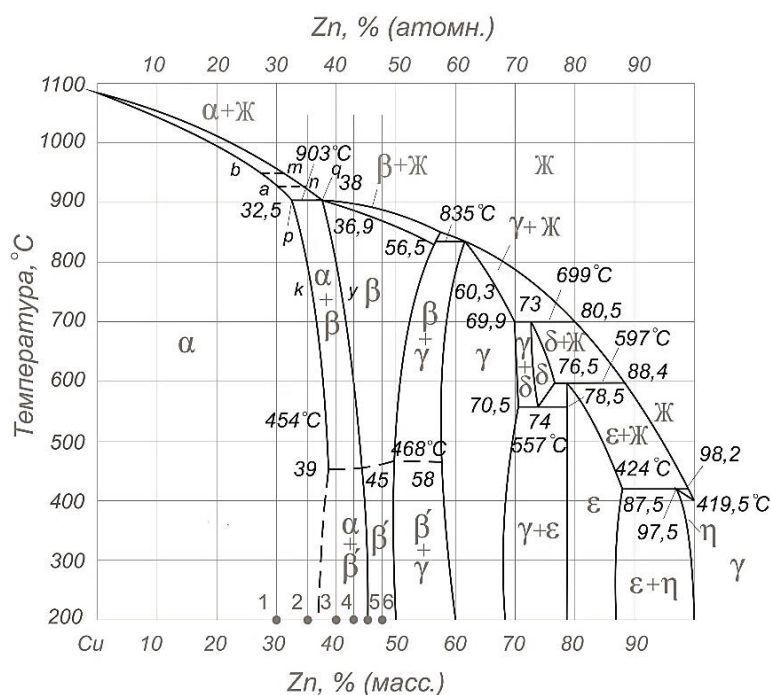


Рис. 3. Диаграмма состояния «медь – цинк»⁵
Fig. 3. Phase diagram “copper – zinc”⁵

⁴ Плошкин В. В. Материаловедение: учебник. М.: Юрайт, 2019. 463 с.

⁵ Copper and copper alloys: ASM specialty handbook / ed. J. R. Davis. Russell: ASM International, 2001. 652 p.



ванной кубической решеткой, при этом происходит резкое понижение пластичности. Прочность увеличивается до концентрации цинка 45 %, а затем резко уменьшается, так как в структуре присутствует только β -фаза^{6,7}.

При литье латуни в воду получают образцы характерной формы, поскольку сдерживающее влияние стенок литейной формы, имеющееся при обычных процессах литья, отсутствует. Также во многих отливках наблюдаются поры и внутренние пустоты, в образовании которых могут участвовать внутриметаллические газы, такие как водород, кислород и азот [14–16]. При этом структура формируется в специфических условиях.

Основные положения теории кристаллизации состоят в следующем: расплавленный металл не имеет правильного кристаллического строения, однако в нем наблюдаются группы атомов с правильным расположением частиц, близким к строению кристаллизующегося вещества⁸. Переход металлического вещества из одной фазы в другую (превращение расплава в кристаллическое состояние) происходит за счет возникновения в жидкой фазе небольших объемов новой фазы – центров кристаллизации или зародышевых центров и их последующего роста. При температурах, близких к температуре плавления (кристаллизации), в жидком металле области с ближним порядком имеют такую же атомную упаковку, как кристалл, и могут стать зародышем твердой фазы [17, 18].

Процесс кристаллизации запускается при условии наличия определенной степени переохлаждения вещества. Она обуславливается разностью между теоретической и реальной температурой начала кристаллизации. Кристаллизация сплава происходит при понижении температуры и заканчивается при достижении температуры солидуса⁹.

При кристаллизации сплавов для образования зародыша необходимо наличие струк-

турных, концентрационных и энергетических флуктуаций, появление новых зародышей кристаллизации в единице объема расплава является случайным [19]. Их рост обеспечивается благодаря присоединению к ним свободных атомов из окружающего расплава. Способностью к росту обладают зародыши размером не менее критического, величина которого зависит от степени переохлаждения. Скорость образования новых центров кристаллизации и скорость роста кристаллов с сторону жидкого расплава зависят от степени переохлаждения¹⁰. Чем она выше, тем больше зародышей успевает образоваться в единицу времени в единице объема.

В результате кристаллизации металл в твердом состоянии состоит из множества кристаллитов неправильной формы, поэтому структура металла называется поликристаллической¹¹. Форма и размер зерна зависят от условий кристаллизации, в частности скорости и направления теплоотвода. Структура литого сплава зачастую имеет характерное дендритное строение. При наличии широкого температурного интервала кристаллизации может возникать дендритная ликвация.

Высокая скорость охлаждения вызывает значительное переохлаждение расплава, которое может достигать до нескольких сотен градусов. Такие условия качественно меняют процесс перехода расплава из жидкого состояния в твердое. Если кристаллизация сплава, структура которого представляет собой твердый раствор замещения, проходила в обычных условиях без переохлаждения, то по ее завершении этот сплав будет являться однородным твердым раствором с тем же составом, что и исходный расплав. Ускоренное охлаждение приводит к уменьшению скорости диффузии и росту вязкости, в результате чего строение формирующихся кристаллитов и их состав получаются иными. При определенных условиях кристаллизация расплава вообще

⁶ Плошкин В. В. Материаловедение: учебник. М.: Юрайт, 2019. 463 с.

⁷ Ullmann F., Gerhartz W. Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. Weinheim: VCH, 1996. 560 p.

⁸ Мальцев М. В., Барсукова Т. А., Борин Ф. А. Металлография цветных металлов и сплавов: учеб. пособие. М.: Металлургиздат, 1960. 372 с.

⁹ Новиков И. И. Металловедение, термообработка и рентгенография: учебник. М.: Изд-во МИСИС, 1994. 478 с.

¹⁰ Мальцев М. В., Барсукова Т. А., Борин Ф. А. Металлография цветных металлов и сплавов: учеб. пособие. М.: Металлургиздат, 1960. 372 с.

¹¹ Там же.



не происходит, а образуется аморфная металлическая масса, не имеющая кристаллического строения¹² [16]. Для получения аморфного металла нужна чрезвычайно высокая скорость охлаждения (около 1000 К/с). Такую скорость невозможно достичь при обычных условиях кристаллизации. Тонкие пленки аморфных металлов получают напылением атомов на охлажденную подложку или конденсацией паров металла. Также аморфные металлы возможно получить путем электрохимического осаждения и при облучении кристаллических металлов интенсивными потоками ионов или нейтронов [10, 14].

Чтобы установить, каким образом на получаемый результат влияют условия охлаждения при литье латуни в воду, был проведен металлографический анализ полученных образцов. Для этого было изучено строение двух отливок, одна из которых сформировалась при литье расплава в воду 0–5 °С, а другая – в воду 80–85 °С.

Из данных отливок были изготовлены шлифы, для этого одна сторона отливки была обработана грубым напильником до образования плоской поверхности диаметром 5–6 мм. Для снижения степени шероховатости полученная плоскость последовательно была отшлифована наждачной бумагой, начиная с крупнозернистой и заканчивая мелкозернистой, чтобы исключить риски и царапины. После шлифовки подготовленные поверхности образцов были отполированы и протравлены в течение 10 секунд в растворе соляной кис-

лоты и хлорного железа, смешанных в соотношении 2:1. Таким же образом для сравнения был изготовлен микрошлиф из исходного сплава – из пластины латуни марки Л63, которая и была использована во всех сериях экспериментов.

Наблюдение проводилось при 400-кратном увеличении с использованием поляризационного микроскопа OLIMPUS BX51.

Строение латуни марки Л63 в состоянии поставки представляет собой полиэдрические зерна с отдельными двойниками (рис. 4), что свидетельствует о том, что это однофазная латунь в отожженном состоянии. Структура отожженного металла отвечает диаграмме состояния, и при содержании цинка 37 % представляет собой твердый раствор замещения цинка в меди^{13,14}.

В том случае, если охлаждение сплава протекает медленно, в процессе кристаллизации сохраняются условия, в которых диффузия проходит до конца – как в жидкой, так и в твердой фазе. Составы этих фаз при любой температуре отвечают равновесной диаграмме состояния [20]. В начале кристаллизации из жидкого расплава формируются зерна α -фазы. При достижении температуры 903 °С происходит перитектическое превращение, которое протекает в условиях недостатка жидкой фазы, что приводит к формированию в сплаве структуры, содержащей кристаллы и α , и β -фазы. Выше температур 450–470 °С β -фаза является неупорядоченным раствором. Ниже этого температурного порога происходит



Рис. 4. Микроструктура латуни марки Л63, исходный образец (увеличение 400х)
Fig. 4. Microstructure of CW508L brass, initial sample (400x magnification)

¹² Куманин В. И., Лившиц В. Б. Материалы для ювелирных изделий: учебник. М.: Астрель – Кладезь, 2012. 223 с.

¹³ Новиков И. И. Металловедение, термообработка и рентгенография: учебник. М.: Изд-во МИСИС, 1994. 478 с.

¹⁴ McCreight T. The complete metalsmith: an illustrated handbook. Worcester: Davis Publications, 1991. 208 p.



упорядочение: в центре куба располагается атом цинка, а в его вершинах – атомы меди. Поскольку с понижением температуры увеличивается растворимость атомов цинка в меди, дальнейшее охлаждение сплава приводит к полному растворению фазы β в α -фазе. При комнатной температуре концентрация цинка в меди составляет 39 %. Таким образом, получается однофазный сплав со структурой α -твердый раствор [12, 19].

Если условия, при которых происходит кристаллизация, далеки от равновесных, как это было в экспериментах с охлаждающей жидкостью, то диффузионные процессы отстают от скорости кристаллизации. Это приводит к тому, что зерно формируется неравномерно: состав твердого раствора не успевает выравниваться по сечению зерна, возникает дендритная ликвация. Чем выше степень скорости охлаждения сплава, тем быстрее протекает процесс кристаллизации и тем существенней будет отличаться в результате его структура от равновесной. Особенно заметно это проявляется в сплавах, в которых имеет место перитектическое превращение, например в латунях.

Металлографический анализ образцов латуни марки Л63, полученных литьем в воду, показал, что структура сплава в литом состоянии похожа на структуру двухфазных латуней (рис. 5). В структуре образцов латуни, по-

лученных в ходе проведенных экспериментов, наблюдаются характерные светлые дендриты α -твердого раствора, окруженные темными выделениями β -фазы. Практика показывает, что в производственных условиях охлаждения даже в сплавах с 32 % цинка можно обнаружить присутствие кристаллов β -фазы [6, 9]. Тем вероятнее ее присутствие в сплаве с содержанием цинка 37 % при литье в воду. Объясняется это тем, что в условиях ускоренного охлаждения точки линии неравновесного солидуса, характеризующие состав α -твердого раствора, оказываются смещенными в область меньших концентраций цинка. Таким образом, раствор обогащен медью, то есть содержит меньше цинка. Доля же β -фазы при перитектическом превращении оказывается больше, чем при протекании равновесных процессов. В таком количестве при ускоренном охлаждении она не успевает раствориться в α -фазе полностью, оставаясь в структуре сплава.

Образование некоторого количества избыточной β -фазы в структуре сплава повышает его твердость и износостойкость, что может оказаться полезным при использовании такого сплава в ювелирном дизайне с точки зрения его эксплуатационных свойств¹⁵.

Примечательно, что микроструктура представленных для анализа образцов между собой также отличается (см. рис. 5). Размеры

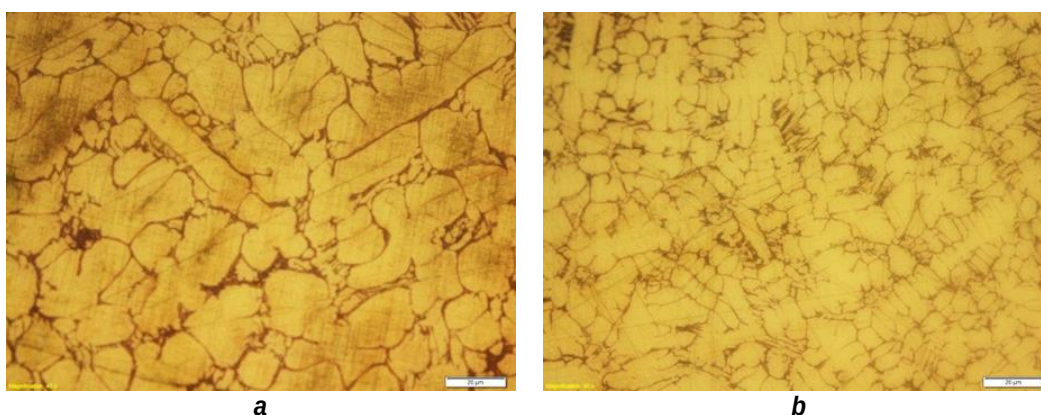


Рис. 5. Микроструктура образцов литой латуни (увеличение 400х):

a – образец, полученный литьем в воду температурой 80–85 °C;

b – образец, полученный литьем в воду температурой 0–5 °C

Fig. 5. Microstructure of the cast brass samples (400x magnification):

a – a sample obtained by water casting at 80–85 °C;

b – a sample obtained by water casting at 0–5 °C

¹⁵ Колачев Б. А., Ливанов В. А., Елагин В. И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учебник. М.: Металлургия, 1981. 416 с.



кристаллитов α -фазы в образце, отлитом в холодную воду, гораздо меньше размеров зерен отливки, полученной в горячей воде. Это значит, что использование охлаждающей жидкости более низкой температуры позволяет достичь большей степени переохлаждения и, следовательно, более высокой скорости зарождения центров кристаллизации в расплаве. Измельчение зерна также более благоприятно сказывается на механических свойствах сплава.

Заключение

Таким образом, в ходе экспериментального исследования литья латуни в охлаждающую жидкость и анализа его результатов были выявлены необходимые технологические параметры. В результате для достижения поставленной цели получения качественных имитаций самородков золота рекомендовано литье латуни в холодную воду температурой до 20–25 °С.

Список источников

1. Олвер Э. Искусство ювелирного дизайна: от идеи до воплощения / пер. с англ. Омск: Дедал-Пресс, 2008. 172 с.
2. Петровская Н. В. Золотые самородки. М.: Наука, 1993. 190 с.
3. Потемкин С. В. Благородный 79-й: очерк о золоте. М.: Недра, 1988. 176 с.
4. Зябнева О. А., Лившиц В. Б., Комиссарова Л. А. Изготовление художественных изделий из медных сплавов // Литейное производство. 2022. № 2. С. 32–34.
5. Сорокина В. Е., Лобацкая Р. М. Эксперименты по получению имитаций самородных металлов для использования в ювелирном дизайне // Дизайн. Теория и практика. 2014. № 15. С. 53–64.
6. McCreight T. Jewelry: fundamentals of metalsmithing. Rockport: Hand Books Press, 1997. 140 p.
7. Сорокина В. Е. О формировании отливок из сплава Cu-Zn в условиях ускоренного охлаждения // Литейное производство. 2017. № 9. С. 18–21.
8. Сорокина В. Е. Особенности кристаллизации латуни в охлаждающей жидкости // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 6. С. 128–134. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-6-128-134>.
9. Gray L. Zinc. Tarrytown: Marshall Cavendish, 2006. 425 p.
10. Ammen C. W. Metalcasting. New York: McGraw-Hill, 2000. 450 p.
11. Кусаинов Е. Н., Константинова М. В., Сорокина В. Е. Особенности формирования структуры сплавов в условиях ускоренного охлаждения // Перспективы

развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов: материалы VI Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2016. С. 34–36.

12. Хансен М., Андерко К. Структуры двойных сплавов / пер. с нем. В 2 т. М.: Metallurgizdat, 1962. 1488 с.
13. Лившиц В. Б. Технология литья художественных изделий. М.: ЛЕНАНД, 2014. 260 с.
14. Sorokina V. E. Technology of obtaining gold and silver imitation nuggets for jewelry design purposes // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 229. P. 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/229/1/012004>.
15. Чернега Д. Ф., Бялик О. М., Иванчук Д. Ф., Ремизов Г. А. Газы в цветных металлах и сплавах. М.: Металлургия, 1982. 176 с.
16. Sar-el H. Z. A new technique for the determination of gases in metals // Applications of Surface Science. 1978. Vol. 1. Iss. 3. P. 414–417. [https://doi.org/10.1016/0378-5963\(78\)90042-9](https://doi.org/10.1016/0378-5963(78)90042-9).
17. Scott D. A. Copper and bronze in art: corrosion, colorants, conservation. Los Angeles: Getty Publications, 2002. 533 p.
18. Кнорозов Б. В., Усова Л. Ф., Третьяков А. В., Китаев Я. А., Филькин В. М., Шевченко А. А. [и др.]. Технология металлов и материаловедение. М.: Металлургия, 1987. 800 с.
19. Коттрелл А. Х. Строение металлов и сплавов / пер. с англ. М.: Металлургиздат, 1961. 288 с.
20. Ефремов Б. Н. Латуни. От фазового строения к структуре и свойствам: монография. М.: ИНФРА-М, 2014. 312 с.

References

1. Olver E. The art of jewelry design: from idea to reality; 2002. 160 p. (Russ. ed.: *Iskusstvo yuvelirnogo dizaina. ot idei do voploshcheniya*. Omsk: Dedal-Press; 2008. 172 p.).
2. Petrovskaya N. V. *Gold nuggets*. Moscow: Nauka; 1993. 190 p. (In Russ.).
3. Potemkin S. V. *Noble 79th: an essay on gold*. Moscow: Nedra; 1988. 176 p. (In Russ.).
4. Zybneva O. A., Livshits V. B., Komissarova L. A. Manufacturing of artistic ware from copper alloys. *Liteinoe*

proizvodstvo = Foundry. Technologies and Equipment. 2022;2:32-34. (In Russ.).

5. Sorokina V. E., Lobatskaya R. M. Experiments on making simulants of native metals for jewelry design. *Dizain. Teoriya i praktika*. 2014;15:53-64. (In Russ.).
6. McCreight T. *Jewelry: fundamentals of metalsmithing*. Rockport: Hand Books Press; 1997. 140 p.
7. Sorokina V. E. On formation of Cu-Zn alloy castings under accelerated cooling. *Liteinoe proizvodstvo*.



2017;9:18-21. (In Russ.).

8. Sorokina V. E. Features of brass crystallization in cooling liquid. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(6):128-134. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-6-128-134>.

9. Gray L. *Zinc*. Tarrytown: Marshall Cavendish; 2006. 425 p.

10. Ammen C. W. *Metallurgy*. New York: McGraw-Hill; 2000. 450 p.

11. Kusainov E. N., Konstantinova M. V., Sorokina V. E. Alloy structure formation features under accelerated cooling. In: *Perspektivy razvitiya tekhnologii pererabotki uglevodorodnykh i mineral'nykh resursov: materialy VI Vse-ros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem = Development prospects of processing technologies for hydrocarbon and mineral resources: materials of the 6th All-Russian scientific and practical conference with international participation*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2016, p. 34–36. (In Russ.).

12. Hansen M. Der Aufbau der Zweistofflegierungen; 1936. 1100 s. (Russ. ed.: *Struktury dvoynykh splavov*. Moscow: Metallurgizdat; 1962. 1488 p.).

13. Livshits V. B. *Technology of ornamental castings*. Moscow: LENAND; 2014. 260 p. (In Russ.).

14. Sorokina V. E. Technology of obtaining gold and silver imitation nuggets for jewelry design purposes. *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science*. 2019;229:012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/229/1/012004>.

15. Chernega D. F., Byalik O. M., Ivanchuk D. F., Remizov G. A. *Gases in non-ferrous metals and alloys*. Moscow: Metallurgiya; 1982. 176 p. (In Russ.).

16. Sar-el H. Z. A new technique for the determination of gases in metals. *Applications of Surface Science*. 1978;1(3):414-417. [https://doi.org/10.1016/0378-5963\(78\)90042-9](https://doi.org/10.1016/0378-5963(78)90042-9).

17. Scott D. A. *Copper and bronze in art: corrosion, colorants, conservation*. Los Angeles: Getty Publications; 2002. 533 p.

18. Knorozov B. V., Usova L. F., Tret'yakov A. V., Kitaev Ya. A., Fil'kin V. M., Shevchenko A. A., et al. *Technology of metals and materials science*. Moscow: Metallurgiya; 1987. 800 p. (In Russ.).

19. Cottrell A. H. Theoretical structural metallurgy; 1961. 288 p. (Russ. ed.: *Stroenie metallov i splavov*. Moscow: Metallurgizdat; 1961. 288 p.).

20. Efremov B. N. *Brass. From phase organization to structure and properties*. Moscow: INFRA-M; 2014. 312 p. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors



Сорокина Вера Евгеньевна,

кандидат технических наук,
доцент кафедры ювелирного дизайна и технологий,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
vs_kina@mail.ru.

Vera E. Sorokina,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Jewelry Design and Technologies,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
vs_kina@mail.ru.



Константинова Марина Витальевна,

кандидат химических наук, доцент,
доцент кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий,
Институт авиамашиностроения и транспорта,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
mavikonst@mail.ru.

Marina V. Konstantinova,

Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Materials Science,
Welding and Additive Technologies,
Institute of Aircraft Engineering and Transport,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
mavikonst@mail.ru.

**Вклад авторов / Contribution of the authors**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 03.06.2022; одобрена после рецензирования 26.07.2022; принята к публикации 30.08.2022.

The article was submitted 03.06.2022; approved after reviewing 26.07.2022; accepted for publication 30.08.2022.